

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

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

PROYECTO TÉCNICO CON ENFOQUE INVESTIGATIVO:
**“ANÁLISIS EN LABORATORIO DE RESPUESTA DE ACCIÓN EN
ZONA 1 DE PROTECCIÓN DE IEDs DE DISTANCIA”**

AUTORES

JOEL ALCIVAR AGILA RIOS
JUAN FERNANDO PIÑA TAPIA

TUTOR:

ING. FLAVIO ALFREDO QUIZHPI PALOMEQUE, MSc.

CUENCA - ECUADOR

2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Joel Alcivar Agila Rios con documento de identificación N° 0705719029 y Juan Fernando Piña Tapia con documento de identificación N° 0107108060, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“ANÁLISIS EN LABORATORIO DE RESPUESTA DE ACCIÓN EN ZONA 1 DE PROTECCIÓN DE IEDS DE DISTANCIA”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de *Ingeniero Eléctrico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, noviembre de 2021



Joel Alcivar Agila R.
CI: 0705719029



Juan Fernando Piña T.
CI: 0107108060

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“ANÁLISIS EN LABORATORIO DE RESPUESTA DE ACCIÓN EN ZONA 1 DE PROTECCIÓN DE IEDS DE DISTANCIA”**, realizado por Joel Alcivar Agila Rios y Juan Fernando Piña Tapia, obteniendo el *Proyecto Técnico con enfoque investigativo*, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, noviembre de 2021



Ing. Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque
CI: 0102257482

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Joel Alcivar Agila Rios con documento de identificación N° 0705719029 y Juan Fernando Piña Tapia con documento de identificación N° 0107108060, autores del trabajo de titulación: **“ANÁLISIS EN LABORATORIO DE RESPUESTA DE ACCIÓN EN ZONA 1 DE PROTECCIÓN DE IEDS DE DISTANCIA”**, certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico con enfoque investigativo* es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, noviembre de 2021



Joel Alcivar Agila R.
CI: 0705719029



Juan Fernando Piña T.
CI: 0107108060

DEDICATORIA

*Primeramente a Dios por haberme dado la sabiduría y firmeza para llevar a cabo
este proyecto.*

*A mis padres Diana Cesibel Rios y Luis Alcivar Agila que son el motivo de mi
lucha constante, por la confianza, apoyo y esfuerzos depositados en mí en todo
momento.*

*A mi hermana y hermanos; Deyvi, Dennis, Alvaro y Kleiner por su confianza y
permanencia conmigo en toda circunstancia.*

Joel Alcivar Agila Rios

DEDICATORIA

A mis padres Juan Piña y María Tapia por apoyarme en todo momento y ser un ejemplo de vida para mi .
A mis hermanas Johanna y Gabriela ya que su guía y apoyo fueron fundamentales para cumplir mi sueño de estudiar y superarme.

Juan Fernando Piña Tapia

AGRADECIMIENTOS

A Dios por la salud y por ser mi guía a lo largo de la carrera.

A mis padres por haber inculcado en mí los valores que me han formado en lo que hoy soy.

A la Universidad Politécnica Salesiana por permitirme formar parte de esta gran familia, así como los docentes por haber compartido sus conocimientos en todo el recorrido de esta formación.

Al Ing. Flavio Quizhpi por ser el mentor para el desarrollo de este proyecto.

A mi compañero Juan Piña por el tiempo prestado para culminar este proyecto.

A todas las personas que me han apoyado de manera directa o indirecta en este proceso.

Joel Alcivar Agila Rios

Primeramente a Dios por la vida, la salud , por la familia y el haberme dado la oportunidad de superarme.

A mis padres por todo el apoyo brindado en cada etapa de este trayecto.

A mi hermana Johanna Piña y su esposo Carlos Estrella por no dejarme solo en este trayecto y darme su apoyo incondicional.

A la Universidad Politécnica Salesiana y todos sus docentes quienes con esmero y dedicación compartieron sus conocimientos y experiencias.

Al tutor del proyecto de titulación, Ing. Flavio Quizhpi por su guía y ayuda en este proyecto .

A mi compañero de proyecto Joel Agila por la dedicación prestada para culminar con éxito de este proyecto de titulación.

Juan Fernando Piña Tapia

RESUMEN

Este proyecto tiene como finalidad el análisis de la respuesta de acción de los IEDs de distancia siemens 7SA86 para la zona 1, y extendiéndose hasta la zona 2 de protección. Para tener una comparativa entre respuestas de acción se emplean la característica poligonal y Mho, para distintas condiciones tales como; el efecto infeed, efecto de acoplamiento mutuo de líneas paralelas y coordinación. Estas dos primeras condiciones pueden causar que la protección de distancia no distinga la falla, o que la detecte en otras zonas de protección. Es por esto que en este proyecto se estudian las respuestas de acción empleando técnicas que permitan compensar estos errores producidos en el relé. Para el relé de estudio se emplean las técnicas convencionales de ajuste y para las pruebas experimentales se dispone del uso del equipo de pruebas *CMC 356 OMICRON* para llevar a cabo el objetivo planteado. Para tener una base de referencia se toma en consideración la simulación de cada caso analizado con el software *DigSILENT*. Finalmente los resultados demuestran que los ajustes propuestos satisfacen lo previsto en simulación y en las pruebas de laboratorio.

Palabras clave: IEDs de distancia, efecto infeed, efecto de acoplamiento mutuo, coordinación.

ABSTRACT

The purpose of this project is to analyze the action response of siemens 7SA86 distance IEDs for zone 1 and extending to protection zone 2. In order to have a comparison between action responses, the polygonal characteristic and M_{ho} are used, for different conditions such as; the infeed effect, mutual coupling effect of parallel lines and coordination. These first two conditions can cause the distance protection not to distinguish the fault, or to detect it in other protection zones. This is why in this project the action responses are studied using techniques to compensate for these errors produced in the relay. For the relay under study, conventional setting techniques are used and for the experimental tests, the *CMC 356 OMICRON* test equipment is used to carry out the proposed objective. In order to have a reference base, the simulation of each case analyzed with the *DigSILENT* software is taken into consideration. Finally, the results show that the proposed settings satisfy the predictions of simulation and laboratory tests.

Keywords Distance IEDs, infeed effect, mutual coupling effect, coordination.

ÍNDICE

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Problema de Estudio	1
1.2 Antecedentes	1
1.3 Justificación	2
1.4 Objetivos	3
1.4.1 Objetivo General	3
1.4.2 Objetivos Específicos	3
1.5 Alcance del Trabajo	3
2 MARCO TEÓRICO	5
2.1 Perturbaciones y Fallas eléctricas	5
2.1.1 Fallas simétricas	7
2.1.2 Fallas asimétricas	7
2.2 Protecciones eléctricas	9
2.2.1 Características del sistema de protecciones eléctricas	9
2.2.2 Zonas de protección del SEP	11
2.2.2.1 Protección primaria	11
2.2.2.2 Protección de Respaldo	11
2.3 Equipos de protección	12
2.3.1 Relés de protección	12
2.3.2 Equipos asociados	13
2.4 Protección de distancia	13
2.4.1 Características de relés de distancia	14
2.4.1.1 Característica poligonal	14
2.4.1.2 Característica Mho	15

2.4.2	Impedancia vista por el relé de distancia	16
2.5	Criterios para el ajuste de relé de distancia	17
2.5.1	Alcances	18
2.5.2	Factor de compensación residual	20
2.5.3	Factor de compensación de línea paralela	22
2.5.4	Resistencia de falla	23
2.5.5	Efecto de fuentes intermedias “infeed”	24
2.6	Características básicas del IED siemens 7SA86	26
2.6.1	Entradas analógicas	26
2.6.2	Entradas y salidas binarias	27
2.6.3	Parámetros del equipo	27
3	RESPUESTAS DE ACCIÓN DEL RELÉ DE ESTUDIO	29
3.1	Introducción	29
3.2	Filosofía de protección	29
3.3	Estudio del efecto de fuentes intermedias	31
3.3.1	Ejemplo del efecto infeed	31
3.3.2	Respuestas de acción del relé para el ajuste propuesto	34
3.4	Estudio del efecto de acoplamiento de líneas paralelas	36
3.4.1	Ejemplo de acoplamiento mutuo de líneas paralelas con extremos comunes	38
3.4.1.1	Método de compensación mutua tradicional	39
3.4.1.2	Método particular optimizado de compensación mutua	40
3.4.2	Respuestas de acción del relé para el ajuste propuesto	41
3.5	Ajuste y coordinación con IEDs de distancia	43
3.5.1	Caso de estudio	43
3.5.2	Consideraciones del proceso de ajuste	44
3.5.3	Ajuste de protección para relevador 1 de la línea L45	45
3.5.3.1	Ajustes con característica poligonal	46
3.5.3.2	Ajustes con característica Mho	46
3.5.4	Ajuste de protección para relevador 2 de la línea L57	47
3.5.4.1	Ajustes con característica poligonal	47
3.5.4.2	Ajustes con característica Mho	48
3.6	Simulación del sistema de estudio	48
4	RESULTADOS EXPERIMENTALES EN LABORATORIO	53
4.1	Introducción	53
4.2	Creación del modelo de prueba en software DigiSi5	53
4.2.1	Primeros pasos	54
4.2.2	Parámetros del sistema de prueba	56

4.2.3	Parámetros de la línea	58
4.2.4	Páginas del display	61
4.2.5	Ajustes y asociación con equipos físicos	63
4.3	Ajuste de maleta de pruebas CMC 356 OMICROM	65
4.3.1	Generalidades de operación	66
4.3.2	Módulos para pruebas de relé de distancia	69
4.3.2.1	QuickCMC	69
4.3.2.2	Advance Distance	70
4.3.2.3	State Sequencer	72
4.4	Prueba de respuesta de acción para caso de efecto infeed	73
4.5	Prueba de respuesta de acción para caso de líneas paralelas	76
4.6	Prueba de respuesta de acción para coordinación	79
5	CASOS DE ESTUDIO PROPUESTOS	86
5.1	Caso de estudio 1	86
5.2	Caso de estudio 2	93
5.3	Caso de estudio 3	98
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	108
	BIBLIOGRAFÍA	112
	ANEXOS	113
	ANEXO 1: Parámetros de los sistemas de análisis	113
	ANEXO 2: Manejo del software DigSILENT para relé de distancia	119

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Falla Línea-Tierra	7
2.2	Falla Línea-Tierra	8
2.3	Falla Línea-Línea	8
2.4	Falla Doble línea-Tierra	8
2.5	Diagrama de una protección de distancia	13
2.6	Zonas de protección de relé de distancia	14
2.7	Plano $R-X$ de la característica poligonal	15
2.8	Plano $R-X$ de la característica Mho	16
2.9	Corrección de impedancia en diagrama R-X con característica Mho	20
2.10	Línea paralela que comparte mismos extremos	22
2.11	Línea paralela que comparte un solo extremo	22
2.12	Efecto de una resistencia de falla	24
2.13	Efecto infeed por incidencia de corriente de barra B	25
3.1	Sistema radial 4 barras con fuente intermedia	31
3.2	Alcance del relé R_A para una falla monofásica solida a tierra al 80% de la línea L_1 sin considerar la corriente intermedia.	34
3.3	Alcance del relé R_A para una falla monofásica solida a tierra al 50% de la línea L_2 sin considerar la corriente intermedia.	35
3.4	Alcance del relé R_A para una falla monofásica solida a tierra al 50% de la línea L_2 considerando la corriente intermedia.	35
3.5	Alcance del relé R_A para una falla monofásica al 80% de la línea L_1 con resistencia de falla de 18Ω considerando la corriente intermedia	36
3.6	Esquema de compensación de corriente de secuencia cero de líneas paralelas.	37
3.7	Sistema con barras colectoras comunes de 138 kV y carga de 150 MW	38

3.8	Impedancia vista por el relé R_{L_2} para una falla monofásica sólida a tierra al 80% de la línea L_2 con el método convencional	41
3.9	Impedancia vista por el relé R_{L_2} para una falla monofásica sólida a tierra al 80% de la línea 2 con el método optimizado	42
3.10	Impedancia vista por el relé R_{L_2} para falla monofásica al 80% de la línea L_2 con resistencia de falla de 8Ω - método optimizado	42
3.11	Caso de estudio IEEE 9 barras	44
3.12	Impedancia vista por el relé R_1 y R_2 para una falla trifásica al 80% de la línea L_{45}	49
3.13	Impedancia vista por el R_1 y R_2 para una falla trifásica al 50% de la línea L_{57}	50
3.14	Impedancia vista por el relé R_1 y R_2 para una falla trifásica al 80% de la línea L_{57}	50
3.15	Impedancias vistas por el relé R_1 y R_2 para una falla trifásica al 50% de la línea L_{78}	51
3.16	Impedancias vistas por el relé R_1 y R_2 para una falla monofásica al 50% de la línea L_{57} con resistencia de falla de 15Ω	51
4.1	Configuración de nuevo equipo	54
4.2	Información del dispositivo	55
4.3	Configuración del punto de medida	55
4.4	Configuración de la información	56
4.5	Ajustes del equipo	57
4.6	Datos de planta	57
4.7	Adición de la función de distancia	58
4.8	Ajuste general de la línea	59
4.9	Configuración monitorización	59
4.10	Configuración general de la función de distancia	60
4.11	Configuración de las zonas de protección	60
4.12	Insertar zona tipo Mho	61
4.13	Configuración de la zona tipo Mho	61
4.14	Elementos de biblioteca	62
4.15	Adición de señal del interruptor	62
4.16	Adición de valores de servicio	63
4.17	Configuración del puerto J	63
4.18	Carga de la configuración al equipo	64
4.19	Exportar archivo RIO	65
4.20	Ventana principal del <i>Test Universe</i>	66
4.21	Confirmación de conexión de maleta	66

4.22	Menú inicial de módulos	67
4.23	Importación de archivp RIO	67
4.24	Configuración de las salidas analógicas	68
4.25	Selección de puertos de salidas analógicas	68
4.26	Módulo <i>QuickCMC</i>	70
4.27	Módulo <i>Advanced Distance</i>	71
4.28	Ajustes del modo de prueba	72
4.29	Módulo <i>State Sequencer</i>	73
4.30	Respuesta poligonal al efecto infeed con Advance Distance	74
4.31	Respuesta Mho al efecto infeed con Advance Distance	75
4.32	Respuesta al efecto de fuente intermedia del IED 7SA86 - Falla monofásica	76
4.33	Respuesta poligonal al efecto de acople mutuo con Advance Distance	77
4.34	Respuesta Mho al efecto de acople mutuo con Advance Distance	77
4.35	Respuesta al efecto de acoplamiento mutuo del IED 7SA86 - Falla monofásica	78
4.36	Respuesta poligonal para fallas monofásicas con Advance Distance	79
4.37	Respuesta poligonal para fallas bifásicas con Advance Distance	80
4.38	Respuesta poligonal para fallas trifásicas con Advance Distance	81
4.39	Respuesta Mho para fallas monofásicas con Advance Distance	82
4.40	Respuesta Mho para fallas bifásicas con Advance Distance	83
4.41	Respuesta Mho para fallas trifásicas con Advance Distance	84
4.42	Respuesta a la coordinación del IED 7SA86 - Falla monofásica	85
5.1	Diagrama caso de estudio 1	88
5.2	Respuesta para falla monofásica al 20% de la línea L_{69}	89
5.3	Prueba de inyección de corriente con módulo QuickCMC	90
5.4	Diagrama de conexión para caso de estudio 1	91
5.5	Respuesta Poligonal al caso de estudio 1 con Advance Distance	92
5.6	Respuesta Mho al caso de estudio 1 con Advance Distance	92
5.7	Diagrama caso estudio 2	94
5.8	Respuesta para falla monofásica sólida a tierra al 80% de la línea L_2	95
5.9	Diagrama de conexión para caso de estudio 2	96
5.10	Respuesta Poligonal al caso de estudio 1 con Advance Distance	97
5.11	Respuesta Mho al caso de estudio 1 con Advance Distance	97
5.12	Diagrama caso de estudio 3	99

5.13	Impedancia vista por el relé R_A y R_B para una falla monofásica y trifásica al 80% de la línea L1	100
5.14	Impedancia vista por el relé R_A y R_B para una falla monofásica y trifásica al 50% de la línea L2	101
5.15	Impedancia vista por el relé R_A y R_B para una falla monofásica y trifásica al 80% de la línea L2	101
5.16	Impedancia vista por el relé R_A y R_B para una falla monofásica y trifásica al 50% de la línea L3	101
5.17	Diagrama fasorial	102
5.18	Configuración general del dispositivo	103
5.19	State Sequencer	103
5.20	Diagrama de conexión para caso de estudio 3	104
5.21	Respuesta poligonal al caso de estudio 3 para fallas monofásicas con Advance Distance	105
5.22	Respuesta poligonal al caso de estudio 3 para fallas trifásicas con Advance Distance	106
5.23	Geometría de torre de transmisión 138 kV	117
5.24	Geometría de torre de transmisión 230 kV	118
5.25	Creación de transformador de corriente - Paso 1	119
5.26	- Paso 2	120
5.27	Creación de transformador de potencial	120
5.28	Importación del relé de distancia - Paso 1	121
5.29	Importación del relé de distancia - Paso 2	121
5.30	Configuración de relé de distancia - Paso 1	122
5.31	Configuración de relé de distancia - Paso 2	122
5.32	Configuración de relé de distancia - Paso 3	123
5.33	Configuración de relé de distancia - Paso 4	123
5.34	Creación de diagramas R-X - Paso 1	124
5.35	Creación de diagramas R-X - Paso 2	125
5.36	Creación de diagramas R-X - Paso 3	125
5.37	Acoplamiento de líneas paralelas - Paso 1	126
5.38	Acoplamiento de líneas paralelas - Paso 2	126
5.39	Acoplamiento de líneas paralelas - Paso 2	127
5.40	Acoplamiento de líneas paralelas - Paso 4	127
5.41	Acoplamiento de líneas paralelas - Paso 5	128
5.42	Acoplamiento de líneas paralelas - Paso 6	128
5.43	Acoplamiento de líneas paralelas - Paso 7	129

Índice de tablas

2.1	Impedancias vistas por unidades de fase y fase tierra.	17
2.2	Alcances en zona 1 con característica poligonal.	18
2.3	Alcances en zona 2 con característica poligonal.	19
2.4	Alcances en zona 3 con característica poligonal.	19
2.5	Alcances en zona 4 con característica poligonal.	19
2.6	Alcances con característica Mho.	19
2.7	Rangos operativos de entradas y salidas analógicas de protección de distancia 7SA86	27
2.8	Rangos operativos de entradas y salidas binarias de protección de distancia 7SA86	27
2.9	Rangos de ajuste de protección de distancia 7SA86	28
3.1	Ajustes propuestos para relevador R_A con efecto infeed	34
3.2	Ajustes propuestos para relevador R_{L2} con acoplamiento mutuo	40
3.3	Parámetros de líneas para ajuste y coordinación	45
3.4	Ajustes propuestos poligonales y Mho para coordinación de protecciones	49
3.5	Impedancias de falla vistas con la característica poligonal	52
3.6	Impedancias de falla vistas con la característica Mho	52
4.1	Informe de pruebas CMC para caso de efecto infeed - relé R_A poligonal	74
4.2	Informe de pruebas CMC para caso de efecto infeed - relé R_A Mho	75
4.3	Informe de pruebas CMC para caso de acople mutuo - relé R_{L2} poligonal	77
4.4	Informe de pruebas CMC para caso de acople mutuo - relé R_{L2} Mho	78
4.5	Informe de pruebas monofásicas CMC para caso de coordinación-relé 1 poligonal	80
4.6	Informe de pruebas monofásicas CMC para caso de coordinación-relé 2 poligonal	80
4.7	Informe de pruebas bifásicas CMC para caso de coordinación-relé 1 poligonal	80
4.8	Informe de pruebas bifásicas CMC para caso de coordinación-relé 2 poligonal	81

4.9	Informe de pruebas trifásicas CMC para caso de coordinación-relé 1 poligonal	81
4.10	Informe de pruebas trifásicas CMC para caso de coordinación-relé 2 poligonal	81
4.11	Informe de pruebas monofásicas CMC para caso de coordinación- relé 1 Mho	82
4.12	Informe de pruebas monofásicas CMC para caso de coordinación- relé 2 Mho	82
4.13	Informe de pruebas bifásicas CMC para caso de coordinación- relé 1 Mho	83
4.14	Informe de pruebas bifásicas CMC para caso de coordinación- relé 2 Mho	83
4.15	Informe de pruebas trifásicas CMC para caso de coordinación- relé 1 Mho	84
4.16	Informe de pruebas trifásicas CMC para caso de coordinación- relé 2 Mho	84
5.1	Parámetros de líneas L_{89} y L_{69}	88
5.2	Ajustes propuestos para caso de estudio 1	89
5.3	Informe de pruebas CMC para caso de estudio 1-relé Poligonal	92
5.4	Informe de pruebas CMC para caso de estudio 1-relé Mho	93
5.5	Ajustes propuestos para relevador A del estudio de efecto infeed en zona 2	95
5.6	Informe de pruebas CMC para caso de estudio 2-relé Polgonal	97
5.7	Informe de pruebas CMC para caso de estudio 2-relé Mho	98
5.8	Ajustes propuestos para caso de estudio 3	100
5.9	Informe de pruebas monofásicas CMC para caso de estudio 3-relé A	105
5.10	Informe de pruebas monofásicas CMC para caso de estudio 3-relé B	106
5.11	Informe de pruebas trifásicas CMC para caso de estudio 3-relé A	106
5.12	Informe de pruebas trifásicas CMC para caso de estudio 3-relé B	107
5.13	Datos de barras-Modelo 4 barras	113
5.14	Datos de red-Modelo 4 barras	113
5.15	Datos de generador-Modelo 4 barras	113
5.16	Datos de líneas-Modelo 4 barras	114
5.17	Datos de cargas-Modelo 4 barras	114
5.18	Datos de barras-Modelo 2 barras	114
5.19	Datos de red-Modelo 2 barras	114
5.20	Datos de líneas-Modelo 2 barras	115
5.21	Datos de cargas-Modelo 2 barras	115

5.22	Datos de barras-Modelo 9 barras IEEE	115
5.23	Datos de generadores-Modelo 9 barras IEEE	115
5.24	Datos de generadores-Modelo 9 barras IEEE	116
5.25	Datos de transformadores-Modelo 9 barras IEEE	116
5.26	Datos de líneas-Modelo 9 barras IEEE	116
5.27	Datos de cargas-Modelo 9 barras IEEE	116
5.28	Geometría y parámetros eléctricos de L/T - 138 kV doble circuito . .	117
5.29	Geometría y parámetros eléctricos de L/T - 230 kV doble circuito . .	118

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Problema de Estudio

El estudio de protecciones es un importante factor dentro de los sistemas eléctricos de potencia, es por esto que en la Universidad Politécnica Salesiana (UPS) con el fin de mejorar los conocimientos de los estudiantes, en condiciones prácticas, se encuentra actualmente implementando un laboratorio de protecciones eléctricas, dónde los principales equipos son relés de protección inteligentes o bien llamados IEDs. Los relés de distancia se distinguen por operar con zonas de protección y para esto deben cumplir con los tiempos de respuesta en cada zona. Por lo tanto, es de importancia demostrar las respuestas de acción ante eventos de falla de estos relés, mediante el desarrollo metodológico que permita validar su estudio y sus respuestas reales de acción. Es oportuno para su análisis tomar modelos de estudio que permitan verificar sus respuestas ante condiciones que interrumpen su correcto desempeño, en consideración a los efectos más comunes dentro de un sistema de transmisión real. El tipo de IED de distancia disponible para su estudio en el laboratorio de la UPS es el modelo 7SA86.

1.2 Antecedentes

Los relés de protección han tenido grandes avances en los últimos tiempos, y con la llegada de los relés digitales se consigue mayor precisión, lo cual permite tener un

mejor funcionamiento de los equipos de protección y una mayor continuidad en el servicio eléctrico.

Para fines académicos la universidad contiene un banco con estos equipos de protección para sus distintas pruebas, además de una maleta para la inyección de corrientes y voltajes marca OMICRON. Hasta la fecha se han desarrollado trabajos con la integración de estos equipos que han servido de aporte para nuevas investigaciones. Sumando un aporte a estos trabajos se requiere de una metodología de estudio práctica que permita comprobar las respuestas de acción de los IEDs, ya que es común que para estos equipos, se realicen pruebas experimentales antes de ser colocados en campo.

Es importante hacer pruebas a los IEDs de protección antes ser puestos en servicio en una subestación eléctrica, por esto en [1] verifica el funcionamiento de los relés de protección con la maleta pruebas y posteriormente se pone en servicio el equipo de protección en una línea de transmisión de 69kV.

Las pruebas de inyección de corriente-voltaje a los IEDs de protección pueden realizarse con el equipo OMICRON CMC 356 y su configuración con el software Digi5 de Siemens, de esta forma en [2], [3] se determina que los tiempos de disparo obtenidos son los esperados en comparativa con los resultados de la simulación en DigSILENT. Además, se presenta un manual para la utilización de las herramientas y equipos de prueba.

Los tiempos de respuesta de acción son los que determinan una adecuada coordinación y en una protección de distancia se prioriza la operación con tiempos para el relé principal y respaldo. Tener en cuenta los criterios y características de operación de este tipo de relé permite ajustar y coordinar adecuadamente, tanto para condiciones que atenten la operabilidad como para contingencias extremas [4], [5].

1.3 Justificación

Para garantizar la fiabilidad y sensibilidad de un sistema de protecciones es de vital importancia conocer a más del equipo que se empleará, también comprender la respuesta ante eventos de dicho equipo antes de ser ubicado dentro del sistema a proteger.

Los relés de distancia son empleados generalmente para la protección de líneas de transmisión, y se consideran distintas características de funcionamiento como lo es el tipo Mho, poligonal, entre otras. Cada uno de estos equipos son configurados según las ventajas que presentan en la zona de protección. Atendiendo esto, y con

la atención fija hacia los laboratorios de protecciones de la UPS, se ve la necesidad de realizar el estudio de las respuestas de acción para casos específicos en la zona 1 de protección, e incluso extendiéndose hacia una zona 2 para analizar su respuesta cuando la estimación de la falla se encuentra por fuera de los límites de la primera zona.

Se pretende colaborar con la Universidad Politécnica Salesiana particularmente en el laboratorio de protecciones a través de un análisis de respuesta de acción de los IEDs de distancia de los bancos de pruebas. Este estudio se enfoca en realizar las correspondientes pruebas con los relés de distancia con el fin de validar la metodología empleada considerando especificaciones del relé siemens 7SA86 en las características poligonal y Mho.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Analizar en laboratorio la respuesta de acción en la zona 1 de protección del IED de distancia siemens 7SA86 con la característica poligonal y Mho.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Recopilar información del relé de estudio para estructurar la metodología a aplicar.
- Ejecutar los ensayos para la validación de los tiempos de respuestas de acción.
- Proponer casos de estudio en base al área de acción propuesta permitiendo la estandarización de prácticas en laboratorio de protecciones.

1.5 Alcance del Trabajo

Con el desarrollo del presente proyecto se verificará que para las distintas condiciones planteadas, el IED de distancia cumple con sus respuestas de acción. A consecuencia

de los resultados obtenidos se desarrollará una guía práctica donde se indiquen los pasos para los ajustes y pruebas del relé de estudio propuesto.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Perturbaciones y Fallas eléctricas

Las perturbaciones son las imperfecciones que se presentan en la forma de onda fundamental de corriente-voltaje y se pueden ocasionar por la influencia de la propia red o externas de esta, normalmente se considera que son de corta duración lo que no produce efectos graves.

La importancia de su estudio reside de identificar cuan vulnerable es el sistema, para esto se requiere conocer su origen y tipo de falla, así como los parámetros eléctricos en estado normal de operación y llevarlos a condiciones desfavorables que permitan determinar los elementos de corte idóneos para cada caso.

Oscilaciones

La distorsión en la forma de onda de voltaje o frecuencia es causada por la carga que atraviesa por todas las etapas desde la producción hasta consumo, esta carga variante origina reactivos que afectan la estabilidad del sistema [6].

Desbalances

Se produce cuando las fases no están equilibradas con respecto a las cargas, problemas como estos se pueden originar al por el descuido en estudios técnicos o bien por factores externos como aislamiento involuntario de una o más fases. Cuando se ve desbalanceado el sistema las corrientes de fases tienen magnitudes y ángulos diferentes esto hace que se origine la aparición de las componentes se

secuencia inversa y homopolar las cuales resultan en pérdidas de energía [6].

Sobrecarga

Es el exceso de corriente que fluye por un equipo, instalación, conductor, carga, etc y que está por encima de sus valores nominales. Una causante de esto es los cortocircuitos que se originen a lo largo de las líneas; a consecuencia, el calentamiento de los conductores o del cuerpo con el que está en contacto.

Sobre corrientes

Es un evento que se produce en condiciones anormales y que genera corrientes por encima de la corriente normal para la que está diseñada un componente eléctrico, ocurren además caídas de voltaje considerables, en general efectos térmicos y dinámicos. Los fusibles y relés limitadores de corriente tienen la característica de soportar sobreintensidades para la protección del sistema eléctrico.

Sobrevoltajes

Son condiciones de elevados voltajes (kV) en la red de duración en microsegundos. Su causa se puede dar por maniobras, descargas atmosféricas, contacto entre conductores, conductor-tierra o por switcheo de equipos. Como consecuencia los equipos se deterioran inclusive hay probabilidad de incendio.

Cortocircuitos

Son producidos por la sobreintensidad que deteriora el aislante y da paso al contacto directo entre conductores. Estas corrientes circulan por los equipos, los mismos que sufren deterioros debido a efectos térmicos y dinámicos [7].

Fallas

Las fallas eléctricas son eventos aleatorios entre fenómenos eléctricos, mecánicos, internos o externos del SEP que ocasionan un incorrecto funcionamiento de este. La ocurrencia de fallas origina sobreintensidades, en consecuencia, los equipos se ven afectados en su nivel de aislamiento el cual disminuye haciéndolo proclive a la ocurrencia de cortocircuitos.

Las redes eléctricas se encuentran expuestas a diferentes tipos de fallas que pueden causar la apertura del circuito y dejar sin servicio de energía eléctrica a un sector de usuarios. La falla producida entre una o varias fases y tierra se las conoce como fallas en paralelo, en estos casos las fases se presentan en cortocircuito, la caída de voltaje y la elevación de la corriente son diferentes en cada punto del sistema lo cual causa desbalance y daño en los equipos del sistema [8].

Las fallas producidas por causas ajenas al sistema ya sea de manera natural o por envejecimiento de elementos de la red que provoquen la ruptura de conductores se conocen como fallas en serie, las fallas más comunes de este tipo son provocadas por descargas atmosféricas las cuales producen un cortocircuito sin implicar la tierra. Estas fallas se dividen en fallas simétricas y fallas asimétricas [8].

2.1.1 Fallas simétricas

Este tipo de falla se presenta cuando las tres fases se unen en algún punto generando un cortocircuito o una falla trifásica que da como resultado un aumento de la corriente que produce un desbalance en el sistema [8].

Falla trifásica: Este tipo de falla se produce cuando las tres fases hacen contacto entre sí.

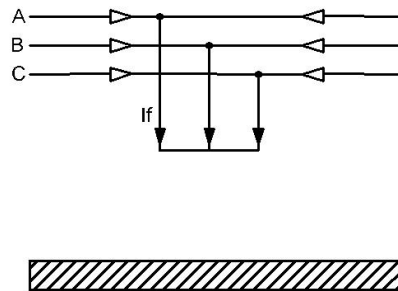


Figura 2.1: Falla Línea-Tierra

2.1.2 Fallas asimétricas

Este tipo de falla se presenta al involucrar las fases en cortocircuito con tierra y entre fases, lo cual provoca un desbalance de corriente y voltaje en el sistema. Estas fallas pueden darse de diferentes maneras; falla de línea a tierra, línea a línea o doble línea a tierra. En estos casos la corriente de falla de doble línea o de línea a tierra puede o no tener impedancia en el momento de la falla. Este tipo de fallas se puede producir por la rotura de cualquier conductor o por la acción de un dispositivo de protección que puede no abrir de manera simultánea todas las fases [8].

Falla monofásica a tierra: Este tipo de falla se da cuando una de las fases hace

contacto con tierra.

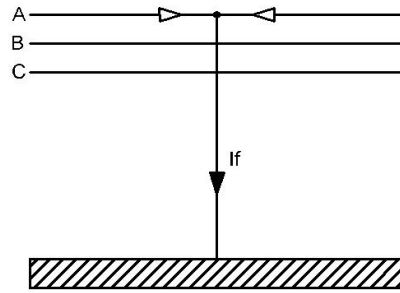


Figura 2.2: Falla Línea-Tierra

Falla bifásica línea - línea: Este tipo de falla se produce cuando dos fases hacen cortocircuito.

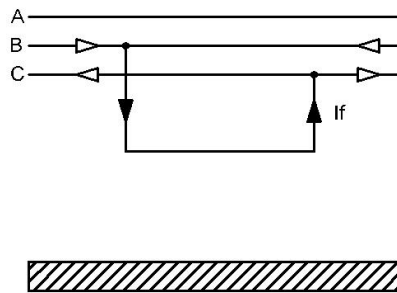


Figura 2.3: Falla Línea-Línea

Falla bifásica a tierra: Esta falla se produce cuando dos de las fases hacen contacto con tierra.

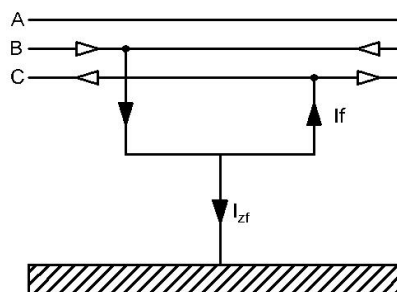


Figura 2.4: Falla Doble línea-Tierra

2.2 Protecciones eléctricas

Los sistemas de protecciones eléctricos son el sistema conjunto de elementos diseñados para la protección de sistemas eléctricos, los cuales se enfrentan a posibles disturbios a lo largo de la etapa Generación-Demanda. Las protecciones garantizan la seguridad del SEP manteniendo aislado el sector afectado por parte de una falla, y estos equipos pueden ser fusibles, relés, disyuntores u otros dispositivos destinados a esta función.

Cuando el sistema se enfrenta a condiciones anormales de operación es cuando las protecciones deben actuar, para esto, es necesario la disposición de equipos de protección en áreas claves según se considere y según la funcionalidad de los equipos de corte ante los nuevos parámetros al que se ven expuestos. Las protecciones eléctricas deben cumplir con características que permitan mantener la operabilidad continua del sistema en todo momento al despejar las fallas en el menor tiempo posible.

2.2.1 Características del sistema de protecciones eléctricas

Es indispensable el uso de equipos que garanticen la continuidad de la energía ante posibles fallos que intervengan en la red eléctrica, para esto es necesario considerar algunas características que debe tener el sistema de protecciones, estas se definen a continuación.

Confiability

Se refiere a la seguridad de que funcione el equipo de protección o el sistema de protecciones, aun cuando se encuentre expuesto a casos adversos. La operación se debe realizar cuando sea requerido al detectar fallas y en ausencia de estas no debe actuar de forma innecesaria, es decir que no ocasione disparos erróneos [6]. En estos dos escenarios se torna trabajoso garantizar una seguridad al ajustar los equipos y que estos no respondan erróneamente es decir cuando no ha sido previsto que actúen.

Sensibilidad

Se refiere a que el sistema de protecciones funcione al valor mínimo al que ha sido ajustado para su disparo de despeje. El equipo de protección debe distinguir entre las perturbaciones y las que no son, como; voltajes variantes, fallas de altas impedancias,

entre otros.

Velocidad

Cuando la falla es detectada operan las protecciones, estas generan arco eléctrico en su operación, son causantes de daños en aisladores y equipos. La duración de este arco eléctrico debe ser la menor posible por lo que la velocidad juega un papel importante. En el sistema de protecciones es deseable que se aisle la parte afectada en tiempos teóricamente instantáneos, considerando que velocidades muy elevadas podrían afectar la coordinación y el disparo innecesario, por otro lado, al no ser lo suficiente veloz al aislar la falla puede causar un efecto desestabilizador debió a tiempos lentos [9].

Selectividad

Las protecciones deben actuar con las características de funcionamiento de tal forma que la parte afectada sea la única que quede aislada manteniendo un mínimo sector sin energía. Es decir, el equipo debe detectar en que zona ocurrió la falla y actuar en esa solamente, lo contrario a esta acción conllevaría a desconexiones innecesarias de sectores no afectados. Para esto es necesario una adecuada coordinación de protecciones donde operen las protecciones principales separando la parte afectada, y solo si la falla no es eliminada se de la intervención de las protecciones de respaldo [6], [9].

Simplicidad

El diseño del sistema de protecciones debe ser lo mas simple posible sin dejar a un lado el cubrimiento óptimo de todo el sistema a proteger. Al evitar una compleja red de protección se evita también posibles fallos auto producentes, por lo que se debe evaluar e instalar solamente las protecciones que son estrictamente imprescindibles.

Costos

Un sistema de protecciones eficiente no es necesariamente colocar una gran cantidad de protecciones o a su vez equipos con elevados costes que bien pueden ser reemplazos por equipos que realizan mismas funciones con igual o mejor durabilidad. La instalación debe ser solo en lugares precisos considerando menores costes en equipos, pero con excelentes índices de confiabilidad.

2.2.2 Zonas de protección del SEP

Al hablar de zonas de protección entiéndase como el área dispuesta máxima de cobertura de la protección, estas zonas se las dispone para los elementos primordiales de un SEP, como el generador, transformador, barras y líneas de transmisión. El SEP al estar expuesto a posibles fallas, se deben colocar selectivamente las protecciones en lugares convenientes para su operación, a mas de esto tener en cuenta la posible ocurrencia de falla del equipo de corte, es así que para afianzar el esquema se deben traslapar las zonas de protección de forma que eviten que el daño se extienda, estas son conocidas como protecciones de respaldo.

2.2.2.1 Protección primaria

Este tipo de protección es la primera en actuar ante un evento de falla, su accionamiento o tiempo de respuesta es inmediato (0ms) y protege la integridad de elementos fundamentales dentro del área que se programe su operación.

De ser empleados relés de distancia para una coordinación se debe evitar el traslape de zonas que tengan iguales tiempos de disparo, para evitar que ante cualquier falla se disparen las protecciones simultáneamente, evitando la operación exclusiva de la protección principal únicamente. Con una buena coordinación se garantiza el disparo principal antes que cualquiera de las demás protecciones de respaldo [6].

2.2.2.2 Protección de Respaldo

Esta protección interviene cuando la protección principal no ha respondido ante un evento defectuoso, siendo así la siguiente línea de protección del sistema. Es así que para la protección de respaldo se requiere tiempos más lentos de depeje para evitar errores selectivos [6], [9].

El sistema de protecciones se ve afectado por probabilidades de no función de relés. Conociendo la diminuta probabilidad, pero con efectos riesgosos es propicio estudiar un adecuado ajuste con protecciones de respaldo.

2.3 Equipos de protección

2.3.1 Relés de protección

Dentro de un sistema eléctrico de potencia; el relé tiene la función de detectar fallas dentro del sistema, mantener la continuidad del servicio, y prevenir daños en los equipos tanto como sea posible. Al detectar una falla dentro del sistema, el relé por medio de sus contactos puede actuar de diferentes maneras según sea el caso, ya sea abriendo un disyuntor o activando una alarma [6].

Los tipos más comunes de relés de protección son:

Un **relé de sobrecorriente** actúa cuando la corriente medida por un transformador de corriente TC supera el valor umbral seteado. El tiempo de corte puede ser instantáneo o con tiempo de retardo. Un relé con tiempo instantáneo tiene una actuación inmediata, mientras que con tiempo de retardo el relé actúa dado un tiempo fijo. El relé con tiempo de retardo inverso actúa según sea la magnitud de corriente; a mayor magnitud menor tiempo [6].

El **relé de sobrevoltaje** tiene un funcionamiento similar al relé de corriente con la diferencia que el valor medido en la red es el voltaje.

Otro tipo, es el **relé diferencial**, su funcionamiento es por medio de la continua supervisión de magnitudes o ángulos de fases. La suma del flujo de corrientes medidos por una unidad de sobrecorriente y una unidad direccional, es igual a la suma de las corrientes que fluyen en condiciones normales. Su operación se da cuando la diferencia entre las corrientes que regula exceden el valor predeterminado [9], [7].

El principio básico del **relé de distancia**, es mediante la estimación de la impedancia a través la medición de voltajes y corrientes; esto por medio del transformador de potencial TP y TC, para así determinar la ubicación de la falla (Figura 2.5). La impedancia medida en condiciones normales, es muy alta, ya que los valores de corriente son relativamente bajos. Sin embargo, cuando se produce una falla, la impedancia medida es muy pequeña debido a la caída de voltaje y elevación de corriente. Es posible conocer la ubicación de la falla ya que la impedancia medida es proporcional con la distancia del punto de falla [10], [6].

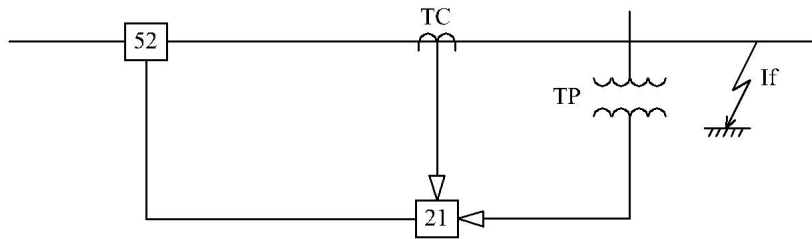


Figura 2.5: Diagrama de una protección de distancia

2.3.2 Equipos asociados

Principalmente los equipos que complementan la funcionalidad de los equipos de protección son los equipos de medida, responsables de la medición de los parámetros de voltaje y corrientes que sirven como relación para la estimación de la impedancia, variable que es de importancia dentro de este contexto.

