

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA SIMULACIÓN DE MÉTODOS DE POLARIZACIÓN DE LA PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE DIRECCIONAL DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO**

ESTEBAN SEBASTIÁN VACA BARRAGÁN

sebasv7@hotmail.com

DIRECTOR: DR.-ING. FABIÁN ERNESTO PÉREZ YAULI

fabian.perez@epn.edu.ec

Quito, septiembre 2019

AVAL

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Esteban Sebastián Vaca Barragán, bajo mi supervisión.

DR.-ING. FABIÁN ERNESTO PÉREZ YAULI
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Esteban Sebastián Vaca Barragán, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

Esteban Sebastián Vaca Barragán

DEDICATORIA

A Dios por regalarme la vida.

A mis padres y hermanas.

A mis fieles acompañantes: Alex y Samantha.

AGRADECIMIENTO

A mi familia, por ser el motor de mi vida y motivarme cada día a ser mejor.

Al Padre David de la Torre, por ser mi guía espiritual y alguien a quien considero un pilar importante en mi desarrollo como persona.

A todos los profesores del Departamento de Energía Eléctrica de la EPN por la formación profesional recibida.

Al Dr. Fabián Pérez, cuya ayuda, amistad y dirección para la culminación de este trabajo valoraré siempre.

¡Gracias de todo corazón!

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	XI
ABSTRACT	XII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. OBJETIVOS	2
1.2. ALCANCE	2
1.3. JUSTIFICACIÓN	3
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. CORTOCIRCUITOS EN SISTEMAS DE POTENCIA.....	4
2.1.1 Cortocircuitos.....	4
2.1.2 Tipos de cortocircuito.....	4
2.1.3 Componentes simétricas	4
2.1.3.1 Relación entre las cantidades de secuencia y de fase	5
2.1.4 Redes de secuencia	6
2.2. PROTECCIONES ELÉCTRICAS	7
2.2.1 Elementos de un sistema de protección	7
2.2.2 Protección primaria y de respaldo.....	8
2.2.2.1 Protección primaria	8
2.2.2.2 Protección de respaldo.....	9
2.2.3 Propiedades de los sistemas de protección.....	10
2.2.3.1 Sensibilidad	11
2.2.3.2 Selectividad	11
2.2.3.3 Rapidez.....	11
2.2.3.4 Confiabilidad.....	11
2.2.4 Tipos de relés de protección	12
2.2.4.1 Clasificación según su tecnología	12
2.2.4.2 Clasificación según su función general	12
2.3. PROTECCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	13
2.3.1 Protecciones utilizadas	13

2.3.2	Protección no unitaria	14
2.3.3	Teleprotección	15
2.3.4	Consideraciones adicionales	17
2.3.4.1	Topología de un sistema eléctrico	17
2.3.4.1.1	Topologías de líneas de transmisión.....	17
2.3.4.2	Longitud de una línea según la relación SIR	18
2.3.4.3	Acoplamiento mutuo.....	18
2.3.4.4	Desbalance inherente.....	18
2.4.	DESCRIPCIÓN DE LA PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE DIRECCIONAL DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	19
2.4.1	Fundamentos de la protección.....	19
2.4.2	Estructura de la protección	20
2.4.3	Unidad de sobrecorriente.....	20
2.4.3.1	Tiempo de operación.....	20
2.4.3.2	Configuración del relé.....	21
2.4.3.3	Concepto básico de coordinación.....	21
2.4.3.4	Relé de sobrecorriente de fase y de tierra.....	22
2.4.4	Unidad direccional	23
2.4.4.1	Principio de funcionamiento electromecánico.....	23
2.4.4.2	Polarización de la corriente de cortocircuito	26
2.4.4.3	Unidad direccional de fase y de tierra	27
2.4.5	Identificación de Métodos de Polarización	28
2.4.5.1	Métodos de polarización de la Unidad direccional de Fase	28
2.4.5.1.1	Método de polarización con voltaje de la propia fase.....	28
2.4.5.1.2	Método de polarización en cuadratura.....	29
2.4.5.1.3	Polarización cruzada.....	31
2.4.5.2	Métodos de polarización de la Unidad direccional de Tierra.....	32
2.4.5.2.1	Polarización con Voltaje de Secuencia Cero	33
2.4.5.2.2	Polarización con Voltaje de Secuencia Negativa	34
2.4.6	Sensibilidad de los métodos de polarización	35
2.4.6.1	Parámetros de las cantidades umbrales.....	36
2.4.7	Representación gráfica a través de la característica direccional.....	36
2.4.8	Selección y ajuste de métodos de polarización.....	38
2.4.8.1	Selección de un método de polarización	38
2.4.8.2	Ajuste de los ángulos de dirección	38
2.4.8.2.1	Ángulo Característico del Relé (RCA) o de máximo torque (MTA)....	38
2.4.8.2.2	Ángulo de Operación del Relé (ROA).....	39

2.4.8.2.3	Ángulos de los límites de dirección α y β	39
2.4.9	Dirección real de una corriente de cortocircuito	40
2.4.10	Aplicaciones de la protección.....	41
2.4.10.1	Configuraciones generales actuales de la protección.....	42
3.	HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN Y METODOLOGÍA DE ESTUDIO DE MÉTODOS DE POLARIZACIÓN	44
3.1.	IDENTIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE POLARIZACIÓN A SIMULAR	45
3.2.	ENTORNO DE PROGRAMACIÓN.....	46
3.2.1	Software PowerFactory.....	46
3.2.1.1	Descripción general.....	46
3.2.1.2	Principales funcionalidades	46
3.2.1.3	Complementos de programación y simulación del software	47
3.2.1.4	Área de protecciones	47
3.2.2	Lenguaje de programación de DIgSILENT (DPL)	48
3.2.2.1	Descripción general.....	48
3.2.2.2	Estructura del comando DPL.....	48
3.2.2.3	Desarrollo de un programa en DPL	50
3.2.2.3.1	Creación del comando DPL	50
3.2.2.3.2	Declaración de variables.....	51
3.2.2.3.3	Escritura de las instrucciones del programa	52
3.2.2.3.4	Parametrización y ejecución del comando DPL	52
3.2.2.4	Ejemplo de un programa en lenguaje DPL.....	53
3.3.	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL ...	55
3.3.1	Requerimientos funcionales básicos de la herramienta	55
3.3.2	Funcionalidades específicas de PowerFactory y del lenguaje DPL para el diseño 56	
3.3.2.1	Comandos requeridos	56
3.3.2.2	Elementos para el manejo de datos	57
3.3.2.3	Elementos para mostrar resultados.....	58
3.3.3	Diseño de la herramienta computacional	58
3.3.4	Generalidades de la herramienta implementada.....	60
3.3.4.1	Descripción general del comando DPL	61
3.3.4.2	Subrutinas del comando DPL.....	63
3.3.4.3	Generalidades del código del programa	64
3.4.	METODOLOGÍA DE ESTUDIO DE MÉTODOS DE POLARIZACIÓN.....	67
3.4.1	Simulación independiente de métodos en cada extremo de una línea	68
3.4.1.1	Características de la simulación y del cálculo de cortocircuitos.....	68

3.4.1.2	Modo de análisis	69
3.4.2	Simulación conjunta de métodos de ambos extremos de una línea.....	73
3.4.2.1	Análisis frente al uso de métodos de polarización distintos en los extremos de una línea.....	74
3.4.2.2	Análisis frente al efecto del acoplamiento mutuo.....	75
3.4.3	Comparación entre métodos de polarización.....	76
3.4.3.1	Comparación entre métodos de la unidad de fase	76
3.4.3.2	Comparación entre métodos de la unidad de tierra.....	80
3.4.4	Determinación de métodos de polarización y sus ajustes más adecuados....	81
3.4.4.1	Selección de los métodos de polarización más adecuados.....	81
3.4.4.1.1	Selección para la unidad direccional de fase	81
3.4.4.1.2	Selección para la unidad direccional de tierra.....	83
3.4.4.2	Obtención de los ajustes de un método de polarización.....	83
3.4.4.2.1	Función objetivo.....	84
3.4.4.2.2	Características de la simulación	87
3.4.4.2.3	Herramienta de cálculo	88
3.4.4.2.4	Cálculo de los ángulos de los límites de dirección	88
3.4.5	Resumen de la metodología de estudio.....	89
4.	APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	91
4.1.	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ESTUDIO.....	91
4.1.1	Sistema de prueba.....	91
4.1.2	Parametrización general de la herramienta	93
4.2.	EJERCICIO DE APLICACIÓN I – LÍNEA DE SIMPLE CIRCUITO	94
4.2.1	Simulación independiente de métodos en cada extremo	94
4.2.1.1	Unidad direccional de fase	95
4.2.1.1.1	Polarización con voltaje de la propia fase (polarización propia).....	95
4.2.1.1.2	Polarización en cuadratura	97
4.2.1.1.3	Polarización cruzada.....	99
4.2.1.2	Unidad direccional de tierra.....	100
4.2.1.2.1	Polarización con voltaje de secuencia cero	100
4.2.1.2.2	Polarización con voltaje de secuencia negativa.....	101
4.2.2	Simulación conjunta de métodos de ambos extremos	103
4.2.3	Comparación entre métodos de polarización.....	103
4.2.3.1	Unidad direccional de fase	104
4.2.3.2	Unidad direccional de tierra.....	105
4.2.3.3	Ventajas y desventajas de los métodos de polarización.....	106

4.2.4	Determinación de métodos de polarización y sus ajustes más adecuados..	107
4.2.4.1	Unidad direccional de fase	107
4.2.4.2	Unidad direccional de tierra.....	108
4.3.	EJERCICIO DE APLICACIÓN II – LÍNEA DE DOBLE CIRCUITO	109
4.3.1	Simulación independiente de métodos en cada extremo	109
4.3.1.1	Unidad direccional de fase	109
4.3.1.1.1	Polarización propia	109
4.3.1.1.2	Polarización en cuadratura	111
4.3.1.1.3	Polarización cruzada.....	113
4.3.1.2	Unidad direccional de tierra.....	114
4.3.1.2.1	Polarización con voltaje de secuencia cero	114
4.3.1.2.2	Polarización con voltaje de secuencia negativa	115
4.3.2	Simulación conjunta de métodos de ambos extremos	116
4.3.2.1	Esquema de las unidades de fase.....	117
4.3.2.2	Esquema de las unidades de tierra	119
4.3.3	Comparación entre métodos de polarización	120
4.3.3.1	Unidad direccional de fase	120
4.3.3.2	Unidad direccional de tierra.....	121
4.3.3.3	Ventajas y desventajas de los métodos de polarización.....	121
4.3.4	Determinación de métodos de polarización y sus ajustes más adecuados..	122
4.3.4.1	Unidad direccional de fase	122
4.3.4.2	Unidad direccional de tierra.....	123
4.4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS EJERCICIOS I Y II	123
4.5.	EJERCICIO DE APLICACIÓN III.....	128
4.5.1	Casos de prueba.....	129
4.5.2	Presentación de resultados.....	129
4.5.3	Análisis de resultados	131
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	133
5.1.	CONCLUSIONES	133
5.2.	RECOMENDACIONES	135
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	137
	ANEXOS.....	141
	ANEXO A. Sintaxis básica del lenguaje DPL.	
	ANEXO B. Herramienta computacional.	
	ANEXO C. Guía de usuario.	
	ANEXO D. Guía de uso de Solver para encontrar un RCA óptimo.	