Transformador de Corriente

Su objetivo es reducir la corriente del primario a valores menores de corriente en el lado secundario para así poder estimar el valor de la corriente que circula por las líneas de transmisión mediante la relación de transformación del transformador de corriente. Para una protección de distancia la elección del transformador de corriente se basa en la corriente nominal de la línea a proteger [5].

Transformador de potencial

El objetivo principal de este tipo de transformador en las líneas de transmisión es reducir el voltaje de la red de medio o alto voltaje, de esta manera en el lado secundario se pueden conectar los equipos de medida y protección, el voltaje de la red es estimado mediante la relación de transformación del transformador de potencial [5].

2.4 Protección de distancia

Una protección de distancia es generalmente usada para la protección de líneas de transmisión, debido a ventajas en cuanto a su velocidad y confiabilidad. Al trabajar con líneas largas no sería idóneo solo instalar relés de sobrecorriente, debido

a que sería riesgoso su ajuste y coordinación, precisamente a los tiempos de retardo demasiado elevados para su respaldo. Esta es la diferencia con un relé de distancia, que opera únicamente en función de impedancia según los voltajes y corrientes de falla medidos dentro de su zona. Esto permite diferenciar fallas en las distintas zonas, es así, lo que conocemos como selectividad [7].

Los diseños convencionales de relés de distancia contienen una clasificación de tres zonas (actualmente hasta 5 zonas), donde la zona 1 es de acción inmediata y las demás zonas operan con tiempos de retardo. Un ejemplo del diagrama de tiempo-distancia de un relé con 3 zonas de protección se puede apreciar en la Figura 2.6.

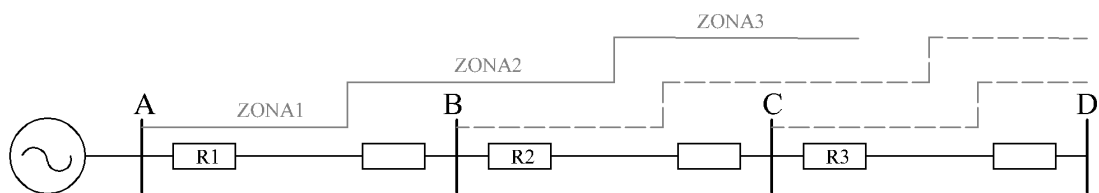


Figura 2.6: Zonas de protección de relé de distancia

2.4.1 Características de relés de distancia

La búsqueda de un sistema de protecciones de mayor fiabilidad se ha llevado a disponer de características de protección con mayor rendimiento. El ajuste de estas características se emplea conforme se presente la mejor cobertura ante los equipos a proteger. Estas características se presentan a continuación considerando las dos más comunes, ya que existen diversas que nacen de la combinación de este par, entre ellas; las características offset Mho, lenticular, entre otras [7].

2.4.1.1 Característica poligonal

Este tipo de característica es la más empleada actualmente, debido a que el ajuste se da por seguimiento independiente direccional (línea inferior), de reactancia “ X ” (línea superior) y resistencia “ R ” (lado izquierdo y derecho), lo que proporciona un alcance extendido para cubrir resistencias de falla. La operación de esta protección se da cuando las impedancias de falla se posicionan en el área poligonal; o cuadrilateral

como también es conocida [7], [9].

Al ser la característica más usada es importante su estudio para el ajuste en el sistema de protección, siempre considerando que se habla de zonas de protección lo que conlleva a tiempos de operación. En la Figura 2.7 se observa el diagrama R - X que describe su forma de operación en las 3 zonas.

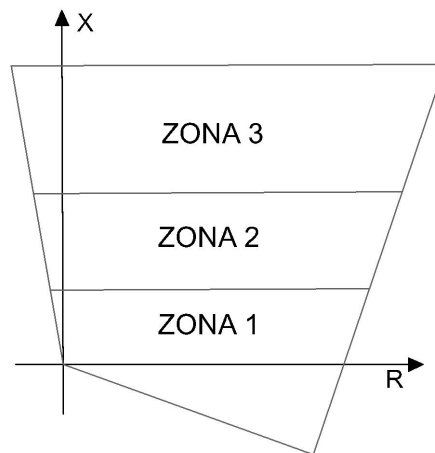


Figura 2.7: Plano R - X de la característica poligonal

Ventajas

- Presenta mayor cobertura a resistencias de falla en comparación a la característica Mho.
- Disparo de alta velocidad en presencia de fallas resistivas sin canal piloto.
- Presenta inmunidad a la conmutación de carga en línea.

2.4.1.2 Característica Mho

En la Figura 2.8 se puede ver el plano R - X que describe la forma de cobertura de esta característica, con un círculo que pasa por el origen. La operación se da cuando la impedancia se ve forzada dentro de estos límites. También se conoce como Mho desplazado cuando su origen se encuentra desplazado. La característica Mho describe un diámetro y un ángulo que se puede representar como el de la línea de transmisión.

Es del tipo direccional y su ventaja principal, es la variación que presenta el ángulo del alcance de impedancia que se percibe, este ángulo representa el de la línea de transmisión, lo que lo hace ideal ante las perturbaciones del tipo oscilantes [7], [9]. Sin embargo su mayor desventaja es que tiene un alcance resistivo insuficiente, lo que lo hace incapaz de de detectar fallas con resistencia de arco [7]. Para este relé el ajuste se realiza definiendo la impedancia de alcance y los tiempos de actuación de cada zona.

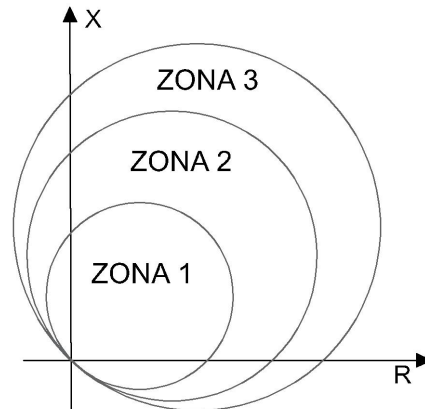


Figura 2.8: Plano R - X de la característica Mho

Ventajas

- Mucho más fácil de configurar que el relé poligonal.
- Menos influencia por falta de homogeneidad en comparación a la característica poligonal.
- En ciertas condiciones del sistema presenta una cobertura resistiva mejor a la poligonal.

2.4.2 Impedancia vista por el relé de distancia

Los relés de distancia pueden distinguir fallas trifásicas, bifásicas, bifásicas a tierra, y monofásicas, para ello cuentan con unidades de detección entre fases y de fase a tierra. Disponen de seis unidades de detección para cada una de las zonas

de protección. Para la operación ante las fallas mencionadas, cada unidad recibe alimentación independientemente de las otras. Esto debido a la complejidad que tendría la selección de voltajes y corrientes para cubrir estas fallas. La Tabla 2.1 resume las formulaciones que usa un relé de distancia convencional para estimar las impedancias de falla [7].

Unidad	Impedancia vista
Fase AB	$Z_{AB} = \frac{V_{AB}}{I_A - I_B}$
Fase BC	$Z_{BC} = \frac{V_{BC}}{I_B - I_C}$
Fase CA	$Z_{CA} = \frac{V_{CA}}{I_C - I_A}$
Fase A	$Z_A = \frac{V_A}{I_A + \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} I_0}$
Fase B	$Z_B = \frac{V_B}{I_B + \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} I_0}$
Fase C	$Z_C = \frac{V_C}{I_C + \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} I_0}$

Tabla 2.1: Impedancias vistas por unidades de fase y fase tierra.

2.5 Criterios para el ajuste de relé de distancia

Los voltajes y corrientes tomados de los TP y TC son los que estiman la impedancia del relé de distancia. Esta impedancia se expresa en Ω *primarios* y la ubicación de la falla es posible determinarla por medio de esta, ya que son proporcionales a la longitud de línea [7], [11]. Al usar la conversión por relación de TP y TC, la lectura que toma el relé está dada por unidades Ω *secundarios*. Se debe tomar en cuenta esto para el ajuste, ya que según disponga el relé se puede ingresar los valores de impedancias de una de estas formas. Para convertir la impedancia primaria en un valor secundario se debe usar la expresión[7]:

$$\frac{V_{prim}}{I_{prim}} = Z_{prim} = \frac{V_{sec} \cdot R_{TP}}{I_{sec} \cdot R_{TC}} \quad (2.1)$$

así, $Z_{sec} = Z_{prim} \cdot (R_{TC}/R_{TP})$, donde R_{TC} y R_{TP} son las relaciones de transformación de los TC y TP respectivamente.

Los relés de distancia modernos ofrecen zonas de protección que pueden llegar hasta 5 zonas. Siemens en su modelo de relé de distancia 7SA86 opera con 4 zonas de protección en tiempo escalonado.

Los criterios para el ajuste de cada zona pueden variar entre autores, sin embargo

quedan a disposición del que ajusta cual de ellos empleará. Para el desarrollo de los posteriores análisis en este documento, se ha considerado los siguientes criterios de ajuste [12], [13], [14]:

Zona 1: Zona selectiva con dirección hacia adelante. Se ajusta entre el 80 y 85% de la impedancia de secuencia positiva de línea a proteger, estos porcentajes debido a consideración de posibles errores de voltaje y corrientes de los equipos de medida. t_1 =instantáneo

Zona 2: Zona de sobrealcance con dirección hacia adelante. Cubrirá el 100% de la línea a proteger y de un 20% a un 50% de la línea adyacente más corta. $t=0,3-0,5s$.

Zona 3: Zona de sobrealcance con dirección hacia adelante(o inversa en algunos relés). Actúa como función de respaldo y se extiende al 100% de la línea protegida más el 100% de la línea adyacente más larga, más el 25% de la línea más corta en el extremo remoto. $t=0,6-1s$.

Zona 4: No direccional. Actúa como función de respaldo “hacia atrás” para la barra local con alcance del 25% de la línea a proteger. $t=1s$.

2.5.1 Alcances

Alcances con característica Poligonal

Los alcances de la característica poligonal son independientemente de sus componentes X y R. Para el ajuste del relé de distancia se escogieron los criterios siguientes donde X_{L1} representa la reactancia de la línea protegida.

Zona 1	Criterio de ajuste
Alcance X	$0,8 \cdot X_{L1}$
Alcance R (f-f)	$0,8 \cdot AlcanceX < R(f - f) < 2,5 \cdot AlcanceX$
Alcance R (f-t)	$0,8 \cdot AlcanceX < R(f - t) < \frac{1+k_x}{1+k_r} \cdot AlcanceX$

Tabla 2.2: Alcances en zona 1 con característica poligonal.

Zona 2	Criterio de ajuste
Alcance X	$X_{L1} + 0,5 \cdot X_{ady}$
Alcance R (f-f)	$AlcanceX < R(f - f) < 4 \cdot AlcanceX$
Alcance R (f-t)	$\frac{1+k_x}{1+k_r} \cdot 0,8 \cdot AlcanceX < R(f - t) < \frac{1+k_x}{1+k_r} \cdot 4 \cdot AlcanceX$

Tabla 2.3: Alcances en zona 2 con característica poligonal.

Zona 3	Criterio de ajuste
Alcance X	$X_{L1} + X_{adyLarga} + 0,25 \cdot X_{adyCorta}$
Alcance R (f-f)	$\frac{(X_{Alcance})_{Z3}}{X_{L1}} \cdot R(f - f)_{Z1}$
Alcance R (f-t)	$\frac{(X_{Alcance})_{Z3}}{X_{L1}} \cdot R(f - f)_{Z1} \cdot 1,2$

Tabla 2.4: Alcances en zona 3 con característica poligonal.

Zona 4	Criterio de ajuste
Alcance X	$0,25 \cdot X_{L1}$
Alcance R (f-f)	$2 \cdot R_{arco} \cdot R_{TC}/R_{TP} < R(f - f) < 6 \cdot AlcanceX$
Alcance R (f-t)	$R(f - f)$

Tabla 2.5: Alcances en zona 4 con característica poligonal.

Las Tablas 2.2 a 2.5 presentan los criterios de ajuste propuestos por Siemens, donde normalmente los alcances resistivos se ajustan entre un rango mínimo y máximo conforme lo indicado [12]. Las resistencias también pueden ser calculadas como se indica en el apartado 2.5.4; donde se describe el efecto de resistencia de falla, así también los factores K_x y K_r son descritos en 2.5.2.

Alcances con característica Mho

Los alcances se toman directamente de la impedancia de secuencia positiva considerando los criterios de cada zona. En la Tabla 2.6 se presentan los alcances de impedancia, donde Z_{L1} es la impedancia de línea protegida [7].

Zona	Alcance de impedancia Z_r
1	$0,8 \cdot Z_{L1}$
2	$Z_{L1} + 0,5 \cdot Z_{ady}$
3	$Z_{1L1} + Z_{1adyLarga} + 0,25 \cdot Z_{1adyCorta}$
4	$0,25 \cdot Z_{L1}$

Tabla 2.6: Alcances con característica Mho.

Una consideración a tomar en cuenta para esta característica es el ajuste del ángulo de fase, para esto es necesario realizar una corrección de la impedancia considerando lo mencionado [7].

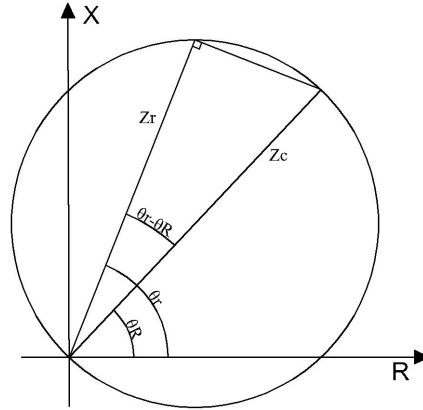


Figura 2.9: Corrección de impedancia en diagrama R-X con característica Mho

De la Figura 2.9 se deduce:

$$\text{Cos}(\theta_r - \theta_R) = \frac{Z_r}{Z_c}$$

$$Z_c = \frac{Z_r}{\text{Cos}(\theta_r - \theta_R)} \quad (2.2)$$

Siendo Z_c la impedancia corregida, θ_r el ángulo de la línea y θ_R el ángulo del relé.

2.5.2 Factor de compensación residual

Es un valor constante independiente de la ubicación de la falla, los relés de distancia usan este factor de compensación para la correcta medición de impedancia de secuencia positiva cuando se produce fallas a tierra. Las fallas a tierra se alimentan de voltajes, corrientes de fase y corrientes residuales que son dependientes de las impedancias de secuencia positiva y cero de línea.

Los voltajes del relevador para una falla línea-tierra considerando $Z_2 = Z_1$ son [7], [11]:

$$V_A = V_{A1} + V_{A2} + V_{A0} = I_{A1} (2Z_1 + Z_0)$$

Para una falla línea-tierra en la línea A; $I_{A1} = I_{A2} = I_{A0}$, entonces $I_A = 3I_{A1}$ y así:

$$\frac{V_A}{I_A} = \frac{(2Z_1 + Z_0)}{3} \quad (2.3)$$

La corriente residual es calculada de tal manera que se ajuste a la impedancia de secuencia positiva, así aplicando un factor K_0 en las corrientes de línea y residual se tiene:

$$I_A = I_A(1 + K_0) \quad (2.4)$$

$$Z_1 = \frac{V_A}{I_A(1 + K_0)} \quad (2.5)$$

Reemplazando la ecuación (2.3) y despejando K_0 se tiene:

$$K_0 = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{Z_0}{Z_1} - 1 \right) \quad \phi = \tan^{-1}(K_0) \quad (2.6)$$

Con:

- K_0 Factor de compensación residual
- Z_0 Impedancia de secuencia cero de la línea protegida
- Z_1 Impedancia de secuencia positiva de la línea protegida
- ϕ Fase del factor de compensación residual

Para el método de la ecuación (2.6), se usa directamente las impedancias de secuencia positiva y cero. También otro criterio es mediante el método de componentes resistivas y reactivas donde se calculan independientemente un factor de compensación en R y otro en X como muestran las ecuaciones (2.7),(2.8) [12].

Parámetro k_r

$$k_r = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{R_0}{R_1} - 1 \right) \quad (2.7)$$

Parámetro k_x

$$k_x = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{X_0}{X_1} - 1 \right) \quad (2.8)$$

Con:

- R_0 Resistencia del sistema homopolar de la línea
- X_0 Reactancia del sistema homopolar de la línea
- R_1 Resistencia de secuencia positiva de la línea
- X_1 Reactancia de secuencia positiva de la línea

Dentro de las características de ajuste de los equipos siemens se cuenta con estos dos métodos como entrada de parámetros.

2.5.3 Factor de compensación de línea paralela

Normalmente los ajustes para un relé de distancia ubicado en una rama que no contenga más líneas en un mismo bus resulta más conveniente, ya que no se consideran efectos de inducción, lo que simplifica su ajuste al usar directamente las impedancias de alcance de cada zona. Por otra parte, muchos de los circuitos de transporte llevan más de una línea por lo que en este caso se debe considerar la inducción mutua entre líneas.

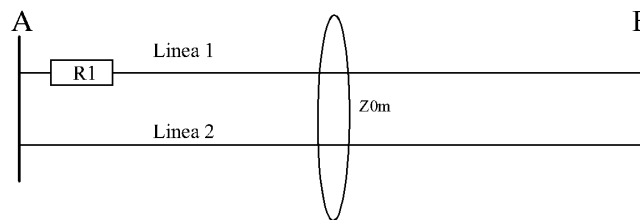


Figura 2.10: Línea paralela que comparte mismos extremos

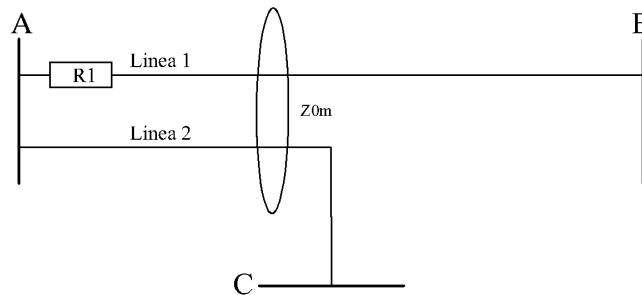


Figura 2.11: Línea paralela que comparte un solo extremo

El efecto de acoplamiento mutuo se produce entre líneas paralelas, las Figuras 2.10 y 2.11 son dos ejemplos de entre otras configuraciones que pueden darse [15], [11]. El efecto que se produce por inducción es una preocupación entre los relés de distancia ya que, debido a esto, puede resultar el mal funcionamiento de los relés. Para el caso de acoplamiento mutuo se debe considerar la intervención de la impedancia mutua de secuencia cero, es así como los algoritmos de los relés de distancia convencionales operan. Para dar solución a esto los relés consideran un parámetro de compensación de acoplamiento mutuo K_{0m} , y así existen otros

métodos que proponen los fabricantes de equipos de protección para el cálculo de los factores de acoplamiento [16], [17].

A continuación, se plantean dos métodos para el cálculo de las constantes de compensación de acoplamiento mutuo. El primero usa la impedancia mutua de secuencia cero[18]:

$$K_{0m} = \frac{Z_{0m}}{3 \cdot Z_1} \quad (2.9)$$

Mientras que el siguiente se calcula mediante el desacople de los componentes resistivos y reactivos[17]:

$$k_{rm} = \frac{R_{0m}}{3 \cdot R_1} \quad (2.10)$$

$$k_{xm} = \frac{X_{0m}}{3 \cdot X_1} \quad (2.11)$$

Donde:

Z_{0m} Impedancia homopolar mutua

R_{0m} Resistencia homopolar mutua

X_{0m} Reactancia homopolar mutua

2.5.4 Resistencia de falla

La resistencia de falla es otro parámetro que dificulta la correcta medición del relé de distancia. La falla a tierra se puede ocasionar por fallas en los aisladores o por la inducción de rayos, al producirse genera un arco e intervienen parámetros como la impedancia de la torre y la resistencia de la base de la torre. Las fallas en fase por lo general se suelen dar por fuertes vientos que ocasionan que los conductores estén muy cerca y ocasionen un arco eléctrico. Estos dos tipos de sucesos producen una resistencia a considerar para el ajuste del relé de distancia [9]. En la Figura 2.12 se puede distinguir una falla fase-tierra, la misma que se ve afectada por una resistencia de falla R_F .

La corriente de cortocircuito tiene influencia de la resistencia de falla, compuesta por 3 elementos; arco eléctrico, puesta a tierra e interferencias de objetos. Es práctica común asumir que la resistencia de falla R_F se compone por la resistencia de arco R_{arco} y la resistencia de puesta a tierra de la torre R_G .

Existen algunos criterios para el cálculo de esta resistencia, uno de los métodos más usados es el de Warrington. Para uso de los equipos, siemens realiza una aproximación de la ecuación R_{arco} de Warrington y recomienda $2500V.m$, resultando

la expresión de la forma siguiente [12], [14]:

$$R_{arco} = \frac{2500 \cdot L}{I_{arco}} \quad (2.12)$$

Donde:

I_{arco} Corriente de arco (rms)

L longitud de arco $L = S + 2 \cdot v \cdot t$ (m)

Considerando I_{arco} como el menor valor de corriente de cortocircuito:

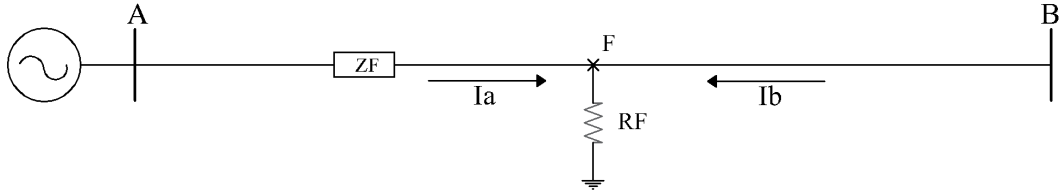


Figura 2.12: Efecto de una resistencia de falla

Para la resistencia de falla fase-fase se considera igual a la resistencia de arco, mientras que la resistencia de fase-tierra está compuesta por la resistencia de arco y la resistencia de puesta a tierra donde se produce el arco con reserva del 20% y una división por $(1+kr)$ [12].

Resistencia fase-fase

$$R(f - f) = R_{arco} \quad (2.13)$$

Resistencia fase-tierra

$$R(f - t) = \frac{1,2 \cdot (R_{arco} + R_{TF})}{1 + kr} \cdot R_{TC}/R_{TP} \quad (2.14)$$

siendo R_{TF} la resistencia máxima de puesta a tierra del poste.

$$R_{TF} = \left(1 + \frac{I_B}{I_A}\right) \cdot R_G \quad (2.15)$$

2.5.5 Efecto de fuentes intermedias “infeed”

El efecto infeed o efecto de fuentes intermedias, se interpreta como las corrientes que aportan barras intermedias de generación hacia el punto de falla. Este efecto

ocasiona que la impedancia sea distinta a la que aparentemente mide el relé. Una explicación básica de cómo se considera este efecto se deduce en base a la Figura 2.13. Se puede ver una falla entre las barras B y C, la cual es percibida por el relé R_1 . En la línea L_{AB} la medición de impedancia se ve con dependencia de la I_1 , en cambio para una falla en la línea BC existe influencia de las corrientes I_1 e I_2 [7], [14].

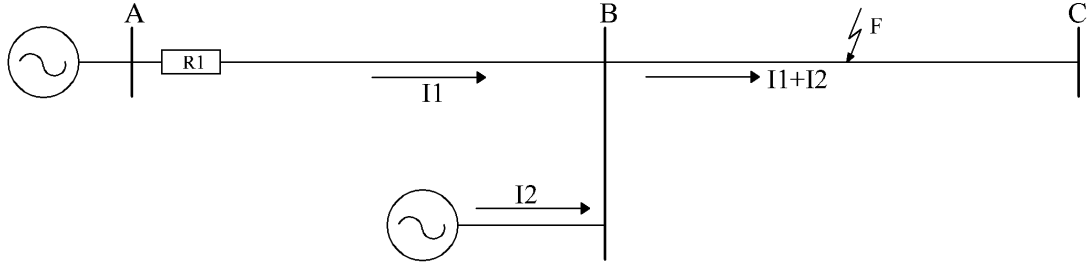


Figura 2.13: Efecto infeed por incidencia de corriente de barra B

Para este análisis se puede observar que el voltaje que mide R_1 es como la ecuación (2.16).

$$V_A = I_1 Z_A + (I_1 + I_2) Z_B \quad (2.16)$$

Entonces la impedancia medida de R_1 se expresa [7],[19], [20]:

$$\frac{V_A}{I_1} = Z_A + \left(1 + \frac{I_2}{I_1}\right) Z_B \quad (2.17)$$

Siendo $K = I_2/I_1$, la impedancia medida por el relé esta dada por la siguiente ecuación:

$$Z_{R1} = Z_A + (1 + K) Z_B \quad (2.18)$$

En conclusión el factor K es la razón de la corriente o corrientes intermedias sobre la corriente donde está ubicado el relé ($K = I_{infeed}/I_{relé}$).

El análisis anterior descrito es valido para la zona 2 ya que la zona 1 no se ve afectada por este efecto, en cambio para las demás zonas se extiende su análisis al incluir los factores de fuentes que intervengan en cada zona.

2.6 Características básicas del IED siemens 7SA86

Los IEDs gracias a sus características tales como su diseño compacto, su confiabilidad y velocidad de actuación se encuentran hoy en día ocupando una gran parte del mercado, dejando atrás a los relés electromecánicos y de estado sólido. Tienen la capacidad de reportar una falla en un tiempo menor a un segundo, así como almacenar datos de información digital y analógica con el fin de realizar el análisis oscilográfico de la falla [6].

El modelo siemens 7SA86 de protección y control, realiza el procesamiento digital de todas las funciones del equipo mediante un microprocesador especialmente diseñado para el procesamiento de las señales desde la adquisición de datos hasta la salida de órdenes hacia los interruptores [12].

Funciones

El equipo 7SA86 presenta una gran flexibilidad en sus funciones, estas pueden ser descargadas de manera individual al IED y además pueden ser copiadas en un equipo y entre los equipos, a continuación se pueden observar las diferentes funciones que ofrece [3]:

- Protección a distancia.
- Protección diferencial de línea.
- Protección restringida contra falla a tierra.
- Protección de sobrecorriente de fases.
- Protección diferencial de sobrecorriente, fases.

2.6.1 Entradas analógicas

Las entradas digitales del relé resultan de la transformación de la salida de los equipos de medida adaptándolos a niveles que el equipo puede procesar. Este equipo dispone de transformadores, tanto de corriente como de voltaje dependiendo de la función a cumplir, estos valores deben ser medidos de manera muy sensible

con el fin de percibir todos los cambios, aunque estas entradas sean analógicas son digitalizadas para su procesamiento [3], [12].

Frecuencia nominal	50 - 60Hz		
Transformadores de corriente - clase de protección	Corriente nominal (Inom)	Rango de medición de los dispositivos modulares	Rango de medición de los dispositivos no modulares
	5A	0 - 500A	0 - 250A
	1A	0 - 100A	0 - 50A

Tabla 2.7: Rangos operativos de entradas y salidas analógicas de protección de distancia 7SA86

2.6.2 Entradas y salidas binarias

Las entradas binarias son utilizadas para que el equipo pueda recibir ordenes emitidas desde la planta o desde otros equipos, mientras que las salidas de este tipo son utilizadas para expedir ordenes a las unidades de mando y los avisos importantes [3], [12].

Rango de voltaje nominal	24 Vcc a 250 Vcc	
Umbrales de reacción	24/48/60 V	Ulow \leq 10Vcc Uhigh \geq 19 Vcc
	110/125 V	Ulow \leq 44Vcc Uhigh \geq 88 Vcc
	220/250 V	Ulow \leq 88Vcc Uhigh \geq 176Vcc

Tabla 2.8: Rangos operativos de entradas y salidas binarias de protección de distancia 7SA86

2.6.3 Parámetros del equipo

Los parámetros para el ajuste del equipo 7SA86 se encuentran en un estado predefinido como se puede observar en la Tabla 2.9. Se encuentran los principales parámetros de ajuste para la protección de distancia así como los rangos de ajuste de cada parámetro. Los valores para los alcances se presentan referenciados hacia valores mínimos y máximos secundarios [12].

Parámetros de ajuste de protección 7SA86			
Parámetro	C	Posibilidades de ajuste	Preajuste
Modo trabajo		<ul style="list-style-type: none"> • L-E y L-L • sólo L-E • sólo L-L 	L-E y L-L
Sentido direccional		<ul style="list-style-type: none"> • No direccional • Hacia a delante • Hacia atrás 	Hacia adelante
Alcance X	1A	0.100 Ω hasta 600.000 Ω	2.500 Ω
	5A	0.020 Ω hasta 120.000 Ω	0.500 Ω
Rf (f-t)	1A	0.100 Ω hasta 600.000 Ω	2.500 Ω
	5A	0.020 Ω hasta 120.000 Ω	0.500 Ω
Rf (f-f)	1A	0.100 Ω hasta 600.000 Ω	1.250 Ω
	5A	0.020 Ω hasta 120.000 Ω	0.250 Ω
Inclinación de zona		0° hasta 45°	0°
Tiempo de disparo (1p)		0.00 s hasta 60,00 s; ∞	0.30 s
Tiempo de disparo (mp)		0.00 s hasta 60,00 s; ∞	0.30 s
Kr		-0.33 hasta 11.00	1.00
Kx		-0.33 hasta 11.00	1.00
K0		0.000 hasta 11.000	1.000
Ángulo (k0)		-180.00° hasta 180.00°	0.00°

Tabla 2.9: Rangos de ajuste de protección de distancia 7SA86

CAPÍTULO 3

RESPUESTAS DE ACCIÓN DEL RELÉ DE ESTUDIO

3.1 Introducción

En este capítulo se realiza los análisis para para verificar las respuestas de acción del relé de distancia. Se plantean los conceptos teóricos sobre los efectos de fuente intermedia y acoplamiento mutuo de líneas paralelas en el relé de distancia. Para comprender estos efectos se plantean casos de estudio, y se comprueban sus respuestas. Finalmente se realiza el ajuste y coordinación de protecciones para el sistema 9 barras IEEE. Para todos estos escenarios se realizan los ajustes de protección atendiendo a los criterios mencionados en el Capitulo 2. La validez de los ajustes realizados se comprueban mediante la herramienta de simulación *DIgSILENT*.

3.2 Filosofía de protección

Las protecciones tienen como objeto mantener aislados sectores afectados ante diversos factores que atenten la operabilidad del sistema. Al hablar de ajustar la protección se refiere a considerar las características del sistema a proteger, tanto en condiciones normales, como ante contingencias. De esta forma se puede establecer el umbral o límite de ajuste de la señal que determina la operación del equipo

de protección. La coordinación de protección; hace referencia a disponer de dos o más equipos de protección, que permitan proteger el sistema manteniendo una protección de primera línea o principal, y una protección de respaldo que aumente la confiabilidad del sistema. Además, su filosofía es principalmente definir los tiempos de operación de actuación y así mantener una selectividad de operación en las protecciones [21].

Según el técnico determine el instrumento de protección, debe considerar las características y disposición del mismo. Para el caso, el relé de distancia presenta una mayor facilidad de ajuste en comparación a un relé de sobrecorriente, aun así, no está exenta de limitaciones en cuanto a cuestiones que pueden alterar su correcta operación, debido a factores externos al ajuste del relé y que deben ser considerados. Como es de esperar, esta protección se encuentra vulnerable a la correcta medición de impedancia, ocasionando alcances excesivos o insuficientes, y al ser esta su forma fundamental de operación ocasionara un mal desempeño en el sistema de protecciones.

Factores que afectan la correcta medición de impedancia del relé de distancia

La estimación de la impedancia de falla medida por el relé de distancia, puede ser evidenciada con mayor precisión en un sistema radial simple, donde su ajuste no necesita mayor análisis. En un sistema más complejo se puede caer en el error de esperar que el equipo mida siempre correctamente, pero el problema es que la protección no puede ver más allá de la línea protegida. Es decir, no ve la influencia que tiene la disposición de líneas, topología o configuración del sistema. Un sistema con múltiples fuentes ocasiona aportes de corriente hacia la falla, en donde el relé no las percibe.

También el relé puede verse frente a una configuración de líneas paralelas, las que producirán un error en la medición de impedancia, debido al acoplamiento mutuo de conductores. Otro factor que impide la correcta medición es la resistencia de falla que ocasiona un subalcanse, también la existencia de fuentes aterradas que inyectan corrientes de secuencia cero, las variaciones en la generación, entre otras causas que quedan como trabajo del técnico distinguirlas.

En el Capítulo 2 se trato sobre las consideraciones a tomar para hacer que el relé compense estos problemas. En general el alcance de los relés de distancia se ve afectado por; variaciones de la generación del sistema, variaciones topológicas de la red, longitud de la línea, presencia de fuentes con conexión a tierra, efecto de impedancias mutuas, presencia de fuentes intermedias de corriente y resistencia de

falla [20],[17].

3.3 Estudio del efecto de fuentes intermedias

Como bien se ha indicado, el efecto infeed es un factor para considerar dentro del ajuste de protección de relé de distancia. El problema de este, es que afecta la precisión de la medida de impedancia, lo que resulta en alcances insuficientes o excesivos. Es comprensible ya que en la mayoría de los casos la corriente que interviene de derivación esta casi en fase con la corriente de aporte de falla de la línea [22], [20]. En el relé de distancia no existe problema debido a fuentes intermedias al ajustar la zona 1 de protección, pero en las demás zonas sí se debe considerar, sin embargo, otros autores si prestan atención a este fenómeno en esta zona. Para los ajustes del presente proyecto se lo realiza de la forma tradicional; sin considerar efectos infeed en zona 1.

3.3.1 Ejemplo del efecto infeed

Para demostrar la influencia de la corriente intermedia, se presenta el proceso de ajuste de un relé de distancia en un sistema simple de 4 barras. Para el sistema radial de la Figura 3.1 se realiza los ajustes de protección; inicialmente, sin considerar el efecto de fuente intermedia, y después considerándolo para notar esta afección y su solución. Los parámetros para el sistema de 4 barras se pueden ver en el **ANEXO 1**.

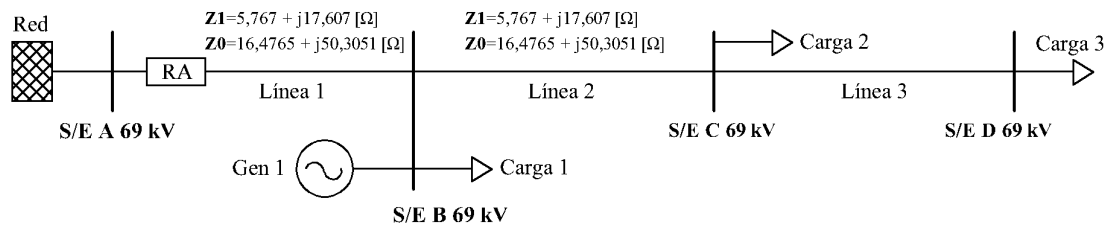


Figura 3.1: Sistema radial 4 barras con fuente intermedia

Para el presente caso el relé A “ R_A ” se ajusta con una característica de protección tipo poligonal, y se considera un R_{TP} de 69 kV/ 115 V y un R_{TC} de 200 A/5 A.

Factores de compensación residual

Los factores de compensación residuales reactivos y resistivos obedeciendo a las ecuaciones (2.7) y (2.8) son:

$$k_r = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{16,48}{5,77} - 1 \right) = 0,62$$
$$k_x = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{50,31}{17,61} - 1 \right) = 0,62$$

Si se emplea la ecuación (2.6) el factor de compensación sería: $K_0 = 0,62 \angle 0^\circ$. Cualquiera de estas formas es válida, todo queda a la disponibilidad que ofrece el relé.

Ajuste de zona 1:

Se ocupa el criterio del 80% de la línea 1. Los alcances para una cobertura poligonal se calculan como la Tabla 2.2.

$$X = 0,8 \cdot X_{L1}$$

$$X = 0,8 \cdot (17,61 \Omega \text{ prim})$$

$$X = 14,09 \Omega \text{ prim}$$

Los alcances resistivos son:

$$R(f - f) = 0,8 \cdot (14,09 \Omega \text{ prim}) = 11,27 \Omega \text{ prim}$$

$$R(f - t) = \frac{1+0,62}{1+0,62} \cdot (14,09 \Omega \text{ prim}) = 14,09 \Omega \text{ prim}$$

Los ajustes para una característica Mho serían de la forma siguiente:

$$Z_r = 0,8 \cdot Z_{1L1}$$

$$Z_r = 0,8 \cdot (18,53 \Omega \text{ prim})$$

$$Z_c = 15,22 \Omega \text{ prim}$$

Los alcances de esta característica se calculan tomando los criterios indicados en la Tabla 2.6 para alcances de la característica Mho, y además considerando la ecuación (2.2) para corregir la impedancia, sabiendo que el ángulo del relé es a 85° .

Ajuste de zona 2:

Se considera un criterio del 50% de la línea adyacente.

$$X = X_{L1} + 0,5 \cdot X_{L2}$$

$$X = 17,61 \Omega prim + 0,5 \cdot (17,61 \Omega prim)$$

$$X = 26,41 \Omega prim$$

$$R(f - f) = 26,41 \Omega prim$$

$$R(f - t) = \frac{1+0,62}{1+0,62} \cdot 0,8 \cdot (26,41 \Omega prim) = 21,13 \Omega prim$$

Para característica Mho:

$$Z_r = Z_{L1} + 0,5 \cdot Z_{L2}$$

$$Z_r = 18,53 \Omega prim + 0,5 \cdot (18,53 \Omega prim)$$

$$Z_c = 28,54 \Omega prim$$

Estos ajustes serían sin considerar la corriente de aporte de la S/E B. Si se la toma en cuenta, lo que sería el correcto procedimiento, entonces, los ajustes en esta zona considerando la ecuación (2.18) quedarían de la siguiente forma [13]:

$$X = X_{L1} + 0,5 \cdot (1 + K)X_{L2}$$

El valor K se obtiene al extraer las corrientes de aporte a una falla monofásica ocurrida al 50% de línea 2. $I_{infeed} = 0,467 kA$, $I_{relé} = 0,326 kA$.

$$K = 1,43$$

$$X = 17,61 \Omega prim + 0,5 \cdot (1 + 1,43)(17,61 \Omega prim)$$

$$X = 39,02 \Omega prim$$

$$R(f - f) = 39,02 \Omega prim$$

$$R(f - t) = 31,22 \Omega prim$$

Ajuste Mho:

$$Z_r = Z_{L1} + 0,5 \cdot (1 + K)Z_{L2}$$

$$Z_r = 18,53 \Omega prim + 0,5 \cdot (1 + 1,43)(18,53 \Omega prim)$$

$$Z_r = Z_c = 42,16 \Omega prim$$

La siguiente tabla resume los ajustes realizados para el relevador A, expresados en unidades primarias y secundarias que se obtuvieron usando la razón de R_{TC} y R_{TP} .

Ajuste poligonal					
Zona 1			Zona 2		
X	14,09 Ω prim	0,94 Ω sec	X	39,02 Ω prim	2,6 Ω sec
R(f-f)	11,27 Ω prim	0,75 Ω sec	R(f-f)	39,02 Ω prim	2,6 Ω sec
R(f-t)	14,09 Ω prim	0,94 Ω sec	R(f-t)	31,22 Ω prim	2,08 Ω sec
Ajuste Mho					
Zona 1			Zona 2		
Zc	15,22 Ω prim	1,01 Ω sec	Zc	42,16 Ω prim	2,81 Ω sec
Factor de compensación					
k_r	0,62	k_x	0,62	K_0	0,62 0°

Tabla 3.1: Ajustes propuestos para relevador R_A con efecto infeed

3.3.2 Respuestas de acción del relé para el ajuste propuesto

Para la simulación se siguen los pasos indicados en el **ANEXO 2**. Se simula una falla monofásica en el circuito plateado con los ajustes propuestos; sin considerar la compensación del efecto de fuente intermedia y luego estimando este efecto. La zona 1 no presenta problemas de alcance tal como se aprecia en la Figura 3.2, así, las figuras siguientes presentan la respuesta de acción al efecto infeed en la zona 2.

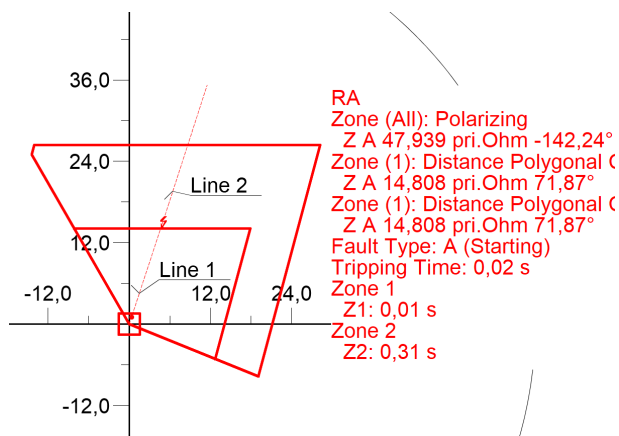


Figura 3.2: Alcance del relé R_A para una falla monofásica sólida a tierra al 80% de la línea L_1 sin considerar la corriente intermedia.