ANEXO E. Modelo de la zona Molino-Milagro.

ANEXO F. Parámetros y cálculos adicionales.

ANEXO G. Resultados adicionales de simulación en el Ejercicio de aplicación I.

ANEXO H. Comparación de métodos en el extremo 2 del Ejercicio de aplicación I.

ANEXO I. Base de datos del Ejercicio de aplicación I.

ANEXO J. Resultados adicionales de simulación en el Ejercicio de aplicación II.

ANEXO K. Comparación de métodos en el extremo 2 del Ejercicio de aplicación II.

ANEXO L. Base de datos del Ejercicio de aplicación II.

RESUMEN

Actualmente, en el área de protecciones eléctricas del país existen limitaciones para estudiar en detalle los métodos de polarización de la protección de sobrecorriente direccional de líneas de transmisión debido a que el programa PowerFactory, comúnmente usado para el análisis de protecciones, no brinda esas facilidades. Dichos estudios son necesarios para identificar problemáticas y medidas correctivas en el funcionamiento de los métodos de polarización. El objetivo de este trabajo es desarrollar una herramienta computacional en el lenguaje de programación de DlgSILENT (DPL) que simule diferentes métodos de polarización, con la cual sea posible determinar el funcionamiento de tales métodos en líneas modeladas en PowerFactory en donde se ubican las protecciones mencionadas. Esta determinación se consigue a través de la evaluación de la capacidad de los métodos de polarización para definir la dirección de un conjunto extenso de cortocircuitos. Además, la información obtenida de las simulaciones es relevante para desarrollar estudios más detallados como la determinación de los métodos y sus ajustes más adecuados para las protecciones de líneas en particular. La herramienta propuesta es utilizada en varios ejercicios de aplicación considerando líneas con diferentes topologías del Sistema Nacional de Transmisión ecuatoriano. En estos ejercicios se evidencia la innovación y utilidad de la herramienta por brindar facilidades para la simulación de métodos de polarización y permitir obtener resultados de gran relevancia, tales como las mejores prestaciones de algunos métodos y la posibilidad de mejorar el desempeño de un método a través de sus ajustes.

PALABRAS CLAVE: DlgSILENT, DPL, línea de transmisión, método de polarización, PowerFactory, protección de sobrecorriente direccional.

ABSTRACT

Currently, in the protective relaying area in the country there are limitations to study accurately polarization methods of directional overcurrent protection of transmission lines because PowerFactory program, which is commonly used in protection analysis, does not provide those facilities. These studies are necessary to identify problems and corrective measures in the performance of polarization methods. The objective of this work is to develop a computational tool in DigSILENT Programming Language (DPL) that simulates different polarization methods, which it could be possible to determine the performance of these methods in lines modeled in PowerFactory where mentioned protections are located. This determination is achieved by evaluating the capacity of polarization methods to define the direction of an extensive set of short-circuits. Moreover, the information gotten by the simulations is relevant to develop more detailed studies such as the determination of more properly methods and adjustments to specific line protection. The proposed tool is used in several application exercises considering lines with different topologies of the Ecuadorian National Transmission System. In these exercises it is evident the innovation and the utility of the tool to give facilities to simulate polarizing methods and to allow to obtain highly relevant results, such as the best performance of some methods and the possibility of improving the performance of a method through its adjustments.

KEYWORDS: DigSILENT, DPL, transmission line, polarization method, PowerFactory, directional overcurrent protection.

1. INTRODUCCIÓN

Las protecciones eléctricas para líneas de transmisión reducen el impacto de cortocircuitos en estos elementos esenciales del Sistema Eléctrico de Potencia y permiten que éste siga funcionando al desconectar las áreas en problemas. El funcionamiento erróneo de las protecciones tiene resultados críticos en el sistema; por ejemplo, desconexiones innecesarias o cortocircuitos no detectados. Es por esto que en el área de protecciones eléctricas de empresas transmisoras y demás centros de investigación es de gran interés efectuar estudios para conseguir que las técnicas sobre las cuales se basa el funcionamiento de las diferentes protecciones eléctricas sean las más idóneas.

Con relación a la protección de sobrecorriente direccional de líneas de transmisión, usada por su capacidad para diferenciar la dirección de ocurrencia de un cortocircuito, se han desarrollado múltiples investigaciones en años recientes sobre problemáticas involucradas con dicha capacidad y el reporte de casos de actuaciones incorrectas de la misma. En este sentido, se debe señalar que tal capacidad se obtiene con los denominados métodos de polarización. Estos métodos comandan el funcionamiento de diferenciación de la protección y, por lo tanto, si estos métodos no presentan un desempeño adecuado, la protección es propensa a funcionar incorrectamente.

Es por esto que existe la necesidad de desarrollar estudios detallados sobre la protección de sobrecorriente direccional y específicamente de sus métodos de polarización con propósitos múltiples como identificar problemáticas en torno a dichos métodos en casos reales para establecer las correspondientes medidas correctivas.

Sin embargo, en el área de protecciones eléctricas del país existen limitaciones para efectuar dichos estudios debido a que los programas computacionales comúnmente usados para el análisis de protecciones no brindan esas facilidades. En el caso del software PowerFactory, ampliamente utilizado en el país, éste tampoco cuenta en sus últimas versiones con herramientas que permitan realizar los estudios mencionados.

En virtud de lo expresado, en el presente trabajo se propone una herramienta computacional en el lenguaje de programación de DIgSILENT (DPL) que simula en detalle el funcionamiento de diferentes métodos de polarización. La herramienta permite determinar el funcionamiento de tales métodos en líneas modeladas en PowerFactory en donde se ubicarían protecciones direccionales. Además, la información que brinda la herramienta es útil para desarrollar estudios más detallados, tales como la identificación de problemáticas en torno a dichos métodos y la definición de medidas correctivas ante esas

problemáticas; por ejemplo, la determinación de los métodos de polarización y sus ajustes más adecuados a ser aplicados en las protecciones de líneas en particular.

1.1. OBJETIVOS

El objetivo general de este Proyecto Técnico es: Desarrollar una herramienta computacional utilizando lenguaje de programación DPL para determinar, a través de simulación, el funcionamiento de diferentes métodos de polarización de la protección de sobrecorriente direccional de líneas de transmisión.

Los objetivos específicos de este Proyecto Técnico son:

- Describir a la protección de sobrecorriente direccional para identificar distintos métodos de polarización a ser simulados en el software PowerFactory.
- Determinar diversas funcionalidades del software PowerFactory y el lenguaje DPL necesarias para diseñar una herramienta computacional que simule diferentes métodos de polarización de la protección de sobrecorriente direccional de líneas de transmisión.
- Implementar la herramienta computacional diseñada utilizando lenguaje de programación DPL.
- Emplear la herramienta desarrollada para determinar el funcionamiento de varios de los métodos de polarización simulados en una parte del Sistema Nacional de Transmisión del Ecuador considerando líneas de transmisión con diferentes topologías.

1.2. ALCANCE

El trabajo de titulación contempla inicialmente una revisión bibliográfica y descripción acerca de la protección de sobrecorriente direccional de líneas de transmisión, a partir de lo cual se identificarán diferentes métodos de polarización aplicados en esta protección, sus características y su representación gráfica; específicamente se considerará, para el desarrollo de este trabajo de titulación, los métodos de polarización con voltaje de la propia fase, polarización en cuadratura y polarización cruzada, para la protección de sobrecorriente direccional de fase; y los métodos de polarización con voltaje de secuencia cero y polarización con voltaje de secuencia negativa, para la protección de sobrecorriente direccional de tierra.

Se revisarán distintas funcionalidades disponibles en el software PowerFactory y el lenguaje de programación DlgSILENT Programming Language (DPL) para determinar aquellas necesarias que permitan diseñar una herramienta computacional para simular el

comportamiento de los métodos de polarización indicados a partir de datos obtenidos de redes modeladas en el software.

Se implementará a través de lenguaje DPL la herramienta computacional diseñada. La simulación obtenida con esta herramienta entregará un conjunto de resultados gráficos y textuales relevantes para determinar el funcionamiento de los distintos métodos de polarización. Con esta información se podrán identificar las ventajas y desventajas de los métodos simulados, lo que permitirá al usuario establecer los métodos y sus ajustes más convenientes a ser aplicados a un sistema de transmisión.

Finalmente, se utilizará la herramienta desarrollada en una parte del Sistema Nacional de Transmisión ecuatoriano para efectuar simulaciones y determinar el funcionamiento de los distintos métodos de polarización indicados. De esta manera, para las diferentes topologías analizadas, se establecerán los métodos de polarización y sus ajustes más adecuados.

1.3. JUSTIFICACIÓN

La protección adecuada de un sistema de potencia reduce el impacto de fallas al evitar daños en sus elementos y en lo posible la pérdida del suministro, por lo tanto, es fundamental que durante el estudio y diseño de los sistemas de protecciones se cuente con las herramientas de simulación necesarias para determinar y garantizar de manera precisa y sin demoras la correcta actuación de los diversos tipos de protecciones previo a su instalación.

El desarrollo del proyecto permitirá a empresas transmisoras y estudiantes contar con un medio para simular y determinar el funcionamiento de diferentes métodos de polarización de la protección de sobrecorriente direccional y así obtener la información necesaria para poder definir el método y sus ajustes más convenientes para un sistema eléctrico a través de resultados textuales y gráficos conseguidos con simulación.

El trabajo de titulación incorpora una herramienta en DPL de gran utilidad para el aprendizaje; que facilitará la simulación versátil y gráfica de los métodos de polarización a través del software PowerFactory, usado ampliamente por las empresas del sector eléctrico y del cual la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la EPN posee una licencia, y que ampliará sus funcionalidades en el campo de estudio de esta protección.

Además, la herramienta en DPL, será fácilmente modificable y adaptable a las necesidades del usuario, por lo que ofrece una motivación a estudiantes para investigar sobre sistemas de protecciones y desarrollar nuevas funcionalidades para su estudio mediante este lenguaje de programación.

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan conceptos básicos que sustentan el desarrollo de este trabajo de titulación. La presentación empieza con un resumen de definiciones acerca de los cortocircuitos en Sistemas de Potencia. Luego, se describe la teoría básica de las protecciones eléctricas con énfasis en las aplicadas en líneas de transmisión. Finalmente, se realiza una descripción de la protección de sobrecorriente direccional de líneas de transmisión a fin de identificar diferentes métodos de polarización aplicados en esta protección.

2.1. CORTOCIRCUITOS EN SISTEMAS DE POTENCIA

2.1.1 CORTOCIRCUITOS

Los cortocircuitos o fallas son perturbaciones causadas por el contacto con una impedancia relativamente baja entre dos puntos con diferente potencial [1]. Estos ocurren por factores como pérdida del aislamiento de los equipos, eventos naturales o errores humanos.

2.1.2 TIPOS DE CORTOCIRCUITO

De acuerdo con las fases involucradas y la existencia de un contacto a tierra, los cortocircuitos pueden ser monofásicos, bifásicos aislados, bifásicos a tierra o trifásicos. Estos últimos se denominan fallas simétricas porque comprenden el contacto físico de las tres fases y, por lo tanto, mantienen el balance de un sistema. Por su parte, las fallas restantes se definen como asimétricas porque provocan un desbalance en el sistema [2].

2.1.3 COMPONENTES SIMÉTRICAS

Al ocurrir un desbalance en el sistema, ya no es posible efectuar su análisis en una base por fase como se realiza cuando el sistema es balanceado. A fin de simplificar tal análisis, el teorema de Fortescue establece una descomposición de un sistema trifásico desbalanceado en tres conjuntos de sistemas simétricos denominados: componentes de secuencia positiva, negativa y cero [3].

Según se muestra en la Figura 2.1, las componentes simétricas rotan con la misma frecuencia del sistema trifásico original (ω) en su misma dirección. Las componentes de secuencia positiva son tres fasores separados 120° entre sí en un orden *abc* en sentido horario; las de secuencia negativa son tres fasores separados 120° en un orden *acb* en sentido horario; mientras que las de secuencia cero son tres fasores con la misma dirección. Convencionalmente, se usa la nomenclatura V_1 , V_2 y V_0 para referirse a las componentes de secuencia positiva, negativa y cero en el caso de voltajes.

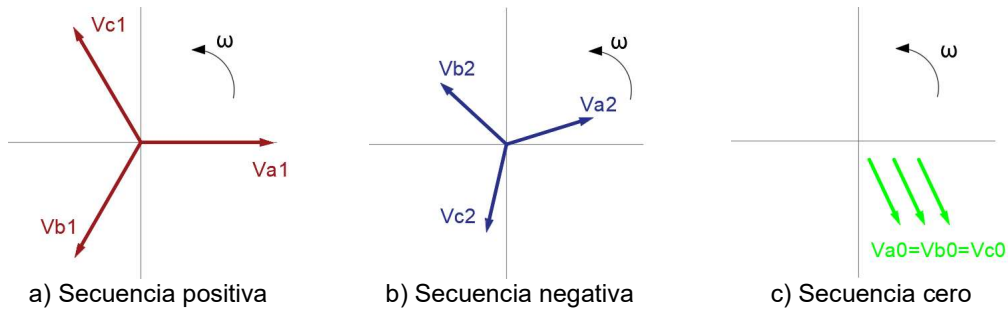


Figura 2.1. Componentes simétricas de secuencia

La suma fasorial de las componentes de secuencia para cada fase da lugar al sistema desbalanceado original según se muestra en la Figura 2.2.

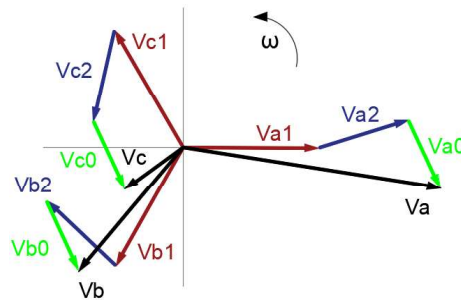


Figura 2.2. Combinación de componentes simétricas de secuencia

2.1.3.1 Relación entre las cantidades de secuencia y de fase

El operador a es usado para representar desfases de 120° entre las cantidades simétricas, de este modo, al multiplicar este operador por un fasor, este último rota 120° adicionales en sentido antihorario. Por lo anterior, las ecuaciones que relacionan a las componentes de secuencia y de fase están dadas por las siguientes expresiones [2].

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \quad (2.1)$$

$$V_b = V_{b0} + V_{b1} + V_{b2} = V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2} \quad (2.2)$$

$$V_c = V_{c0} + V_{c1} + V_{c2} = V_{a0} + a V_{a1} + a^2 V_{a2} \quad (2.3)$$

De este modo, la forma matricial de las ecuaciones se expresa como:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Además,

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Luego,

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Por lo tanto,

$$3V_0 = V_a + V_b + V_c \quad (2.7)$$

$$3V_1 = V_a + a V_b + a^2 V_c \quad (2.8)$$

$$3V_2 = V_a + a^2 V_b + a V_c \quad (2.9)$$

Las ecuaciones anteriores también se utilizan en relación con fasores de corriente.

2.1.4 REDES DE SECUENCIA

El análisis de un sistema desbalanceado a través de componentes simétricas es posible con el uso de tres redes independientes, las cuales son conexiones imaginarias que permiten el apareamiento de las componentes de secuencia ante una falla y se conectan entre sí en el punto en el que ocurre la falla según se muestra en la Figura 2.3 [2].

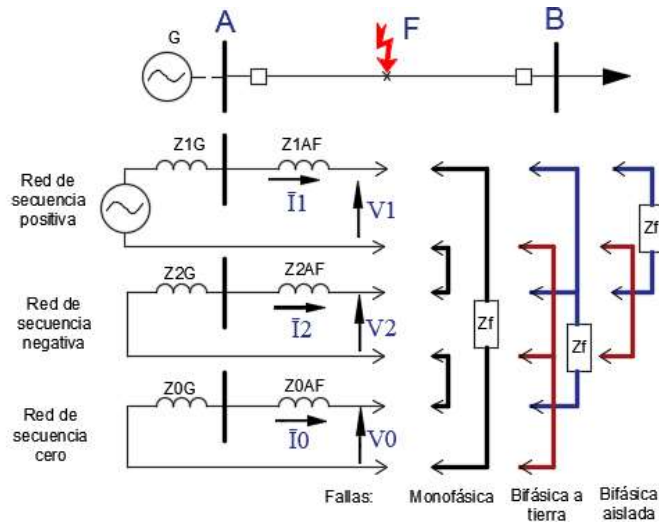


Figura 2.3. Conexión de redes de secuencia

Observaciones:

- Las impedancias Z_1 , Z_2 y Z_0 son las correspondientes a las secuencias positiva, negativa y cero respectivamente de los elementos del sistema.
- La impedancia Z_f se conoce como impedancia de falla entre los puntos cortocircuitados, normalmente es resistiva, en cuyo caso adopta el nombre de Resistencia de falla (R_f). Cuando $Z_f \approx 0$ se denomina a una falla como franca.

- Las corrientes de secuencia cero aparecen si existe un camino de flujo de corriente por tierra como sucede ante fallas monofásicas y bifásicas a tierra; de esta manera, en fallas bifásicas aisladas y trifásicas no existen componentes de secuencia cero.

2.2. PROTECCIONES ELÉCTRICAS

Las protecciones eléctricas son componentes fundamentales de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) por ser necesarias cuando el sistema se encuentra en problemas debido a fallas u otras perturbaciones intolerables que pueden afectar a los elementos de este sistema. En este sentido, las protecciones desconectan las áreas en problemas a fin de que el resto del sistema pueda continuar funcionando, entre otros beneficios, como evitar daños en equipos, instalaciones e inclusive peligros para las personas [4].

2.2.1 ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN

Las protecciones de un SEP se componen de una amplia gama de elementos; sin embargo, es posible distinguir los siguientes cuatro elementos básicos [5].

Relé

El Relé es considerado como el núcleo de un sistema de protección; éste recibe información de la red eléctrica para diferenciar entre una condición normal de una anormal y, frente a esta última, iniciar una acción de control según la lógica con la que se lo haya programado. Esta acción puede ser generalmente la apertura de un interruptor de potencia para desconectar elementos bajo fallas o perturbaciones. En varios ámbitos es común referirse a un relé de protección simplemente como protección.

Transformadores de medida

Los transformadores de medida hacen referencia a los transformadores de potencial (TPs) y a los de corriente (TCs); estos tienen como función obtener información de la red eléctrica a través de señales de voltaje y corriente respectivamente. Los transformadores aíslan la red eléctrica del sistema de protecciones y reducen las magnitudes medidas a señales tolerables que puedan ser utilizadas por un relé. De manera usual, las cantidades de la red eléctrica se denominan como primarias (kV.pri, kA.pri, Ω .pri) y las cantidades reducidas a la salida de los transformadores como secundarias (V.sec, A.sec, Ω .sec).

Interruptores de potencia

Los interruptores permiten la conexión de los equipos del SEP y son comandados por relés (u operadores) para desconectar tales equipos en caso de fallas u otras perturbaciones.

Los interruptores pueden ser maniobrados de forma directa, es decir, que éstos permiten la desconexión de equipos aun cuando exista algún flujo de corriente a través de ellos. Es común el uso del término *despeje de una falla* cuando un interruptor asociado a un elemento en falla ha abierto sus contactos para desconectar dicho elemento.

❑ Circuitos auxiliares

Los circuitos auxiliares comprenden todo el conjunto de circuitos que interconectan los tres elementos anteriores. En dicho conjunto se encuentran los circuitos que hacen de interfaz entre la operación del relé y el interruptor a comandar.

La Figura 2.4 ilustra los elementos de la protección de una línea de transmisión (L/T).

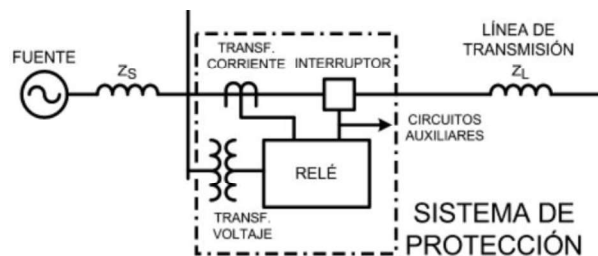


Figura 2.4. Sistema de protección de una línea de transmisión [6]

2.2.2 PROTECCIÓN PRIMARIA Y DE RESPALDO

Los sistemas de protección contra cortocircuitos son diseñados con dos modalidades de protección: una protección primaria o principal y una protección de respaldo. La principal constituye la primera línea de defensa de un equipo, mientras que la de respaldo se define como aquella que opera con componentes independientes de los de la protección primaria, lo que conlleva a una duplicación de la misma protección primaria (conocida también como primaria redundante) o a una protección que opera solo si la protección principal ha fallado o si se encuentra fuera de servicio [1].

Las modalidades indicadas se aplican a través de las denominadas zonas de protección, las cuales delimitan la cobertura o la región de alcance de la protección en donde un relé es capaz de detectar un cortocircuito, por lo tanto, existen zonas primarias y de respaldo.

2.2.2.1 Protección primaria

La protección primaria se caracteriza porque desconecta solo el elemento fallado, de este modo, es la primera línea de defensa de un elemento y, por lo tanto, su actuación debe ser instantánea para minimizar el impacto de un cortocircuito (en el orden de milisegundos). Según se ilustra en la Figura 2.5, para cada elemento existe su respectiva zona primaria.

Los interruptores dentro de cada zona deben ser los únicos en abrirse ante una falla en el elemento protegido a fin de desconectar el menor número de elementos.