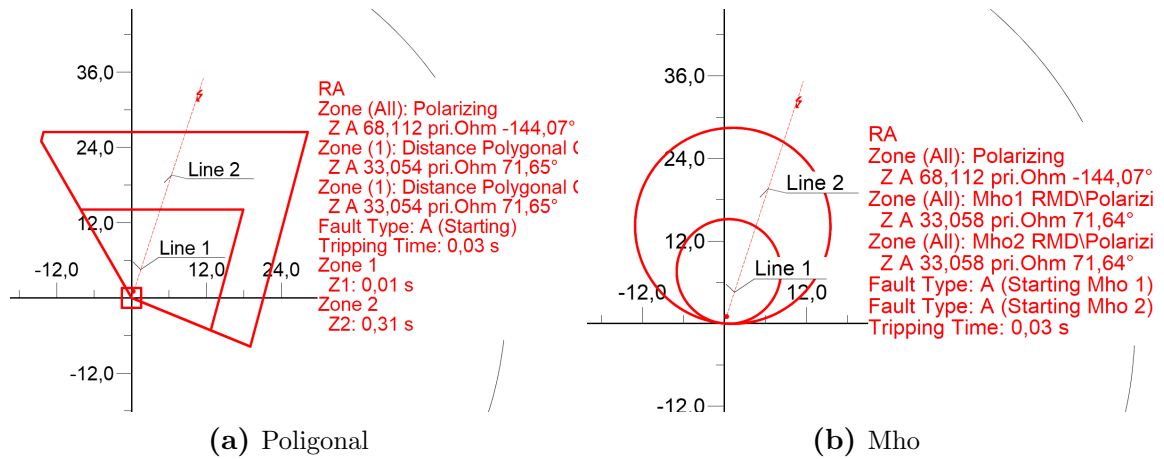


Figura 3.3: Alcance del relé R_A para una falla monofásica solida a tierra al 50% de la línea L_2 sin considerar la corriente intermedia.

Como se muestra en las Figura 3.3a y 3.3b la impedancia medida por el relevador A es $33,054 \Omega_{prim}$ para una característica poligonal y $33,058 \Omega_{prim}$ para la Mho, por lo que gráficamente se ve un subalcance, debido a que el alcance de la zona 2 está por debajo de la impedancia que mide el relé. Por lo tanto el relé no actúa cuando ocurre la falla, debido a que no se perciben problemas en sus zonas de protección.

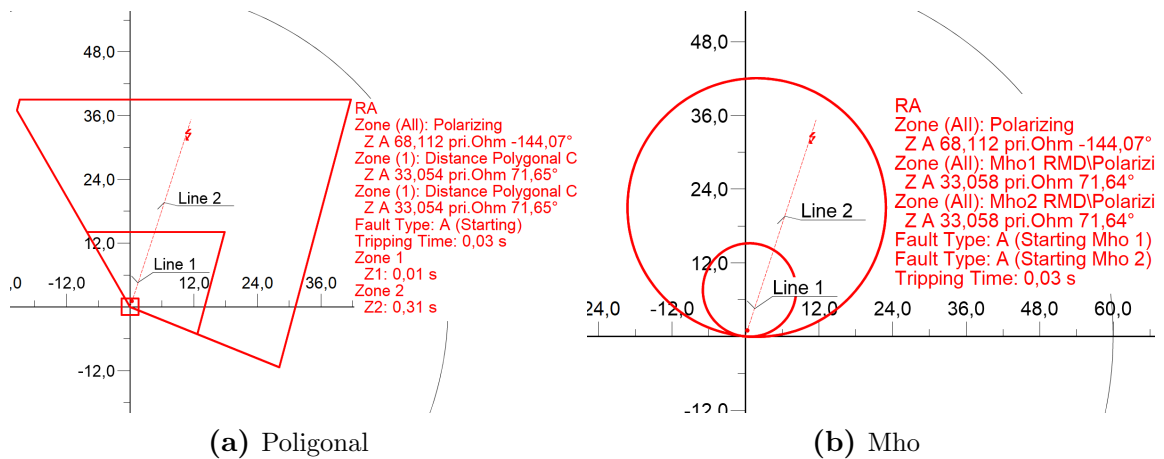


Figura 3.4: Alcance del relé R_A para una falla monofásica solida a tierra al 50% de la línea L_2 considerando la corriente intermedia.

De la Figura 3.4 se observa que el relevador mide la misma impedancia que en el análisis anterior, pero a diferencia, la impedancia de falla si está comprendida en la zona 2. Por lo que el alcance de zona 2 considerando la fuente intermedia, corrige el error no percibido por el relé y se produce el disparo desde esta zona. Es así, que se puede apreciar como influye la corriente intermedia en el ajuste del alcance, considerando el factor K en los análisis. También es importante indicar que

este efecto se verá mayormente desviado dependiendo de las características de la línea y configuraciones del sistema.

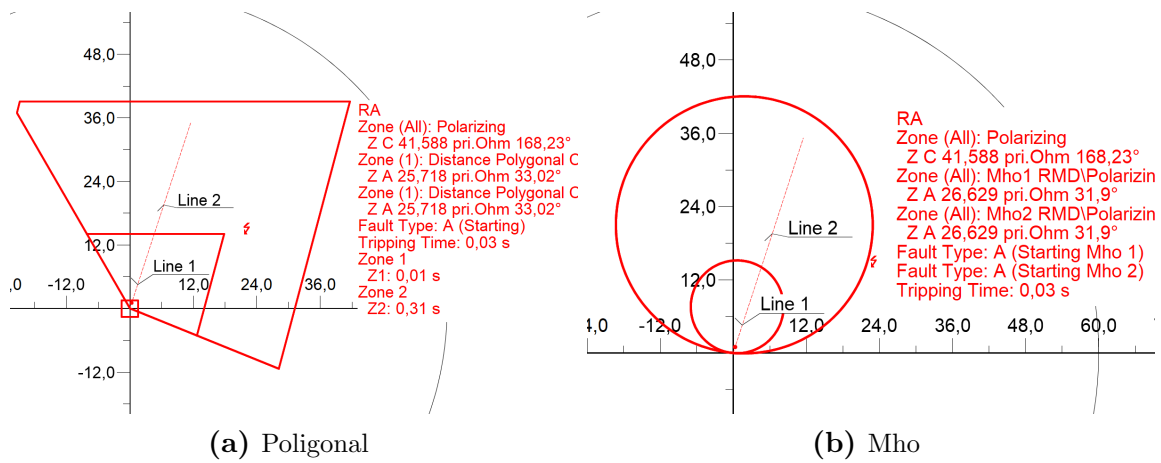


Figura 3.5: Alcance del relé R_A para una falla monofásica al 80% de la línea L_1 con resistencia de falla de 18Ω considerando la corriente intermedia

Finalmente se verifica la respuesta de acción en zona 1 para una falla monofásica al 80% de la línea 1 con resistencia de falla de 18Ω . La Figura 3.5a presenta el resultado frente a esta condición, se examina que la impedancia de falla se desplaza hacia la derecha por lo que la zona en la que es detectada es la zona 2.

En la Figura 3.5b se observa que bajo las mismas condiciones de falla, la impedancia vista por el relé no está comprendida en ninguna zona, por lo que en este caso la falla no será despejada. Como se puede ver, para este análisis la característica poligonal presenta mejor desempeño de protección que la característica Mho.

3.4 Estudio del efecto de acoplamiento de líneas paralelas

El acoplamiento mutuo de líneas paralelas modifica los alcances de zonas de protección, generando errores de operación en la protección, especialmente en protección de falla a tierra, ya que el relé de distancia es muy sensible a la inducción mutua [18], [23]. El efecto de acoplamiento se da entre fases y fase tierra del mismo circuito o con conductores de un circuito paralelo. El acople entre conductores del mismo circuito ocasiona un error de estimación de impedancia, pero generalmente las protecciones de distancia consideran esto un error minúsculo, y por eso es despreciable en el ajuste de estos, sin embargo, el acoplamiento de líneas paralelas

si es considerado. En líneas paralelas, cuando el acoplamiento es entre fases se suele dar solución a esto mediante la transposición de las fases de los dos circuitos, lo que disminuye el efecto de acoplamiento. Para el acoplamiento entre fases y tierra no es así de sencillo ya que este efecto se encuentra de manera permanente y la transposición no elimina el acoplamiento mutuo de secuencia cero [24].

Los factores que influyen en la cantidad de acoplamiento mutuo son; tipo de conductor, configuración, espacio de la torre, conexión a tierra y dirección de la corriente [18]. Es así que según se estudie el caso, los relés de distancia deben de ser compensados debido a que la corriente que fluye a través de una fase induce voltajes en las demás fases, es decir, la corriente que circula por la línea sana cuando ocurre una falla en la línea protegida [15], [23].

Para compensar el efecto mencionado, una solución considerada por los técnicos en protecciones es compensar con la medición de la corriente de secuencia cero que circula por la línea sana. Para esto, es necesario colocar un transformador de corriente adicional e introducir otra entrada en la protección. Los actuales relés con función 21N contienen una entrada adicional donde se conecta la corriente de tierra de la línea paralela o línea sana. La Figura 3.6 representa el circuito de compensación mediante la medición de la corriente mutua [23].

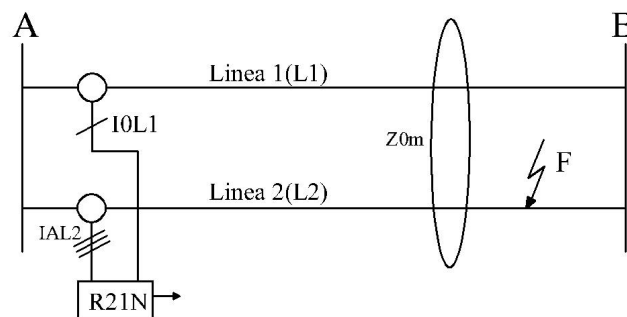


Figura 3.6: Esquema de compensación de corriente de secuencia cero de líneas paralelas.

La alternativa si bien da solución al problema, presenta la desventaja de mantener costes económicos a considerar, debido a que se emplea mayores recursos físicos. Las distancias de cableado hasta el relé implicarían una posible saturación en el TC, debido a una mayor carga para fallas a tierra[18].

Sin embargo, dentro de este análisis también se propone un método particular que permita al diseñador optimizar recursos, se da solución a este fenómeno solo usando un TC de medición. Los detalles y aplicación se presentan en el posterior ejemplo dando solución con estas dos técnicas.

Los acoplamientos se experimentan en distintos tipos de configuraciones incluso a diferentes niveles de voltaje. Para la siguiente demostración se discuten los análisis en la configuración con líneas paralelas acopladas mutuamente en ambos extremos. Para esto se considera de igual magnitud la corriente de fase y la corriente de secuencia cero de la línea protegida, así mismo para la corriente residual de la línea paralela y la línea protegida[23]. Es importante indicar que el análisis de esta afección requiere del modelado geométrico de las líneas de transmisión (estructuras y conductores).

3.4.1 Ejemplo de acoplamiento mutuo de líneas paralelas con extremos comunes

Para el circuito de la Figura 3.7 se considera la protección de la línea 2, relé “ R_{L2} ”. El sistema es a 138 kV con líneas de 63 km de longitud y alimenta una carga de 150MW [17], [23]. El R_{TC} es de 400 A/5 A y el R_{TP} de 138 kV/115 V. Para ilustrar el efecto de acoplamiento mutuo se consideran fallas monofásicas en la línea protegida. Además, es prudente indicar que se realizó el modelado geométrico de las líneas de transmisión para considerar la impedancia mutua. El **ANEXO 1** y **ANEXO 2** contienen los datos del sistema y los pasos para su modelado en simulación respectivamente.

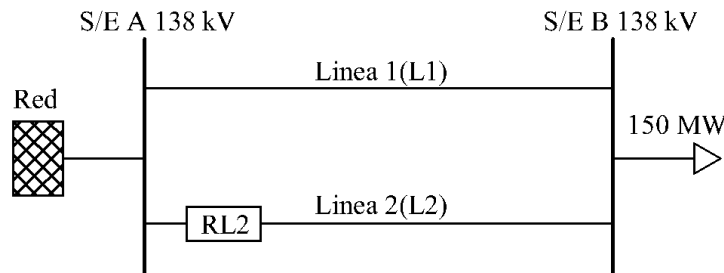


Figura 3.7: Sistema con barras colectoras comunes de 138 kV y carga de 150 MW

Parámetros de la línea:

$$\begin{aligned} Z1 &= 0,05298114 + j0,4582906 \text{ } \Omega/km & Z1 &= 3,33781182 + j28,8723078 \text{ } \Omega \\ Z0 &= 0,2217059 + j1,606449 \text{ } \Omega/km & Z0 &= 13,9674717 + j101,206287 \text{ } \Omega \end{aligned}$$

Del modelo geométrico se tiene que la impedancia mutua de secuencia cero es:
 $Z0m = 0,168718 + j1,07979 \text{ } \Omega/km$.

3.4.1.1 Método de compensación mutua tradicional

Factores de compensación

Se calcula el factor de compensación a tierra y factor de compensación mutua, este último en base a las ecuaciones (2.10) y (2.11).

$$\begin{aligned}k_r &= 1,06 & k_{rm} &= 1,06 \\k_x &= 0,84 & k_{xm} &= 0,79\end{aligned}$$

Ajuste de zona 1

Criterio del 80% de la línea protegida.

Ajuste poligonal:

$$X = 0,8 \cdot (28,87) = 23,10 \ \Omega \text{ prim}$$

$$R(f - f) = 18,48 \ \Omega \text{ prim}$$

$$R(f - t) = 20,56 \ \Omega \text{ prim}$$

Ajuste Mho:

$$Z_r = 0,8 \cdot Z_{1L1}$$

$$Z_r = 0,8 \cdot (29,06 \ \Omega \text{ prim})$$

$$Z_r = Z_c = 23,26 \ \Omega \text{ prim}$$

Ajuste de zona 2

Criterio del 120% de la línea protegida.

Ajuste poligonal:

$$X = 1,2 \cdot (28,87) = 34,65 \ \Omega \text{ prim}$$

$$R(f - f) = 34,65 \ \Omega \text{ prim}$$

$$R(f - t) = 24,67 \ \Omega \text{ prim}$$

Ajuste Mho:

$$Z_r = 1,2 \cdot Z_{1L1}$$

$$Z_r = 1,2 \cdot (29,06 \Omega_{prim})$$

$$Z_c = 34,89 \Omega_{prim}$$

El resumen de los ajustes para el caso de estudio analizado, se ven en la tabla siguiente; representado en unidades primarias y secundarias.

Ajuste poligonal					
Zona 1			Zona 2		
X	23,10 Ω_{prim}	1,54 Ω_{sec}	X	34,65 Ω_{prim}	2,31 Ω_{sec}
R(f-f)	18,48 Ω_{prim}	1,23 Ω_{sec}	R(f-f)	34,65 Ω_{prim}	2,31 Ω_{sec}
R(f-t)	20,56 Ω_{prim}	1,37 Ω_{sec}	R(f-t)	24,67 Ω_{prim}	1,64 Ω_{sec}
Ajuste Mho					
Zona 1			Zona 2		
Zc	23,26 Ω_{prim}	1,55 Ω_{sec}	Zc	34,89 Ω_{prim}	2,33 Ω_{sec}
Factor de compensación					
k_r	1,06	k_x	0,84	K_0	0,84 $\angle -1,8^\circ$
k_{rm}	1,06	k_{xm}	0,79	K_{0m}	0,79 $\angle -2,3^\circ$

Tabla 3.2: Ajustes propuestos para relevador R_{L2} con acoplamiento mutuo

3.4.1.2 Método particular optimizado de compensación mutua

Con el fin de corregir el error producente por líneas acopladas mutuamente, se propone un método optimizado de compensación mutua. Con este método se consigue el uso de menos recursos físicos y operativos del relé, es decir; sin un TC adicional, cableado extra, entrada adicional de medición de corriente en el relé y sin el uso de factores de compensación mutua; k_{rm} y k_{xm} . Lo que se propone, es corregir el error introducido por el efecto de acoplamiento, al disponer solo del uso de los factores de compensación residual; k_r y k_x .

Para aplicar el método indicado, se suma la impedancia mutua de secuencia cero Z_{0m} a la impedancia de secuencia cero de la línea Z_0 , y con esta nueva Z_0' se calcula los factores compensación residual:

$$Z0' = 0,3904239 + j2,686239 \Omega/km$$

$$k_r = 2,12$$

$$k_x = 1,62$$

Alternativamente, este valor se puede obtener usando los valores calculados en el apartado anterior; sumar k_{rm} , k_{xm} a k_r , k_x respectivamente.

3.4.2 Respuestas de acción del relé para el ajuste propuesto

Para ilustrar los efectos de acoplamiento mutuo, se simula una falla monofásica sólidamente aterrada en el circuito planteando con los ajustes del relé usando primero el método convencional y luego el optimizado.

En un primer caso se examina la reacción de la protección, despreciando la compensación mutua y posteriormente, se evalúa su desempeño atendiendo este efecto. También se introduce una resistencia de falla para observar las respuestas a las características poligonal y Mho.

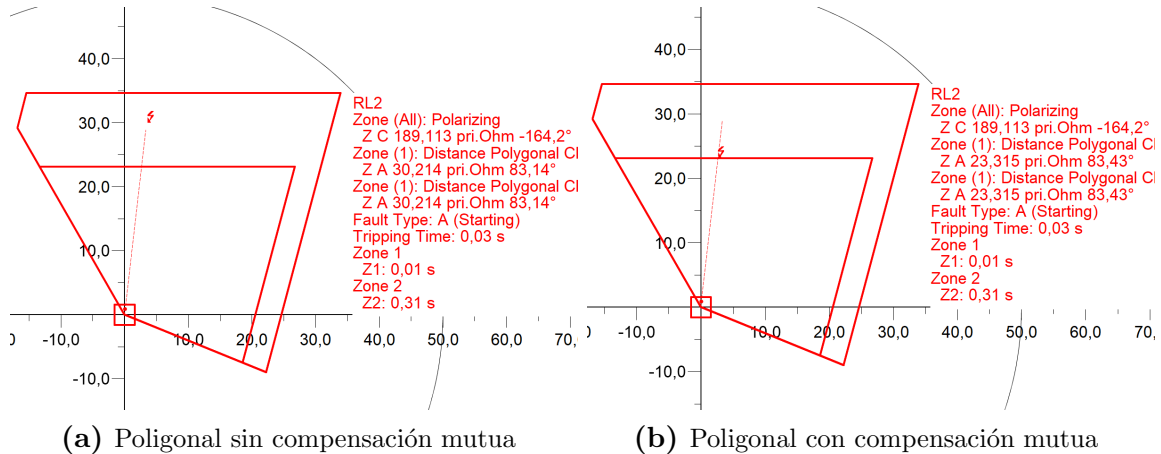


Figura 3.8: Impedancia vista por el relé RL_2 para una falla monofásica sólida a tierra al 80% de la línea L_2 con el método convencional

En la Figura 3.8a se observa el diagrama R-X de protección sin considerar la compensación mutua de secuencia cero, se ve que el relé mide una impedancia de $30,214 \Omega_{prim}$ para una falla al 80% de la línea 2. También el alcance propuesto en zona 1 está por debajo de la impedancia de falla (subalcance). En este análisis se observa una mala operación de relé, ya que la falla ocasiona un disparo en la zona 2 y no en el límite de la zona 1 que sería lo correcto.

De la Figura 3.8b se aprecia la impedancia medida por el relé considerando la compensación de acoplamiento mutuo. La impedancia medida para una falla monofásica sólidamente aterrada al 80% de la línea 2 es $23,315 \Omega$ *prim*, que comparada con la anterior esta es un 22,83% menos de impedancia medida, esto es correcto ya que la falla cae en el límite del ajuste de la zona 1.

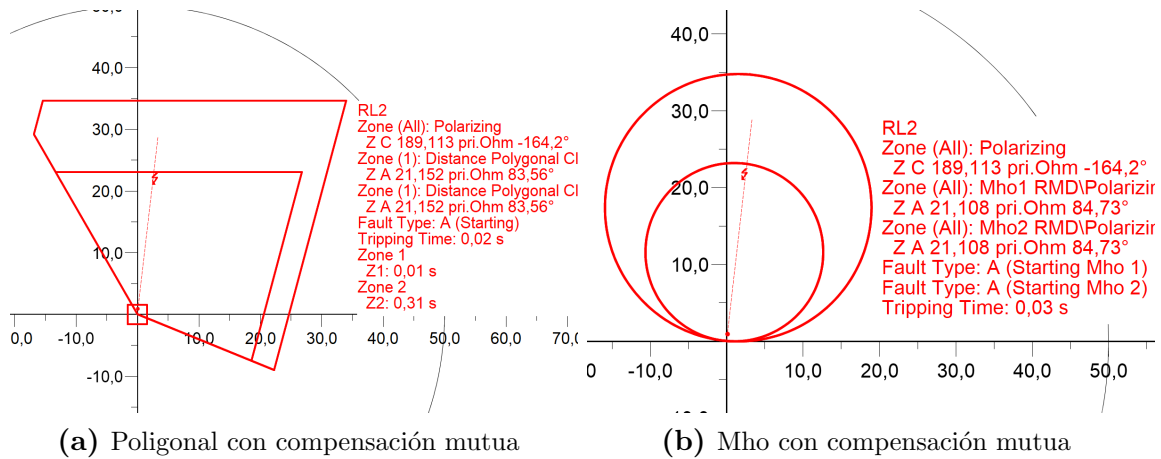


Figura 3.9: Impedancia vista por el relé R_{L2} para una falla monofásica sólida a tierra al 80% de la línea 2 con el método optimizado

Las Figuras 3.9a y 3.9b muestran el resultado de la impedancia vista desde el relevador R_{L2} para una falla monofásica solida a tierra al 80%. Se puede observar que en comparación a las respuestas obtenidas por el método convencional 3.8b, este tiene un error del 0,1% menos de impedancia. Sin embargo, no representa un error significativo, por lo que se considera un método válido cuando se mantiene una cantidad de recursos limitados para corregir este error.

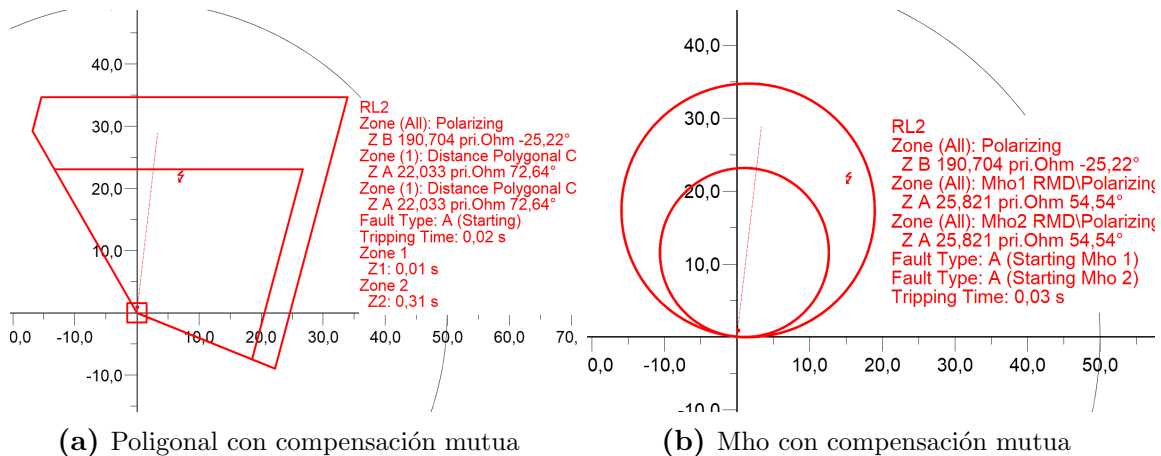


Figura 3.10: Impedancia vista por el relé R_{L2} para falla monofásica al 80% de la línea L_2 con resistencia de falla de 8Ω - método optimizado

De la Figura 3.10a se aprecia la impedancia vista del relevador al 80% para una falla monofásica con resistencia de falla de 8Ω . Para este caso, la cobertura tipo poligonal ofrece un mejor desempeño, ya que la falla permanece dentro de los límites de la zona 1. La cobertura Mho sin embargo, ve la impedancia de falla en la zona 2, Figura 3.10b.

Con los análisis indicados en esta sección, se ve la importancia de considerar el acoplamiento mutuo. El ajuste convencional también es válido para cuando la línea L_1 se encuentra fuera de servicio, es decir cuando las líneas dejarían de estar acopladas el resultado sería igual al de la Figura 3.8b. Más casos, como el mencionado y otros son estudiados en [23], [15].

3.5 Ajuste y coordinación con IEDs de distancia

En este apartado se realiza el ajuste y coordinación con dos relés de distancia, para ello, se emplea un diagrama de protección simple, el cual consta de implementar un solo relé en cada extremo por cada línea a proteger, posteriormente se comprueba sus respuestas en simulación.

3.5.1 Caso de estudio

La Figura 3.11 representa el modelo de estudio tomado como base para los posteriores análisis afines en este trabajo. El esquema propuesto es tomado por la IEEE, que consta de; 9 barras, 3 transformadores, generadores y cargas. Los valores de las cargas se asumieron particularmente con la finalidad de plantear un escenario adecuado, ya que se plantearon mayores distancias en las líneas. También se integro la impedancia de secuencia cero asumiendo que esta es 2,5 veces mayor a la impedancia de secuencia positiva.

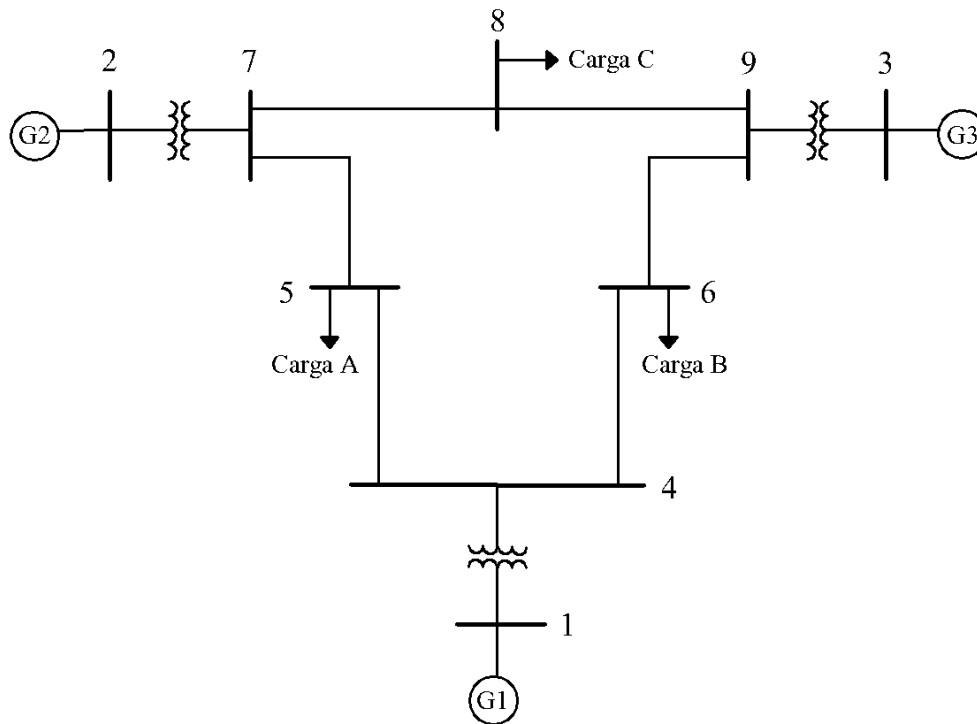


Figura 3.11: Caso de estudio IEEE 9 barras

Los tramos tomados para los posteriores análisis son la línea entre los buses 4 y 5 “ L_{45} ” con el relevador 1 “ R_1 ” y la línea entre los buses 5 y 7 “ L_{57} ” con el relevador 2 “ R_2 ”. También es oportuno mencionar algunas consideraciones planteadas para realizar el respectivo ajuste y coordinación en este estudio.

3.5.2 Consideraciones del proceso de ajuste

Para el análisis de la coordinación se parte desde las características de operación del sistema. Para ello, se plantean consideraciones que permitan llevar a cabo el proceso de ajuste y coordinación, en base a las limitaciones de implementar de forma practica estos ajustes en los laboratorios de protecciones.

- Se considera un solo escenario de cargabilidad del sistema.
- Se desprecia transposición de líneas y acoples mutuos de líneas paralelas.
- El ajuste se realiza usando hasta la segunda zona de protección y coordinando dos relés de distancia.

- Para el ajuste se implementa dos características de operación, la poligonal y luego Mho.
- Se parte desde el uso de un diagrama de protección simple con un relé de distancia por línea.
- No se considera la corriente de secuencia cero que aporta el transformador de la barra 7 y 4.
- Se estudia la protección en forma general para una falla del tipo trifásica, ya que al ser la peor condición se asume protección para las demás fallas.
- Se considera el efecto de fuente intermedia de la barra 7.

En el siguiente apartado se presentan los ajustes de cada tramo de línea a proteger teniendo presente los criterios y consideraciones planteadas dentro de este documento.

3.5.3 Ajuste de protección para relevador 1 de la línea L45

Para el relé de la línea L_{45} se realiza el flujo de carga y se obtiene el valor de corriente de carga máxima. El voltaje de línea es de 230 kV, por lo que para el relevador de esta línea se considera un R_{TC} de 200 A/5 a y R_{TP} de 230 kV/115 V.

En la Tabla 3.3 se puede apreciar los parámetros de las líneas que se obtuvieron del modelo IEEE adjuntos en el **ANEXO 1**, con referencia a una potencia base de 100 MVA.

i	j	km	Z1[ohm]	Z0[ohm]	Z1 ∠°[ohm]	Z0 ∠°[ohm]
4	5	5	26,45+j224,825	66,125+j562,0625	226,38 ∠83, 29°	565,94∠83, 29°
5	7	8	135,424+j681,352	338,56+j1703,38	694,68 ∠78, 76°	1736,70∠78, 76°
7	8	3	13,4895+j114,264	33,72375+j285,66	115,06 ∠83, 27°	287,64 ∠83, 27°

Tabla 3.3: Parámetros de líneas para ajuste y coordinación

De acuerdo con las características de impedancias de las líneas se puede observar que los valores de compensación residual son los mismos para las dos líneas a proteger, estos son:

$$Kr = 0,5$$

$$Kx = 0,5$$

3.5.3.1 Ajustes con característica poligonal

Para el calculo de los alcances de las siguientes zonas se considera los criterios propuestos en la sección 2.5.1.

Ajuste en zona 1

Se considera un valor porcentual de alcance del 80% de la línea a proteger, así:

$$X = 0.8 \cdot X_{L45}$$

$$X = 0.8 \cdot (224, 825 \ \Omega \text{ prim})$$

$$X = 180 \ \Omega \text{ prim}$$

Así mismo los valores de resistencia de falla entre fases y fase tierra se calcula como indica la Tabla 2.2.

$$R(f - f) = 0.8 \cdot (180 \ \Omega \text{ prim}) = 144 \ \Omega \text{ prim}$$

$$R(f - t) = \frac{1+0,5}{1+0,5} \cdot (180 \ \Omega \text{ prim}) = 180 \ \Omega \text{ prim}$$

Ajuste en zona 2

Se toma como criterio de alcance el 50% de la línea adyacente L_{57} . Como se puede ver, en la barra 5 no existe ninguna fuente intermedia, por lo que facilita el cálculo en esta zona.

$$X = X_{L45} + 0.5 \cdot X_{L57}$$

$$X = 225 \ \Omega \text{ prim} + 0.5 \cdot (681, 4 \ \Omega \text{ prim})$$

$$X = 565, 5 \ \Omega \text{ prim}$$

Como lo describe la Tabla 2.3 para valores de resistencia de falla entre fases y fase tierra en zona 2 se tomarían los siguientes valores.

$$R(f - f) = 565, 5 \ \Omega \text{ prim}$$

$$R(f - t) = 452, 4 \ \Omega \text{ prim}$$

3.5.3.2 Ajustes con característica Mho

Para los ajuste tipo Mho se considera el ángulo del relé el cual es de 85° . Los valores corregidos de alcance son muy similares debido a que el ángulo característico de línea es $83, 29^\circ$ y no varia significativamente al corregirlo.

Ajuste en zona 1

Se mantiene el criterio del 80%.

$$Z_r = 0.8 \cdot Z_{L45}$$

$$Z_r = 0.8 \cdot (226,38 \Omega \text{ prim})$$

$$Z_r = Z_c = 181,18 \Omega \text{ prim}$$

Ajuste en zona 2

Para un alcance del 50% en zona 2 se tiene:

$$Z_r = Z_{L45} + 0.5 \cdot Z_{L57}$$

$$Z_r = 226,38 \Omega \text{ prim} + 0.5 \cdot (695 \Omega \text{ prim})$$

$$Z_r = Z_c = 574 \Omega \text{ prim}$$

3.5.4 Ajuste de protección para relevador 2 de la línea L57

3.5.4.1 Ajustes con característica poligonal

Ajuste en zona 1

Se considera el alcance del 80% de la línea L_{57} , así:

$$X = 0.8 \cdot X_{L57}$$

$$X = 0.8 \cdot (681,4 \Omega \text{ prim})$$

$$X = 545,08 \Omega \text{ prim}$$

Los valores de resistencia de falla entre fases y fase tierra son:

$$R(f - f) = 0.8 \cdot (545,08 \Omega \text{ prim}) = 436,07 \Omega \text{ prim}$$

$$R(f - t) = X = 545,08 \Omega \text{ prim}$$

Ajuste en zona 2

Se toma como criterio el 50% de la línea adyacente L_{78} . En la barra 7 el transformador aporta una corriente intermedia, así, las corrientes que fluyen se ven mediante una falla trifásica: $I_{infeed} = 0,970 \text{ kA}$, $I_{relé} = 0,080 \text{ kA}$.

$$K = 12, 13$$

$$X = X_{L57} + 0.5(1 + K)X_{L78}$$

$$X = 681, 4 \ \Omega \ prim + 0.5 \cdot (13, 13)(114, 3 \ \Omega \ prim)$$

$$X = 1431, 21 \ \Omega \ prim$$

Los alcances resistivos son:

$$R(f - f) = 1431, 21 \ \Omega \ prim$$

$$R(f - t) = 1145 \ \Omega \ prim$$

3.5.4.2 Ajustes con característica Mho

Así mismo en base a los criterios presentados para esta característica se calcula los alcances.

Ajuste en zona 1

Alcance al 80% de línea L_{57} .

$$Z_r = 0.8 \cdot Z_{L57}$$

$$Z_r = 0.8 \cdot (695 \ \Omega \ prim)$$

$$Z_r = Z_c = 559, 1 \ \Omega \ prim$$

Ajuste en zona 2

Alcance del 50% de línea L_{78} , considerando el efecto de fuente intermedia con; $K = 12, 13$.

$$X = Z_{L57} + 0.5 \cdot (1 + K)Z_{L78}$$

$$Z_r = 695 \ \Omega \ prim + 0.5 \cdot (13, 13)(115, 1 \ \Omega \ prim)$$

$$Z_r = Z_c = 1450, 4 \ \Omega \ prim$$

3.6 Simulación del sistema de estudio

La Tabla 3.4 resume los valores de ajuste calculados en la sección anterior, los mismo que son usados para implementar en simulación. Los valores están representados en unidades óhmicas primarias y secundarias.

Relevador 1			Relevador 2		
Ajuste Poligonal					
Zona 1					
Alcance X	180 Ω_{prim}	3,6 Ω_{sec}	Alcance X	545,08 Ω_{prim}	10,90 Ω_{sec}
R(f-f)	144 Ω_{prim}	2,88 Ω_{sec}	R(f-f)	436,07 Ω_{prim}	8,72 Ω_{sec}
R(f-t)	180 Ω_{prim}	3,6 Ω_{sec}	R(f-t)	545,08 Ω_{prim}	10,90 Ω_{sec}
Zona 2					
Alcance X	565,5 Ω_{prim}	11,31 Ω_{sec}	Alcance X	1431,2 Ω_{prim}	28,62 Ω_{sec}
R(f-f)	565,5 Ω_{prim}	11,31 Ω_{sec}	R(f-f)	1431,2 Ω_{prim}	28,62 Ω_{sec}
R(f-t)	452,4 Ω_{prim}	9,05 Ω_{sec}	R(f-t)	1145 Ω_{prim}	22,90 Ω_{sec}
Ajuste Mho					
Zona 1					
Alcance Z_c	181,18 Ω_{prim}	3,62 Ω_{sec}	Alcance Z_c	559,1 Ω_{prim}	11,18 Ω_{sec}
Zona 2					
Alcance Z_c	574 Ω_{prim}	11,48 Ω_{sec}	Alcance Z_c	1450,4 Ω_{prim}	29,01 Ω_{sec}
Factor de compensación					
k_r	0,5	k_x	0,5	K_0	0,5 $0\angle^\circ$

Tabla 3.4: Ajustes propuestos poligonales y Mho para coordinación de protecciones

Los resultados simulados se ven en las figuras siguientes, donde se ilustra la coordinación de protección con las dos características de operación propuestas.

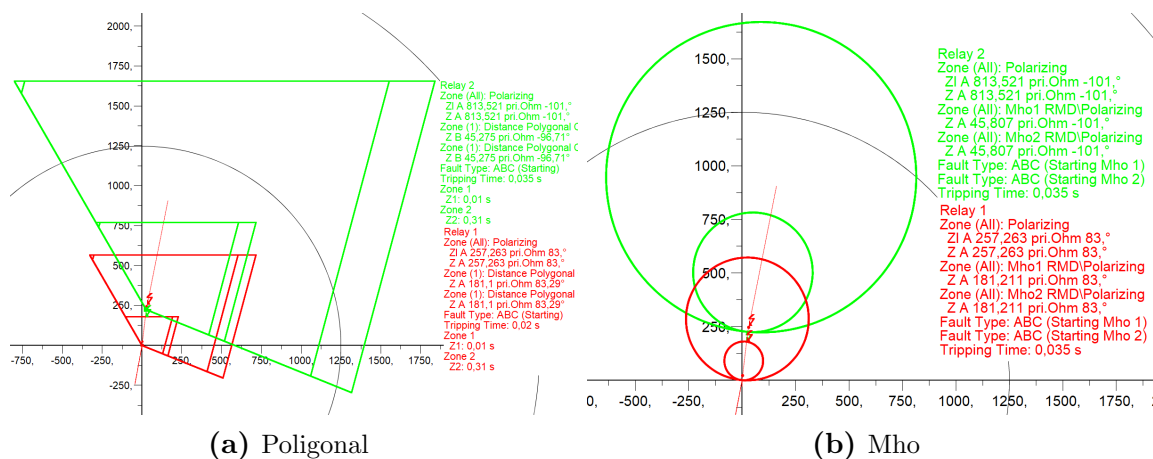


Figura 3.12: Impedancia vista por el relé R_1 y R_2 para una falla trifásica al 80% de la línea L_{45}

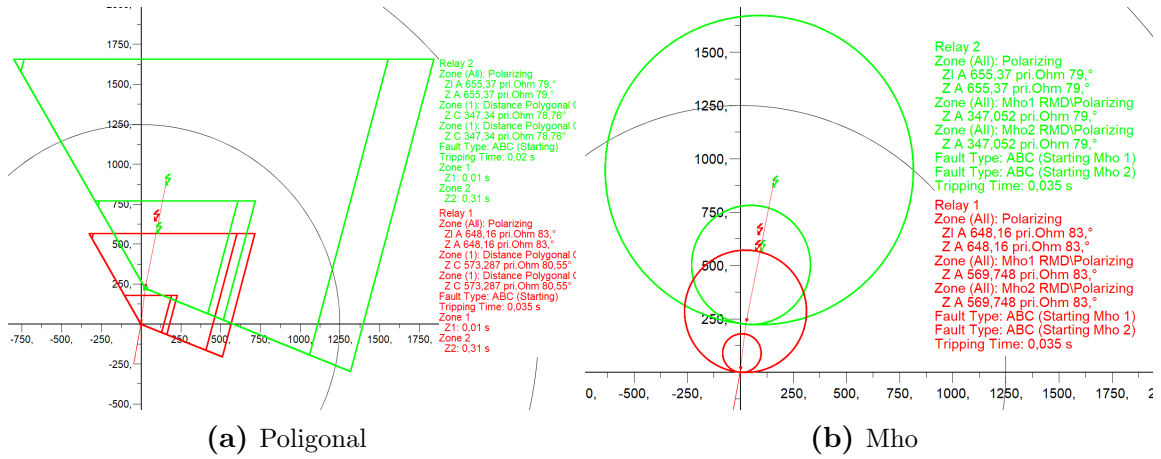


Figura 3.13: Impedancia vista por el R_1 y R_2 para una falla trifásica al 50% de la línea L_{57}

Las Figuras 3.12, 3.13 muestran los resultados obtenidos de los ajustes, con la simulación de fallas trifásicas al 80% y 50% de las líneas L_{45} y L_{57} respectivamente. En estas ilustraciones se observa como la impedancia medida por el relé R_1 cae en el límite de las zonas 1 y 2. Mientras que el relé R_2 distingue fallas para el 50% de la línea L_{45} en zona 1 y zona 2 con unidades de fase-tercera y fase-fase en zona 1 y 2 respectivamente. En este ultimo análisis el R_2 cumple su función de protección principal ya que las detecta la falla en zona 1 con las unidades monofásicas.

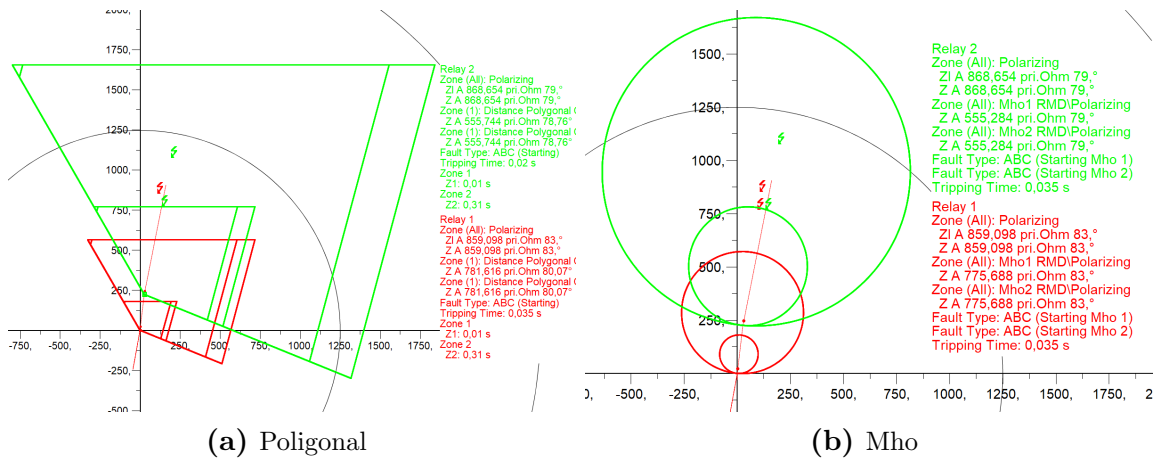


Figura 3.14: Impedancia vista por el relé R_1 y R_2 para una falla trifásica al 80% de la línea L_{57}

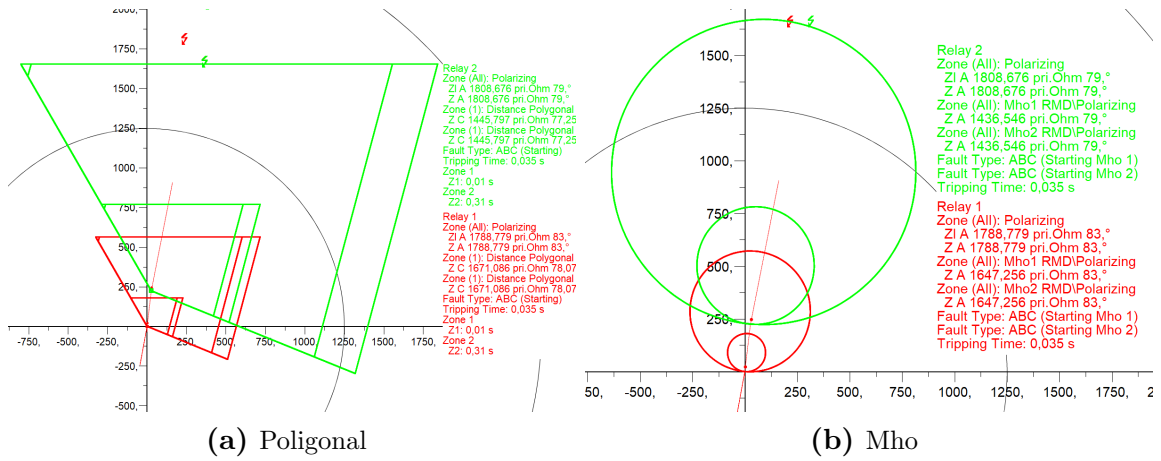


Figura 3.15: Impedancias vistas por el relé R_1 y R_2 para una falla trifásica al 50% de la línea L_{78}

Por otra parte, en las figuras 3.14, 3.15 se observa las impedancias vistas por los relés R_1 y R_2 para fallas trifásicas al 80% y 50% de las líneas L_{57} y L_{78} respectivamente. Para las zonas del R_2 no se presentan problemas de alcance para fallas al 80% ni para fallas al 50% de la siguiente línea ya que en este último se considero la influencia de la corriente intermedia que aporta corriente a la falla desde la barra 7.

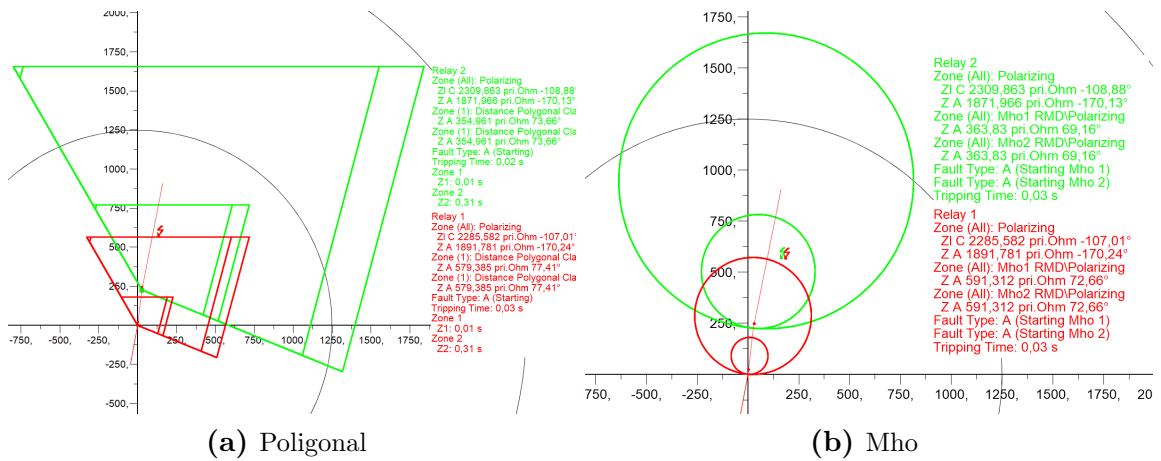


Figura 3.16: Impedancias vistas por el relé R_1 y R_2 para una falla monofásica al 50% de la línea L_{57} con resistencia de falla de 15Ω

Finalmente se produce una falla monofásica con resistencia de falla de 15Ω al 50% de la línea L_{57} . La impedancia vista por la característica poligonal se mantiene en el límite de la zona 1 del relevador 1, sin embargo, en la característica Mho la impedancia de falla es vista solo por el relevador 2. Como resultado a las condiciones planteadas; con la característica poligonal el relé R_1 cumple su función de respaldo.

Por el contrario, con la característica Mho, el relé R_2 es quien se activará únicamente sin respaldo de R_1 .

La Tablas 3.5 y 3.6 resumen los resultados de las impedancias vistas por cada relé para todas las fallas probadas en el sistema. También se indica con que unidad mide la impedancia de falla.

Falla	% de línea	$ ZR1 $	fase	$ ZR2 $	fase	Ud. Medida
1f-3f	80% L45	181,1	83,29	45,275	-96,71	Fase-tierra
2f	80% L45	230,422	123,25	957,044	79	Fase-Fase
1f-3f	50% L57	573,287	80,55	347,34	78,76	Fase-tierra
2f	50% L57	679,317	114,09	498,543	127,54	Fase-tierra
1f-3f	80% L57	781,616	80,07	555,744	78,76	Fase-tierra
2f	80% L57	919,174	112,87	730,905	121,67	Fase-tierra
1f	50% L78	1262,15	79,33	1036,432	78,47	Fase-tierra
3f	50% L78	1671,086	78,07	1445,797	77,25	Fase-tierra
2f	50% L78	1946,35	110,22	1747,541	113,59	Fase-tierra
1f RF	50% L57	579,385	77,41	354,961	73,66	Fase-tierra

Tabla 3.5: Impedancias de falla vistas con la característica poligonal

Con la característica poligonal se puede ver en la mayoría de los casos que mide el mismo valor de impedancia para fallas monofásicas y trifásicas.

Falla	% de línea	$ ZR1 $	fase	$ ZR2 $	fase	Ud. Medida
1f	80% L45	181,013	83	45,164	-96,21	Fase-tierra
3f	80% L45	181,211	83	45,807	-101	Fase-tierra
2f	80% L45	611,413	45,39	957,044	79	Fase-Fase
1f	50% L57	576,817	78,41	347,572	78,55	Fase-tierra
3f	50% L57	569,748	83	347,052	79	Fase-tierra
2f	50% L57	1728,131	44,39	1443,286	42,98	Fase-tierra
1f	80% L57	786,471	78,05	556,043	78,59	Fase-tierra
3f	80% L57	775,688	83	555,284	79	Fase-tierra
2f	80% L57	2325,242	44,25	2054,905	42,86	Fase-tierra
1f	50% L78	1270,545	77,87	1037,454	78,26	Fase-tierra
3f	50% L78	1647,256	83	1436,546	79	Fase-tierra
2f	50% L78	4923,719	43,89	4721,315	42,48	Fase-tierra
1f RF	50% L57	591,312	72,66	363,83	69,16	Fase-tierra

Tabla 3.6: Impedancias de falla vistas con la característica Mho

CAPÍTULO 4

RESULTADOS EXPERIMENTALES EN LABORATORIO

4.1 Introducción

En este capítulo se obtienen los resultados experimentales para todos los casos de estudio propuestos anteriormente en el capítulo 3. El objetivo es evaluar en los equipos físicos las mismas condiciones empleadas en las simulaciones, y verificar que cumplen los tiempos de respuesta esperados. Para el uso de los equipos es necesario la manipulación de los software *Digsi5* para configurar el relé, y *Test Universe* para realizar las pruebas. Para esto, en la primera parte se expone el procedimiento para el uso de estos software. El procedimiento se explica en su forma general para el uso de los mismos en referencia a [3].

4.2 Creación del modelo de prueba en software Digsi5

El software *Digsi5* es una herramienta que permite la conectividad con los dispositivos *SIPROTEC5*. El archivo con los ajustes del equipo puede ser creado sin la necesidad de una conexión física, y la transferencia se puede realizar mediante

conexión USB o por los canales de comunicación, mediante un cable Ethernet.

4.2.1 Primeros pasos

Al iniciar un proyecto nuevo el primer paso es agregar el equipo con el que se va a trabajar, ya sea por medio del código largo o corto. Para el relé de distancia 7SA86 se coloca el código corto (P1A150332) y seguidamente se comprueba la importación del equipo. Aparecerá una ventana como la Figura 4.1, aquí, se ha seleccionado la plantilla de aplicación básica.

Figura 4.1 shows the configuration window for adding new equipment. The window is titled "Añadir nuevo equipo" and contains four steps:

- Paso 1: Seleccione un tipo de equipo.** This step is active. It prompts the user to enter a short product code (TNS) or a long product code. The code entered is "75A86-DAAA-AAQ-QAAAAQ-AK0111-13111B-AAC000-000AC0-CH1BA1". There is a "Comprobar" button and a "Configurar" button.
- Paso 2: Seleccione las propiedades del equipo.** This step is inactive. It includes dropdown menus for:
 - Variante de tensión: DC 60 V a 250 V, AC 100 V a 230 V
 - Propiedad determinante: <No está disponible ninguna característica importante para el tipo del equipo sel...
 - Selección de los puntos funcionales: Base + 150
 - Interfaz Ethernet integrado (Puerto J): Solo conexión DIGSI 5
- Paso 3: Seleccione una plantilla de aplicación.** This step is active. It shows a table of application templates. The "Básico" template is selected.
- Paso 4: Seleccione las versiones de comunicación.** This step is inactive. It includes a dropdown menu for "Configuración de comunicación" set to "V07.90".

At the bottom, there is a checkbox labeled "Se abre el editor de Hardware y protocolos después de establ..." which is checked.

Plantilla de aplicación	Configuración	Estado
Básico	V07.90.23	●
Básico	V07.84.03	●
DIS RMD línea aérea, redes puestas a tierra	V07.90.23	●
DIS RMD línea aérea, redes puestas a tierra	V07.84.03	●
DIS redes comp./aisl., con RE	V07.90.23	●

Figura 4.1: Configuración de nuevo equipo

En información del dispositivo es recomendable seleccionar IEC61850 Edición 1, con el fin de no tener problemas de compatibilidad con el relé, como lo demuestra la Figura 4.2.

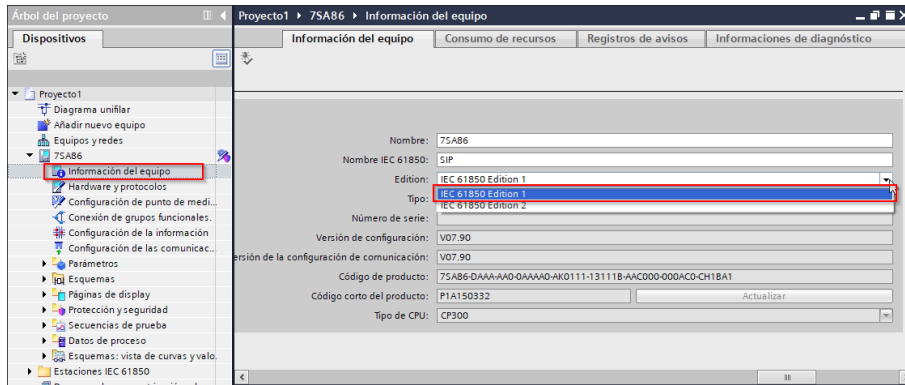


Figura 4.2: Información del dispositivo

Se configura los puntos de medida como; “trifásico + IN” para la intensidad y, “3tens.fase - tierra ” para el voltaje, la Figura 4.3 indica esto. Este ajuste normalmente viene por defecto y para las pruebas realizadas se consideraron los mismos.

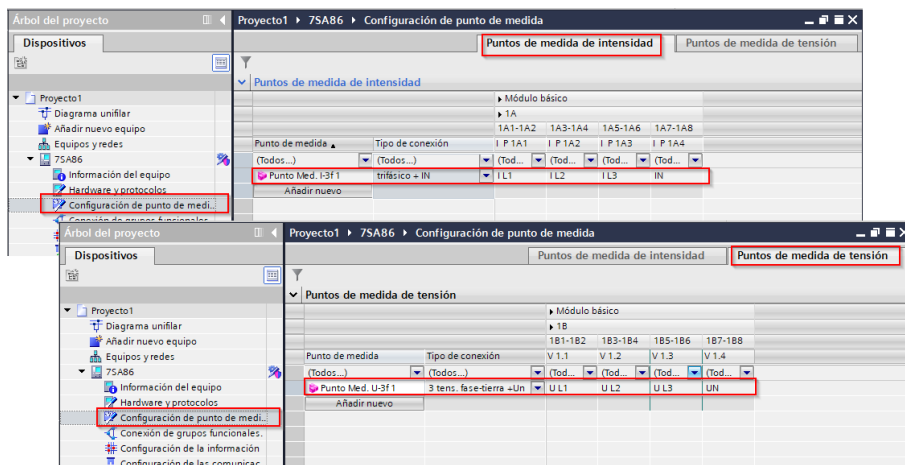


Figura 4.3: Configuración del punto de medida

En el apartado de “Conexión de grupos funcionales”, para los casos de estudio propuestos se mantiene la configuración preestablecida. Mientras que, en el siguiente segmento que se ve en la Figura 4.4, se configura la información donde se designa la activación las salidas binarias. Para los casos propuestos se establece una salida para la señal de arranque y una salida para la señal de disparo.

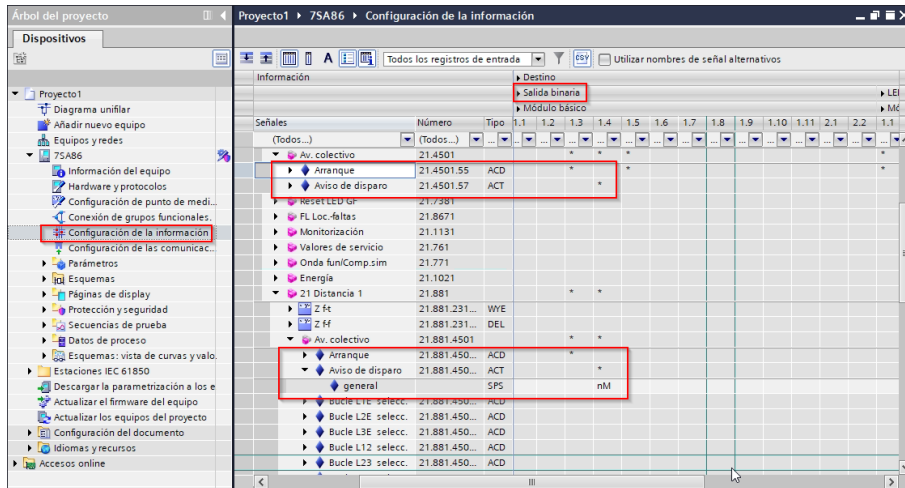


Figura 4.4: Configuración de la información

La “Configuración de las comunicaciones” permite visualizar las señales predefinidas por el programa, así como añadir nuevas señales de diferentes tipos para la comunicación entre relés.

Dentro de este estudio no se hizo uso de un ajuste adicional en esta parte, por lo que, se recomienda para los fines propuestos en este documento mantener los ajustes por defecto.

4.2.2 Parámetros del sistema de prueba

En esta sección se presentan los ajustes correspondientes a las características del equipo de protección. En “Ajustes del equipo” se presentan los ajustes generales para el sistema de prueba, como se ve en la Figura 4.5.

De los ajustes presentes, es posible modificar a conveniencia entre todo el grupo de parámetros. Se hace énfasis en la configuración del modo primario o secundario ya que los arreglos posteriores se ajustarán a esto. También en el bloque “General” se debe colocar la frecuencia nominal, que en los casos estudiados se modificó a 60 Hz.

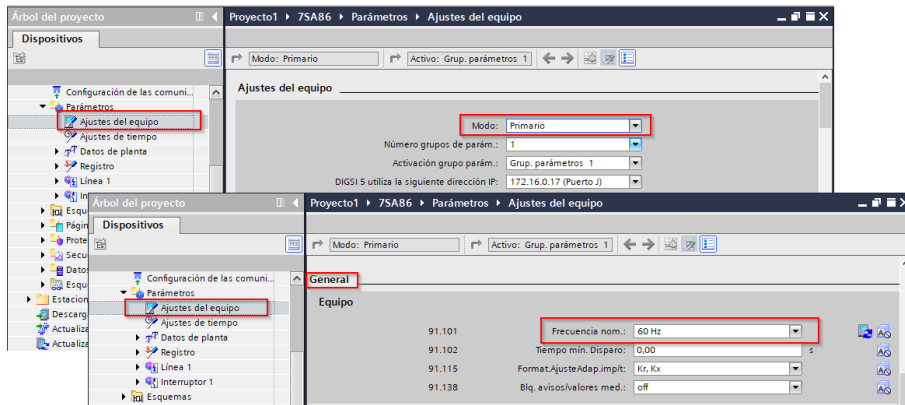


Figura 4.5: Ajustes del equipo

En “Ajustes de tiempo” puede establecer la fecha y hora adecuada para que el equipo lo integre en su operación.

En “Datos de planta” se tienen tres secciones de ajuste como se aprecia en la Figura 4.6, el primero corresponde a la sección general, donde se define el arreglo de las fases. En los siguientes secciones se configura el TC y TP, donde se establecen los parámetros del valor nominal primario y el secundario. Para los demás parámetros dentro de estas secciones se recomienda mantener los valores preestablecidos.

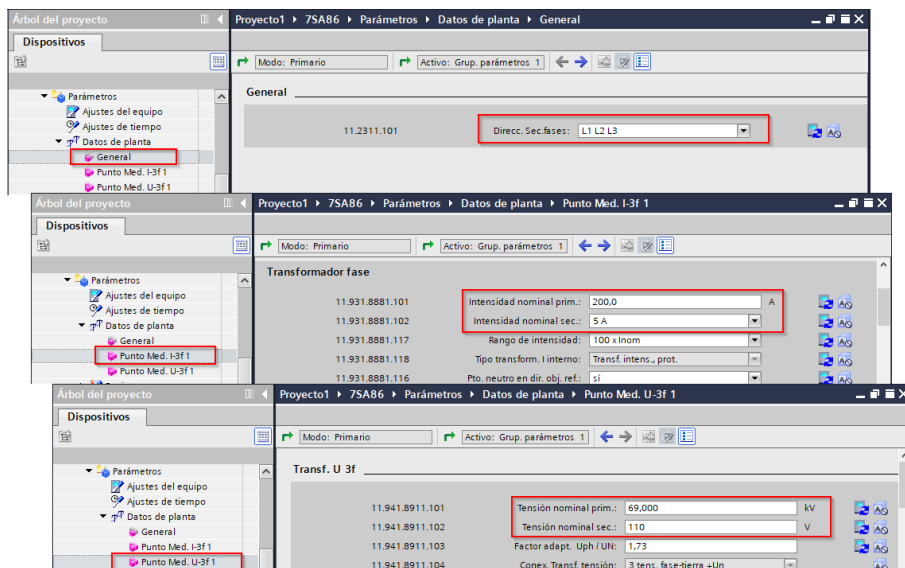


Figura 4.6: Datos de planta

4.2.3 Parámetros de la línea

Es necesario configurar los parámetros correspondientes de la línea a proteger, así como los alcances de las zonas de protección. Pero antes, se debe añadir la función de protección de distancia desde las librerías, como se puede observar en la Figura 4.7. Esta función debe ser arrastrada hacia la segmento línea para agregarla al equipo y luego configurarla.

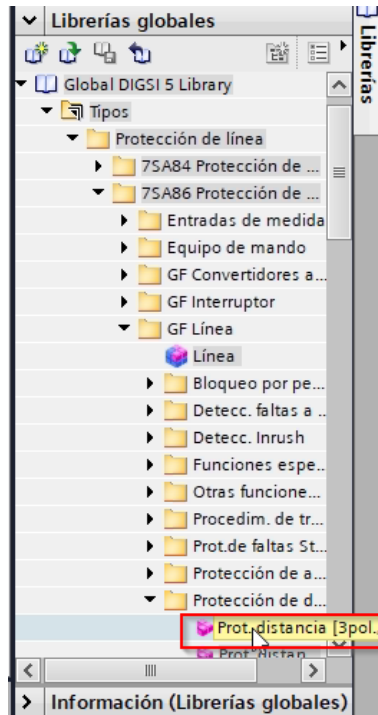


Figura 4.7: Adición de la función de distancia

Se puede observar que añadida la función de distancia, se despliegan las secciones de ajuste. En el ajuste general se introduce los valores nominales primarios tanto del TC como del TP. Los datos de la línea se introducen a continuación, donde los datos principales son la reactancia en Ω/km , la longitud de la línea, el ángulo de la línea y los factores de compensación residual k_r y k_x . Ver Figura 4.8.

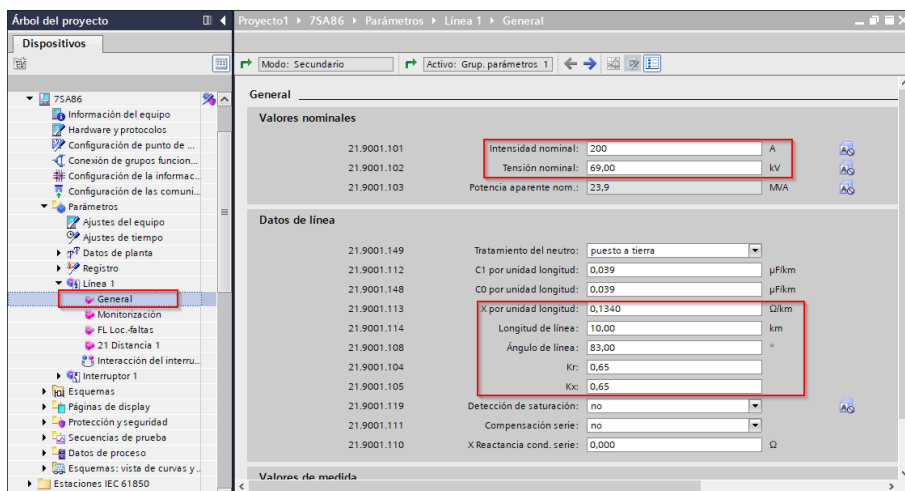


Figura 4.8: Ajuste general de la línea

En la sección que se muestra en la Figura 4.9, se ajusta el valor umbral de voltaje abierto. Para los casos de estudio se ha colocado 30 V, esto por recomendación del manual Siemens. Recuerde que este valor se verá modificado según se haya configurado el modo primario o secundario, es decir, este mismo valor para un modo primario será de aproximadamente 19 V.

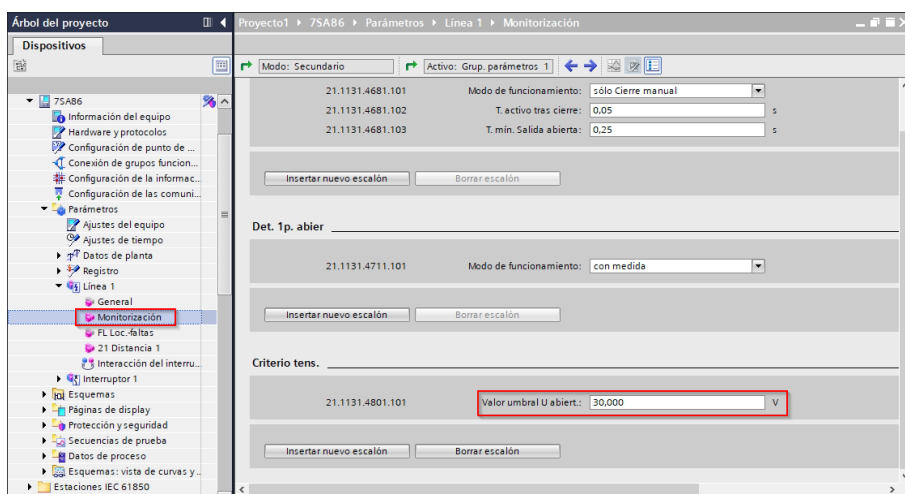


Figura 4.9: Configuración monitorización

Para el ajuste de localización de faltas se mantiene con los ajustes por defecto. En la sección siguiente presentada por la la Figura 4.10, es donde se configuran los alcances de las zonas de protección. Hay que tener en cuenta los valores umbrales de voltaje y de corriente, además se recomienda usar 0,5 A como corriente de fase mínima para un modo secundario. Sin embargo, este último valor se puede modificar al mínimo según sea necesario cuando se realice la prueba de disparo.

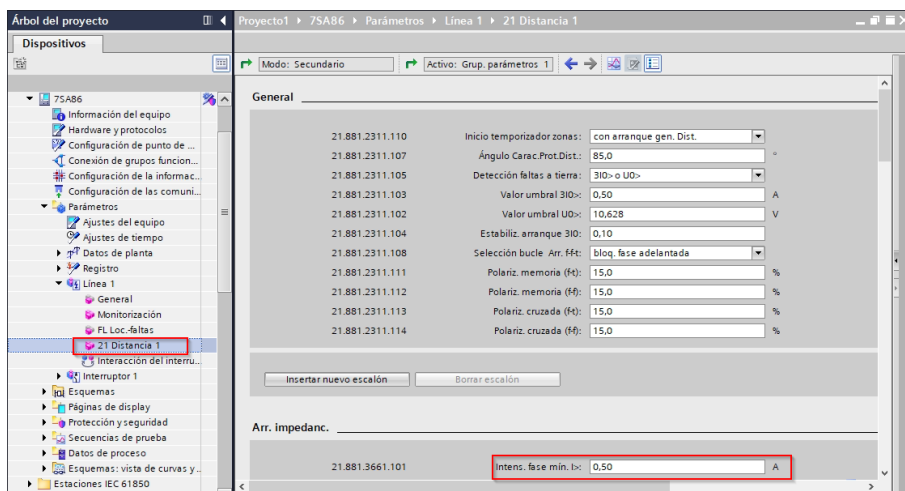


Figura 4.10: Configuración general de la función de distancia

Las zonas de protección que se van a usar deben estar activas, para así colocar los valores calculados correspondientes al alcance X y las resistencias de fase-fase y fase-tierra. La Figura 4.11 muestra el bloque de ajuste para una característica poligonal.

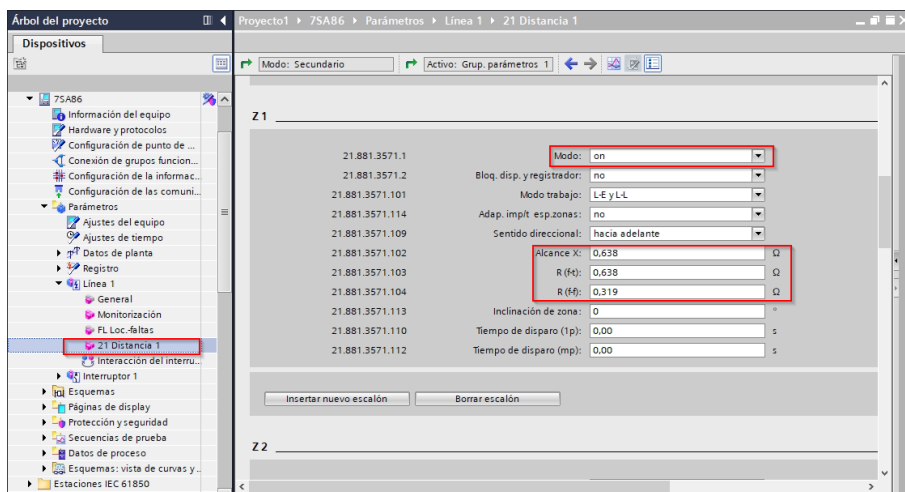


Figura 4.11: Configuración de las zonas de protección

Para configuración de zonas de protección tipo Mho se debe seleccionar la opción "Insertar nuevo escalón", aquí presenta varias opciones de inserción de bloques tal como se puede observar en la Figura 4.12. Se selecciona el tipo Mho para así configurar el alcance de la zona y el tiempo de disparo del relé como indica la Figura 4.13. Este proceso se repite dependiendo del número de zonas que se requieran añadir. Cuando se añada la característica Mho es prudente que se desactive las zonas poligonales o se las elimine.

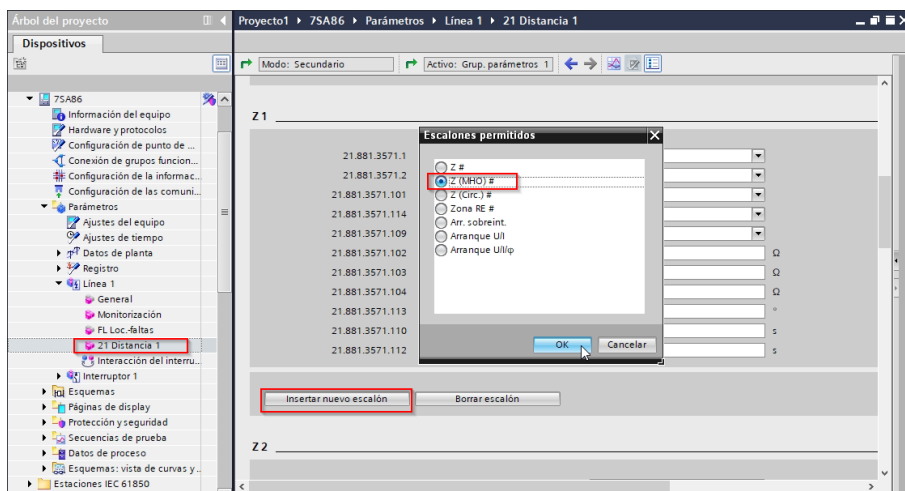


Figura 4.12: Insertar zona tipo Mho

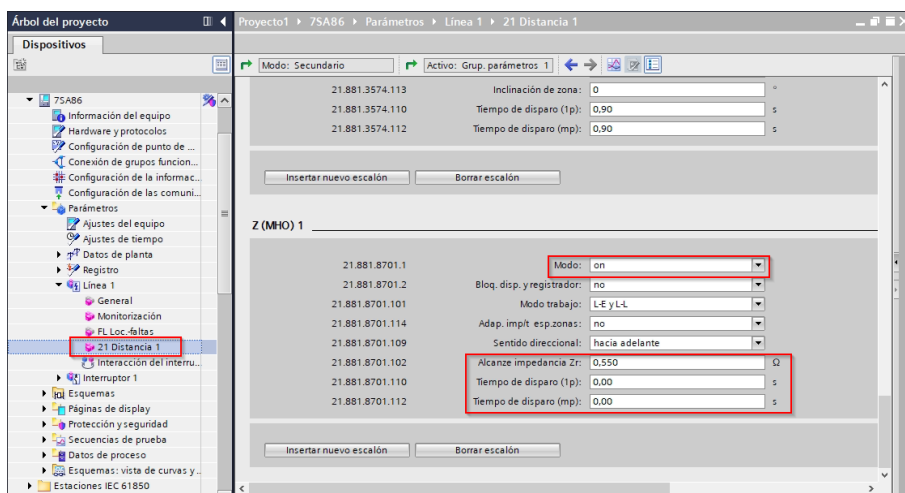


Figura 4.13: Configuración de la zona tipo Mho

4.2.4 Páginas del display

En esta parte se configura lo que se va a visualizar en la pantalla del relé. Tal como la Figura 4.14, para acceder a esta configuración se posiciona en el grupo de display y se selecciona la opción de “Incluir nueva página”. En propiedades se le designa un nombre y se selecciona como página propuesta. Luego se diseña el esquema con el que se está trabajando, y para esto, se da un clic derecho dentro de la pantalla en blanco, después se selecciona la opción de incluir elementos de la biblioteca, para acceder a la simbología que contiene los elementos comúnmente usados en un SEP.

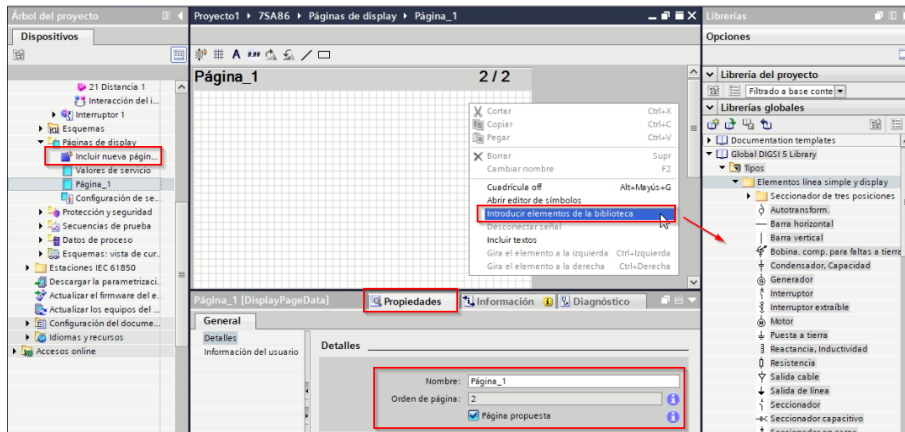


Figura 4.14: Elementos de biblioteca

Después de configurado el esquema, se añaden las señales a los elementos de acción. En este caso se añade una señal al interruptor, para esto, se accede a la pestaña “Señales” ubicada en la parte lateral derecha de la ventana y se despliega las opciones de interruptor. En la parte de control se selecciona la señal de orden con retroaviso, como se muestra en la Figura 4.15. Se arrastra esta señal hacia el interruptor del esquema y este debe cambiar a color verde lo que indica que la señal fue cargada correctamente. También es recomendable arrastrar los valores de servicio ubicados en la parte de línea, para que se visualicen en la pantalla como se indica en la Figura 4.16.

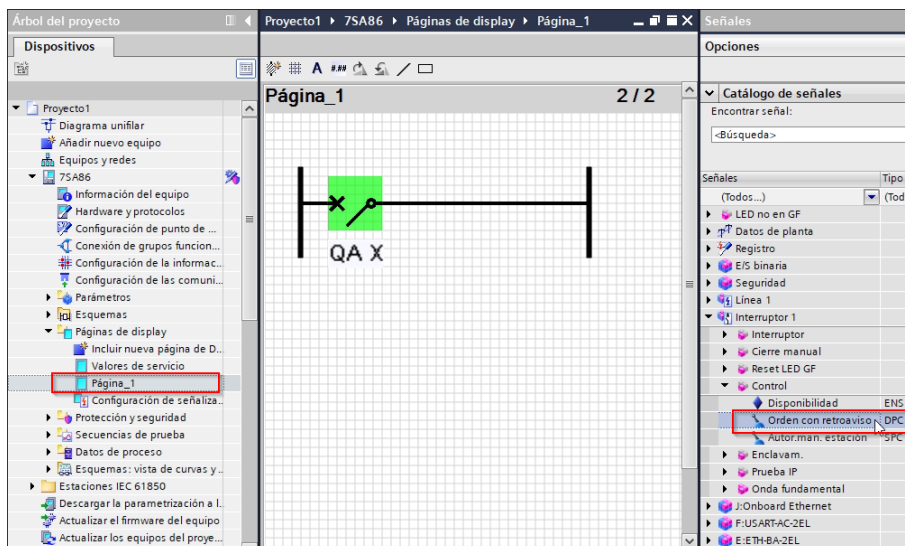


Figura 4.15: Adición de señal del interruptor

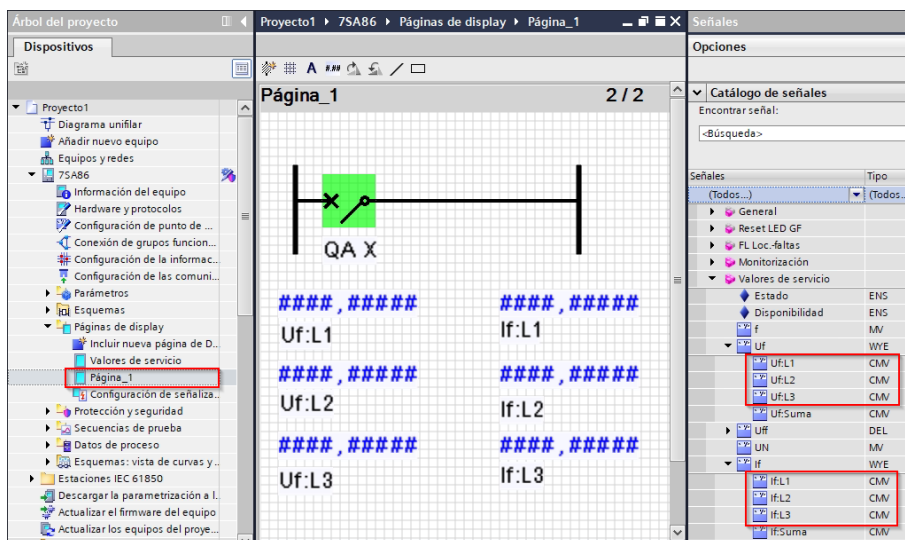


Figura 4.16: Adición de valores de servicio

4.2.5 Ajustes y asociación con equipos físicos

En hardware y protocolos se asigna una dirección IP, una dirección de la máscara de subred y una dirección IP portal preajustada a los puertos que se van a utilizar, en la Figura 4.17 se puede visualizar un ejemplo de la configuración del puerto J.

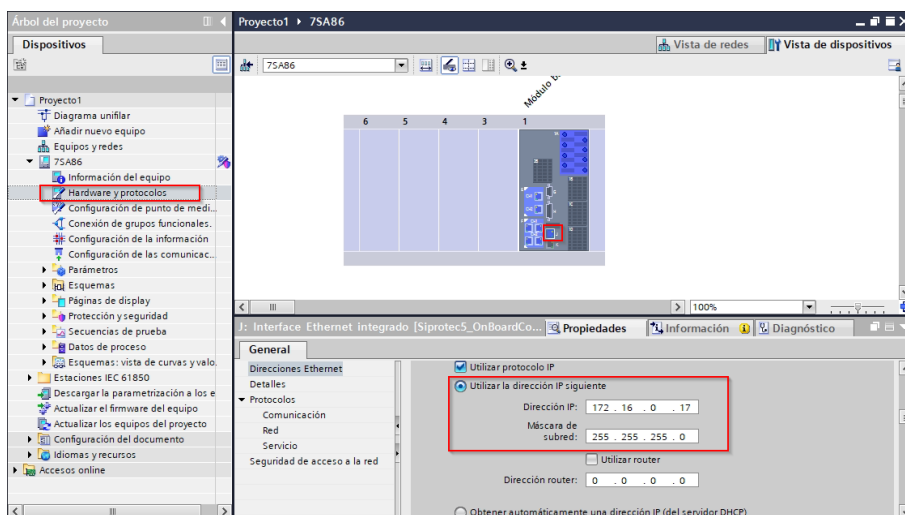


Figura 4.17: Configuración del puerto J

Para cargar la configuración al relé es necesario conectar la PC mediante un cable Ethernet o USB al puerto configurado del relé. Para las configuraciones tratadas en este documento, se usó únicamente el puerto J y el cable Ethernet para la

transferencia de datos al relé. Es recomendable antes de transferir los datos, verificar que la conexión es correcta al hacer *ping* con el relé mediante la consola de Windows. Para transferir el programa se hace clic derecho en el relé y se selecciona la opción de cargar, así como indica la Figura 4.18. Finalmente se requiere incluir la contraseña de seguridad que da paso a la transferencia del archivo.