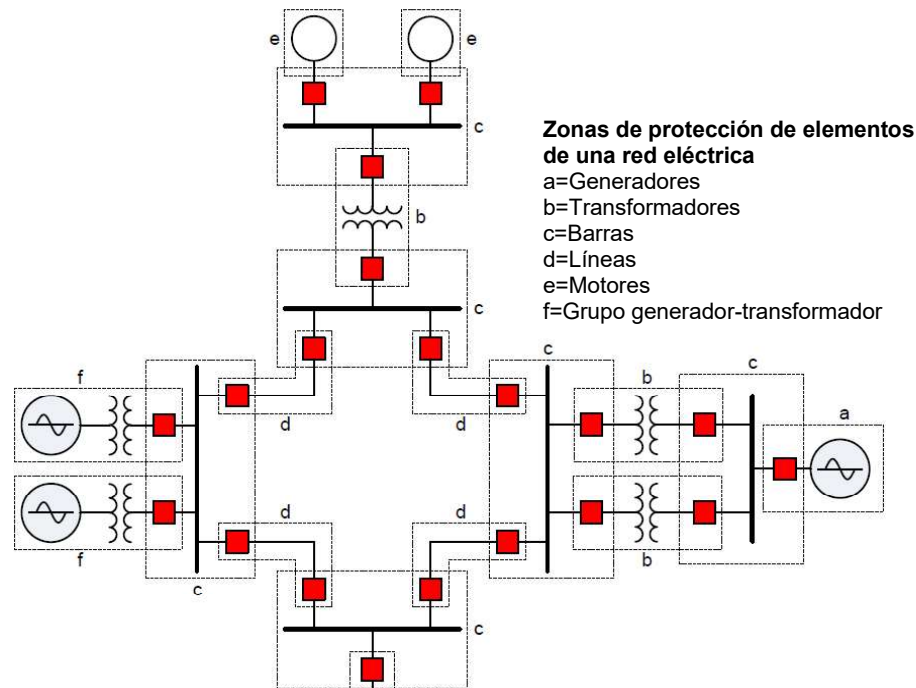


Figura 2.5. Ejemplos de zonas de protección primarias [7]

Es evidente que existen zonas de traslape, en las que una falla provocaría la apertura de más de un elemento, sin embargo, esto se admite porque sin este traslape existirían partes del sistema sin ser protegidas, también conocidas como *zonas muertas*.

2.2.2.2 Protección de respaldo

La protección de respaldo es exclusiva ante cortocircuitos, debido a que estos son las perturbaciones con mayor frecuencia [8]. La protección de respaldo debe funcionar con elementos independientes de los de la principal, de modo que un defecto en la principal no afecte también a la protección de respaldo. Con este fin, la protección de respaldo puede optar por utilizar diferentes relés, TCs, TPs, principios de funcionamiento e inclusive una diferente localización que la de la protección principal. Con relación a la diferente localización, en un SEP pueden existir protecciones de respaldo locales y remotas.

La protección local es aquella ubicada en la misma subestación en donde se encuentra la primaria; ésta puede poseer una zona de protección igual que la zona primaria cuando se ha duplicado a la protección principal (protección de respaldo redundante). Por otro lado, la protección remota es aquella ubicada en una subestación distinta a donde se ubica la primaria. La zona de protección remota puede abarcar otros elementos además del fallado.

En la Figura 2.6 se esquematiza un sistema de protecciones con distintas zonas de protección. Para la línea de transmisión CD, existe una protección de respaldo local 1 (redundante) cuya zona de protección es igual que la zona primaria; una protección de respaldo local 2 ubicada en la subestación S/E2 y una protección de respaldo remoto en la subestación S/E1 (protecciones de respaldo para la protección del extremo C). Estas dos últimas con zonas más amplias que la zona primaria.

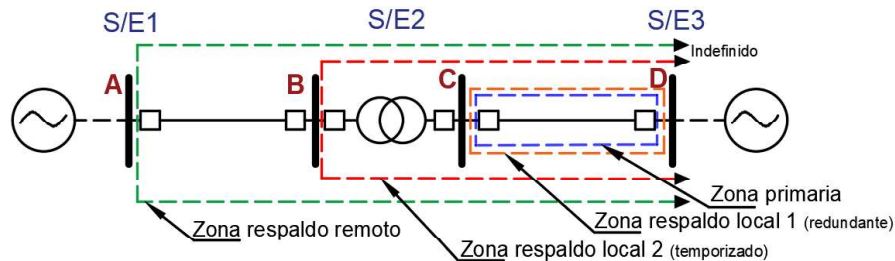


Figura 2.6. Ejemplos de zonas de protección de respaldo

Es preciso señalar que la protección de respaldo, a menos de que ésta sea redundante, debe operar con un tiempo de retardo para permitir que la protección principal opere primero, puesto que generalmente la operación de una protección de respaldo conlleva a la desconexión de un número mayor de elementos.

Observaciones:

- ♦ Una protección principal cubre fallas en el elemento protegido y a la vez puede funcionar como protección de respaldo para otros equipos de forma inherente.
- ♦ Cada zona se delimita a través de los TCs que alimentan el relé correspondiente, a excepción de las zonas de respaldo, las cuales pueden extenderse indefinidamente.
- ♦ Todas las protecciones deben detectar una falla al mismo tiempo; dicha detección se conoce como *arranque de la protección*, no obstante, cada una, dependiendo de su temporización, provocaría un disparo de los interruptores en tiempos distintos; esta acción se denomina como *operación de la protección*.
- ♦ La operación de una protección de respaldo no redundante es incorrecta a menos que la correspondiente protección primaria no haya sido capaz de operar.

2.2.3 PROPIEDADES DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN

La efectividad de un sistema de protección requiere que éste cumpla con ciertas propiedades básicas descritas a continuación [9].

2.2.3.1 Sensibilidad

La sensibilidad es una propiedad que permite que una protección sea capaz de actuar ante perturbaciones que ejerzan tendencias mínimas de operación dentro de una zona de protección, lo cual requiere que la protección pueda detectar condiciones anormales con facilidad. Esto está ligado normalmente al valor de ajuste que limita el punto en el que una protección debe arrancar. Si la magnitud de una condición anormal debe superar tal ajuste para que cierta protección opere, entonces se dice que esa protección es más sensible cuando su ajuste puede ser menor a fin de detectar condiciones de menor impacto.

2.2.3.2 Selectividad

Es una estrategia global que involucra a varios relés de un sistema de protección para que estos operen en coordinación entre sí, de modo que cada uno sea capaz de diferenciar si es o no necesaria su operación, así como el tiempo de operación. Este término se asocia usualmente con la coordinación entre relés. La propiedad permite que se pueda discriminar la localización de un cortocircuito para desconectar solo los elementos en falla.

2.2.3.3 Rapidez

El impacto de una falla sobre un elemento depende del tiempo de duración de la misma, de este modo, a fin de que tal impacto se minimice, el tiempo que tarda una protección en operar cobra gran importancia. La rapidez de una protección para desconectar el equipo bajo falla es una propiedad necesaria que es cuidadosamente estudiada, dado que los tiempos de operación de los relés del sistema deben coordinarse apropiadamente.

2.2.3.4 Confiabilidad

La confiabilidad, en el área de protecciones eléctricas, hace referencia a la capacidad de una protección para actuar correctamente, de modo específico, esta actuación se relaciona con el hecho de operar o no operar, por lo tanto, la confiabilidad se determina desde estos dos aspectos, denominados formalmente como fiabilidad y seguridad [7].

Fiabilidad

Es la capacidad de una protección para operar cuando es necesario que ésta lo haga, es decir, ante el apareamiento de una perturbación dentro de su zona de protección. Cuando una protección no cumple con tal capacidad, es usual referirse al término *falla para operar*.

Seguridad

Es la capacidad de una protección de no operar (abstenerse) cuando no es necesario que ésta lo haga. Cuando ocurre una operación no deseada en las protecciones, es común utilizar el término de *falso disparo*.

La fiabilidad y seguridad usualmente se relacionan de forma inversa, puesto que generalmente al aumentar la fiabilidad de una técnica de protección, la seguridad se ve afectada y viceversa. En las protecciones ante cortocircuitos, por ejemplo, incrementar la sensibilidad de un relé mejora la fiabilidad, sin embargo, la seguridad decrece.

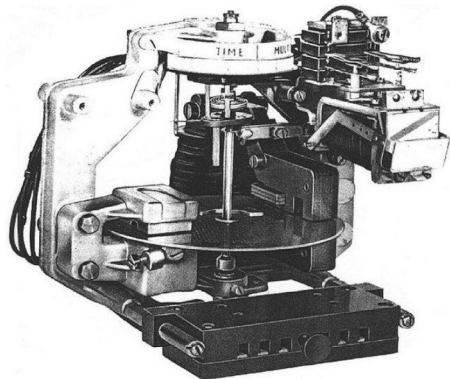
2.2.4 TIPOS DE RELÉS DE PROTECCIÓN

Existen varias formas para clasificar relés de protección. A continuación, se presentan dos formas usualmente empleadas en el área de protecciones [9].

2.2.4.1 Clasificación según su tecnología

En esta clasificación se considera la tecnología con la que se han fabricado los componentes de los relés; según este criterio, los relés pueden clasificarse en electromecánicos, de estado sólido, digitales o numéricos.

Los relés electromecánicos son casi obsoletos, sin embargo, muchos de sus principios de operación y terminologías son aún empleados en las tecnologías actuales más sofisticadas como es el caso de los relés numéricos. La Figura 2.7 muestra dos ejemplos de relés.



a) Relé electromecánico tipo disco [10]



b) Relé numérico SIPROTECT de Siemens [11]

Figura 2.7. Ejemplos de relés de protección

2.2.4.2 Clasificación según su función general

El Instituto Americano de Estándares Nacionales (ANSI, por sus siglas en inglés) ha estandarizado los relés de protección de acuerdo con su función general a través del Código ANSI [12]. En la Tabla 2.1 se expone un resumen de este código.

Es común el uso de sufijos para especificar el elemento en el que el relé es usado. Además, el sufijo N suele ser utilizado para referirse a los relés que detectan fallas a tierra.

Tabla 2.1. Resumen del Código ANSI para relés de protección

Código ANSI	Dispositivo
21	Relé de distancia
27	Relé de bajo voltaje
32	Relé de potencia inversa
46	Relé de sobrecorriente de secuencia negativa
50	Relé de sobrecorriente instantáneo
51	Relé de sobrecorriente temporizado
67	Relé de sobrecorriente direccional
85	Relé de teleprotección
87	Relé diferencial

2.3. PROTECCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Existen definiciones comunes en torno a la protección de líneas ante cortocircuitos. En este apartado se exponen dichas definiciones en forma general.

2.3.1 PROTECCIONES UTILIZADAS

En virtud de que las líneas son los elementos más propensos a la ocurrencia de fallas, sus sistemas de protección son complejos y se configuran de diversas formas. La protección de una línea puede tener dos modalidades: una protección independiente en cada extremo de la línea, también llamada protección no unitaria, y otra denominada como teleprotección. La primera hace referencia a los relés que pueden operar en cada extremo de una línea por sí solos, mientras que la segunda se refiere a los sistemas de protección que emplean canales de comunicación para que los relés de los extremos se comuniquen y funcionen conjuntamente. En la Figura 2.8 se muestra la clasificación de estas protecciones [13].