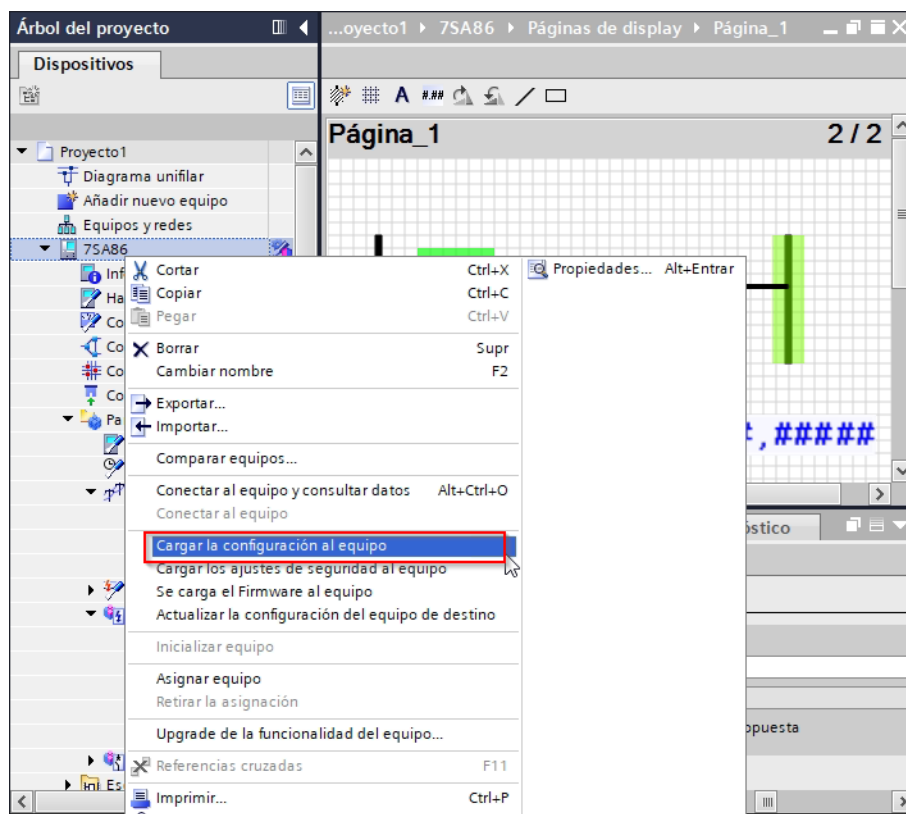


Figura 4.18: Carga de la configuración al equipo

Una vez cargados los ajustes al relé se debe exportar el archivo RIO para luego ser importado en el software de la maleta de pruebas *Test Universe*. Esto evita configurar nuevamente los valores de corriente, voltaje y los alcances de las zonas de protección. Para extraer el RIO se hace clic derecho en el relé y se selecciona la opción de exportar, en este se desplegará una ventana con diferentes opciones como se ve en la Figura 4.19. Se selecciona el formato y la carpeta en la que se desea guardar, una vez hecho esto se selecciona la opción de Exportar con lo que se tendrá el archivo RIO listo para ser cargado al *Test Universe*

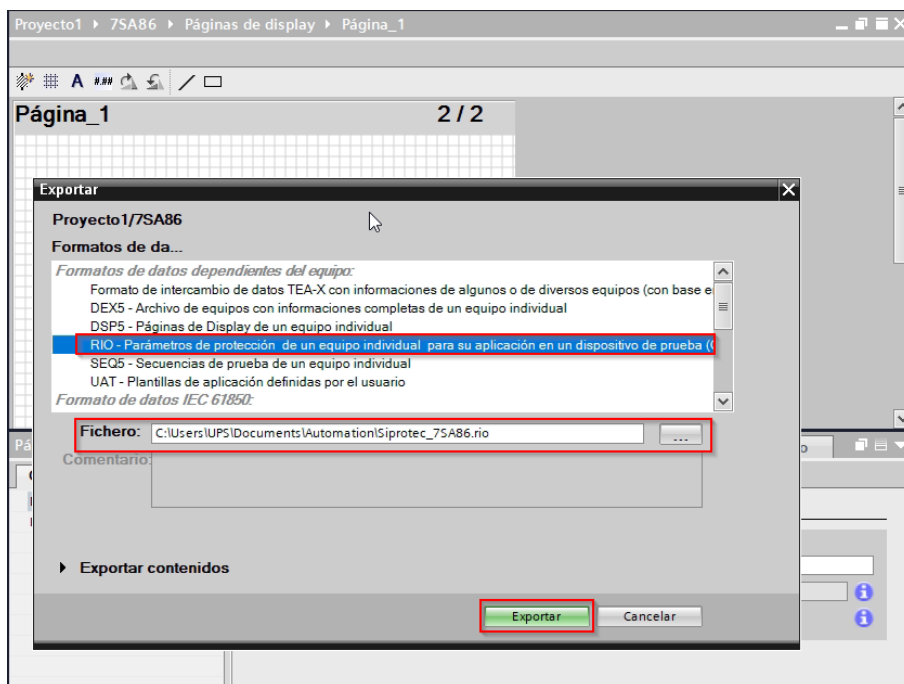


Figura 4.19: Exportar archivo RIO

4.3 Ajuste de maleta de pruebas CMC 356 OMICROM

La unidad de prueba CMC 356 es manipulable a través del software *Test Universe* (Figura 4.20), que contiene herramientas que permiten al usuario realizar pruebas a una variedad de equipos de protección. Con la instalación del software también se incluye el manual de referencia. La CMC 356 contiene; *Salida de voltaje de 4x300 V, Salida monofásica de voltaje 300 V, Aux DC con salida de 3 rangos entre 0-264 V, Salida binaria 4 contactos, Entrada analógica DC 0-±1 mA, 0-±10 V, Salida de corriente A y B 3x32 A, Enchufe combinado 8 polos de voltaje y corriente (mismas a borneras de voltaje y corriente de grupo A), 10 entradas binaria/analógica en 5 grupos e interruptor de corriente [25].*



Figura 4.20: Ventana principal del *Test Universe*

4.3.1 Generalidades de operación

Se debe asociar la unidad de pruebas con la PC, para esto, se puede usar un cable USB o un Ethernet, ambos son compatibles. En la pantalla principal del *Test Universe* en la sección “configurar” se encuentra enlazado el software *OMICRON Device Link* nombrado como “Asociación de unidad de prueba” la cual permite establecer la comunicación. En este punto cuando el equipo este encendido, se debe asociar siguiendo los pasos de referencia, después tendrá una conexión automática con la PC e indicará la pantalla tal como la Figura 4.21.



Figura 4.21: Confirmación de conexión de maleta

En todos los módulos o documentos de prueba es común ver las funciones

“Equipo en prueba” y “Configuración de hardware” ubicados en la parte superior izquierda, ver Figura 4.22.

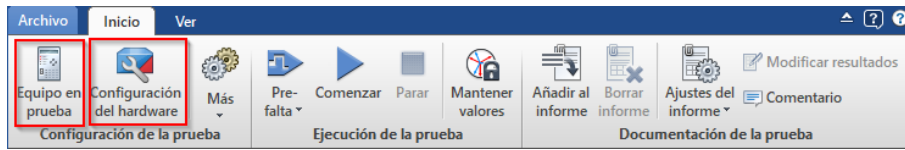


Figura 4.22: Menú inicial de módulos

Para crear o ingresar un archivo de prueba se presiona en “Equipo de prueba”, se puede crear o importar un archivo de prueba. La Figura 4.23 indica el resultado de importar un archivo de prueba tipo RIO. Los valores dentro de la función “Distance” se importan como valores secundarios, y es importante verificar que la longitud de línea sea la correcta, ya que en este valor no está incluida la resistencia de la línea.

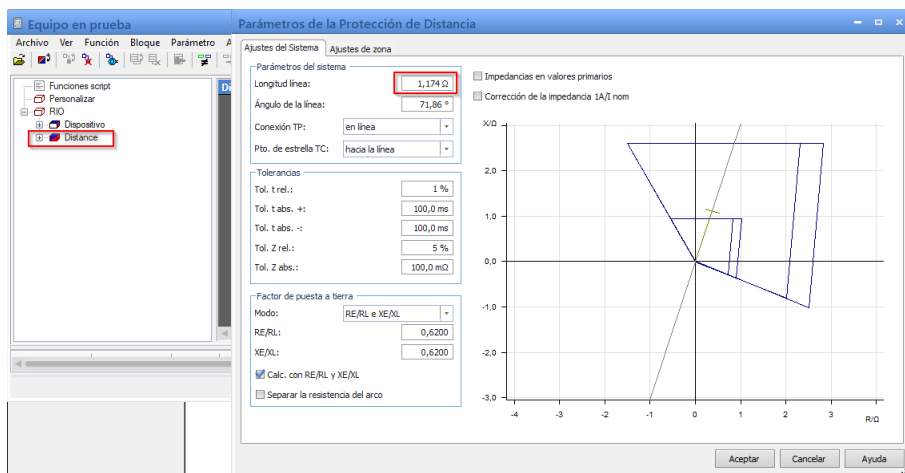


Figura 4.23: Importación de archivo RIO

Al presionar la función “Configuración de hardware” se puede configurar las salidas y entradas físicas de la maleta CMC. En la pestaña “General” se encuentran las características operativas del sistema. Al pulsar en “Configurar” se mostrará la ventana con los distintos arreglos para las salidas de voltaje y corriente de la maleta.

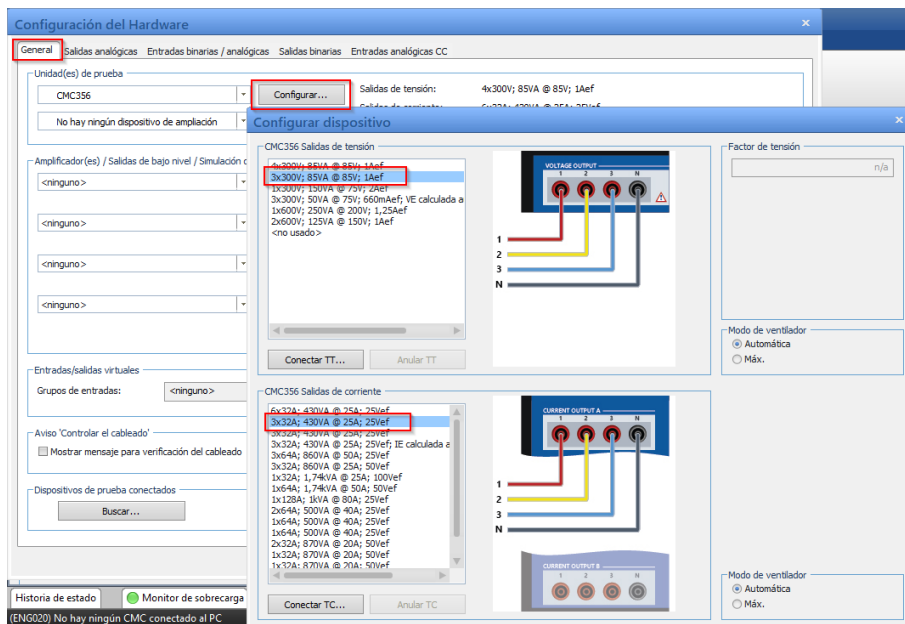


Figura 4.24: Configuración de las salidas analógicas

En la Figura 4.25 se ve la pestaña “Salidas analógicas”, aquí se encuentran las señales que se añaden por defecto según el arreglo escogido anteriormente. También se indica los puertos de voltaje y corriente, en los que se seleccionan los canales que se van a usar.

En “Entradas binarias/analógicas”, se encuentran las señales de entrada del módulo. En esta parte se eligen las señales que se van a usar del grupo presentado en el listado, según se haya configurado en el relé. Para este caso se dispone de 2 señales; Arranque y disparo.

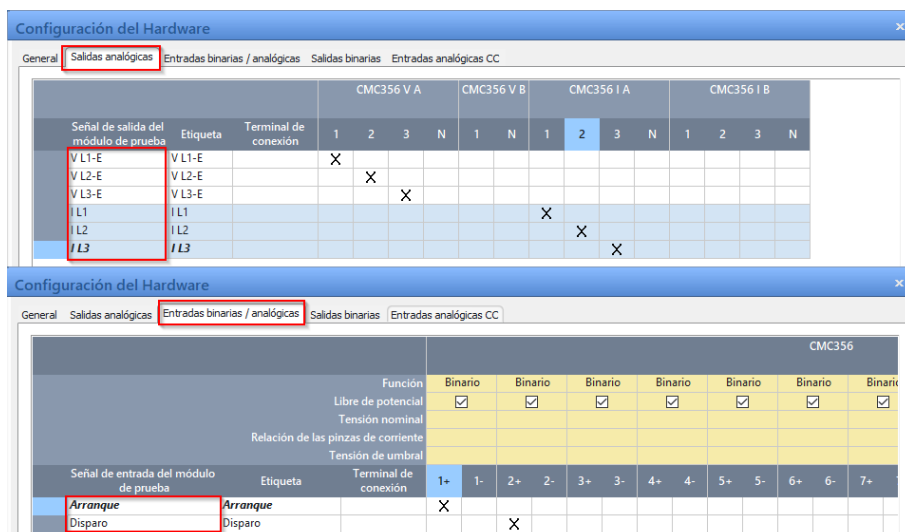


Figura 4.25: Selección de puertos de salidas analógicas

Las salidas binarias y Entradas analógicas CC se configuran automáticamente cuando ajusta la pestaña General.

4.3.2 Módulos para pruebas de relé de distancia

Los módulos son en general herramientas que inyectan corrientes y voltajes de forma peculiar a equipos de protección específicos. De esta forma cada modulo puede probar un equipo en particular, así para la protección de distancia se dispone de módulos propios que contienen librerías para verificar sus ajustes. Sin embargo, también es posible disponer de otros módulos para probar distintas protecciones, pero es aconsejable siempre el uso de los módulos diseñados exclusivamente para la protección que se evalúa. Los módulos pueden iniciarse de forma autónoma o insertándolos en un documento de prueba de la sección “Control Center” [25].

4.3.2.1 QuickCMC

Es una herramienta de prueba básica que emite valores constantes analógicos y digitales. Permite probar casi todas las funciones de protección y revisar el estado de las entradas binarias. En este contexto, este módulo se utiliza con el fin de verificar que los valores de inyección de corriente y voltaje sean los correctos, a su vez, se asegura una correcta conexión de los equipos

Cuando se inicia esta herramienta se presenta una pantalla tal como la Figura 4.26, en la pestaña *Inicio* se encuentra toda la interfaz de ajuste y manipulación de parámetros de la unidad de pruebas. En la pestaña *Ver* se encuentran las características de vista y diseño del ensayo, es importante en esta parte considerar las unidades en las que se va a trabajar, sean unidades primarias, secundarias, segundos, ciclos, entre otros.

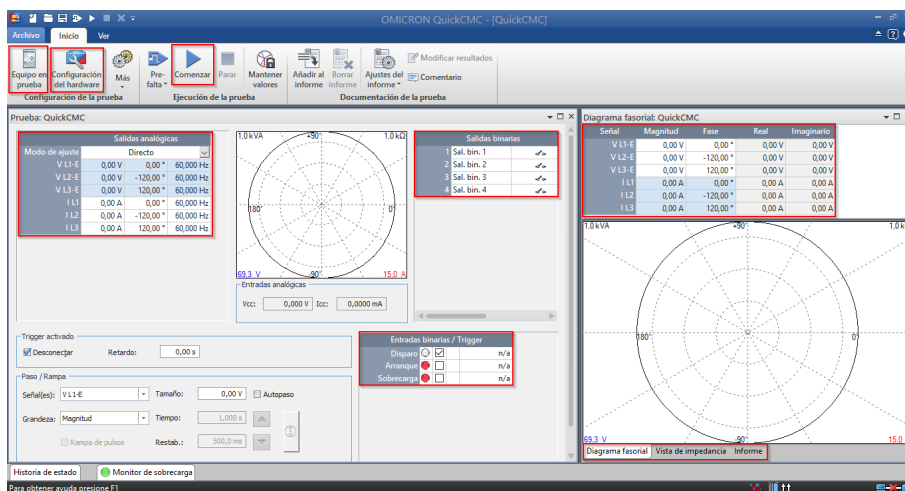


Figura 4.26: Módulo *QuickCMC*

En “Salidas analógicas” se colocan los valores de prueba. Se puede elegir el modo de ajuste entre ellos; directamente los voltajes y corrientes; las potencias o, las impedancias de falla. En los bloques “Entradas binarias/Trigger” y “Salidas binarias” se puede visualizar el estado de las señales usadas. En la parte derecha se puede visualizar la ventana del diagrama fasorial, con el bloque que describe los voltajes y corrientes de prueba. También se encuentra la vista para el diagrama de impedancias y el informe que describe el resultado de las pruebas.

4.3.2.2 Advance Distance

Este módulo contiene las librerías para la protección de distancia en su forma más completa. Incluye funciones avanzadas para pruebas de disparo, búsqueda y verificación. En la prueba de disparo se escoge el punto de prueba y se evalúan los tiempos de disparo. Con la prueba de búsqueda se determinan los alcances de las zonas automáticamente, y la prueba de verificación sitúa líneas con puntos de verificación entre las líneas proyectadas y los límites de las zonas [3].

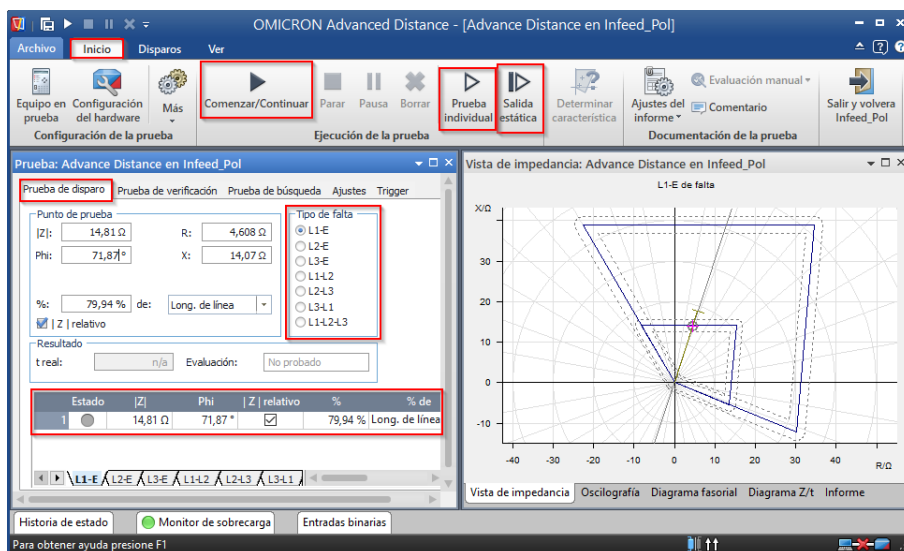


Figura 4.27: Módulo *Advanced Distance*

La ventana principal del módulo *Advance Distance* es como la Figura 4.27. En el panel inferior se encuentran los diferentes tipos de prueba y los ajustes para las mismas. También se encuentra el tipo de falla a tratar y finalmente los resultados del ensayo.

Para realizar la prueba de disparo se debe indicar el tipo de falla y colocar el punto de prueba. En este último se puede ingresar directamente la impedancia de falla con su ángulo, o también porcentualmente a la longitud de línea o de las zonas. Después en la pestaña *Disparos* se presiona en la herramienta “disparo”, y el disparo es añadido. Finalmente de vuelta a la ventana principal se habilitan las funciones para comenzar la prueba. Si se presiona en “Comenzar/Continuar” se realizan todas las pruebas que han sido añadidas. Con “Prueba individual” se ejecuta únicamente la prueba que ha sido seleccionada. La “Salida estática” funciona como switch, es decir, se debe pulsar para comenzar la prueba y para terminar la prueba.

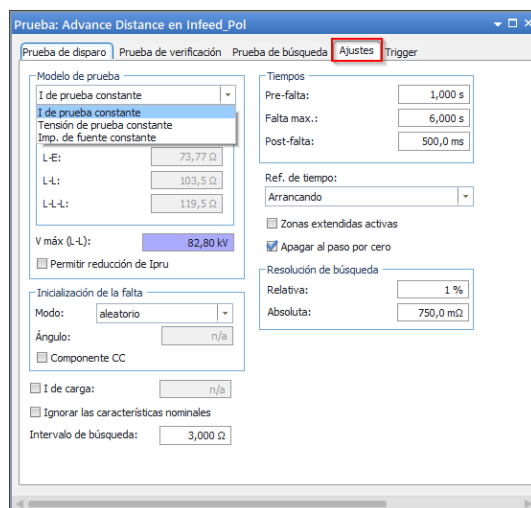


Figura 4.28: Ajustes del modo de prueba

Es importante que cuando se añada el punto de prueba se verifique en el diagrama de impedancias, el punto de prueba, este debe permanecer con una forma de cruz de color rojo para una falla posible. Si por el contrario se ve una forma circular morada se debe verificar los voltajes o corrientes de prueba empleados en la pestaña “Ajustes” (Figura 4.28) ya que esto indica problemas en la prueba.

Las pruebas se pueden realizar con corriente, voltaje o impedancia constante, por defecto se encuentra corriente constante.

4.3.2.3 State Sequencer

Su funcionalidad es idéntica al módulo *QuickCMC*, se puede decir que es una plantilla que permite añadir múltiples Quicks. El menu inicial de este módulo es como la Figura 4.29. En la parte superior se encuentra el bloque con los voltajes y corrientes de prueba, además el tiempo “Trigger” que es el tiempo de cambio de un estado a otro. En la parte inferior se encuentra el bloque de Salidas analógicas que es en donde se ingresa los valores de prueba, en esta parte también se puede indicar el modo de ajuste, para el ejemplo de la imagen se ha ajustado con impedancia y voltaje constante.

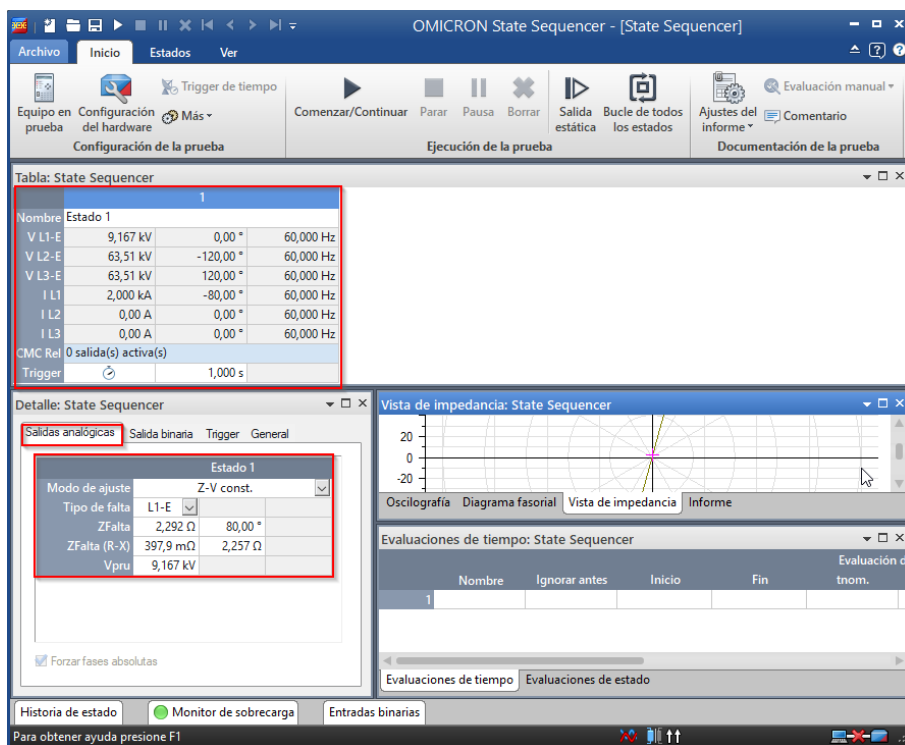


Figura 4.29: Módulo *State Sequencer*

Desde la pestaña “Estados” se puede añadir o eliminar un estado. Las pruebas pueden ser ejecutadas todas al mismo tiempo o también con la salida estática se puede probar individualmente cada una.

Particularmente el uso de este módulo también se usó para las pruebas del relé de distancia. Se utilizó con el fin de comprobar el ajustes de dos relé al mismo tiempo, ya que, el módulo *Advance Distance* solo permite hacer pruebas de un solo relé a la vez. En los posteriores resultados se detallara como se emplea este módulo para que cumpla lo descrito.

4.4 Prueba de respuesta de acción para caso de efecto infeed

Las Figuras 4.30 y 4.31 presentan las zonas de protección poligonales y tipo Mho respectivamente, como resultado de las pruebas realizadas en laboratorio para el caso planteado. La Tabla 4.1 y 4.2, resume los resultados de las pruebas de disparo para tres fallas monofásicas; al 80% de la línea, 80% de la línea con resistencia de falla de 18 Ω, y falla con el efecto infeed.

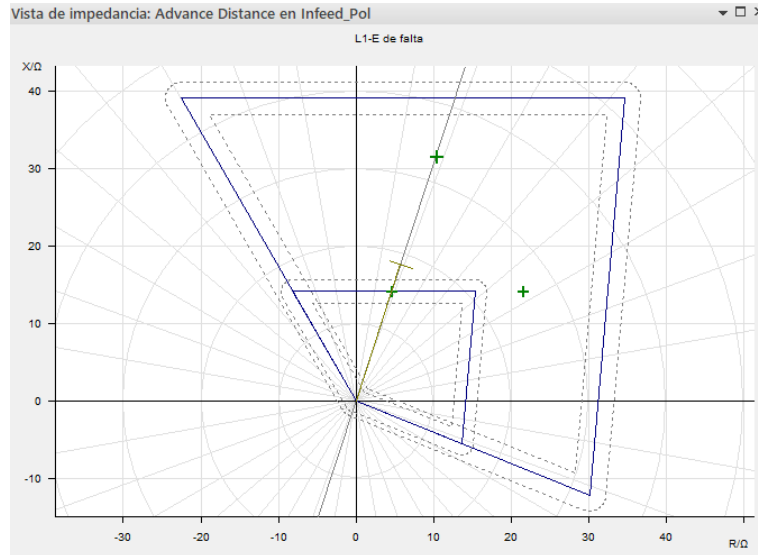


Figura 4.30: Respuesta poligonal al efecto infeed con Advance Distance

Prueba de disparo: tipo de falta L1-E							
$ Z $	Phi	% línea	tnom.	treal	Desvi.	Ipru:	Resultado
14,82Ω	71,86°	80%	0	31,30 ms	31,30 ms	400 A	correcta
25,72Ω	33,02°	138,4%	0,3 s	313 ms	4,433%	400 A	correcta
33,05Ω	71,65°	178,43%	0,3 s	313 ms	4,9%	400 A	correcta

Tabla 4.1: Informe de pruebas CMC para caso de efecto infeed - relé R_A poligonal

Las pruebas de disparo se realizaron con corriente de prueba “Ipru” de 400 A. La respuesta de acción en zona 1 con la característica poligonal mantiene un tiempo respuesta como el programado “tnom.”, si se desprecia el tiempo de switcheo “Desvi.” Se verifica similares resultados para los pruebas en zona 2.

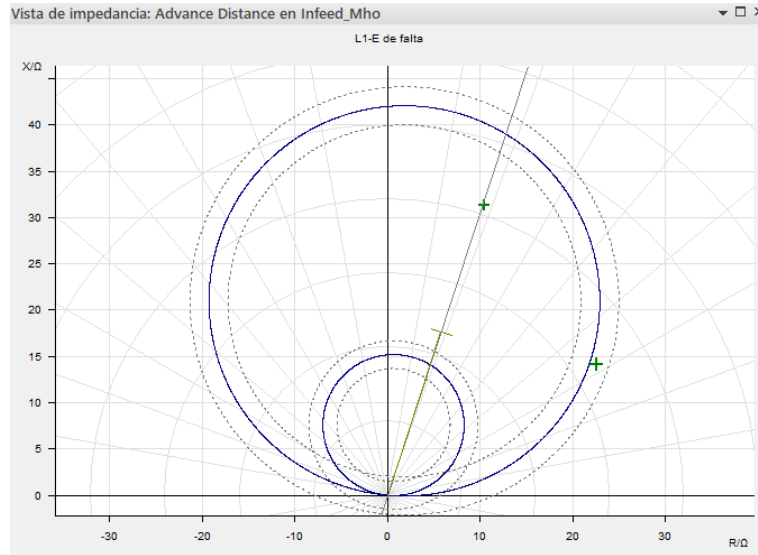


Figura 4.31: Respuesta Mho al efecto infeed con Advance Distance

Prueba de disparo: tipo de falta L1-E							
$ Z $	Phi	% línea	tnom.	treal	Desvi.	Ipru:	Resultado
33,06Ω	71,64°	178,45%	0,3 s	319 ms	6,633%	400 A	correcta
26,63Ω	31.90°	143,75%	no disparó	no disparó	n/a	400 A	correcta

Tabla 4.2: Informe de pruebas CMC para caso de efecto infeed - relé R_A Mho

En la característica Mho la protección también dispara en el tiempo programado para zona 1 y 2. Para el caso ubicado fuera de la zona la protección no dispara lo cual es correcto.

Es de esperarse estos resultados para las dos características en base a los análisis que se discutieron en el capítulo 2.

Circuit breaker 1		1/1	Circuit breaker 1		1/1
01.01.2011		02:08:00.607	01.01.2011		02:28:29.825
Line 1:21Distance prot. 1			Line 1:21Distance prot. 1		
Z 2:Pickup		phs A	Z (MHO) 2:Pickup		phs A
		gnd			gnd
		forward			forward
PUtime		365ms	PUtime		370ms
Line 1:21Distance prot. 1			Line 1:21Distance prot. 1		
Z 2:Operate		on	Z (MHO) 2:Operate		on
Trip time		297ms	Trip time		299ms
Fault distance		17.8km	Fault distance		17.8km
Quit			Quit		

(a) Zona 2 - Poligonal

(b) Zona 2 - Mho

Figura 4.32: Respuesta al efecto de fuente intermedia del IED 7SA86 - Falla monofásica

La Figura 4.32 se presenta como resultado de la prueba del IED 7SA86 a la falla monofásica al 50% de la línea L2 en sus características poligonal y Mho.

4.5 Prueba de respuesta de acción para caso de líneas paralelas

Las figuras y tablas siguientes se presentan como resultado de las pruebas experimentales realizadas con los ajustes poligonal y Mho. Se puede apreciar las respuestas para la falla al 80% de la línea; sin resistencia de falla y con resistencia de falla de 8 Ω .

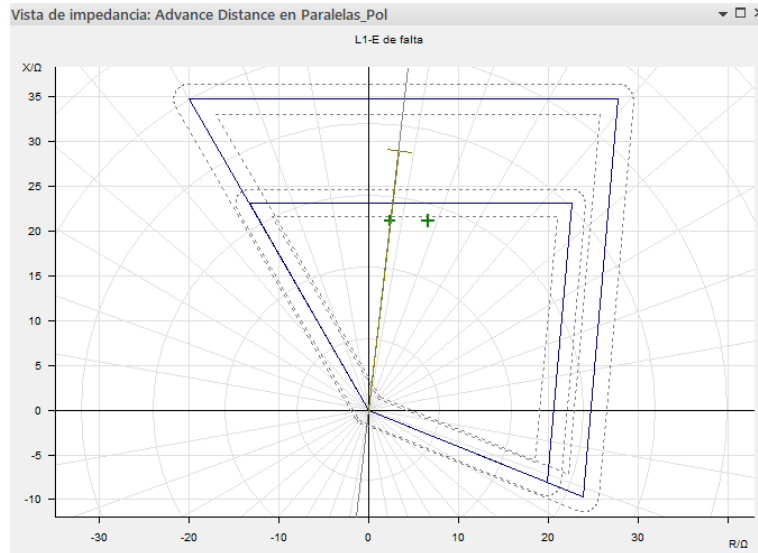


Figura 4.33: Respuesta poligonal al efecto de acople mutuo con Advance Distance

Las pruebas para este caso se realizaron con 800 A y los tiempos de respuestas como muestran los resultados son los esperados para las zonas.

Prueba de disparo: tipo de falta L1-E							
$ Z $	Phi	% línea	tnom.	treal	Desvi.	Ipru:	Resultado
21,15	$83,56^\circ$	72,76%	0 s	31,20 ms	31,20 ms	800 A	correcta
22,03	$72,64^\circ$	75,79%	0 s	31,20 ms	32,20 ms	800 A	correcta

Tabla 4.3: Informe de pruebas CMC para caso de acople mutuo - relé R_{L2} poligonal

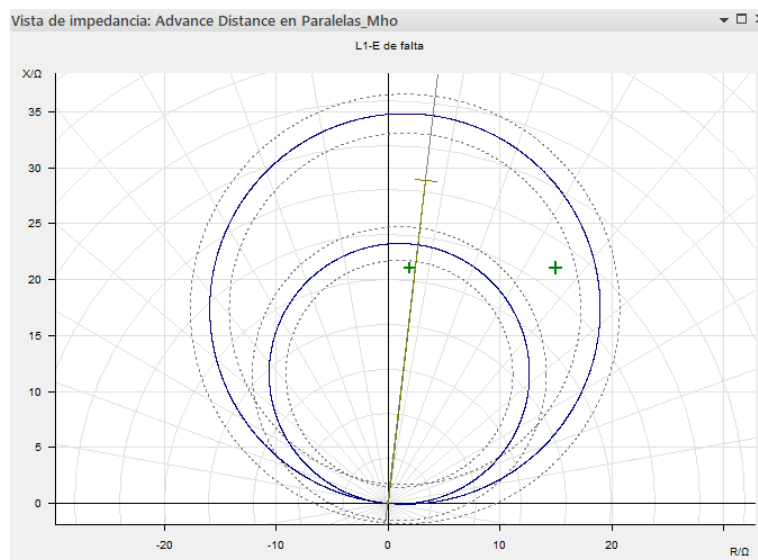


Figura 4.34: Respuesta Mho al efecto de acople mutuo con Advance Distance

Prueba de disparo: tipo de falta L1-E							
$ Z $	Phi	% línea	tnom.	treal	Desvi.	Ipru:	Resultado
21,11	84,73°	72,61%	0 s	28 ms	28 ms	800 A	correcta
25,82	54,54°	88,82%	0,3 s	326 ms	8,833%	800 A	correcta

Tabla 4.4: Informe de pruebas CMC para caso de acople mutuo - relé R_{L2} Mho

Como anteriormente se analizo estos casos, es de esperarse que la característica poligonal mantenga su respuesta de acción dentro de la zona uno, mientras que la característica Mho para las mismas condiciones de falla dispare en zona 2.

Circuit breaker 1		1/1
01.01.2011		04:55:24.044
Line 1:21Distance prot. 1		
Z 2:Pickup	phs A	
	gnd	
	forward	
PUtime		81ms
Line 1:21Distance prot. 1		
Z 1:Operate		on
Triptime		15ms
Fault distance		45.9km
		Quit

Circuit breaker 1		1/1
01.01.2011		04:49:34.663
Line 1:21Distance prot. 1		
Z (MHO) 2:Pickup	phs A	
	gnd	
	forward	
PUtime		82ms
Line 1:21Distance prot. 1		
Z (MHO) 1:Operate		on
Triptime		12ms
Fault distance		45.9km
		Quit

(a) Zona 1 - Poligonal

(b) Zona 1 - Mho

Figura 4.35: Respuesta al efecto de acoplamiento mutuo del IED 7SA86 - Falla monofásica

La Figura 4.35 se presenta como resultado de la prueba del IED 7SA86 a la falla monofásica al 80% de la línea L2 en sus características poligonal y Mho.

4.6 Prueba de respuesta de acción para coordinación

Como se indico en las secciones anteriores con el módulo *Advance Distance* se puede probar un solo equipo de protección. Por lo que en la práctica, para una coordinación lo que se hace es probar las respuestas de los relés individualmente. Esto permite comprobar que los equipos responden a lo esperado y así luego ser ubicados en campo. Si se requiere probar los dos equipos simultáneamente existe la necesidad de una maleta de prueba CMC 356 adicional. En este sentido, existe una limitante debido a que se dispone de una sola maleta de pruebas en los laboratorios donde se desarrollan estos estudios. Sin embargo, en este proyecto y para fines didácticos se plantea el procedimiento para probar los dos relés simultáneamente empleando solo la unidad CMC 356 disponible. Para llevar a cabo este procedimiento es necesario usar el módulo *State Sequencer*. Los detalles de como se lleva a cabo el proceso con este módulo se describen en la Sección 5.3 (En referencia a los parámetros del presente caso).

Los resultados posteriores presentan las pruebas individuales de cada relé tomadas desde el módulo *Advance Distance* en respuesta a las fallas que se analizaron en el Capítulo 3 para este caso. Los valores de impedancia para esta prueba se toman de las Tablas 3.5 y 3.6.

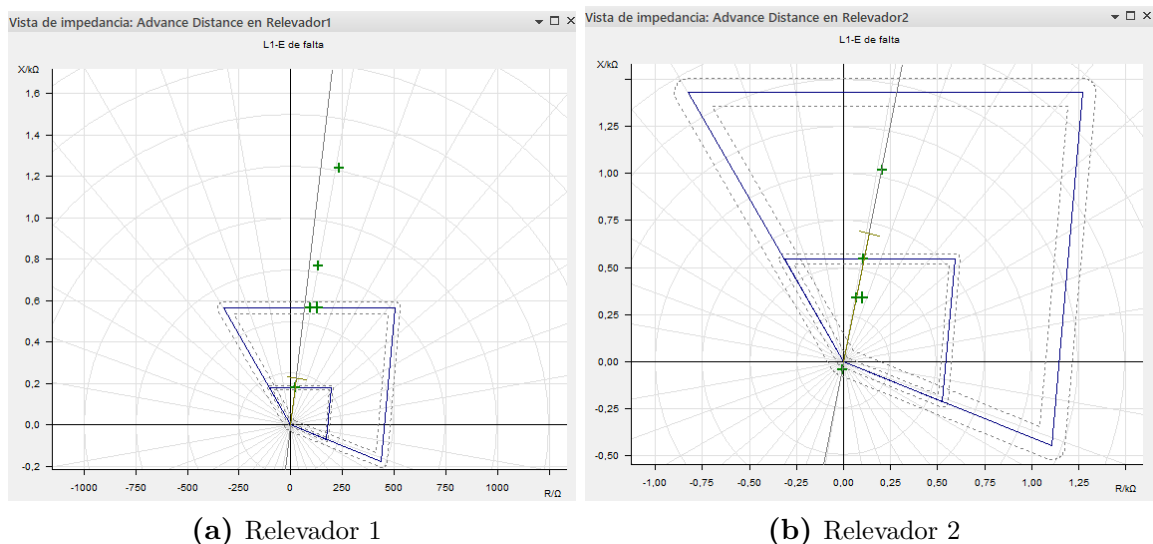


Figura 4.36: Respuesta poligonal para fallas monofásicas con Advance Distance

Prueba de disparo: tipo de falta L1-E							
$ Z $	Phi	% línea	tnom.	treal	Desvi.	Ipru:	Resultado
181, 1 Ω	83, 29°	79,9%	0 s	371 ms	371 ms	50 kV	correcta
573 Ω	80, 55°	253,09%	0,3 s	380,9 ms	26,97%	50 kV	correcta
781, 6 Ω	80, 07°	345,24%	no disparó	no disparó	n/a	50 kV	correcta
1, 262k Ω	79, 33°	557,49%	no disparó	no disparó	n/a	50 kV	correcta
579, 4 Ω	77, 41°	255,91%	0,3 s	375 ms	24,99%	50 kV	correcta

Tabla 4.5: Informe de pruebas monofásicas CMC para caso de coordinación-relé 1 poligonal

Prueba de disparo: tipo de falta L1-E							
$ Z $	Phi	% línea	tnom.	treal	Desvi.	Ipru:	Resultado
45, 28 Ω	-96, 71°	6,52%	no disparó	no disparó	n/a	50 kV	correcta
347, 2 Ω	78, 76°	50%	0 s	62,41 ms	62,41 ms	50 kV	correcta
555, 7 Ω	78, 76°	80,02%	0,3 s	277,2 ms	-7,6%	50 kV	correcta
1, 036k Ω	78, 47°	149,23%	0,3 s	335,3 ms	11,75%	50 kV	correcta
355 Ω	73,66°	51,11%	0 s	93,84 ms	93,84 ms	50 kV	correcta

Tabla 4.6: Informe de pruebas monofásicas CMC para caso de coordinación-relé 2 poligonal

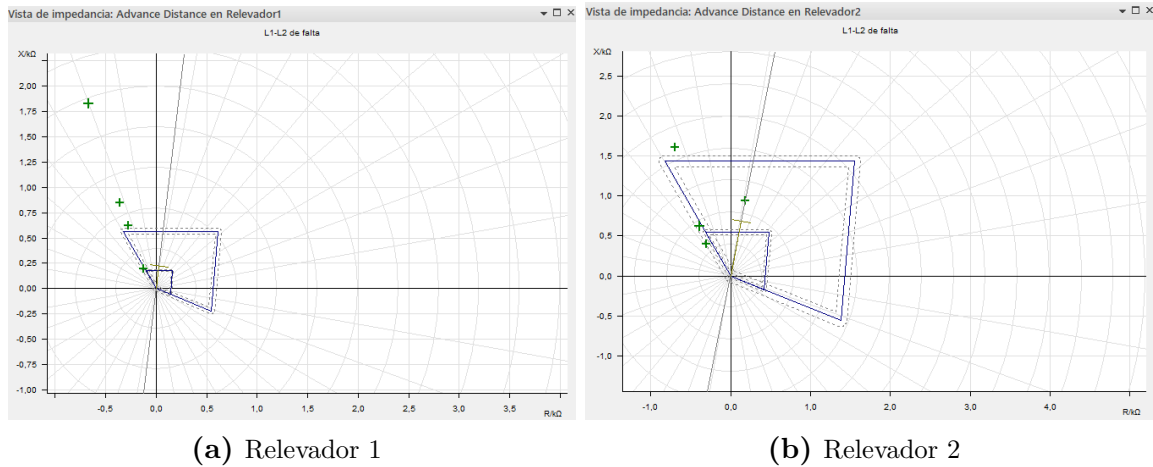


Figura 4.37: Respuesta poligonal para fallas bifásicas con Advance Distance

Prueba de disparo: tipo de falta L1-L2							
$ Z $	Phi	% línea	tnom.	treal	Desvi.	Ipru:	Resultado
230, 4 Ω	123, 25°	101,78%	no disparó	no disparó	n/a	50 kV	correcta
679, 3 Ω	114, 09°	300,05%	no disparó	no disparó	n/a	50 kV	correcta
919, 2 Ω	112, 87°	406%	no disparó	no disparó	n/a	50 kV	correcta
1, 946k Ω	110, 22°	859,70%	no disparó	no disparó	n/a	50 kV	correcta

Tabla 4.7: Informe de pruebas bifásicas CMC para caso de coordinación-relé 1 poligonal

Prueba de disparo: tipo de falta L1-L2							
$ Z $	Phi	% línea	tnom.	treal	Desvi.	Ipru:	Resultado
957 Ω	79°	137,8%	0,3 s	311 ms	3,66%	50 kV	correcta
498,5 Ω	127,54°	71,78%	no disparó	no disparó	n/a	50 kV	correcta
730,9 Ω	121,67°	105,24%	no disparó	no disparó	n/a	50 kV	correcta
1,748k Ω	113,59°	251,63%	no disparó	no disparó	n/a	50 kV	correcta

Tabla 4.8: Informe de pruebas bifásicas CMC para caso de coordinación-relé 2 poligonal

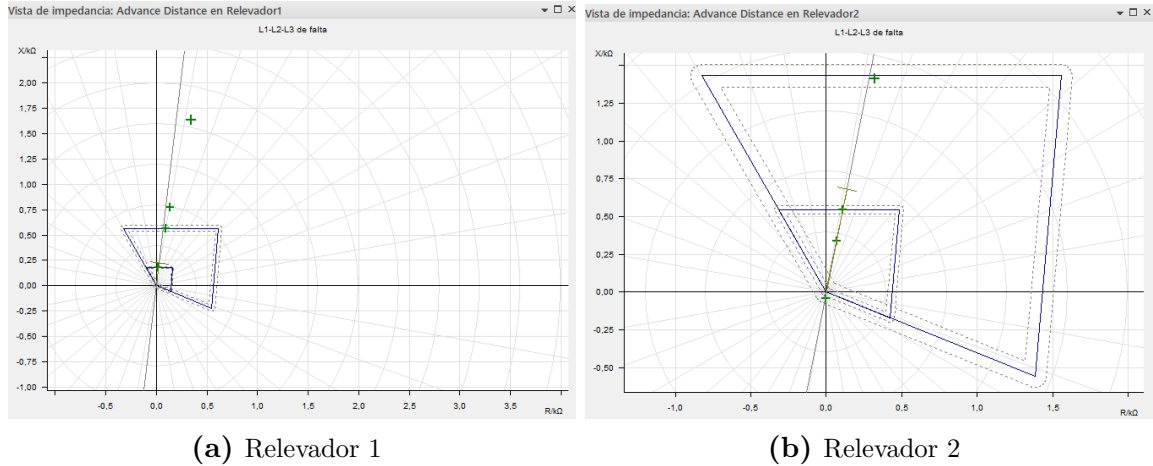


Figura 4.38: Respuesta poligonal para fallas trifásicas con Advance Distance

Prueba de disparo: tipo de falta L1-L2-L3							
$ Z $	Phi	% línea	tnom.	treal	Desvi.	Ipru:	Resultado
181,1 Ω	83,29°	79,9%	0 s	18,19 ms	18,19 ms	50 kV	correcta
573 Ω	80,55°	253,09%	0,3 s	240,9 ms	-19,71%	50 kV	correcta
781,6 Ω	80,07°	345,24%	no disparó	no disparó	n/a	50 kV	correcta
1,671k Ω	78,07°	738,11%	no disparó	no disparó	n/a	50 kV	correcta

Tabla 4.9: Informe de pruebas trifásicas CMC para caso de coordinación-relé 1 poligonal

Prueba de disparo: tipo de falta L1-L2-L3							
$ Z $	Phi	% línea	tnom.	treal	Desvi.	Ipru:	Resultado
45,28 Ω	-96,71°	6,52%	no disparó	no disparó	n/a	50 kV	correcta
347,2 Ω	78,76°	50%	0 s	62,41 ms	62,41 ms	50 kV	correcta
555,7 Ω	78,76°	80,02%	0,3 s	322 ms	7,33%	50 kV	correcta
1,446k Ω	77,25°	208,18%	0,3 s	289,4 ms	-3,537%	50 kV	correcta

Tabla 4.10: Informe de pruebas trifásicas CMC para caso de coordinación-relé 2 poligonal

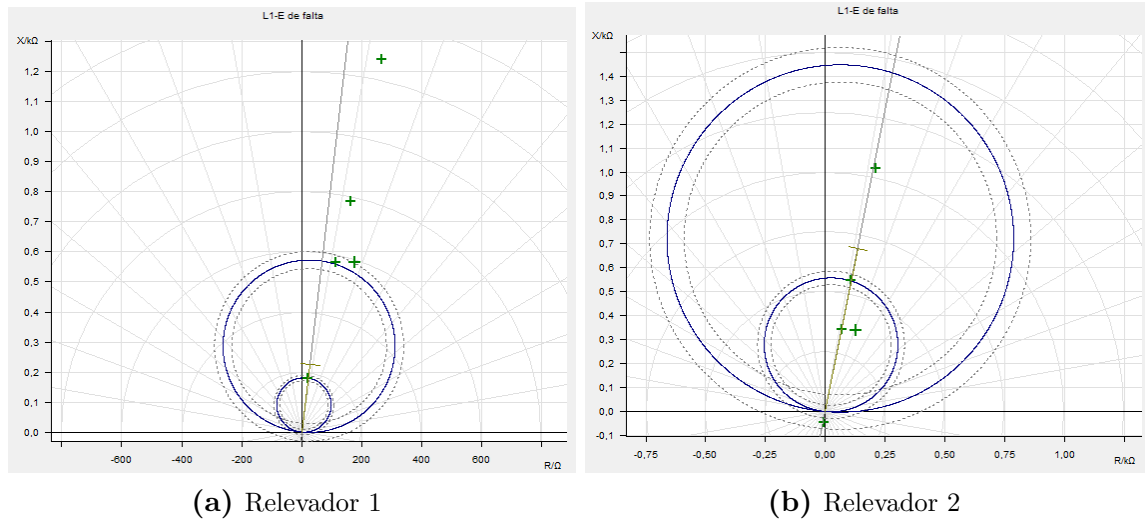


Figura 4.39: Respuesta Mho para fallas monofásicas con Advance Distance

Prueba de disparo: tipo de falta L1-E							
$ Z $	Phi	% línea	tnom.	treal	Desvi.	Ipru:	Resultado
181,0 Ω	83°	79,95%	0 s	114,4 ms	114,4 ms	50 kV	correcta
576,8 Ω	78,41°	254,78%	no disparó	no disparó	n/a	50 kV	correcta
786,5 Ω	78,05°	347,38%	no disparó	no disparó	n/a	50 kV	correcta
1,271k Ω	77,87°	561,20%	no disparó	no disparó	n/a	50 kV	correcta
591,3 Ω	72,66°	261,17%	no disparó	no disparó	n/a	50 kV	correcta

Tabla 4.11: Informe de pruebas monofásicas CMC para caso de coordinación- relé 1 Mho

Prueba de disparo: tipo de falta L1-E							
$ Z $	Phi	% línea	tnom.	treal	Desvi.	Ipru:	Resultado
45,16 Ω	-96,21°	6,50%	no disparó	no disparó	n/a	50 kV	correcta
347,6 Ω	78,55°	50,03%	0 s	71,64 ms	71,64 ms	50 kV	correcta
556 Ω	78,59°	80,04%	0,3 s	267,1 ms	-10,96%	50 kV	correcta
1,038k Ω	78,26°	149,34%	0,3 s	399,6 ms	33,19%	50 kV	correcta
363,8 Ω	69,16°	52,37%	0 s	79,13 ms	79,13 ms	50 kV	correcta

Tabla 4.12: Informe de pruebas monofásicas CMC para caso de coordinación- relé 2 Mho

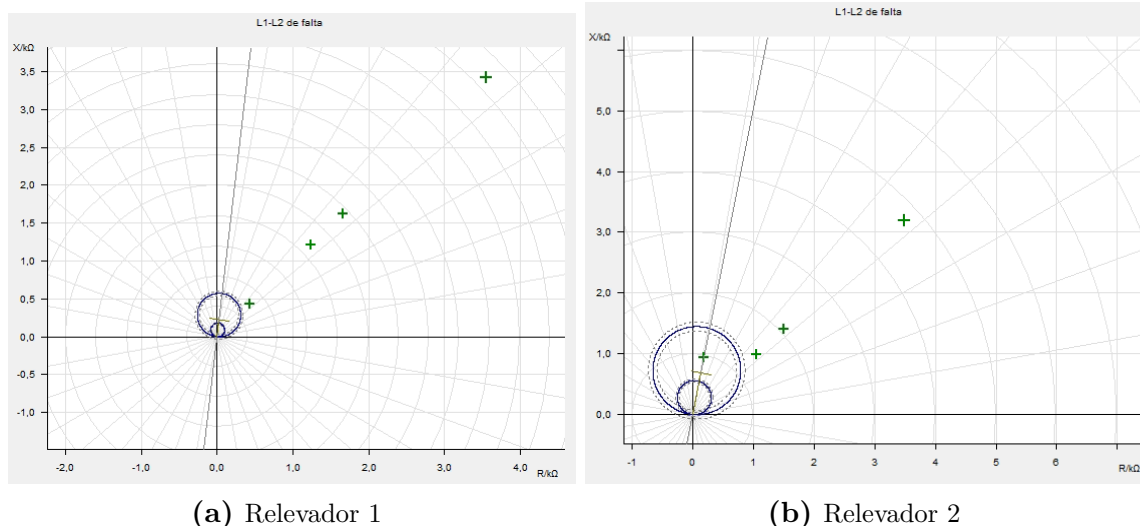


Figura 4.40: Respuesta Mho para fallas bifásicas con Advance Distance

Prueba de disparo: tipo de falta L1-L2							
$ Z $	Phi	% línea	tnom.	treal	Desvi.	Ipru:	Resultado
611, 4 Ω	45, 39°	270,05%	no disparó	no disparó	n/a	50 kV	correcta
1, 728k Ω	44, 39°	763,25%	no disparó	no disparó	n/a	50 kV	correcta
2, 325k Ω	44, 25°	1026,94%	no disparó	no disparó	n/a	50 kV	correcta
4, 924k Ω	43, 89°	2174,91%	no disparó	no disparó	n/a	50 kV	correcta

Tabla 4.13: Informe de pruebas bifásicas CMC para caso de coordinación- relé 1 Mho

Prueba de disparo: tipo de falta L1-L2							
$ Z $	Phi	% línea	tnom.	treal	Desvi.	Ipru:	Resultado
957 Ω	79°	137,76%	0,3 s	393,5 ms	31,16%	50 kV	correcta
1, 443k Ω	42, 98°	207,76%	no disparó	no disparó	n/a	50 kV	correcta
2, 055k Ω	42, 86°	295,8%	no disparó	no disparó	n/a	50 kV	correcta
4, 721k Ω	42, 48°	679,62%	no disparó	no disparó	n/a	50 kV	correcta

Tabla 4.14: Informe de pruebas bifásicas CMC para caso de coordinación- relé 2 Mho

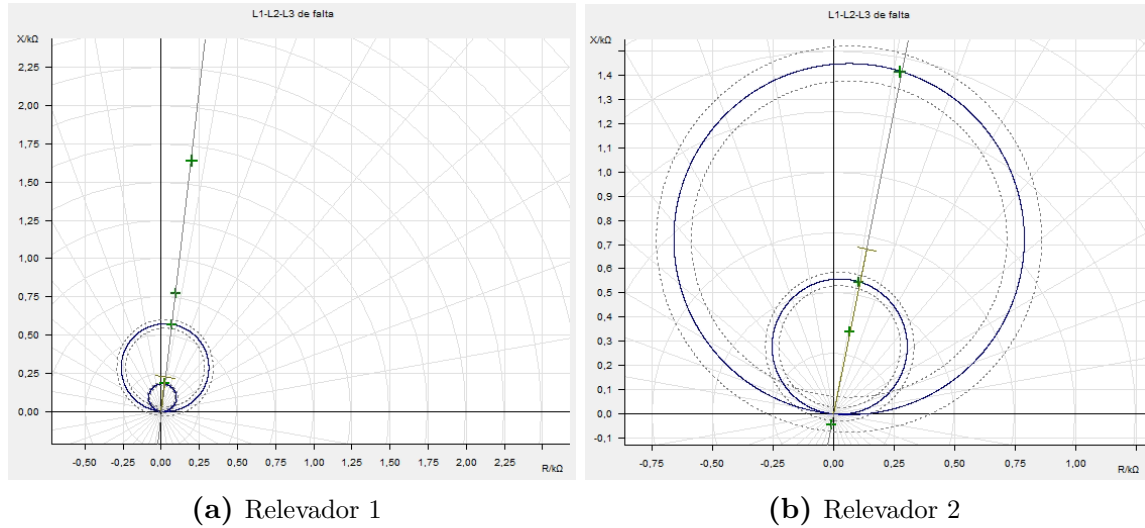


Figura 4.41: Respuesta Mho para fallas trifásicas con Advance Distance

Prueba de disparo: tipo de falta L1-L2-L3							
$ Z $	Phi	% línea	tnom.	treal	Desvi.	Ipru:	Resultado
181, 2 Ω	83°	80,04%	0,3 s	289,6 ms	-3,46%	50 kV	correcta
569, 8 Ω	83°	251,68%	0,3 s	302,8 ms	0,933%	50 kV	correcta
775, 7 Ω	83°	342,62%	no disparó	no disparó	n/a	50 kV	correcta
1, 647k Ω	83°	727,47%	no disparó	no disparó	n/a	50 kV	correcta

Tabla 4.15: Informe de pruebas trifásicas CMC para caso de coordinación- relé 1 Mho

Prueba de disparo: tipo de falta L1-L2-L3							
$ Z $	Phi	% línea	tnom.	treal	Desvi.	Ipru:	Resultado
45, 81 Ω	-101°	6,59%	no disparó	no disparó	n/a	50 kV	correcta
347, 1 Ω	79°	49,96%	0 s	49,63 ms	49,63 ms	50 kV	correcta
555, 3 Ω	79°	79,93%	0 s	214,3 ms	214,3 ms	50 kV	correcta
1, 437k Ω	79°	206,79%	0,3 s	264,3 ms	-11,91%	50 kV	correcta

Tabla 4.16: Informe de pruebas trifásicas CMC para caso de coordinación- relé 2 Mho

Circuit breaker 1		1/1	Circuit breaker 1		1/1
01.01.2011		02:21:37.899	01.01.2011		02:21:40.079
Line 1:21 Distance prot. 1			Line 1:21 Distance prot. 1		
Z 1: Pickup		phs A	Z 2: Pickup		phs A
		gnd			gnd
		forward			forward
PU time		1866ms	PU time		1034ms
Line 1:21 Distance prot. 1			Line 1:21 Distance prot. 1		
Z 1: Operate		on	Z 2: Operate		on
Triptime		0ms	Triptime		297ms
Fault distance		4.0km	Fault distance		12.6km
Quit			Quit		

(a) Zona 1 - Relé principal R_2

(b) Zona 2 - Relé de respaldo R_1

Figura 4.42: Respuesta a la coordinación del IED 7SA86 - Falla monofásica

La Figura 4.42 se presenta como resultado de la prueba del IED 7SA86 a la falla monofásica al 50% de la línea L_{57} , con el módulo *State Sequencer*. En esta parte es donde las zonas de los dos relés se encuentran traslapadas, por lo que la respuesta del relé R_2 es en tiempo instantáneo mientras que el relé R_1 reacciona con retardo de tiempo, cumpliendo así sus funcionamientos de protección principal y respaldo ya analizados en la Sección 3.6.

CAPÍTULO 5

CASOS DE ESTUDIO PROPUESTOS

En este capítulo se plantean casos de estudio con el relé de distancia, los casos son planteados en base a los diferentes efectos de la línea estudiados anteriormente. En el primer caso de estudio se implementa un sistema con el efecto de fuente intermedia, en el segundo se implementa un sistema en el que se analiza la respuesta al efecto de acoplamiento mutuo utilizando el método optimizado de compensación. Finalmente se plantea el caso para la coordinación con dos relés de distancia para un sistema de radial simple. Para los diferentes casos se encuentran detallados cada uno de los pasos a seguir hasta obtener los resultados con los tiempos de respuesta esperados.

5.1 Caso de estudio 1

RESPUESTA DE ACCIÓN DEL IED DE DISTANCIA AL EFECTO INFEED

Objetivos

- Calcular los alcances para la protección de distancia en zona 1 y 2 con efecto infeed.
- Simular los tiempos de disparo de la protección de distancia para fallas monofásicas y trifásicas mediante el software *DigSILENT*.

- Aplicar los ajustes en el software DigsI5 para exportar al equipo 7SA86.
- Comprobar las respuestas de acción del relé con la maleta de pruebas *CMC 356 OMICRON*.

Requisitos y conocimientos previos

- Criterios de ajuste para relé de distancia.
- Ajuste para efecto de fuente intermedia.
- Manejo del software *DigSILENT*, *DigsI5* y *Test Universe*.

Equipos, instrumentos y software

- 1 IED Siemens 7SA86.
- 1 Maleta de pruebas 356 OMICRON.
- Cables tipo banana.
- Software *DigSILENT*, *DigsI5* y *Test Universe*

Exposición

Para la línea entre las barras 8 y 9 “ L_{89} ” de la Figura 5.1, se considera una protección de distancia ubicada en el extremo de la barra 8. La línea tiene una longitud de 2 km con un voltaje de línea de 230 kV y corriente máxima de carga de 100 A. Se considera un R_{TC} : (200 A/5 A) y R_{TP} : (230 kV/110 V). Para el presente caso se requiere ajustar el relé R_{L89} en zona 1 y 2 considerando la influencia de la fuente intermedia desde la barra 9. Se considera únicamente fallas monofásicas y se desprecia la influencia de la corriente de secuencia cero del transformador de la barra 7 y 4.

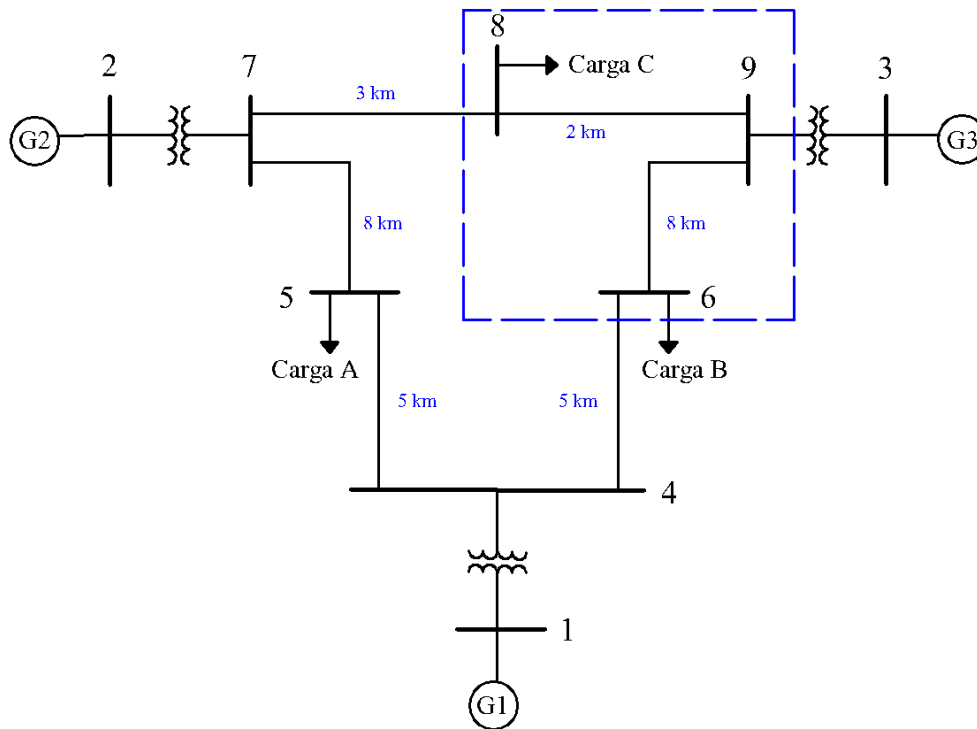


Figura 5.1: Diagrama caso de estudio 1

La zona 1 se configura con tiempo de acción instantánea al 80% de la línea protegida y la zona 2 se ajusta con un tiempo de 300 ms al 20% de la línea adyacente “ L_{69} ”.

Los datos del sistema de 9 barras se toman del **ANEXO 1**, y la impedancia de secuencia cero se estima a 2,5 veces la impedancia de secuencia positiva. El valor de las impedancias se toman considerando la potencia base del sistema de 100 MVA, así;

$$Z_1 = 6,2951 + j53,3232 \Omega/km$$

$$Z_0 = 20,631 + j89,93 \Omega/km$$

i	j	km	Z1[ohm]	Z0[ohm]	Z1 ∠°[ohm]	Z0 ∠°[ohm]
9	8	2	12,5902+j106,6464	31,4755+j266,616	107,39 ∠83,27°	268,47∠83,27°
6	9	8	165,048+j719,44	412,62+j1798,6	738,13 ∠77,08°	1845,32 ∠77,08°

Tabla 5.1: Parámetros de líneas L_{89} y L_{69}

Actividades por desarrollar

- Calcular los alcances para la característica de protección poligonal y Mho

en zona 1 y zona2, después simular los tiempos de disparo para las fallas: monofásica al 80% de la línea L_{89} , monofásica al 20% de la línea L_{69} y trifásica al 80% de la línea L_{89} . El **ANEXO 2** resume los pasos para la simulación con DigSILENT.

Ajuste poligonal					
Zona 1			Zona 2		
X	85,32 $\Omega prim$	1,63 Ωsec	X	384,59 $\Omega prim$	7,36 Ωsec
R(f-f)	68,25 $\Omega prim$	1,31 Ωsec	R(f-f)	384,59 $\Omega prim$	7,36 Ωsec
R(f-t)	85,32 $\Omega prim$	1,63 Ωsec	R(f-t)	307,67 $\Omega prim$	5,89 Ωsec
Ajuste Mho					
Zona 1			Zona 2		
Zc	85,95 $\Omega prim$	1,64 Ωsec	Zc	392,73 $\Omega prim$	7,51 Ωsec
Factor de compensación					
k_r	0,5	k_x	0,5	K_0	0,5 $0\angle^o$

Tabla 5.2: Ajustes propuestos para caso de estudio 1

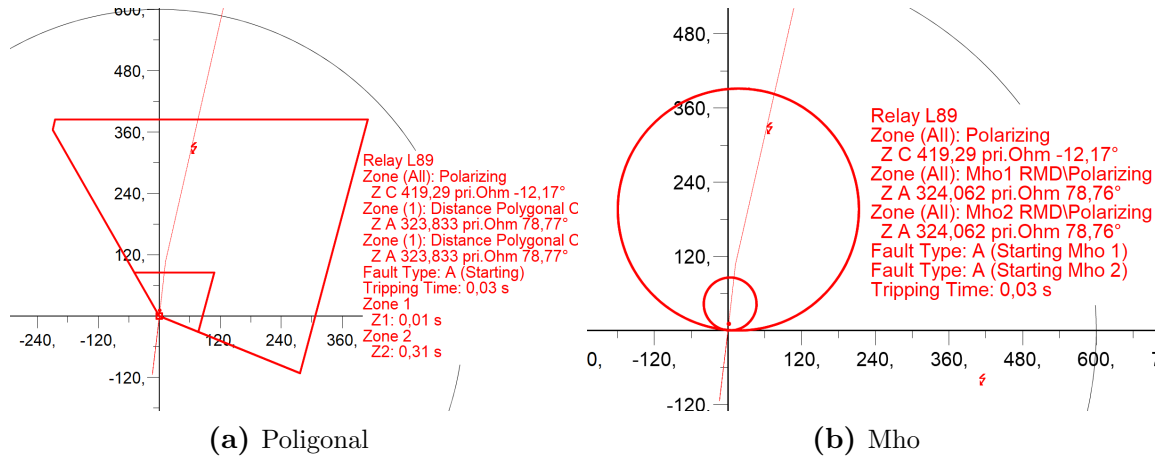


Figura 5.2: Respuesta para falla monofásica al 20% de la línea L_{69}

- En el software Digsil5 configurar el relé de distancia 7SA86 considerando los pasos detallados en la sección 4.2.
- Crear un documento de prueba en el software *Test Universe* e importa el archivo RIO. Dentro de la función Distance (Figura 4.23) corregir la longitud de línea; el valor 2,040 Ωsec se reemplaza por 2,0544 Ωsec , el cual considera la resistencia de línea.
- En configuración de hardware se ajusta el equipo como las Figuras 4.24 y 4.25, y se comprueba la inyección de voltajes-corrientes con el módulo *QuickCMC*.

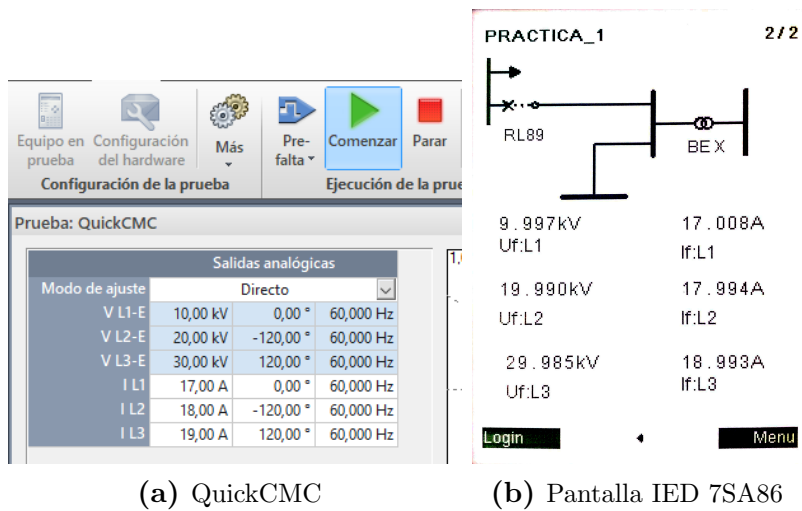


Figura 5.3: Prueba de inyección de corriente con módulo QuickCMC

- Se añade el módulo *Advance Distanced* y se realiza las pruebas atendiendo a las indicaciones del apartado 4.3.2.2.

Esquema de conexión

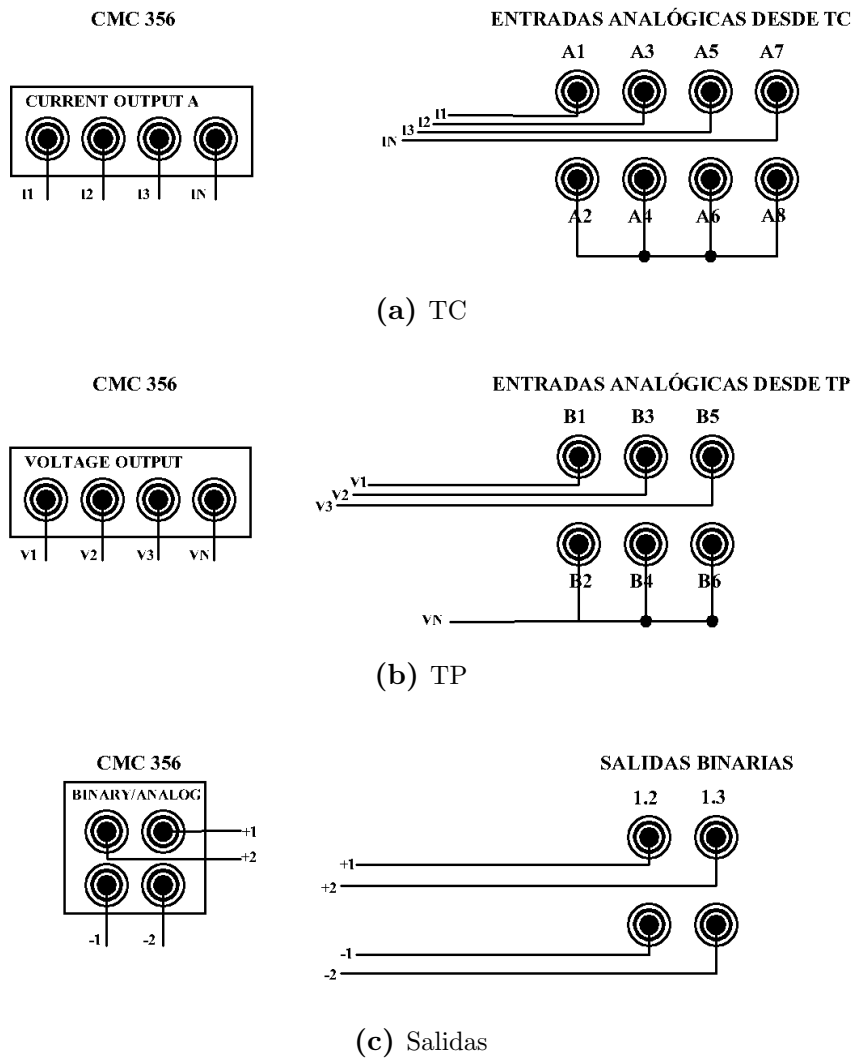


Figura 5.4: Diagrama de conexión para caso de estudio 1

Según se hayan configurado las salidas del relé se realizarán las conexiones respectivas. Para este caso se eligieron las salidas analógicas 1.2 y 1.3.

Resultados obtenidos

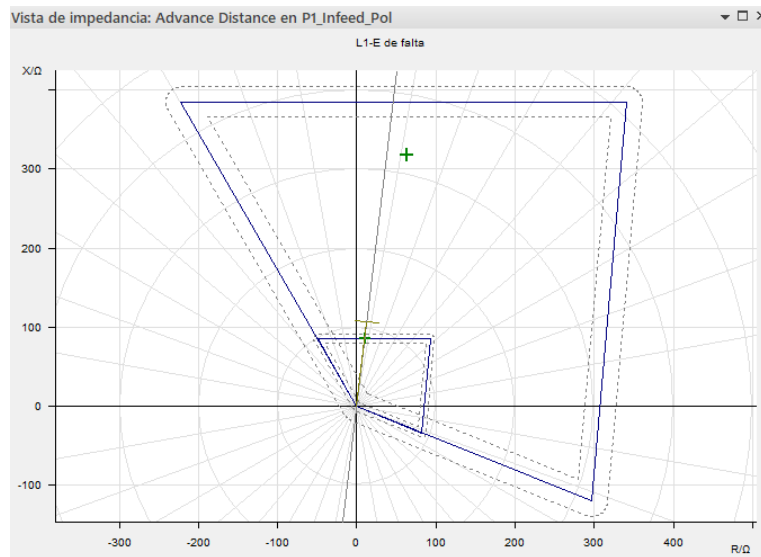


Figura 5.5: Respuesta Poligonal al caso de estudio 1 con Advance Distance

Prueba de disparo: tipo de falta L1-E							
$ Z $	Phi	% línea	tnom.	treal	Desvi.	Ipru:	Resultado
85,91 Ω	83,27°	80,01%	0 s	159,3 ms	159,3 ms	20 kV	correcta
323,8 Ω	78,77°	301,61%	0,3 s	0,376 s	25,38%	20 kV	correcta
Prueba de disparo: tipo de falta L1-L2-L3							
85,91 Ω	83,27°	80,01%	0 s	251 ms	251 ms	20 kV	correcta

Tabla 5.3: Informe de pruebas CMC para caso de estudio 1-relé Poligonal

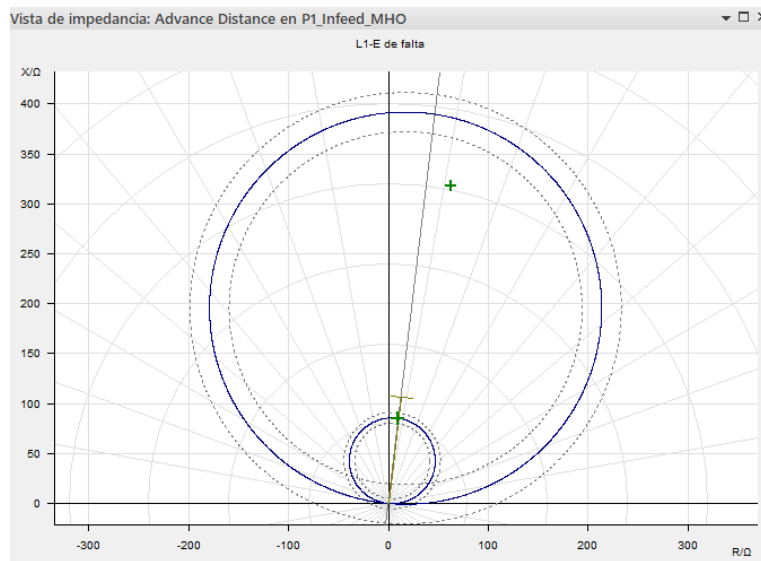


Figura 5.6: Respuesta Mho al caso de estudio 1 con Advance Distance

Prueba de disparo: tipo de falta L1-E							
$ Z $	Phi	% línea	tnom.	treal	Desvi.	Ipru:	Resultado
85,89 Ω	83,28°	80%	0 s	253,5 ms	253,5 ms	20 kV	correcta
324,1 Ω	78,76°	301,82%	0,3 s	0,321 s	7,2%	20 kV	correcta
Prueba de disparo: tipo de falta L1-L2-L3							
85,91 Ω	83,27°	80,01%	0 s	34,4 ms	34,4 ms	20 kV	correcta

Tabla 5.4: Informe de pruebas CMC para caso de estudio 1-relé Mho

Recomendaciones

Verificar en el *Advance Distance* que los alcances sean los correctos, ya que los valores se importan en secundarios y para pruebas de alta precisión pueden verse resultados incorrectos. Si fuere el caso se recomienda elevar los valores decimales del alcance.

Para desprestigiar la corriente de secuencia cero es necesario modificar la conexión estrella aterrada a solo estrella del transformador.

5.2 Caso de estudio 2

RESPUESTA DE ACCIÓN DEL IED DE DISTANCIA AL EFECTO DE ACOPLAMIENTO MUTUO.

Objetivos

- Calcular los alcances para la protección de distancia en zona 1 y 2 con el método optimizado de compensación mutua.
- Simular los tiempos de disparo de la protección de distancia para fallas monofásicas mediante el software DigSILENT.
- Aplicar los ajustes en el software Digsil5 para exportar al equipo 7SA86.
- Comprobar las respuestas de acción del relé con la maleta de pruebas *CMC 356 OMICRON*.

Requisitos y conocimientos previos

- Criterios de ajuste para relé de distancia.
- Comprensión del efecto de acople mutuo de líneas paralelas.
- Manejo del software *DigSILENT*, *Digsi5* y *Test Universe*.

Equipos, instrumentos y software

- 1 IED Siemens 7SA86.
- 1 Maleta de pruebas 356 OMICRON.
- Cables tipo banana.
- Software *DigSILENT*, *Digsi5* y *Test Universe*.

Exposición

Para el circuito de la Figura 3.7 que contiene configuración con fuentes en común (secuencia positiva y cero) se considera la protección de la línea 2 con el relé R_{L2} . El sistema es a 230 kV con líneas de 50 km de longitud y alimenta una carga de 150MW. Para el estudio del caso se considera una falla monofásica en la línea protegida con un R_{TC} : (200 A/5 A) y R_{TP} : (230 kV/110 V), además se realiza el modelado geométrico de las líneas de transmisión para obtener la impedancia mutua y considerar el efecto de acoplamiento. Los datos de la torre y del sistema de 2 barras son tomados del ANEXO 1.

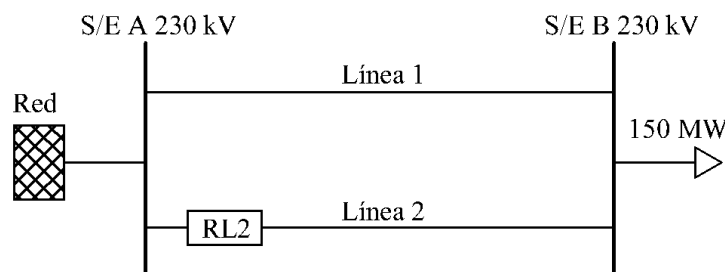


Figura 5.7: Diagrama caso estudio 2

El criterio para la zona 1 se configura con tiempo de acción instantánea al 80% de la línea L_2 y la zona 2 se ajusta con un tiempo de 300 ms al 20% de la misma línea.

Actividades por desarrollar

- Calcular los alcances para la característica de protección poligonal y Mho en zona 1 y zona2. Con el método optimizado compensar el efecto de acoplamiento mutuo. Después simular los tiempos de disparo para las fallas; monofásica al 80% de la línea L_2 y monofásica con resistencia de falla de 10Ω al 80% de la línea L_2 . El **ANEXO 2** resume los pasos para la simulación con *DigSILENT*.

Ajuste poligonal					
Zona 1			Zona 2		
X	18,60 Ω prim	0,36 Ω sec	X	27,90 Ω prim	0,53 Ω sec
R(f-f)	14,88 Ω prim	0,28 Ω sec	R(f-f)	27,90 Ω prim	0,53 Ω sec
R(f-t)	16,11 Ω prim	0,31 Ω sec	R(f-t)	19,33 Ω prim	0,37 Ω sec
Ajuste Mho					
Zona 1			Zona 2		
Zc	18,72 Ω prim	0,36 Ω sec	Zc	28,08 Ω prim	0,54 Ω sec
Factor de compensación					
k_r	2,13	k_x	1,53	K_0	1,63 - 2,02 \angle°

Tabla 5.5: Ajustes propuestos para relevador A del estudio de efecto infeed en zona 2

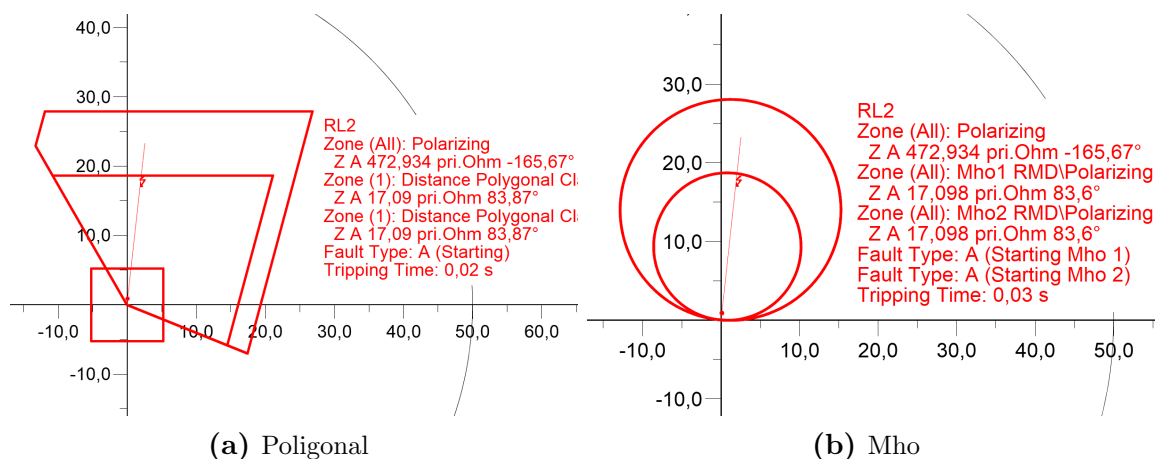


Figura 5.8: Respuesta para falla monofásica sólida a tierra al 80% de la línea L_2

- En el software *Digsi5* configurar el relé de distancia 7SA86 considerando los pasos detallados en la sección 4.2.

- Crear un documento de prueba en el software *Test Universe* e importar el archivo RIO. Corregir la longitud de línea a $0,447 \Omega \text{ sec}$.
- En configuración de hardware se ajusta el equipo como indican las Figuras 4.24 y 4.25, y se comprueba la inyección de voltajes-corrientes con el módulo *QuickCMC*.
- Se añade el módulo *Advance Distanced* y se realiza las pruebas atendiendo a las indicaciones del apartado 4.3.2.2.

Esquema de conexión

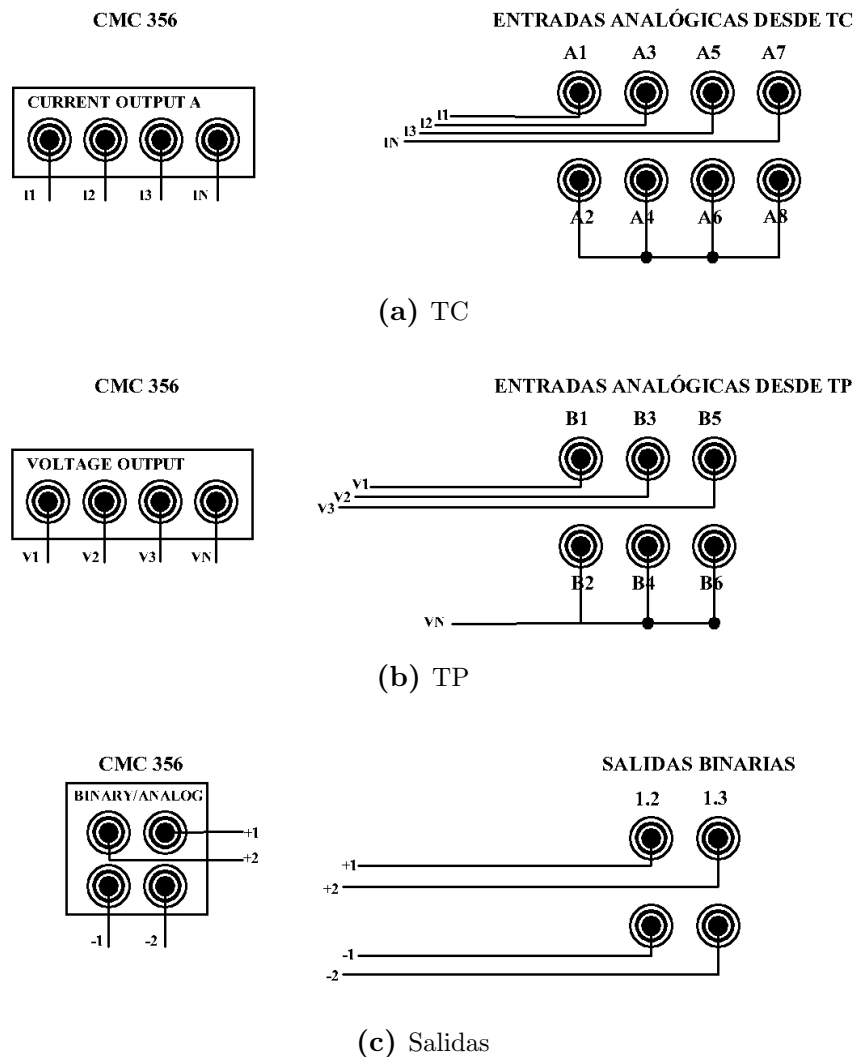


Figura 5.9: Diagrama de conexión para caso de estudio 2

Según se hayan configurado las salidas del relé se realizaran las conexiones respectivas. Para este caso se eligieron las salidas analógicas 1.2 y 1.3.