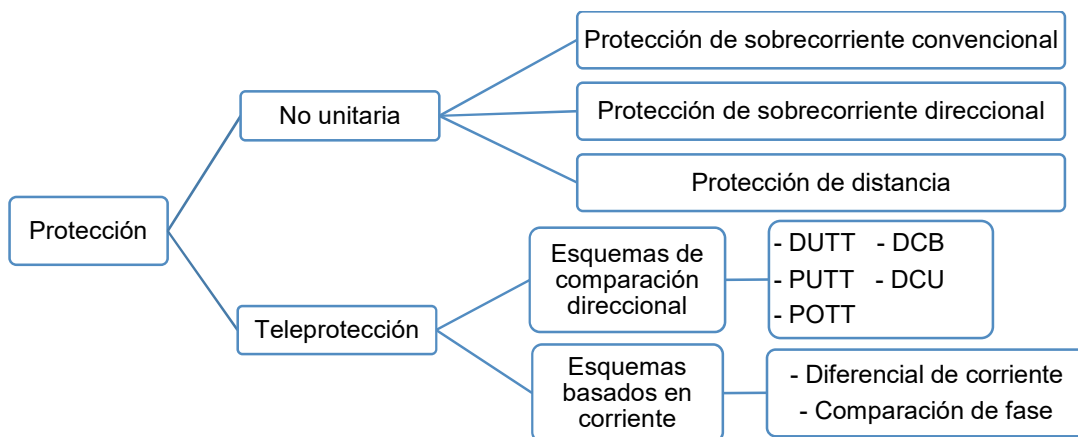


Figura 2.8. Protecciones ante cortocircuitos en líneas de transmisión

2.3.2 PROTECCIÓN NO UNITARIA

La protección independiente o no unitaria se ubica generalmente en cada extremo de una línea y funciona de forma autónoma con respecto a la protección del otro extremo. Esta protección puede ser implementada para la operación ante fallas entre fases y fallas a tierra y utiliza relés de sobrecorriente convencionales, direccionales y relés de distancia; cuyo funcionamiento básico se describe a continuación [7]. Más adelante, en la sección 2.4 se presenta una descripción detallada de la protección de sobrecorriente direccional.

□ Protección de sobrecorriente convencional

Esta protección (que usa relés ANSI 50/51) es una de las más simples; su funcionamiento se basa en la magnitud de la corriente medida por el relé, de manera que, cuando tal magnitud supera un límite o umbral ajustable, conocido como corriente de *Pick-up* o de *TAP*¹ (I_{TAP}), la protección arranca. La aplicación de esta protección es limitada en líneas de transmisión, puesto que en muchos casos no es posible establecer una adecuada coordinación entre ésta y otras protecciones. En sistemas radiales con fuentes en un extremo o cuando las fallas en un sentido presentan bajas magnitudes es posible su uso. Además, la protección es muy sensible a los cambios topológicos, por lo que en muchos casos ésta requiere ser reajustada con mayor frecuencia que otras protecciones.

□ Protección de sobrecorriente direccional

La protección de sobrecorriente direccional (ANSI 67) es una modificación de la protección de sobrecorriente convencional que cuenta con todas sus características y, adicionalmente, es capaz de operar solo ante cortocircuitos que tienen una determinada dirección, lo cual facilita su uso en líneas de transmisión; puesto que, a pesar de que una falla puede tomar distintas direcciones, esta protección en particular, dada su unidireccionalidad, solo requiere ser coordinada con otros relés que detectan fallas en la misma dirección. Esto conlleva a grandes ventajas, puesto que facilita la tarea de coordinación con otras protecciones y evita situaciones en las que una protección de sobrecorriente convencional provocaría desconexiones innecesarias.

□ Protección de distancia

La protección de distancia (ANSI 21) funciona con el cálculo de una impedancia a partir de las mediciones de voltaje y corriente de los TPs y TCs que sirve para determinar la

¹ Los términos *Pick-up* o *TAP* se usaron en relés electromecánicos para referirse al valor de corriente capaz de provocar actuación en un relé a través de partes móviles. Hasta la actualidad, en relés numéricos estos términos aún son empleados para referirse al límite de arranque de un relé.

presencia de una falla. La protección define su zona de operación en diagramas de impedancia (R vs X); de modo que, para que un relé opere, el valor de impedancia calculado debe situarse dentro de dicha zona. Una de sus particularidades es que en ocasiones tiene problemas para detectar cortocircuitos a tierra con resistencias de falla elevadas, por lo que es usual que se use en complemento a la protección de sobrecorriente de tierra, dado que esta última posee mayor sensibilidad para detectar las fallas indicadas.

2.3.3 TELEPROTECCIÓN

La protección independiente o no unitaria no permite el despeje instantáneo de una falla cercana a los extremos de una línea, debido a que, al detectar una falla solo con la información de un extremo, todas aquellas cercanas al otro extremo serán despejadas con la introducción de un retardo a fin de evitar perder la coordinación con relés cercanos. Una solución ante este problema son los esquemas de teleprotección, los cuales utilizan un canal de comunicación entre los extremos de una línea para discriminar si una falla se encuentra en la línea protegida (zona primaria) o fuera de ella. Esta información permite despejar fallas localizadas en cualquier parte de la línea instantáneamente. De esta manera, la teleprotección provee cobertura en la zona primaria sin respaldo temporizado adicional y sin la necesidad de coordinarse con otras protecciones. En esta forma de protección se distinguen dos tipos de esquemas denominados como: esquemas de comparación direccional y esquemas basados en corriente [13].

□ Esquemas de comparación direccional

En estos esquemas se hace uso de la protección de sobrecorriente direccional y/o de la protección de distancia en ambos extremos de una línea (protecciones capaces de discriminar la dirección de una falla). El funcionamiento básico de este tipo de esquema consiste en despejar una falla en la línea a partir de la información que los relés de cada extremo envían mediante un canal de comunicación cuando estos han detectado una falla.

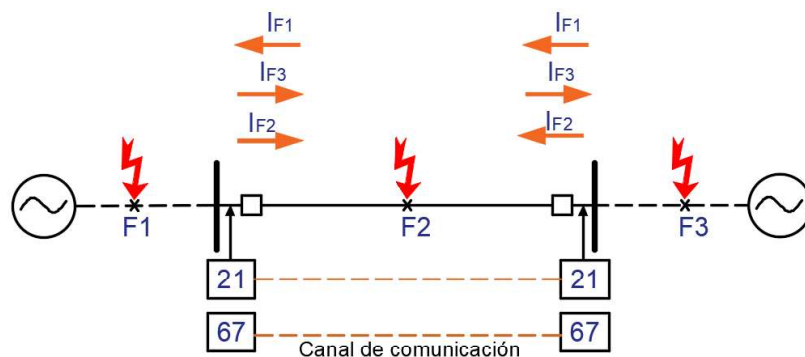


Figura 2.9. Funcionamiento de una teleprotección por comparación direccional

El funcionamiento correcto de un esquema se muestra en la Figura 2.9. Cuando una falla se ubica en la línea protegida (F2), los relés de ambos extremos detectan una falla hacia adelante (I_{F2}), mientras que si la falla es externa (F1 o F3), uno de los relés detecta que la falla es hacia adelante y el otro detecta que la falla es hacia atrás, visto de otra forma, *ambos relés no detectan fallas externas con dirección hacia adelante al mismo tiempo*.

La detección de una falla efectuada por cada relé y transferida a través de un canal de comunicación permite que el relé de cada extremo procese su información en conjunto con la correspondiente al relé del extremo opuesto. Luego de esto, es posible que los circuitos lógicos de los relés que comandan el disparo de los interruptores de cada extremo de la línea establezcan una decisión final para operar o no operar. La decisión puede efectuarse según varios tipos de esquemas, los mismos que se implementan según criterios como el alcance de la protección en cada extremo, el modo de confirmación o la confiabilidad del canal de comunicación. En la Tabla 2.2 se muestran los esquemas clásicos [7].

Tabla 2.2. Esquemas de teleprotección de comparación direccional

Siglas en inglés	Nombre del esquema
DUTT	Disparo directo transferido con subalcance
PUTT	Disparo transferido con permisivo de subalcance
POTT	Disparo transferido con permisivo de sobrealcance
DCB	Bloqueo de comparación direccional
DCU	Desbloqueo de comparación direccional

Ante la ocurrencia de una falla en la línea protegida, en los esquemas más simples que funcionan con la protección de sobrecorriente direccional, las corrientes de falla que fluyen en cada extremo deben ser detectadas con una dirección hacia adelante y superar la I_{TAP} correspondiente en cada relé de los extremos para un despeje efectivo de la falla.

□ Esquemas basados en corriente

El funcionamiento de estos esquemas se basa en la comparación de la corriente medida en ambos extremos. En forma típica, se usa el relé diferencial para establecer la diferencia fasorial de las corrientes de ambos extremos, de manera que la protección opera cuando esta diferencia supera un umbral establecido. En la Figura 2.10 se ilustra este esquema de protección. Por otra parte, el esquema de comparación de fase, cuyo empleo es menos usual, realiza la comparación del ángulo de la corriente en ambos extremos.

Finalmente, se debe señalar que en los relés numéricos actuales es posible disponer de todas las protecciones mencionadas (protección no unitaria y teleprotección) en dispositivos compactos. Es por esto que es usual que tales protecciones se denominen

simplemente como funciones para evitar confusión, puesto que es posible que el relé sea único en cada extremo, pero que las funciones en dicho relé sean varias.

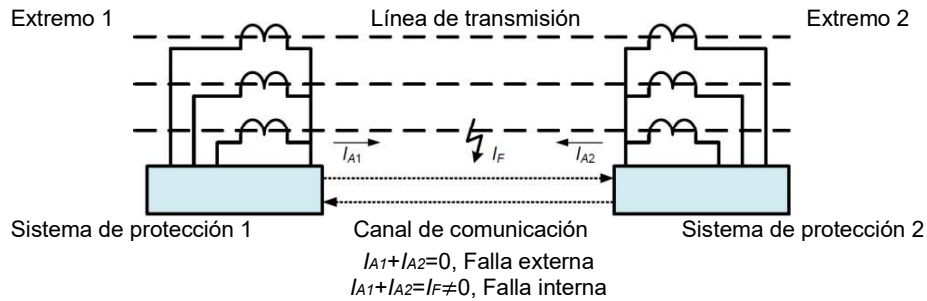


Figura 2.10. Esquema de teleprotección con relés diferenciales [7]

2.3.4 CONSIDERACIONES ADICIONALES

Existen varios factores que se ven involucrados de forma inherente en el desempeño de las protecciones de líneas. A continuación, se describen algunos relacionados principalmente en el funcionamiento de la protección de sobrecorriente direccional.