Resultados obtenidos

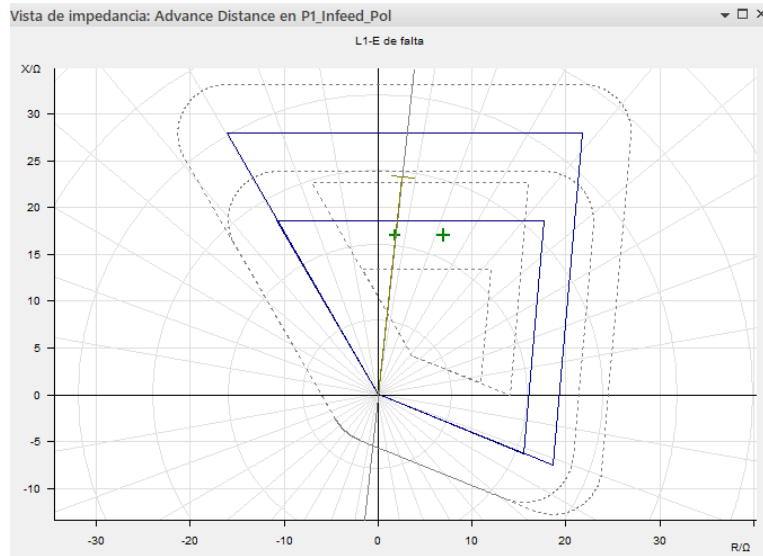


Figura 5.10: Respuesta Poligonal al caso de estudio 1 con Advance Distance

Prueba de disparo: tipo de falta L1-E							
$ Z $	Phi	% línea	tnom.	treal	Desvi.	Ipru:	Resultado
17,09 Ω	83,87°	73,14%	0 s	30,70 ms	30,70 ms	400 A	correcta
18,40 Ω	67,59°	78,75%	0 s	31 ms	31 ms	400 A	correcta

Tabla 5.6: Informe de pruebas CMC para caso de estudio 2-relé Polgonal

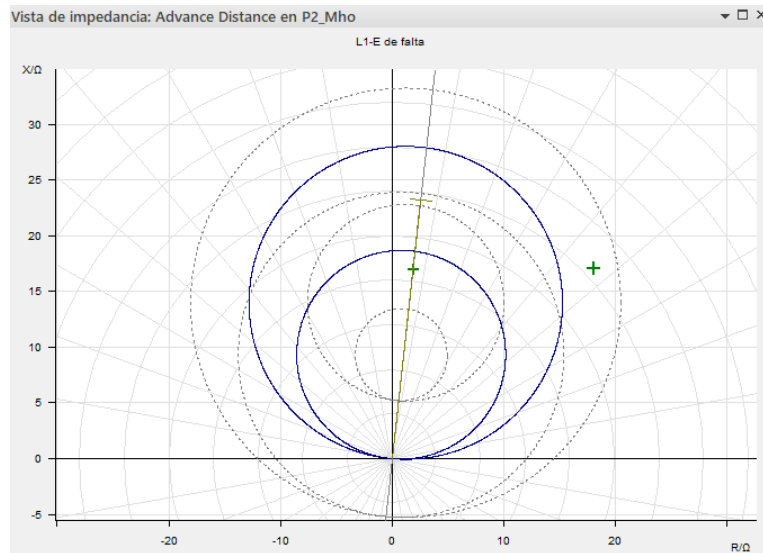


Figura 5.11: Respuesta Mho al caso de estudio 1 con Advance Distance

Prueba de disparo: tipo de falta L1-E							
$ Z $	Phi	% línea	tnom.	treal	Desvi.	Ipru:	Resultado
17,10 Ω	83,60°	73,17%	0 s	27,30 ms	27,30 ms	400 A	correcta
24,80 Ω	43,33°	106,12%	no disparó s	no disparó	n/a	400 A	correcta

Tabla 5.7: Informe de pruebas CMC para caso de estudio 2-relé Mho

Recomendaciones

Verificar en el *Advance Distance* que los alcances sean los correctos, ya que los valores se importan en secundarios y para pruebas de alta precisión pueden verse resultados incorrectos. Si fuere el caso se recomienda elevar los valores decimales del alcance. Verificar en la conexión que las salidas analógicas son las que se establecieron.

5.3 Caso de estudio 3

RESPUESTA DE ACCIÓN DE DOS IEDs DE DISTANCIA EN UN SISTEMA DE PROTECCIÓN.

Objetivos

- Calcular los alcances en zona 1 y 2 para la coordinación de protecciones de distancia.
- Simular los tiempos de disparo de las protecciones de distancia para fallas monofásicas y trifásicas mediante el software DigSILENT.
- Aplicar los ajustes en el software Digi5 para exportar al equipo 7SA86.
- Comprobar las respuestas de acción de los relés con la maleta de pruebas *CMC 356 OMICRON* usando el módulo *State Sequencer*.

Requisitos y conocimientos previos

- Criterios de ajuste para relé de distancia.

- Manejo del software *DigSILENT*, *Digsi5* y *Test Universe*.

Equipos, instrumentos y software

- 2 IEDs Siemens 7SA86.
- 1 Maleta de pruebas 356 OMICRON.
- Cables tipo banana.
- Software *DigSILENT*, *Digsi5* y *Test Universe*.

Exposición

Para el diagrama de 4 barras del **ANEXO 1** considere un sistema sin alimentación en la barra B y carga 1: 9MW, 4Mvar; carga 2: 8MW, 2Mvar; carga 3: 11MW, 4Mvar, tal como muestra la Figura 5.12. El SEP de estudio está conformado por 3 líneas de 10 km cada una e iguales características. La corriente máxima de carga para la línea 1 es de 294 A y para la línea 2 es 203 A Para los dos relés se tiene un R_{TC} : (300 A/5 A) y un R_{TP} : (69 kV/110 V). Para el caso planteado se requiere realizar la coordinación de protecciones con el relé de distancia entre el relé ubicado en la línea 1 R_A y el relé ubicado en la línea 2 R_B .

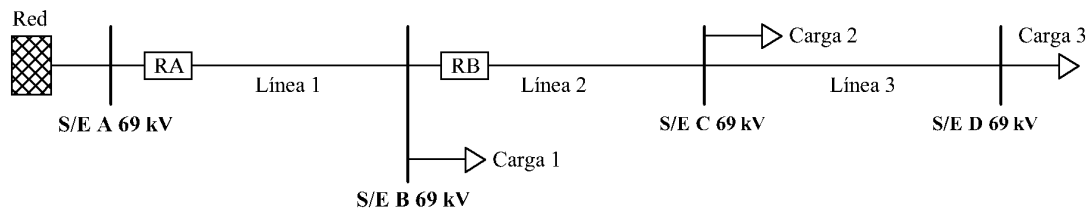


Figura 5.12: Diagrama caso de estudio 3

Para los alcances de la zona 1 con respuesta instantánea y zona 2 con retardo de 300 ms, considere un criterio del 80% y 20% de la línea respectivamente.

Datos de las líneas:

$$Z_1 = 0,5767 + j1,7607 \Omega/km$$

$$Z_1 = 5,7668 + j17,6068 \Omega$$

$$Z_0 = 16,4765 + j50,3051 \Omega/km$$

$$Z_0 = 13,9674717 + j101,206287 \Omega$$

Actividades por desarrollar

- Calcular los alcances para la característica de protección poligonal y Mho en zona 1 y zona2 para el relé R_A y R_B .

Ajuste poligonal del relé A y relé B					
Zona 1			Zona 2		
X	14,09 Ω prim	1,35 Ω sec	X	26,41 Ω prim	2,53 Ω sec
R(f-f)	11,27 Ω prim	1,08 Ω sec	R(f-f)	26,41 Ω prim	2,53 Ω sec
R(f-t)	14,09 Ω prim	1,35 Ω sec	R(f-t)	21,13 Ω prim	2,02 Ω sec
Factor de compensación					
k_r	0,62	k_x	0,62	K_0	0,62 0°

Tabla 5.8: Ajustes propuestos para caso de estudio 3

En el caso de la línea del relevador B los ajustes y alcances de las zonas son los mismos debido a que son líneas que poseen las mismas características.

- Simular los tiempos de disparo con la característica poligonal de protección, en el software *DigSILENT* para las siguientes fallas:
 - Monofásica y trifásica al 80% de la línea $L1$
 - Monofásica y trifásica al 50% de la línea $L2$
 - Monofásica y trifásica al 80% de la línea $L2$
 - Monofásica y trifásica al 50% de la línea $L3$

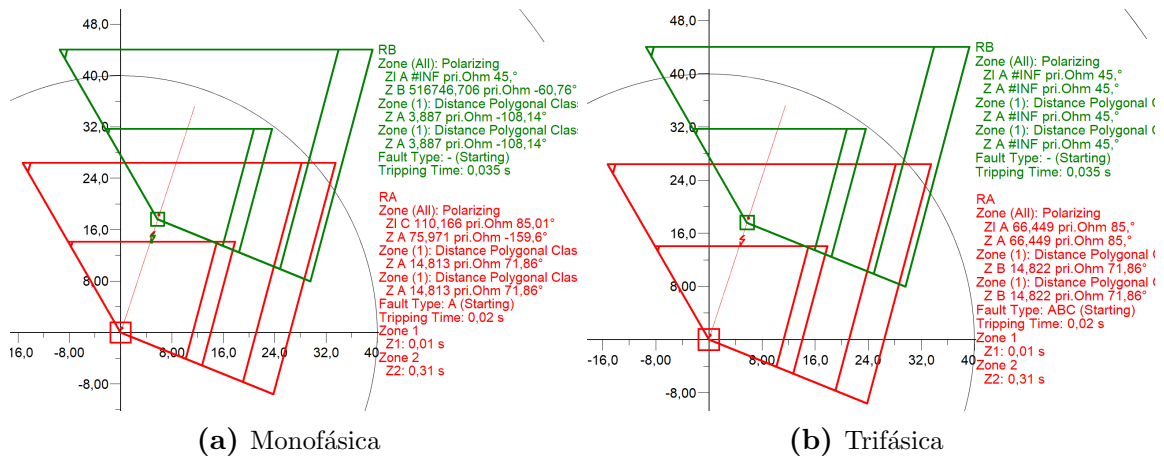


Figura 5.13: Impedancia vista por el relé R_A y R_B para una falla monofásica y trifásica al 80% de la línea $L1$

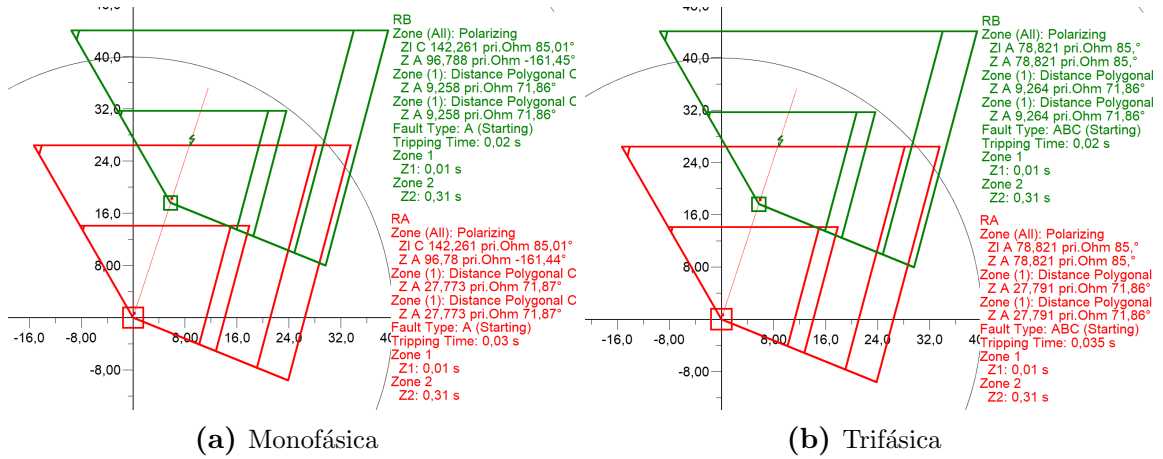


Figura 5.14: Impedancia vista por el relé R_A y R_B para una falla monofásica y trifásica al 50% de la línea L2

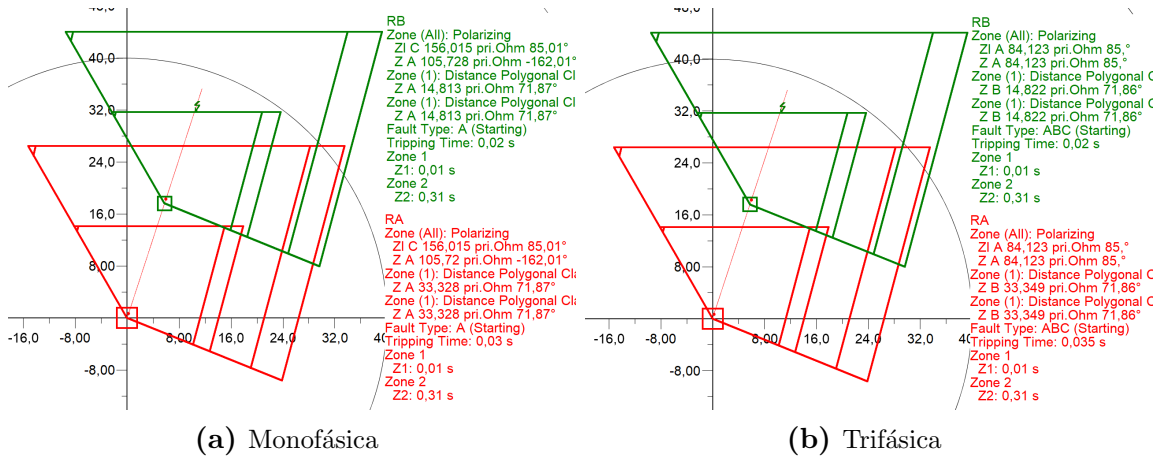


Figura 5.15: Impedancia vista por el relé R_A y R_B para una falla monofásica y trifásica al 80% de la línea L2

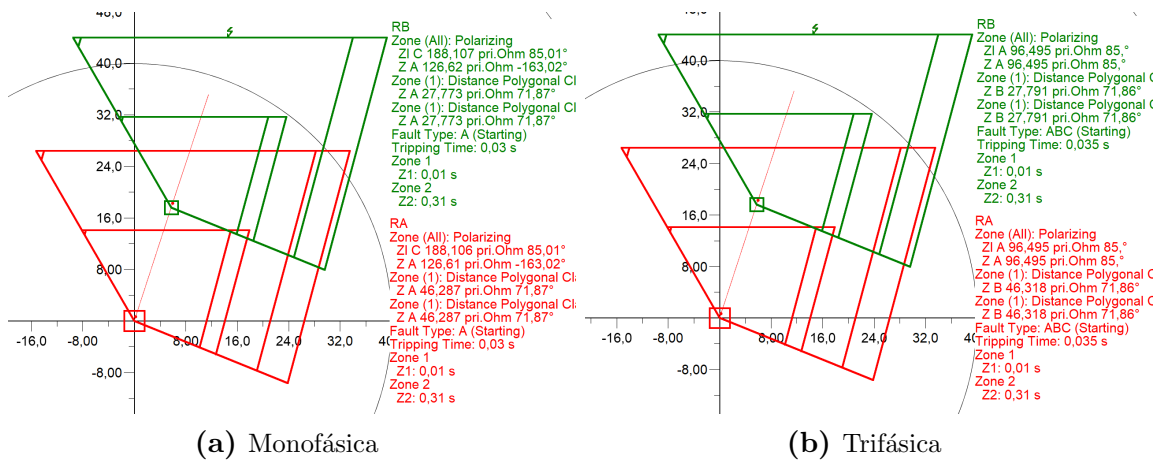


Figura 5.16: Impedancia vista por el relé R_A y R_B para una falla monofásica y trifásica al 50% de la línea L3

- En el software Digi5 configurar los relés de distancia 7SA86 considerando los pasos detallados en la sección 4.2.
- Crear el documento de prueba en el software *Test Universe* para el relé R_B y se corrige el valor de impedancia de la longitud de línea a $1,772 \Omega sec$.
- En el documento de prueba del relé R_B realizar la configuración de hardware como indican las Figuras 4.24 y 4.25, y se comprueba la inyección de voltajes-corrientes con el módulo *QuickCMC*.
- Se añade el módulo de pruebas *Advance Distance*, y se configura con un voltaje de prueba constante. Después se realizan las pruebas de disparo conforme las impedancias de falla para el relé R_B de la simulación.
- Situado el punto de falla se observa en el Diagrama fasorial los datos de corriente en magnitud y fase, como se puede observar en la Figura 5.17. Este proceso se repite para todas las fallas, y se registran los valores de corriente correspondiente a cada prueba.

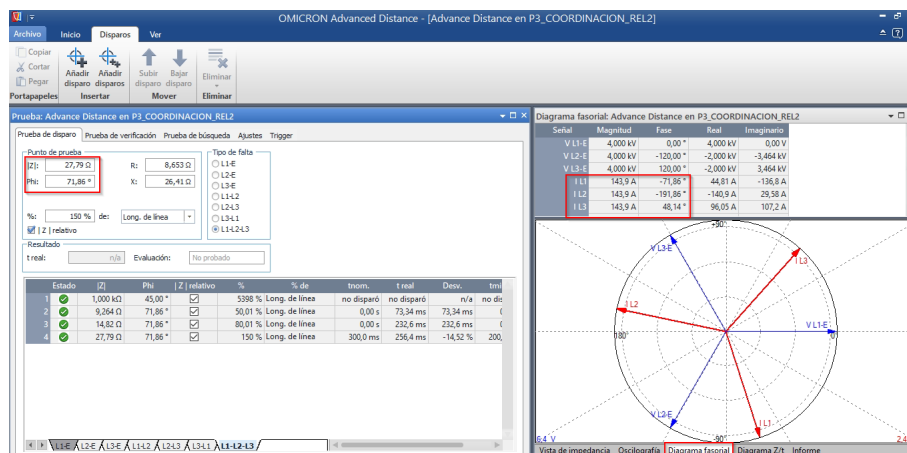


Figura 5.17: Diagrama fasorial

- Se crea un nuevo documento de prueba en *Test Universe*, y se importa el archivo RIO del relé R_A y se corrige el valor de impedancia de la longitud de la línea.
- En configuración de hardware para el relé R_A se ajusta el equipo como indican las Figuras 5.18 y 4.25, en este caso se debe verificar que las señales de salida analógicas de las corrientes del puerto B, se encuentren activas para poder comprobar la inyección de voltajes-corrientes con el módulo *QuickCMC*.

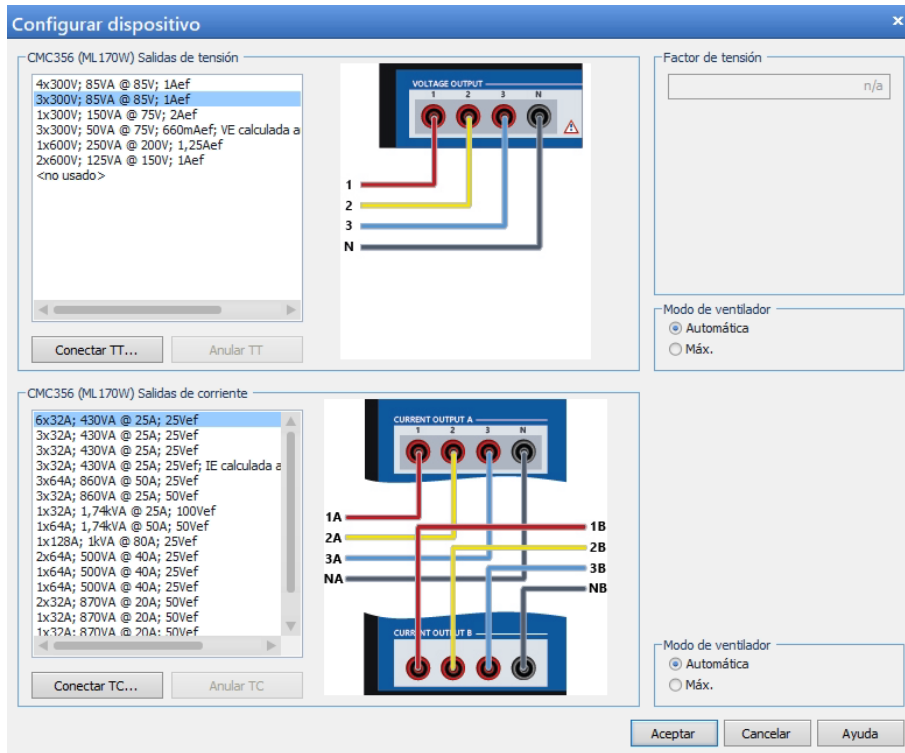


Figura 5.18: Configuración general del dispositivo

- Para la realización de las pruebas simultáneas se añade el módulo *State Sequencer*, se selecciona el modo de ajuste *Z-V const.* Se configura el mismo voltaje de prueba del relé R_B y se coloca las impedancias de falla para el relé R_A con los valores de corriente de falla registrados del relé R_B como se puede observar en la Figura 5.19. De esta forma se puede probar los dos relés a la vez, debido a que habrá una corriente para el relé R_A y otra corriente para el relé R_B .

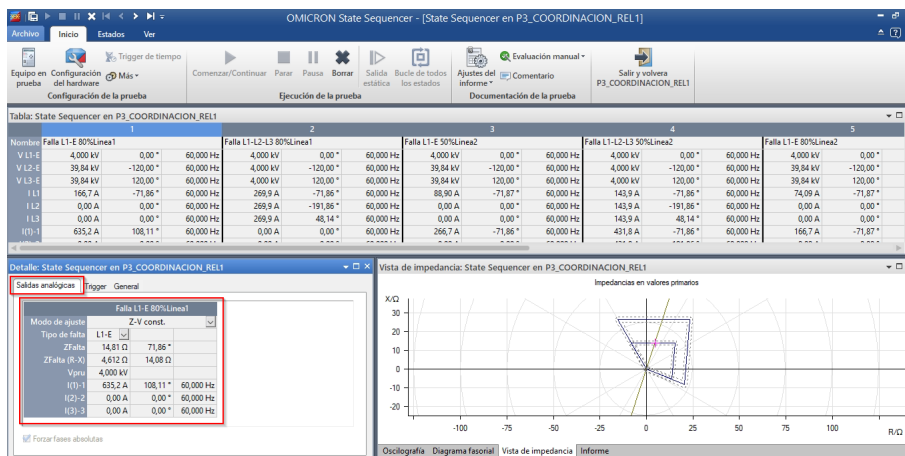


Figura 5.19: State Sequencer

Esquema de conexión

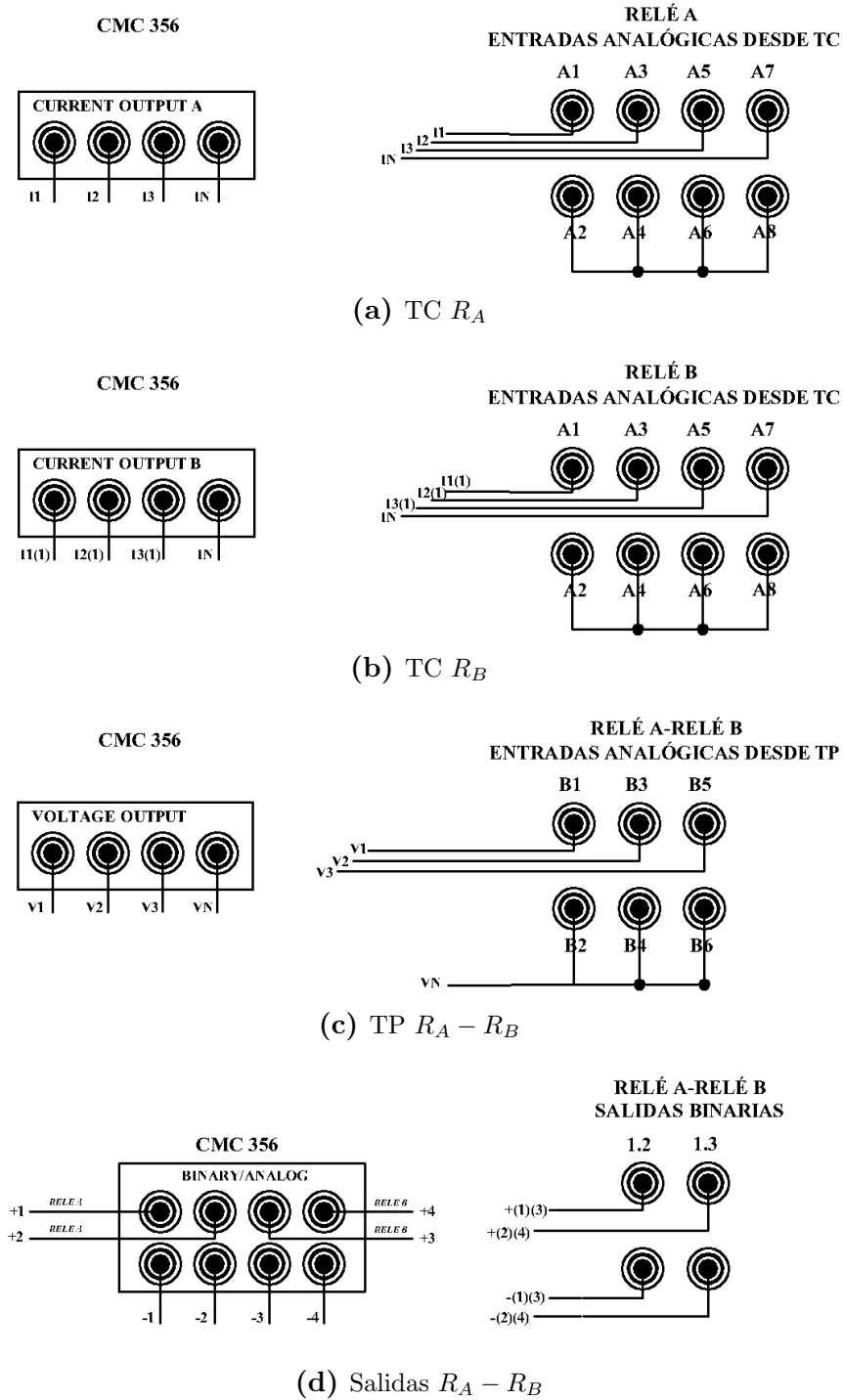


Figura 5.20: Diagrama de conexión para caso de estudio 3

Para este caso se dispone de la maleta de pruebas con diferentes salidas de corriente, es decir un TC desde el puerto A y otro desde el puerto B. Para los voltajes sin embargo se hace uso del mismo puerto ya que es único, y se conectan a cada relé respectivamente como indica la Figura 5.20c. Las salidas analógicas de los dos relés son conectadas como indica la Figura 5.20d, lo que indica es que desde los canales

(+1,-1,+2,-2) se conecta a las salidas del relé A, y (+3,-3,+4,-4) son conectadas al relé B.

Cabe aclarar en esto último indicado que las conexiones varían según se haya configurado las salidas del relé. Para este caso se eligieron las salidas analógicas 1.2 y 1.3.

Resultados obtenidos

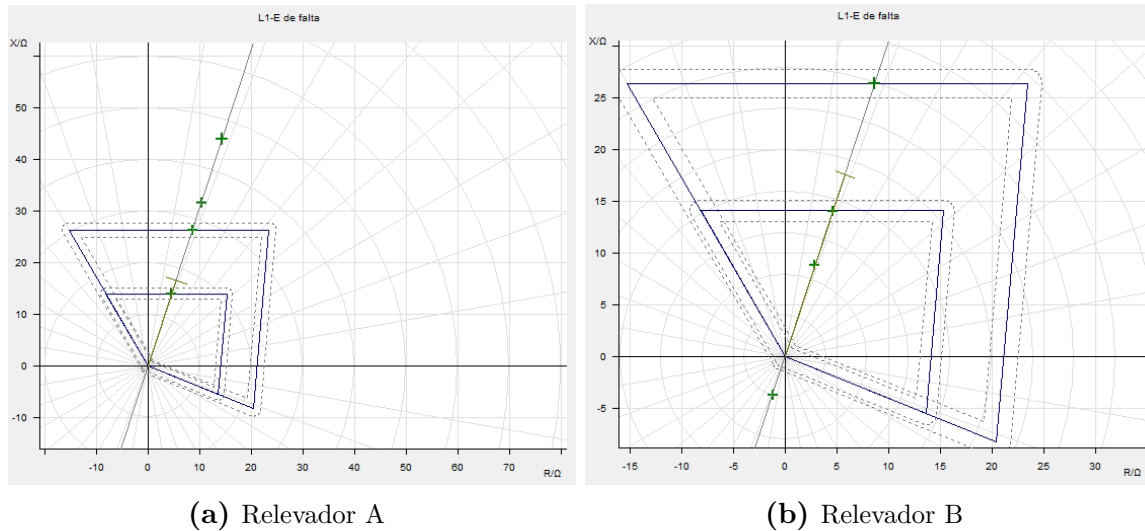


Figura 5.21: Respuesta poligonal al caso de estudio 3 para fallas monofásicas con Advance Distance

Prueba de disparo: tipo de falta L1-E							
$ Z $	Phi	% línea	tnom.	treal	Desvi.	Ipru:	Resultado
14,81 Ω	71,86°	84,10%	0 s	290,5 ms	290,5 ms	4,00 kV	correcta
27,77 Ω	71,87°	157,69%	300 ms	362,9 ms	20,98%	4,00 kV	correcta
33,33 Ω	71,87°	189,27%	no disparó	no disparó	n/a	4,00 kV	correcta
46,29 Ω	71,87°	262,86%	no disparó	no disparó	n/a	4,00 kV	correcta

Tabla 5.9: Informe de pruebas monofásicas CMC para caso de estudio 3-relé A

Prueba de disparo: tipo de falta L1-E							
$ Z $	Phi	% línea	tnom.	treal	Desvi.	Ipru:	Resultado
3,887 Ω	$-108,11^\circ$	20,98%	no disparó	no disparó	n/a	4,00 kV	correcta
9,258 Ω	$71,86^\circ$	49,97%	0 s	28,17 ms	28,17	4,00 kV	correcta
14,81 Ω	$71,87^\circ$	79,96%	0 s	142,5	142,5 ms	4,00 kV	correcta
27,77 Ω	$71,87^\circ$	149,92%	300 ms	279,7	-6,756%	4,00 kV	correcta

Tabla 5.10: Informe de pruebas monofásicas CMC para caso de estudio 3-relé B

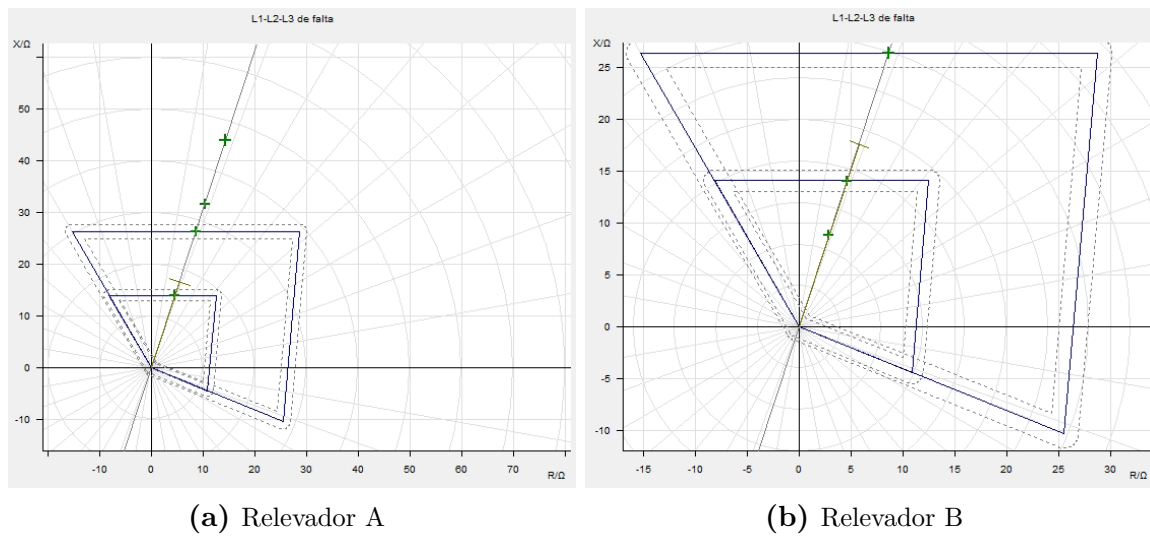


Figura 5.22: Respuesta poligonal al caso de estudio 3 para fallas trifásicas con Advance Distance

Prueba de disparo: tipo de falta L1-L2-L3							
$ Z $	Phi	% línea	tnom.	treal	Desvi.	Ipru:	Resultado
14,82 Ω	$71,86^\circ$	84,16%	0 s	357,9 ms	357,9 ms	4,00 kV	correcta
27,79 Ω	$71,86^\circ$	157,81%	300 ms	397,2 ms	32,4%	4,00 kV	correcta
33,35 Ω	$71,86^\circ$	189,38%	no disparó	no disparó	n/a	4,00 kV	correcta
46,32 Ω	$71,86^\circ$	263,03%	no disparó	no disparó	n/a	4,00 kV	correcta

Tabla 5.11: Informe de pruebas trifásicas CMC para caso de estudio 3-relé A

Prueba de disparo: tipo de falta L1-L2-L3							
$ Z $	Phi	% línea	tnom.	treal	Desvi.	Ipru:	Resultado
1k Ω	45°	5397,8%	no disparó	no disparó	n/a	4,00 kV	correcta
9,264 Ω	71,86°	50,01%	0 s	73,34 ms	73,34	4,00 kV	correcta
14,82 Ω	71,86°	80,01%	0 s	232,6 ms	232,6 ms	4,00 kV	correcta
27,79 Ω	71,86°	150,02%	300 ms	256,4 ms	-14,52%	4,00 kV	correcta

Tabla 5.12: Informe de pruebas trifásicas CMC para caso de estudio 3-relé B

Recomendaciones

Revisar que las salidas analógicas de corriente del puerto B se encuentren activas en la maleta de pruebas, conectarlas en el orden correspondiente a las entradas del relé y verificar que los voltajes y corrientes emitidas por la maleta sean leídos correctamente por el relé.

Para probar relés de forma simultánea se requiere que los valores de los TC para los relés sean iguales. Esto debido a la limitante que presenta el disponer de una sola maleta de pruebas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Es evidente que para los casos planteados de estudio el relé se encuentra afectado por ciertas condiciones que impiden su correcto funcionamiento. Las respuestas de acción en zona 1, cuando existe corriente intermedia en una barra remota no afecta el desempeño de la protección, por otra parte; para la zona 2 si se ven efectos erróneos de respuestas. Cuando la línea protegida se encuentra acoplada mutuamente el relé presenta respuestas erróneas en zona 1 y zona 2 de protección. Sin embargo, con las técnicas que se emplearon en este proyecto ha sido posible compensar estos dos errores mencionados.

La compensación mutua usando el método optimizado posee muchas ventajas, ya que requiere de menos recursos para su implementación. Los resultados son válidos con un margen de error mínimo, sin embargo, si se quiere mejorar la respuesta de acción se puede modificar los factores de compensación residual hasta lograr una mayor precisión en la medida de impedancia de falla.

En comparativa a las respuestas poligonales y M_{ho} , se puede concluir que una característica poligonal presta mayores ventajas de protección, ya que para las mismas condiciones de falla que se realizaron para las dos características, esta presenta una mejor cobertura a resistencias de falla.

Las pruebas en laboratorio para la protección de estudio, presentaron resultados similares a los esperados, tanto en simulación como en su implementación; con tiempos de respuesta en cada zona valederos. Por lo tanto, se garantiza que los ajustes propuestos en este estudio contienen técnicas validas para considerar en futuras investigaciones.

Aunque la maleta CMC 356 permite realizar pruebas a un solo relé de protección

a la vez, se demostró que mediante el uso de la salida de corriente adicional de la maleta y del uso del modulo *State Sequencer* es posible comprobar las pruebas de coordinación entre dos relés, pudiendo evidenciar los resultados de manera simultanea.

Antes de realizar las pruebas a los relés es recomendable verificar mediante el módulo *QuickCMC* que las conexiones se encuentren de manera correcta, esto se realiza programando una salida constante de voltajes y corrientes, además de verificar que son coherentes con los valores de servicio medidos por el relé.

Cuando se realicen pruebas de coordinación con el módulo *State Sequencer*, es recomendable asumir valores iguales en los TC para los 2 relés a probar, ya que al realizar la prueba simultánea se toma como referencia un solo archivo de prueba y por lo tanto la maleta considera la inyección de corrientes en base a esa única configuración de TC.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Barraza, “Parametrización y pruebas en los relevadores de protección para la línea de transmisión santa ana (69kv),” Tesis Gdo., Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, Ene 2017.
- [2] X. Bustos and H. Oñate, “Prueba de inyección de corriente secundaria a los relés de protecciones de los módulos de sistemas eléctricos de potencia utilizando la omicron cmc 356,” Tesis Gdo., Universidad de los Andes, 2020.
- [3] F. Jiménez and P. Rivera, “Implementación de una red de relé virtual iec 61850 para el laboratorio de protecciones de la universidad politécnica salesiana sede cuenca,” Tesis Gdo., Universidad Politécnica Salesiana, Feb 2021.
- [4] J. Figueroa, *Protección de sistemas eléctricos*. Instituto Universitario Politécnico “Santiago Mariño”, 2018.
- [5] X. Pelaes, “Coordinación automática de protecciones de distancia en líneas de transmisión frente a una contingencia extrema,” Tesis Gdo., Universidad Politécnica Salesiana, Feb 2019.
- [6] G. Arguello and C. Carchipulla, “Ingeniería de diseño para la utilización de los relés multifunción de la central mazar en las unidades de la central molino pertenecientes a celec ep. hidropaute,” Tesis Gdo., Universidad de Cuenca, 2015.
- [7] S. Ramirez, *Protección de sistemas eléctricos*, 1st ed. Universidad Nacional de Colombia, Ene 2003.
- [8] D. López, “Ubicación de fallas en redes de distribución eléctrica basado en sensado comprimido,” Tesis Gdo., Universidad Politécnica Salesiana, Jul 2018.
- [9] J. L. Blackburn and T. J. Domin, *Protective Relaying Principles and applications*, 4th ed., ser. ISBN-13: 9781439888117. CRC Press, Feb 2014.
- [10] H. A.-G. Mohammed AL-Mahrooqi, Mahnd AL-Yaqoubi, M. AL-Saadi, H. Soliman, and A. Elhaffar, “Simulation of distance protection for parallel transmission lines,” *Bell System Technical Journal*, vol. 13, pp. 285–300, 2017.

- [11] A. Nájera, “Ajuste y coordinación de protecciones de distancia y sobrecorriente para líneas de transmisión que comparten el mismo derecho de vía.” Tesis Gdo., Instituto politécnico nacional, Ene 2012.
- [12] S. 5, *Protección de distancia, diferencial de línea y de sobreintensidad para disparo tripolar 7SA84, 7SD84, 7SA86, 7SD86, 7SL86, 7SJ86*, 4th ed., Siemens, 2014.
- [13] J. M. Maldonado, “Metodología de coordinación de protecciones de distancia en la plataforma digilent para un sistema de transmisión,” Tesis Gdo., Universidad de los Andes, Jun 2016.
- [14] M. B. Irshad Ulla, M. S. Radwan, H. Ahmad, H. M. Luqman, and Z. Zainal, “Effect of infeed current and fault resistance on distance protection for teed-feed line,” *AIP Conference Proceedings*, pp. 1–12, 2017.
- [15] C. Holt and M. J. Thompson, “Practical considerations when protecting mutually coupled lines,” *A69th Annual Conference for Protective Relay Engineers, CPRE 2016*, pp. 1–16, 2016.
- [16] B. M.-I. Hamid Teimourzadeh and M. Shahidehpour, “Adaptive protection of partially coupled transmission lines,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1–12, Feb 2021.
- [17] N. B. Michael O’Donovan, Eoin Cowhey and J. Connell, “The effects of mutual coupling compensation on distance protection of parallel lines,” in *2020 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, ser. 10.1109 / UPEC49904.2020.9209829, IEEE, Ed., vol. 55. IEEE, Sep 2020, pp. 1–6.
- [18] O. T. Osmel Pérez and R. Pérez, “Efecto de la inductancia mutua en las protecciones de lineas paralelas. el defecto de sus soluciones,” *Ingeniería Energética*, vol. 41, pp. 1–9, May 2020.
- [19] P. S. Jagtap and M. P. Thakre, “Effect of infeed current and fault resistance on distance protection for teed-feed line,” *IEEE*, pp. 1–6, 2020.
- [20] A. M. T. Vassilis C. Nikolaidis and A. S. Safigianni, “Investigating particularities of infeed and fault resistance effect on distance relays protecting radial distribution feeders with dg,” *IEEE Access*, pp. 11 301–11 312, 2018.
- [21] *Criterios de ajuste y coordinacion de los sistemas de proteccion del SEIN*, COES SINAC, Jul 2014.