2.3.4.1 Topología de un sistema eléctrico

Un sistema eléctrico puede presentar topologías (formas de diseño) como las de la Figura 2.11. En estas configuraciones, cuando existe alimentación desde ambos extremos de una línea, es posible que las corrientes de falla puedan fluir en varias direcciones, por lo tanto, las protecciones deben ser capaces de discriminar de forma adecuada su operación ante ciertas fallas.

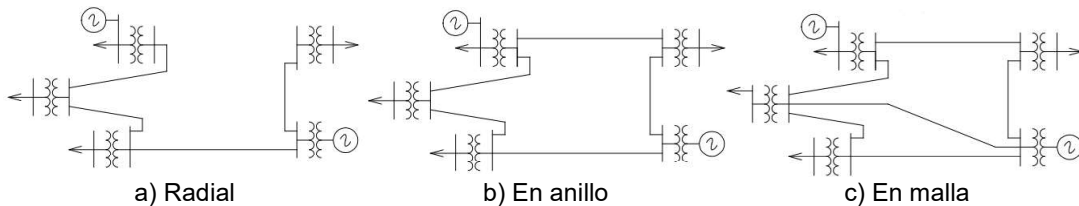


Figura 2.11. Topologías de un sistema eléctrico [14]

2.3.4.1.1 Topologías de líneas de transmisión

La topología de una línea puede describirse según el número de circuitos que ésta tiene y según cómo se conectan tales circuitos. Con relación a líneas de doble circuito, en el área de protecciones se han desarrollado varios estudios de las protecciones de tierra (distancia y sobrecorriente) considerando usualmente las topologías de la Figura 2.12.

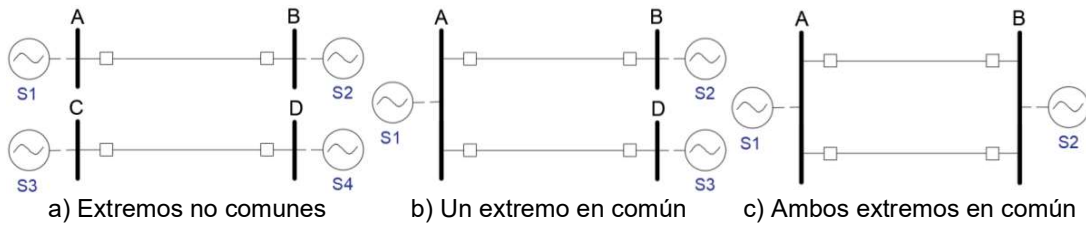


Figura 2.12. Variaciones topológicas de una línea de doble circuito [7]

2.3.4.2 Longitud de una línea según la relación SIR

La relación entre la impedancia de la fuente equivalente detrás de un relé y la impedancia de la línea delante (SIR, por sus siglas en inglés) es un parámetro utilizado para clasificar la longitud de una línea en lugar de su distancia física. El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) clasifica las líneas como: cortas cuando $SIR > 4$; medianas cuando $0.5 \leq SIR \leq 4$; y largas cuando $SIR < 0.5$. Existen varios factores que influyen en la impedancia de la fuente equivalente, de modo que la relación SIR no es constante [7].

2.3.4.3 Acoplamiento mutuo

Los circuitos en una misma torre o en estructuras cercanas se exponen a efectos de inducción por el acoplamiento mutuo entre ellos. Los acoplamientos en redes de secuencia positiva y negativa son normalmente despreciables; no obstante, en la red de secuencia cero el acoplamiento puede ser considerable, por lo que las protecciones que miden variables de secuencia cero pueden verse afectadas. El acoplamiento puede considerarse como una caída de voltaje en una impedancia mutua Z_{0M} en una línea producto de una corriente $3I_0$ que fluye por otra línea (Figura 2.13). El acoplamiento depende de factores como la longitud de las líneas o la cercanía de los circuitos acoplados. A medida que la longitud de los circuitos acoplados es mayor, la magnitud del acoplamiento crece [15].

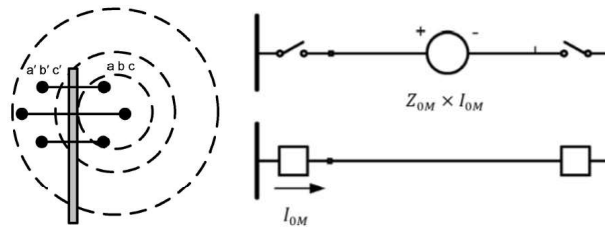


Figura 2.13. Modelo de acoplamiento mutuo en líneas de transmisión [16]

2.3.4.4 Desbalance inherente

A pesar de que el desbalance en líneas de transmisión es aproximadamente nulo, los relés, en casos reales, miden pequeños desbalances aún en condiciones normales de operación.

Estos son producto de varios factores; por ejemplo, el hecho de que las líneas no son perfectamente transpuestas, de modo que las impedancias de cada fase no son exactamente las mismas. Otros factores también se adicionan a este desbalance como los errores en la precisión de los transformadores de medida. El desbalance inherente puede afectar el comportamiento de algunas protecciones altamente sensibles [17].

2.4. DESCRIPCIÓN DE LA PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE DIRECCIONAL DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

En este apartado se describe a la protección de sobrecorriente direccional a fin de identificar diferentes métodos de polarización aplicados en esta protección, sus características y su representación gráfica. Además, se aclaran varios términos que serán empleados a lo largo de este documento.

2.4.1 FUNDAMENTOS DE LA PROTECCIÓN

La protección de sobrecorriente direccional funciona de acuerdo con la magnitud y la dirección de una falla. La operación de la protección ocurre cuando la magnitud de una falla supera un límite especificado y cuando esta corriente tiene una determinada dirección, es decir, la protección discrimina su operación para un sentido de flujo de la falla y se inhabilita o se abstiene cuando la falla fluye en sentido contrario. En la Figura 2.14 se muestra este funcionamiento, el cual considera a la corriente en términos fasoriales para la discriminación. En ambos casos se asume que la falla ha superado la I_{TAP} de la protección, de modo que el relé ha detectado una falla, sin embargo, la operación se produce solo para un sentido de flujo [8].

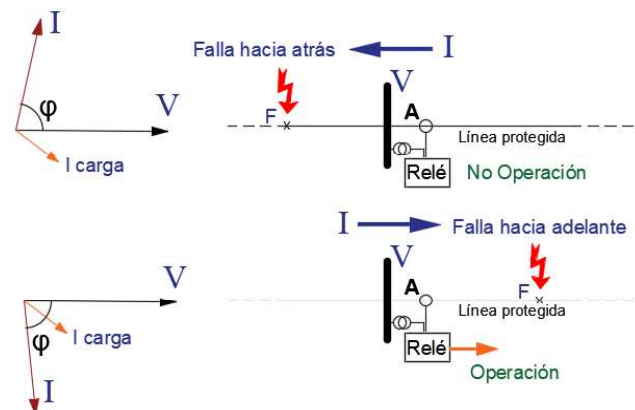


Figura 2.14. Funcionamiento básico de la protección de sobrecorriente direccional

La capacidad para definir la dirección de una falla permite que la protección actúe controladamente para establecer la ubicación de la misma. Para el relé de la Figura 2.14,

la dirección de la falla está asociada con su posición, es decir, si ésta se encuentra *hacia adelante* (Forward, en inglés) o *hacia atrás* (Reverse, en inglés) del relé. La convención usual, adoptada en este proyecto, es que el relé se configure para operar solo ante fallas hacia adelante (dirección de disparo). Si el relé se configura para operar ante fallas hacia atrás, la lógica expuesta es contraria.

2.4.2 ESTRUCTURA DE LA PROTECCIÓN

La protección se compone de dos elementos independientes uno del otro, una unidad de sobrecorriente y una unidad direccional. La primera es un elemento con las mismas funciones de un relé de sobrecorriente convencional, mientras que la segunda es la encargada de discriminar la dirección de una falla. En la Figura 2.15 se muestra esta estructura. El arranque de la protección es posible si ambas unidades han operado. La protección puede ser vista como un relé convencional adicionado con una unidad direccional. Es por esto que, para una comprensión completa de la protección, se describirá tanto al relé de sobrecorriente convencional como a la unidad direccional [9].

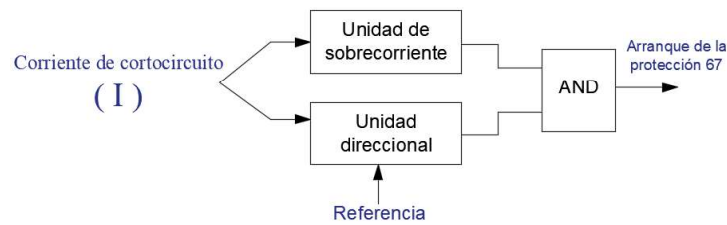


Figura 2.15. Estructura básica de la protección de sobrecorriente direccional

2.4.3 UNIDAD DE SOBRECORRIENTE

2.4.3.1 Tiempo de operación

Un relé de sobrecorriente opera cuando la magnitud de un cortocircuito supera un valor de corriente I_{TAP} en un tiempo que depende de esa magnitud. Este tiempo define dos formas de protección: una instantánea (ANSI 50) y una temporizada (ANSI 51). Esta última tiene a su vez la clasificación de la Figura 2.16.

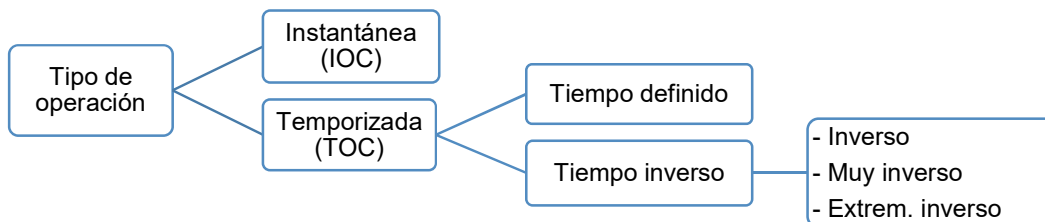


Figura 2.16. Tipos de relés de sobrecorriente según su tiempo de operación

El tiempo de operación permite la coordinación entre relés, de modo que, ante una falla, solo los relés especificados para hacerlo operen primero. La Figura 2.17 muestra las denominadas *curvas tiempo-corriente*, las cuales relacionan el tiempo de operación de un relé en función de la corriente detectada [7].