- [22] R. A. de Oliveira and J. N. de Nunes, “Adaptative distance protection with compensation for remote infeed effect,” *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference*, pp. 5–10, 2017.
- [23] J. C. Michael O Donovan, Noel Barry and E. Cowhey, “Mutual coupling compensation techniques used for distance protection of parallel lines,” *Energies*, pp. 1–15, Abr 2021.
- [24] A. Fonseca, “Efecto del acoplamiento mutuo en los relés de distancia de líneas de transmisión,” *Energía*, pp. 56–68, Ene 2009.
- [25] F. Arévalo, “Guía metodológica para pruebas de relés de protección multifuncional con el equipo de inyección omicron cmc,” Tesis Gdo., Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Nov 2015.

ANEXOS

ANEXO 1: Parámetros de los sistemas de análisis

Esquema 4 barras

Tabla 5.13: Datos de barras-Modelo 4 barras

Bus Number	Voltage Base (kV)	V max (Pu)	V min (Pu)
1	69	1,05	0,95
2	69	1,05	0,95
3	69	1,05	0,95

Bus Number	Power rating (MVA)	V_0 (Pu)	θ^o (Pu)	Sk'' max (MVA)	Sk'' min (MVA)
1	100	1	0	100	80

Tabla 5.14: Datos de red-Modelo 4 barras

Bus Number	Power Rating (MVA)	Voltage Rating (kV)	Active Power (MW)	Reactive Power (Mvar)	Q max (Pu)	Q min (Pu)	Power Factor
2	100	69	41	27	1	-1	0,8

Tabla 5.15: Datos de generador-Modelo 4 barras

From Bus	To Bus	Lenght (km)	Frequency Rating (Hz)	R1 (Ω/km)	X1 (Ω/km)	R0 (Ω/km)	X0 (Ω/km)	B (uS/km)
1	2	10	60	0,5767	1,7607	1,6476	5,0305	0,1124
2	3	10	60	0,5767	1,7607	1,6476	5,0305	0,1124
3	4	10	60	0,5767	1,7607	1,6476	5,0305	0,1124

Tabla 5.16: Datos de líneas-Modelo 4 barras

Bus Number	Power Rating (MVA)	Voltage rating (kv)	Active Power (MW)	Reactive Power (Mvar)	Voltage (Pu)
2	100	69	26	11	1
3	100	69	15	4	1
4	100	69	11	4	1

Tabla 5.17: Datos de cargas-Modelo 4 barras

Esquema 2 barras

Bus Number	Voltage Base (kV)	V max (Pu)	V min (Pu)
1	138	1,05	0,95
2	138	1,05	0,95

Tabla 5.18: Datos de barras-Modelo 2 barras

Bus Number	Power rating (MVA)	V_0 (Pu)	θ^o (Pu)	Sk'' max (MVA)	Sk'' min (MVA)
1	200	1	0	200	180

Tabla 5.19: Datos de red-Modelo 2 barras

Line	Lenght (km)	Voltage Rating (kV)	Frequency Rating (Hz)	R1 (Ω/km)	X1 (Ω/km)	R0 (Ω/km)	X0 (Ω/km)	B (uS/km)
1	63	138	60	0,052981	0,458291	0,221706	1,60645	3,63313
2	63	138	60	0,052981	0,458291	0,221706	1,60645	3,63313

Tabla 5.20: Datos de líneas-Modelo 2 barras

Bus Number	Voltage rating (kv)	Active Power (MW)	Reactive Power (Mvar)	Voltage (Pu)
2	69	150	0	1

Tabla 5.21: Datos de cargas-Modelo 2 barras

Esquema 9 barras IEEE

Bus Number	Voltage Base (kV)	V max (Pu)	V min (Pu)	Bus type
1	16,5	1,05	0,95	swing
2	18	1,05	0,95	PV
3	13,8	1,05	0,95	PV
4	230	1,05	0,95	PQ
5	230	1,05	0,95	PQ
6	230	1,05	0,95	PQ
7	230	1,05	0,95	PQ
8	230	1,05	0,95	PQ
9	230	1,05	0,95	PQ

Tabla 5.22: Datos de barras-Modelo 9 barras IEEE

Bus Number	Power Rating (MVA)	Voltage Rating (kV)	V[pu]	Active Power (pu)	Reactive Power (pu)	Q max (Pu)	Q min (Pu)	Power Factor
1	247,5	16,5	1,04	0,7163	0,2791	1	-1	0,85
2	192	18	1,025	1,63	0,067	1	-1	0,85
3	128	13,8	1,025	0,85	-0,109	1	-1	1

Tabla 5.23: Datos de generadores-Modelo 9 barras IEEE

Bus Number	H (sec)	X _d (pu)	X' _d (pu)	X _q (pu)	X' _q (pu)	T' _{d0} (pu)	T' _{q0} (pu)
1	23,64	0,146	0,0608	0,0969	0,0969	8,96	0,31
2	6,4	0,8958	0,1198	0,8645	0,1969	6	0,535
3	3,01	1,3125	0,1813	1,2578	0,25	5,89	0,6

Tabla 5.24: Datos de generadores-Modelo 9 barras IEEE

From Bus	To Bus	Power Rating (MVA)	Voltage Rating (kV)	Frequency Rating (Hz)	Voltage Ratio (kV/kV)	R (Pu)	X (Pu)
1	4	250	230	60	13,939	0	0,125
2	7	200	230	60	12,77	0	0,144
3	9	150	230	60	16,666	0	0,0879

Tabla 5.25: Datos de transformadores-Modelo 9 barras IEEE

From Bus	To Bus	Length (km)	Voltage Rating (kV)	Frequency Rating (Hz)	R (pu)	X (pu)	B (Pu)
2	7	1	230	60	0	0,125	0
7	8	1	230	60	0,0085	0,072	0,1490
5	7	1	230	60	0,032	0,161	0,306
5	4	1	230	60	0,01	0,085	0,176
1	4	1	230	60	0	0,144	0
6	4	1	230	60	0,017	0,092	0,158
6	9	1	230	60	0,039	0,17	0,358
3	9	1	230	60	0	0,0879	0
8	9	1	230	60	0,0119	0,1008	0,209

Tabla 5.26: Datos de líneas-Modelo 9 barras IEEE

Bus	P (Pu)	Q (Pu)
5	0,75	0,3
6	0,9	0,35
8	1	0,6

Tabla 5.27: Datos de cargas-Modelo 9 barras IEEE

Torres eléctricas 138 kV y 230 kV

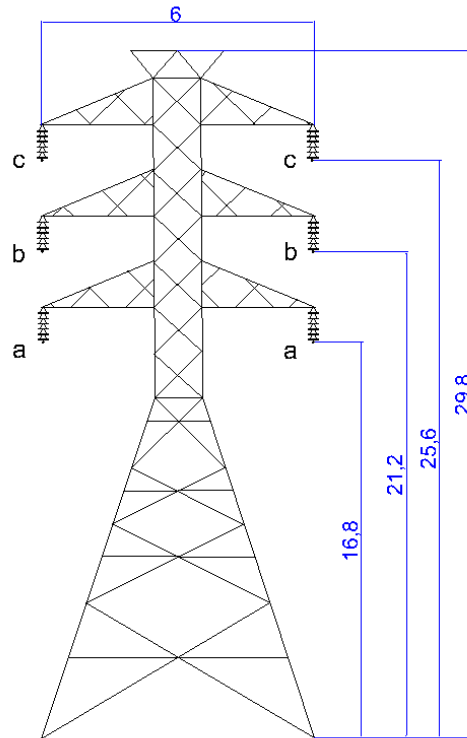


Figura 5.23: Geometría de torre de transmisión 138 kV

Disposición geométrica de torre					
Circuito 1			Circuito 2		
	x (m)	y (m)		x (m)	y (m)
A	-3	16,8	A	3	16,8
B	-3	21,2	B	3	21,2
C	-3	25,6	C	3	25,6
Conductor de fase					
Material			Aluminio/acero 1113		
Tipo			Bluejay		
Diámetro exterior (mm)			31,9786		
Resistencia DC 20° (ohm/km)			0,051		
Resistencia DC 75° (ohm/km)			0,0711		
RMG (mm)			12,6492		
Corriente (kA)			1,081		

Tabla 5.28: Geometría y parámetros eléctricos de L/T - 138 kV doble circuito

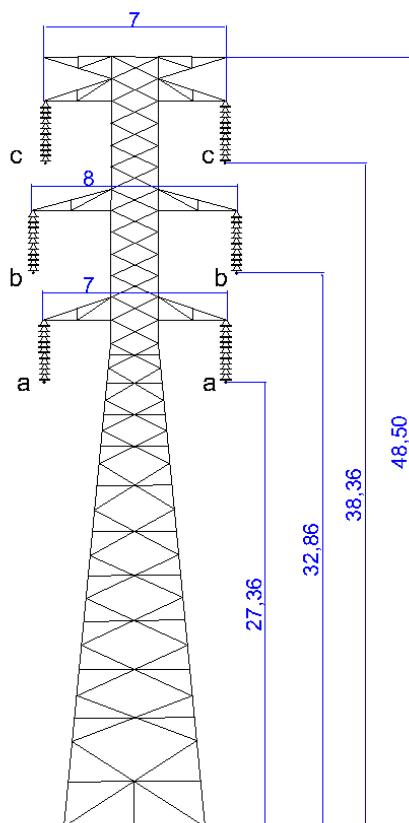


Figura 5.24: Geometría de torre de transmisión 230 kV

Disposición geométrica de torre					
Circuito 1			Circuito 2		
	x (m)	y (m)		x (m)	y (m)
A	-3,5	27,36	A	3,5	27,36
B	-4	32,86	B	4	32,86
C	-3,5	38,36	C	3,5	38,36
Conductor de fase					
Material			Aluminio/acero 18/19		
Tipo			ACAR 1200		
Diámetro exterior (mm)			32,02		
Resistencia DC 20° (ohm/km)			0,05099		
Resistencia DC 75° (ohm/km)			0,0615		
RMG (mm)			12,6492		
Corriente (kA)			1,096		

Tabla 5.29: Geometría y parámetros eléctricos de L/T - 230 kV doble circuito

ANEXO 2: Manejo del software DigSILENT para relé de distancia

Creación de transformadores de medida

Para añadir el equipo de medida se posiciona en el cubo de la línea y se hace clic derecho. Tal como la Figura 5.25 se sitúa en *New Devices* donde se encuentran; TC, TP, Relés, fusibles, etc.

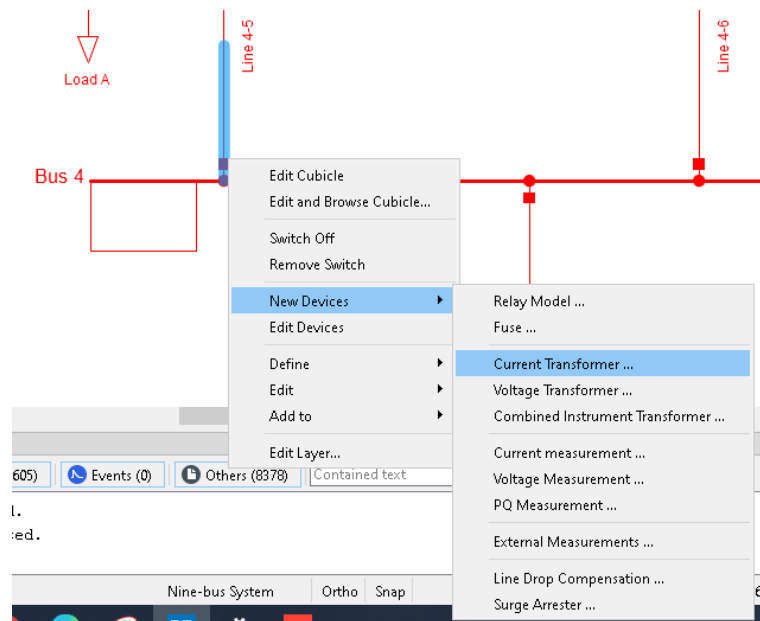


Figura 5.25: Creación de transformador de corriente - Paso 1

Se puede elegir un tipo de TC o TP establecido de las librerías, o se puede añadir un nuevo tipo, tal como se indica en la Figura 5.26. A continuación se establece los valores del TC en primario y secundario.

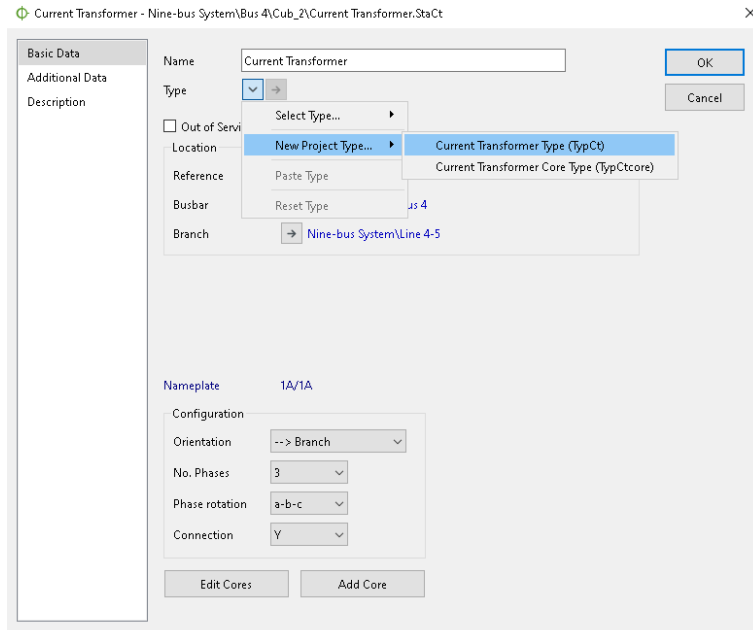


Figura 5.26: - Paso 2

Los mismos pasos indicados llevan a la creación de un TP, aquí se establecen los valores primarios y secundarios como se indica en la siguiente figura.

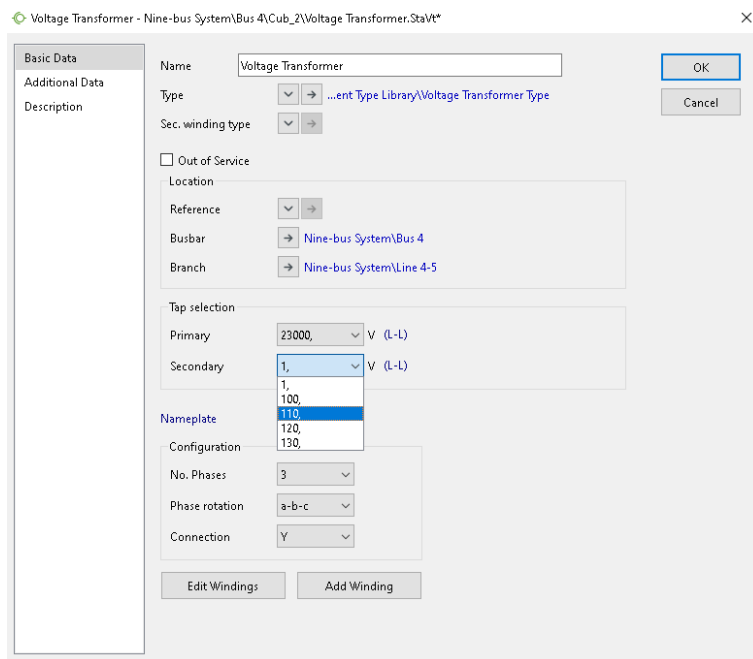


Figura 5.27: Creación de transformador de potencial

Creación del relé de distancia

Para añadir el relé se selecciona un modelo de la librería de DigSilent y se añade como indican las figuras 5.28 y 5.29. Se ha elegido el modelo 7SA8 5A.

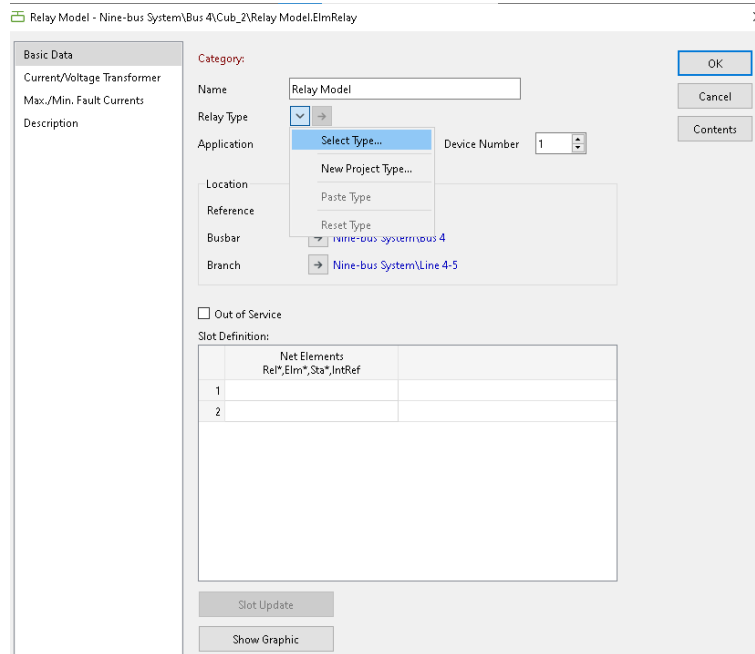


Figura 5.28: Importación del relé de distancia - Paso 1

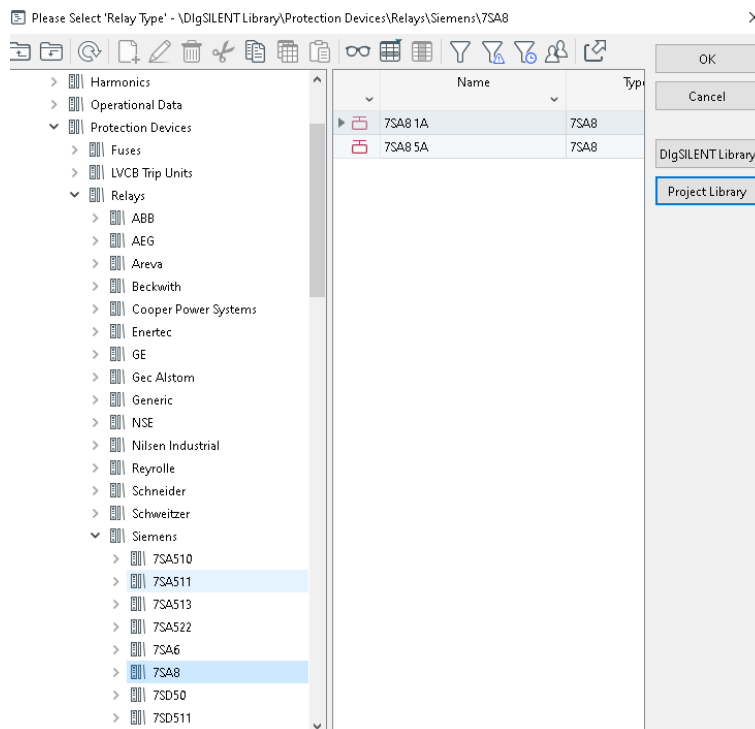


Figura 5.29: Importación del relé de distancia - Paso 2

Al cargar el relé se añaden todas las funciones del modelo, y se añaden inmediatamente los transformadores de medida (Ct,Vt) que se crearon inicialmente.

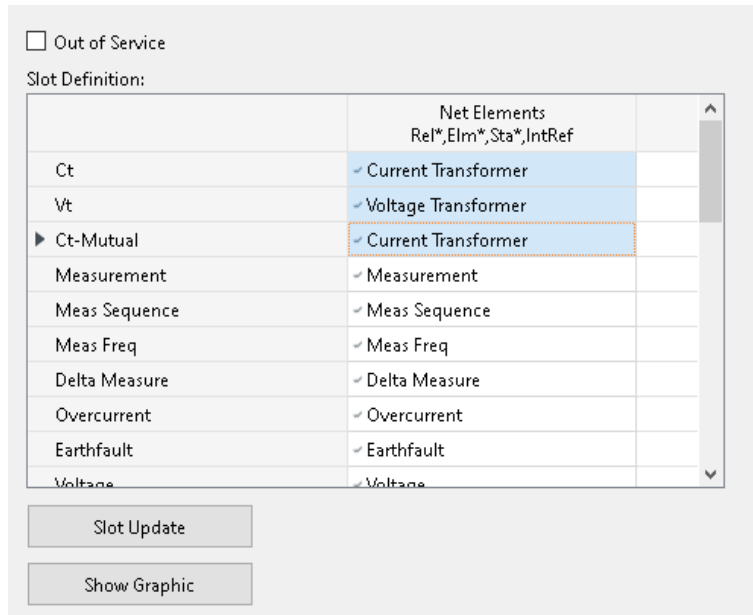


Figura 5.30: Configuración de relé de distancia - Paso 1

Se encuentran dos formas de ajuste; Mho y poligonal, estas funciones se encuentran para la serie RMD y en su forma clásica. Se recomienda usar la forma clásica para la poligonal y las RMD para la Mho.

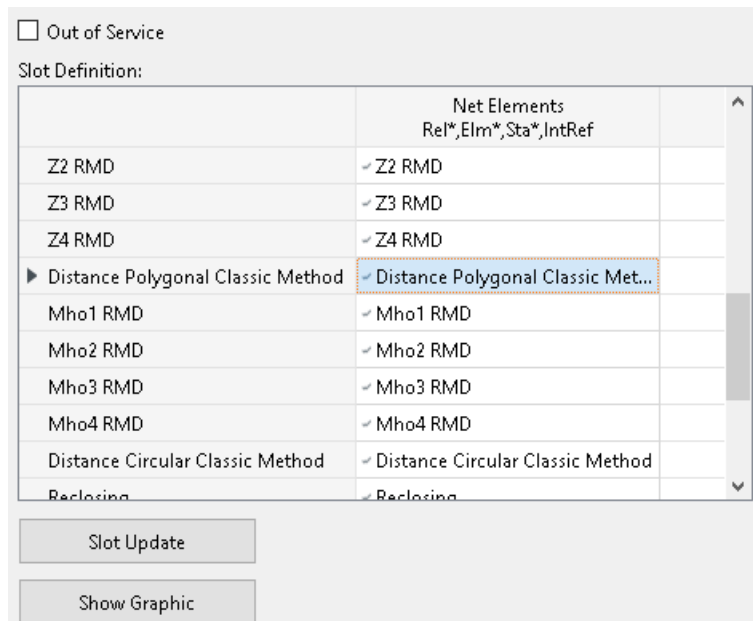


Figura 5.31: Configuración de relé de distancia - Paso 2

Dentro de la forma clásica poligonal se encuentran los bloques de configuración de las zonas. En los bloques *Polarizing* se configura los factores de compensación residual y mutua. Las Figuras 5.32 y 5.33 indican las ventanas con lo mencionado.

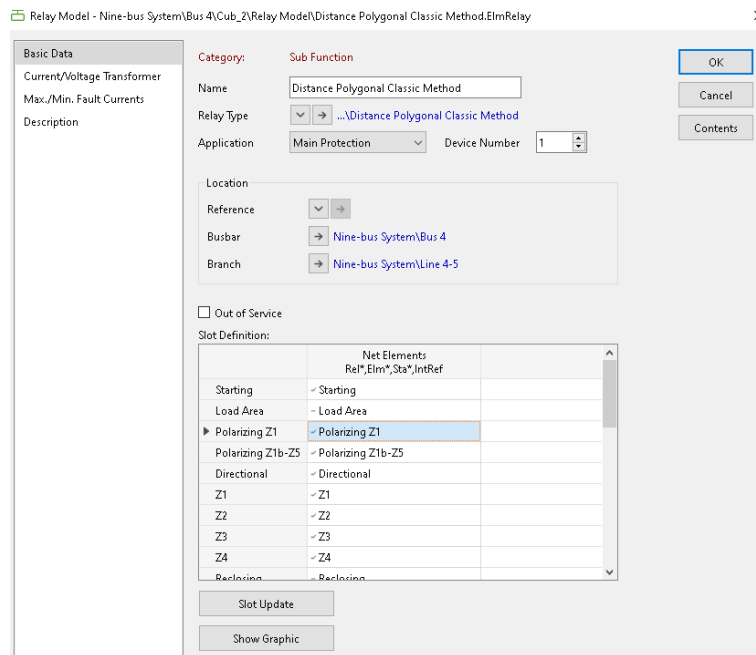


Figura 5.32: Configuración de relé de distancia - Paso 3

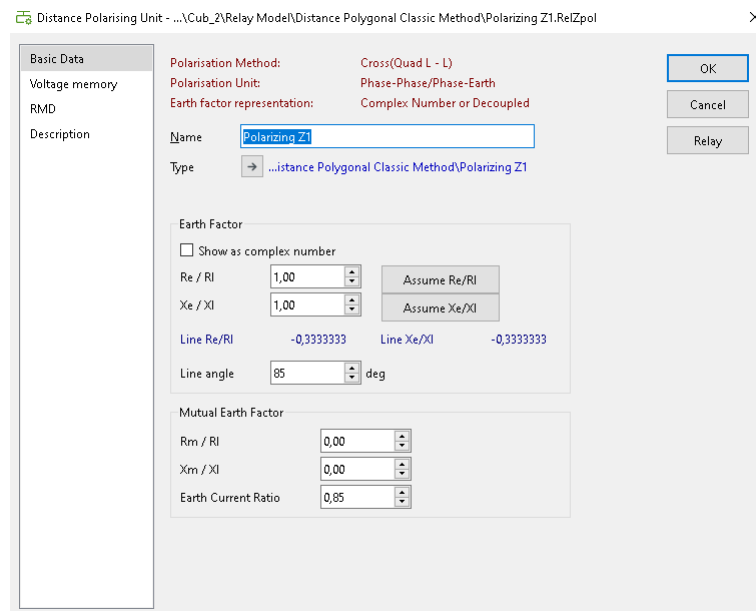


Figura 5.33: Configuración de relé de distancia - Paso 4

Creación de diagramas R-X

Para poder visualizar los diagramas R-X de la protección es necesario primero establecer el tramo de las líneas protegidas. Se selecciona las líneas y con click derecho se añade una nueva parte como se ve en la Figura 5.34.

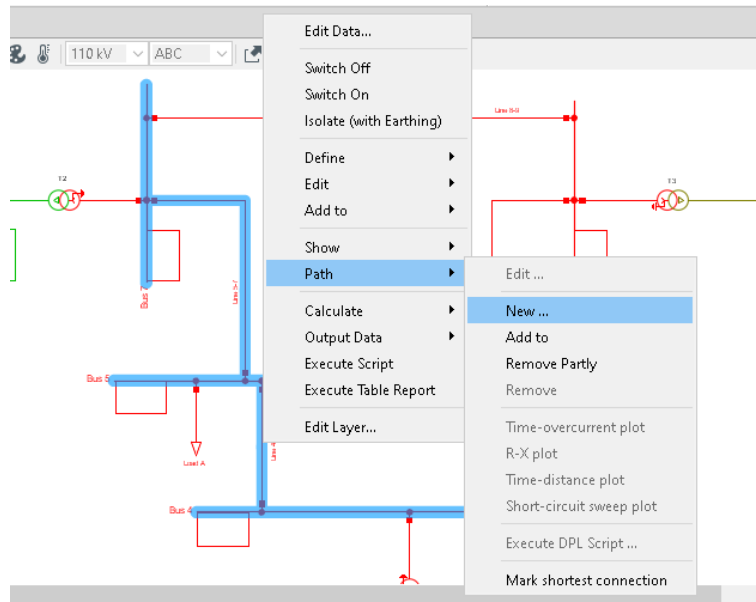


Figura 5.34: Creación de diagramas R-X - Paso 1

Aparecerá la ventana que se muestra en la Figura 5.35. Se añade el nombre, se verifica el orden de la selección y se puede establecer el color distintivo de la parte añadida.

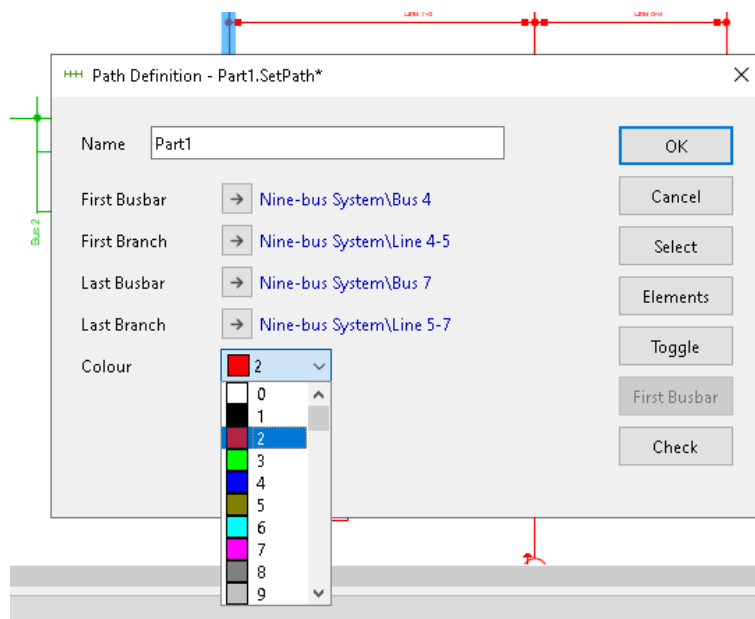


Figura 5.35: Creación de diagramas R-X - Paso 2

Para ver las ventanas con los diagramas R-X se da click derecho dentro de la parte añadida anteriormente y se selecciona *R-X plot* como lo indica la siguiente figura.

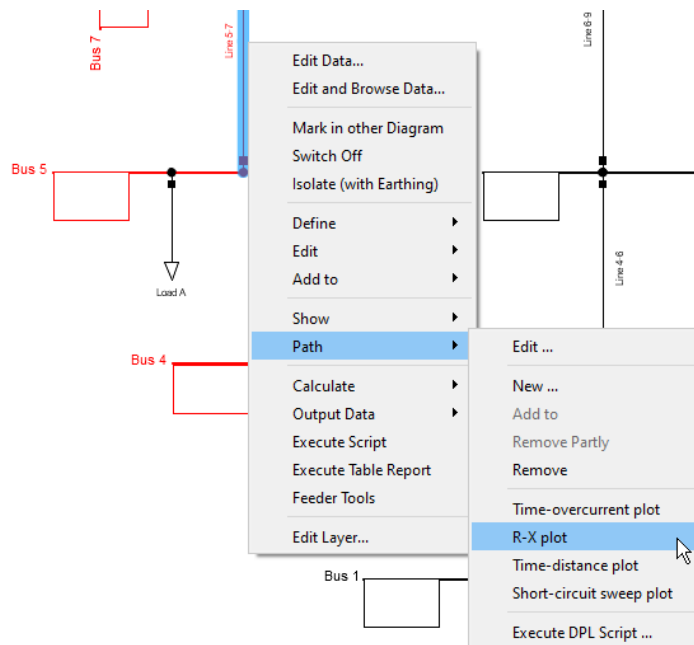


Figura 5.36: Creación de diagramas R-X - Paso 3

Acoplamiento mutuo de líneas

La Figura 5.37 muestra el paso inicial para acoplar líneas paralelas. Se seleccionan las líneas y con click derecho se define como *Line Couplings*.

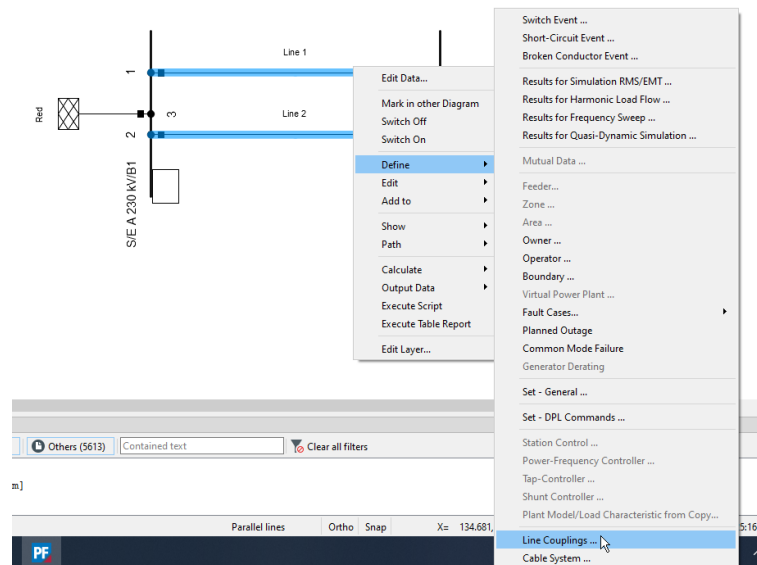


Figura 5.37: Acoplamiento de líneas paralelas - Paso 1

En la ventana que aparece en la Figura 5.38, se selecciona en crear nuevo objeto (*New Object*). Después en la siguiente ventana, se inserta un tipo de torre geométrica.

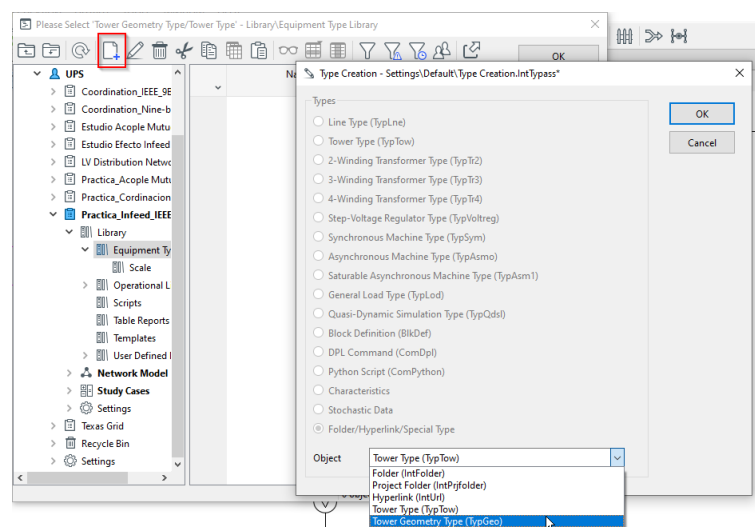


Figura 5.38: Acoplamiento de líneas paralelas - Paso 2

En la ventana siguiente mostrada en la 5.39 se colocan los valores de la disposición geométrica de la torre.

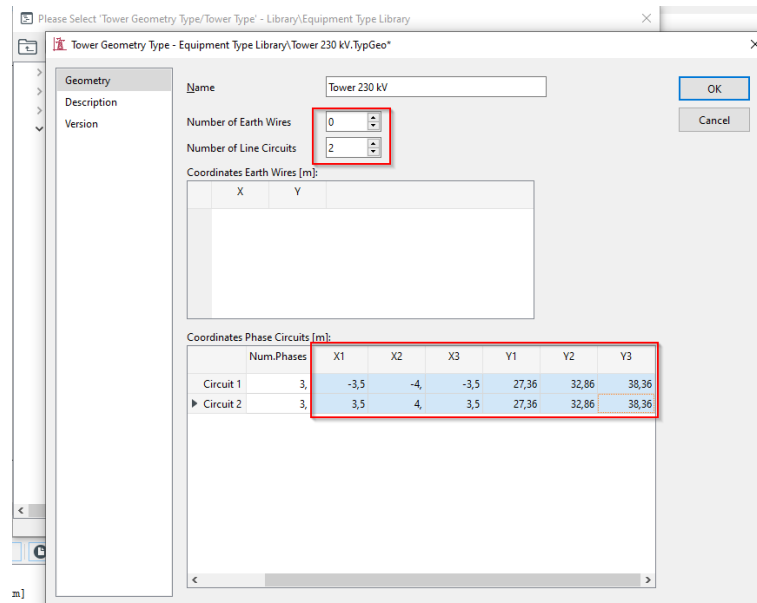


Figura 5.39: Acoplamiento de líneas paralelas - Paso 2

En la nueva ventana aparecerá el archivo con la torre creada. Se da click en ella y se ingresa a cualquiera de las líneas que aparecen como se observa en la Figura 5.40.

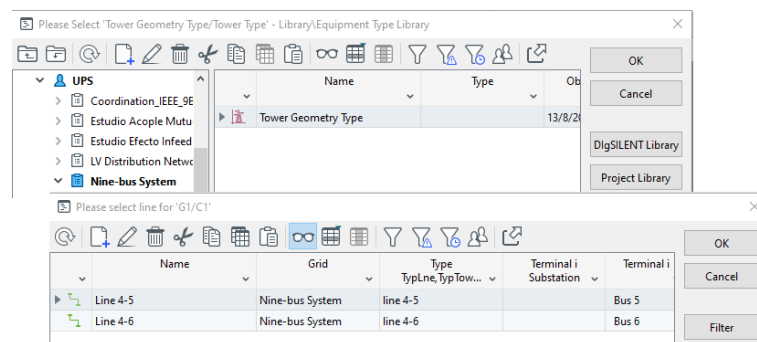


Figura 5.40: Acoplamiento de líneas paralelas - Paso 4

Aparecerá la ventana de la Figura 5.41 donde se debe colocar el tipo de conductor, bien puede ser añadido desde las librerías o creando un nuevo tipo de conductor como se ve en las Figuras 5.42 y 5.43.

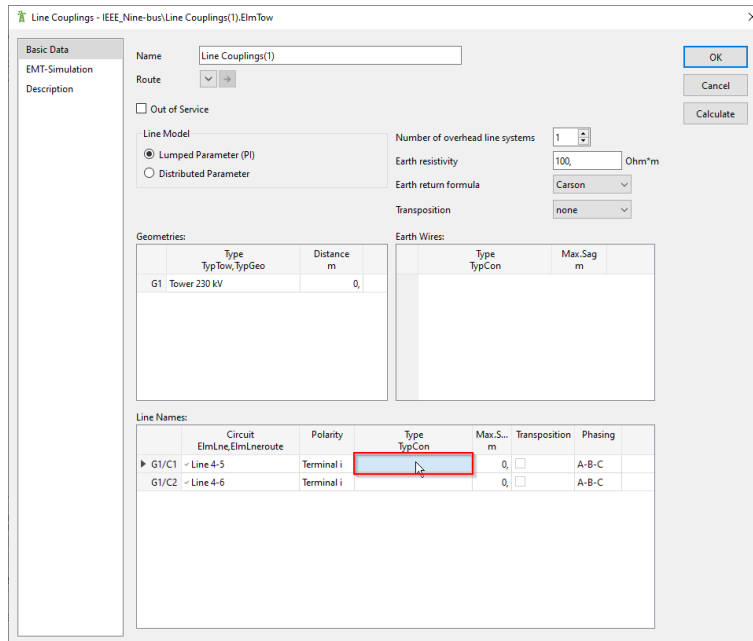


Figura 5.41: Acoplamiento de líneas paralelas - Paso 5

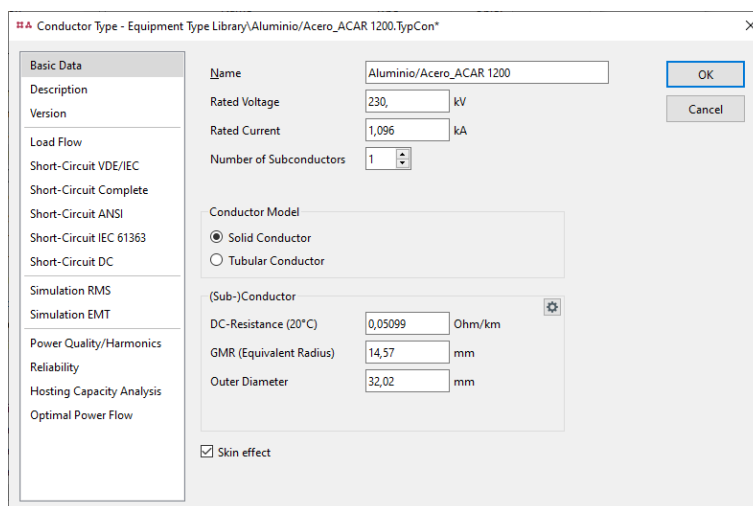


Figura 5.42: Acoplamiento de líneas paralelas - Paso 6

Finalmente se confirma el archivo del nuevo conductor creado y para la siguiente línea se añade directamente este nuevo conductor. Al confirmar esto se podrá ver el sistema ya acoplado mutuamente.

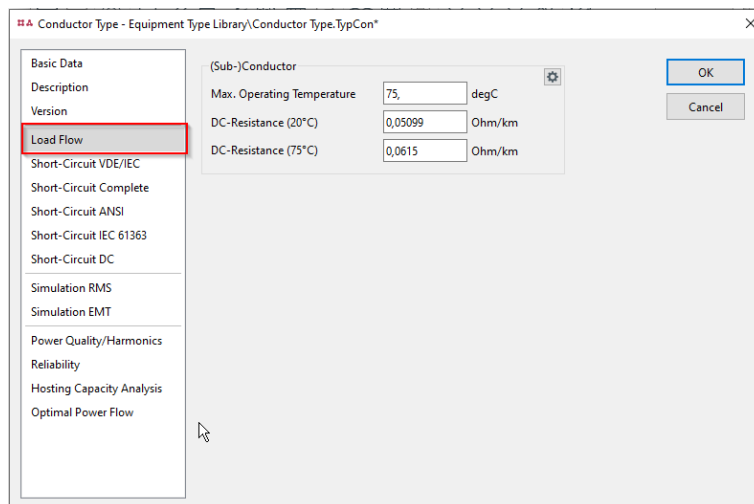


Figura 5.43: Acoplamiento de líneas paralelas - Paso 7