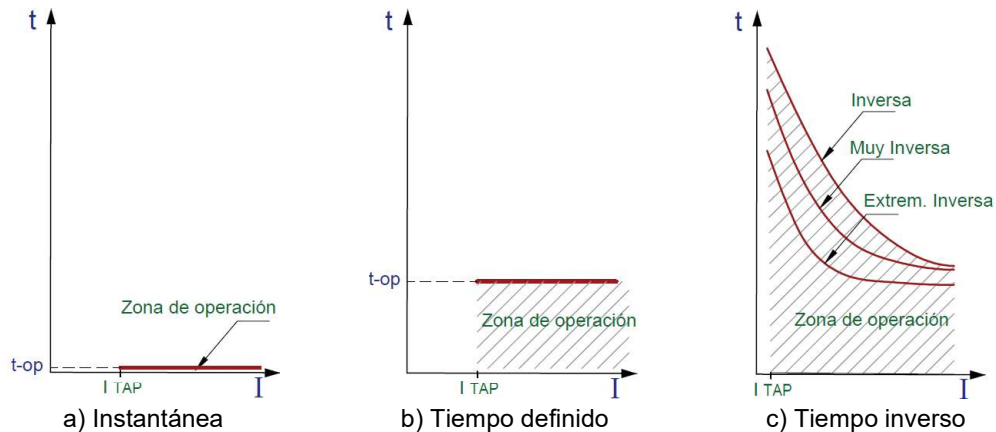


Figura 2.17. Curvas características tiempo-corriente de un relé de sobrecorriente

2.4.3.2 Configuración del relé

El relé se configura a través de la selección y modificación de la característica tiempo-corriente a usar (Figura 2.17); dicha modificación se efectúa sobre la corriente I_{TAP} , el Dial y el tipo de curva. La corriente I_{TAP} es un parámetro que fija el límite por sobre el cual el relé puede arrancar y su configuración es un desplazamiento horizontal de la curva. Por otra parte, el Dial, en el caso de relés temporizados, es un desplazamiento en tiempo (vertical) de la curva característica. Finalmente, el tipo de curva: inversa, muy inversa o extremadamente inversa; se selecciona de acuerdo con la pronunciación de la misma [4].

2.4.3.3 Concepto básico de coordinación

La coordinación del relé de sobrecorriente permite que éste funcione en conjunto con otros relés. Para la explicación de la idea de coordinación [13], se considera el modo de protección no unitario (sin teleprotección) y se supone que la dirección de la corriente es única por existir una sola alimentación de forma radial como se muestra en la Figura 2.18.

La idea de coordinar relés es que el despeje de una falla se efectúe en el menor tiempo posible con la desconexión mínima de elementos. El uso único del relé instantáneo para una línea no puede satisfacer aquello, puesto que fallas en la línea a proteger cercanas a una barra no serían diferenciadas con precisión de fallas en la misma barra o en líneas adyacentes, de modo que el relé puede causar desconexiones indeseadas. En este sentido, el uso del relé instantáneo solo es posible si se reduce su alcance a un porcentaje

de la línea según se indica en la Figura 2.18. Para el resto de la línea, la única alternativa es el uso adicional de un relé temporizado por curva inversa. El tiempo de retardo entre la operación de los relés evita que más de dos operen ante una falla.

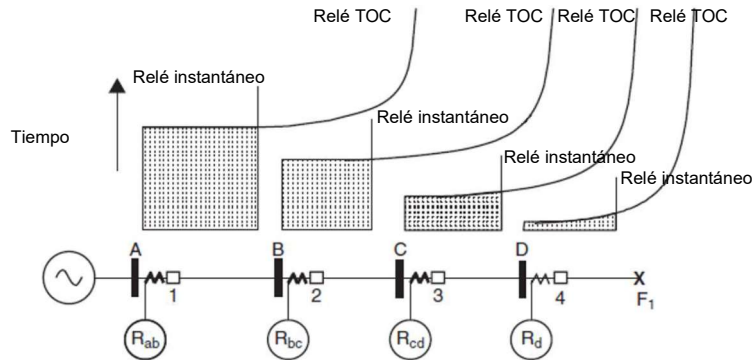


Figura 2.18. Concepto básico de coordinación de relés de sobrecorriente [13]

Es preciso señalar que la configuración de la I_{TAP} en cada relé es la que permite limitar su alcance, mientras que el Dial permite que los tiempos de despeje se minimicen.

2.4.3.4 Relé de sobrecorriente de fase y de tierra

Existen dos formas de utilizar un relé de sobrecorriente: como una protección en las fases (ANSI 50/51), capaz de detectar fallas en las mismas, y como una protección de tierra (ANSI 50N/51N), la cual es capaz de detectar cortocircuitos con contacto a tierra (monofásicos y bifásicos a tierra) independientemente de las fases que han fallado. Estas formas son independientes y tienen diferencias relacionadas con la corriente que miden para operar. Los relés de fase y tierra miden como corriente de falla la corriente de fase y la corriente de secuencia cero ($3I_0$) respectivamente (ver Figura 2.19) [7].

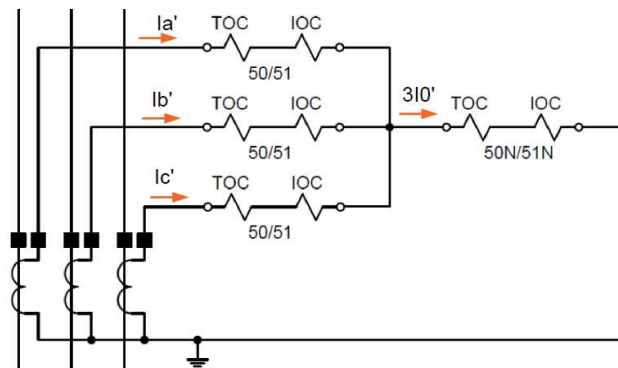


Figura 2.19. Conexión de relés de sobrecorriente de fase y tierra [7]

La protección de fase puede operar ante todos los tipos de fallas, para lo cual la I_{TAP} debe ser superior que la corriente de demanda máxima. Por otra parte, la protección de tierra

solo opera ante corrientes de secuencia cero, las cuales aparecen cuando hay una falla a tierra; de modo que puede ser configurada con una I_{TAP} menor que la corriente de carga.

2.4.4 UNIDAD DIRECCIONAL

2.4.4.1 Principio de funcionamiento electromecánico

Como se mostró en la Figura 2.14, dado que generalmente las redes son inductivas, la corriente se desfasa en atraso con respecto al voltaje con una falla hacia adelante y se desfasa en adelanto con una falla detrás de la posición del relé; de este modo, *la definición de la dirección de una falla depende de su desfasamiento*. Este efecto fue utilizado en relés antiguos, como el electromecánico tipo disco de inducción, para operar a través de fuerzas electromecánicas al existir cierto desfasamiento de la corriente. En este sentido, el principio electromecánico es útil para entender varios conceptos de la protección direccional [9].

En la Figura 2.20 se muestra un relé con entradas de corriente y de voltaje que se conectan a la salida de los TCs y TPs. El paso de una corriente sinusoidal I por la bobina 1 produce un flujo magnético variable ϕ_I . Por otro lado, el paso de una corriente I_V por la bobina 2, producto de haber conectado un voltaje sinusoidal V a través del circuito desfasador² indicado, produce un flujo magnético variable ϕ_V . Dichos flujos están dados por las expresiones 2.10 y 2.11; estos se encuentran desfasados entre sí en un ángulo δ . En la Figura 2.20 se muestran las direcciones de dichos flujos en un instante en el que ambos atraviesan el disco perpendicularmente en la dirección indicada con una magnitud positiva.

$$\phi_I = \Phi_I \sin(\omega t + \delta) \quad (2.10)$$

$$\phi_V = \Phi_V \sin(\omega t) \quad (2.11)$$

Donde:

Φ_I = Magnitud del flujo ϕ_I por la bobina 1 (bobina de corriente)

Φ_V = Magnitud del flujo ϕ_V por la bobina 2 (bobina de voltaje)

ω = Frecuencia angular del sistema

Los flujos ϕ_I y ϕ_V producen corrientes de Foucault en el disco giratorio i_{ϕ_I} e i_{ϕ_V} respectivamente [8]. Estas corrientes están dadas por las expresiones 2.12 y 2.13. En la

² Este circuito modifica el ángulo δ para rotar la zona de torque positivo de acuerdo con el desfasamiento de la señal de voltaje de entrada.

Figura 2.21 se representan dichas corrientes en el disco del relé, en donde se aprecia que la corriente i_{ϕ_V} interactúa con el flujo ϕ_I y que la corriente i_{ϕ_I} interactúa con el flujo ϕ_V .

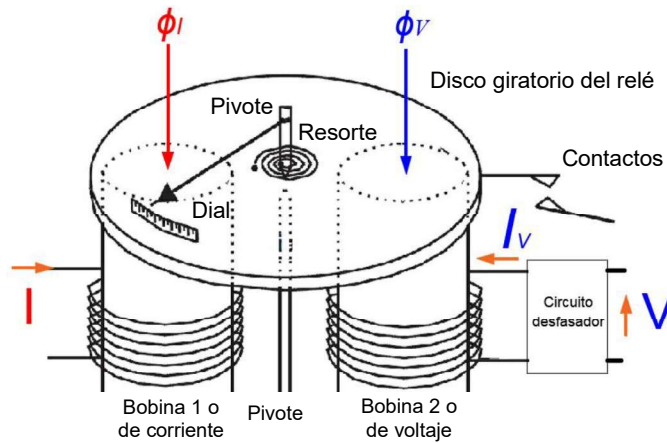


Figura 2.20. Generación de flujos magnéticos en un relé electromecánico tipo disco [13]

$$i_{\phi_I} \propto \frac{d\phi_I}{dt} \propto \Phi_I \cos(\omega t + \delta) \quad (2.12)$$

$$i_{\phi_V} \propto \frac{d\phi_V}{dt} \propto \Phi_V \cos(\omega t) \quad (2.13)$$

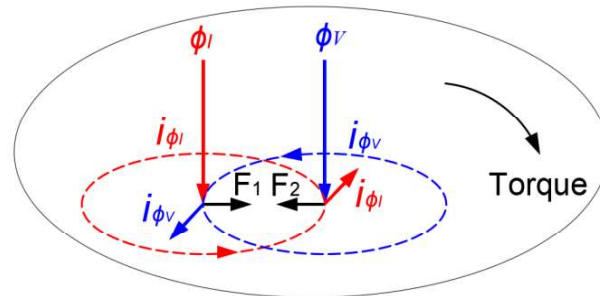


Figura 2.21. Generación de torque en un relé electromecánico direccional tipo disco [13]

Según la ley de Lorentz [18], un flujo variable incidente en una corriente eléctrica produce una fuerza en el conductor de dicha corriente. En el caso de la Figura 2.21, al considerar que el conductor en el que fluyen las corrientes de Foucault es el disco giratorio, la interacción entre ϕ_I e i_{ϕ_V} produce la fuerza F_1 y la interacción entre ϕ_V e i_{ϕ_I} produce la fuerza F_2 en el disco. Las fuerzas producidas son opuestas entre sí; la fuerza neta $F_1 - F_2$ está dada por la expresión 2.14 [8].

$$F = (F_1 - F_2) \propto (\phi_I \times i_{\phi_V} - \phi_V \times i_{\phi_I}) \quad (2.14)$$

Al reemplazar las expresiones 2.10 a la 2.13 en la expresión 2.14 es posible encontrar que el torque de giro en el disco (proporcional a la fuerza neta) está dado por la Ecuación 2.15 (K =constante de proporcionalidad).

$$T = K \Phi_V \Phi_I \sin(\delta) \quad (2.15)$$

La ecuación muestra que el torque no varía en el tiempo y, entre otros factores, su valor depende del desfaseamiento entre los flujos por cada bobina (δ). El ángulo δ que produce el Máximo Torque es de 90° , mientras que el ángulo que produce un torque nulo es de 0° . Entre $0 < \delta < 180$ se produce un torque positivo y entre $180 < \delta < 360$ un torque negativo.

La Ecuación 2.15 puede expresarse en función del voltaje y la corriente de entrada al considerar la Figura 2.22, en donde se muestran las cantidades fasoriales de las variables involucradas. Con esto se obtienen las expresiones 2.16 y 2.17. En la expresión 2.17, el término $\tau - \varphi$ es el Ángulo de Torque del relé y de éste depende el torque de giro. Cuando la corriente tiene un desfaseamiento con respecto al voltaje (φ) igual a τ se produce el máximo torque. Es por esto que el ángulo τ se denominó antiguamente como Ángulo de Máximo Torque (MTA, por sus siglas en inglés) o Ángulo Característico del Relé (RCA). Este ángulo define el lugar geométrico³ de máximo torque o Línea de Máximo Torque (MTL). Por otro lado, una corriente con un desfaseamiento de $\tau \pm 90^\circ$ no produce ningún torque, lo que define el lugar geométrico denominado como Línea de Torque Nulo.

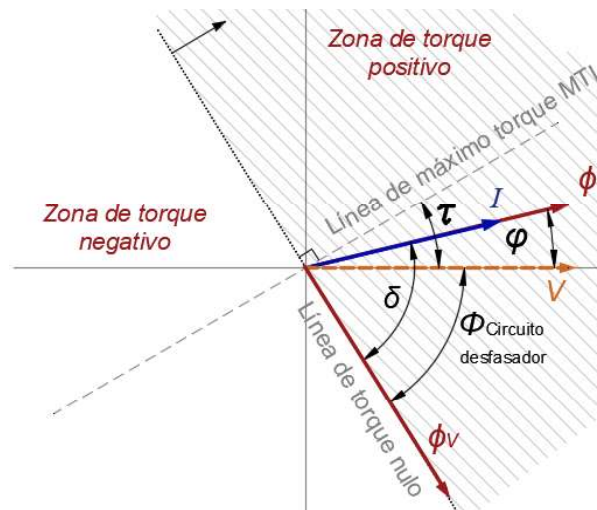


Figura 2.22. Diagrama fasorial de la generación de torque en un relé direccional

$$T = K VI \sin(\delta) \quad (2.16)$$

$$T = K VI \cos(\tau - \varphi) \quad (2.17)$$

³ Un lugar geométrico es un conjunto de puntos que tienen ciertas características en común

En definitiva, toda falla con $90^\circ < \tau - \varphi < -90^\circ$ provoca un torque positivo (operación) y con otro desfase se genera un torque negativo. *En relés numéricos este principio aún se considera para discriminar la dirección de una falla, lo cual se hace efectivo a través del cálculo de la ecuación de torque o de simulación para identificar si el fasor de corriente se posiciona o no dentro de la zona de operación.* Además, a pesar de que variables como MTL, RCA o ángulo de torque no existen físicamente en un relé numérico, los términos son aún empleados para referirse al mismo principio funcional [19], [20] y [21].

La forma para discriminar la dirección de una falla, según lo indicado en [22], es hasta cierto punto arbitraria, puesto que el acto de separar en dos partes el diagrama fasorial para definir que una porción corresponde a una falla hacia adelante y que la porción restante a una falla hacia atrás es una convención, la cual debe coincidir con la dirección real de una falla a través de una división apropiada de este diagrama para que exista tal coherencia.

Algo menos evidente es que la división del diagrama se define a través de la señal de voltaje y del ángulo RCA. Con relación al voltaje, éste no debe ser afectado significativamente por una falla para que la zona de operación se mantenga inalterable para definir la dirección de una falla. En este sentido, en [22] se ha propuesto el uso de distintos voltajes e inclusive corrientes para definir la dirección de una falla. Con relación al ángulo RCA, éste es ajustable en varios relés actuales y permite posicionar a la zona de operación de forma apropiada considerando los posibles desfases entre el voltaje de referencia y la corriente de falla.

En estudios como [16] o [23] se ha determinado que el principio de funcionamiento para discriminar la dirección de una falla descrito enfrenta diversos problemas.

2.4.4.2 Polarización de la corriente de cortocircuito

La diferenciación de la dirección de una falla es conocida como polarización de la corriente de cortocircuito. De acuerdo con [1], la polarización de la corriente es proporcionar una referencia para establecer su dirección. Hasta la actualidad, existen varias formas para polarizar a la corriente. Todas estas formas se conocen como *Métodos de Polarización*. Los métodos clásicos funcionan con el principio electromecánico. La diferencia entre un método de otro es la cantidad de polarización o de operación utilizada para establecer la dirección de una falla. No hay un estándar que defina todos estos términos, no obstante, es usual denominar a la corriente como *Cantidad de Operación* y a la señal de referencia como *Cantidad de Polarización*; ambas se conocen como *Variables de Comparación* [24].

En las últimas décadas se han planteado nuevas formas para determinar la dirección de una falla, las cuales funcionan según otros modelos matemáticos como el cálculo de impedancias de secuencia; no obstante, técnicas como ésta usan algoritmos patentados disponibles con relés de ciertos fabricantes y están fuera del alcance de este proyecto [25].

2.4.4.3 Unidad direccional de fase y de tierra

Cuando un relé de sobrecorriente de fase y tierra se adiciona con una unidad direccional se define una protección de sobrecorriente direccional de fase (ANSI 67) y de tierra (ANSI 67N) respectivamente. Es común referirse a ellas como unidades de fase y de tierra. Las cantidades de polarización y operación utilizadas por cada unidad son diferentes. La unidad de fase emplea voltajes de fase o una combinación de ellos para las cantidades de polarización y corrientes de fase o una combinación de ellas para las cantidades de operación. La unidad de tierra usa cantidades de secuencia cero o negativa [9].

Cabe mencionar que, en la protección de fase, cada una de las fases tiene su propia unidad direccional con sus respectivas cantidades de polarización y de operación. En este sentido, en la Figura 2.23 se esquematiza el diagrama lógico del Relé MiCOM P54X del fabricante Schneider (simplificado por el autor) que evidencia que cada unidad funciona independientemente de las otras [20].

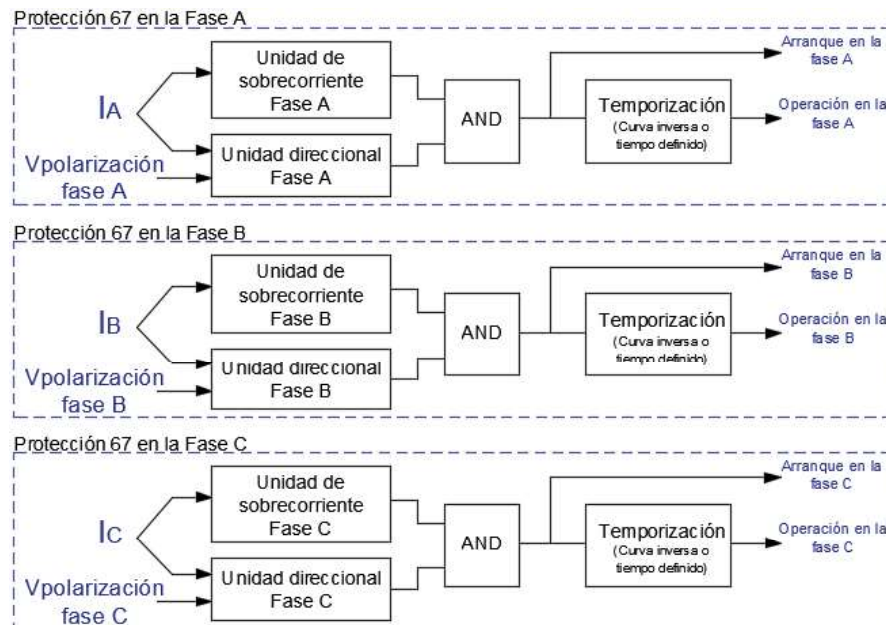


Figura 2.23. Diagrama funcional de una protección de sobrecorriente direccional de fase

2.4.5 IDENTIFICACIÓN DE MÉTODOS DE POLARIZACIÓN

En este apartado se identifica (describe propiedades) de los métodos de polarización de la unidad direccional de fase y de tierra.

2.4.5.1 Métodos de polarización de la Unidad direccional de Fase

Los métodos de la unidad de fase se constituyen de variaciones de las cantidades de polarización (Cpol) y operación (Cop) utilizadas para definir la dirección de una falla. En la Tabla 2.3 se muestran las cantidades utilizadas por los métodos clásicos de la unidad de fase y su ángulo RCA típico que permite una posición apropiada de la zona de operación.

Tabla 2.3. Resumen de los métodos de polarización de la unidad direccional de fase

Método de polarización	RCA	Fase A		Fase B		Fase C	
		Cpol	Cop	Cpol	Cop	Cpol	Cop
En cuadratura	30	V_{bc}	I_a	V_{ca}	I_b	V_{ab}	I_c
Propia	-60	V_a	I_a	V_b	I_b	V_c	I_c
Cruzada	-30	V_{ac}	I_a	V_{ba}	I_b	V_{cb}	I_c
Conexión Δ	60	V_{ac}	$I_a - I_b$	V_{ba}	$I_b - I_c$	V_{cb}	$I_c - I_a$
Conexión Y	60	$-V_c$	I_a	$-V_a$	I_b	$-V_b$	I_c
Compuesta	0	$V_{ac} + V_{bc}$	I_a	$V_{ba} + V_{ca}$	I_b	$V_{cb} + V_{ab}$	I_c
Adyacente	-90	V_{ab}	I_a	V_{bc}	I_b	V_{ca}	I_c

A continuación, se caracteriza a través de circuitos eléctricos y diagramas fasoriales a los tres primeros métodos, puesto que el alcance del presente trabajo incluye a los mismos. En [22] pueden consultarse las características de varios métodos similares.

2.4.5.1.1 Método de polarización con voltaje de la propia fase

La polarización con voltaje de la propia fase, también conocida como Polarización Propia, constituye una de las formas más antiguas e intuitivas para polarizar a la corriente. Este método utiliza el voltaje de la propia fase como cantidad de polarización y la corriente de fase como cantidad de operación, es decir, el voltaje de fase V_a para polarizar la corriente I_a , el voltaje V_b para polarizar la corriente I_b y el voltaje V_c para polarizar la corriente I_c . En la Figura 2.24 se muestra el detalle de este método de polarización.

Evidentemente, al existir una unidad direccional por cada fase, existe una zona de operación autónoma para cada una que identifica la dirección de su respectiva corriente. En la Figura 2.24b se muestra la zona de la fase A y sus respectivas cantidades de polarización y operación. El ajuste del RCA usual en este método es de 60° , lo que sitúa a la MTL a 60° en sentido horario con respecto al voltaje de polarización. Esto con el fin de abarcar todos los posibles desfases de la corriente dentro de la zona de operación;

de este modo, toda corriente con un desfase entre -150° y 30° con respecto al voltaje puede provocar la operación del relé. Esto se repite para las otras fases [22].

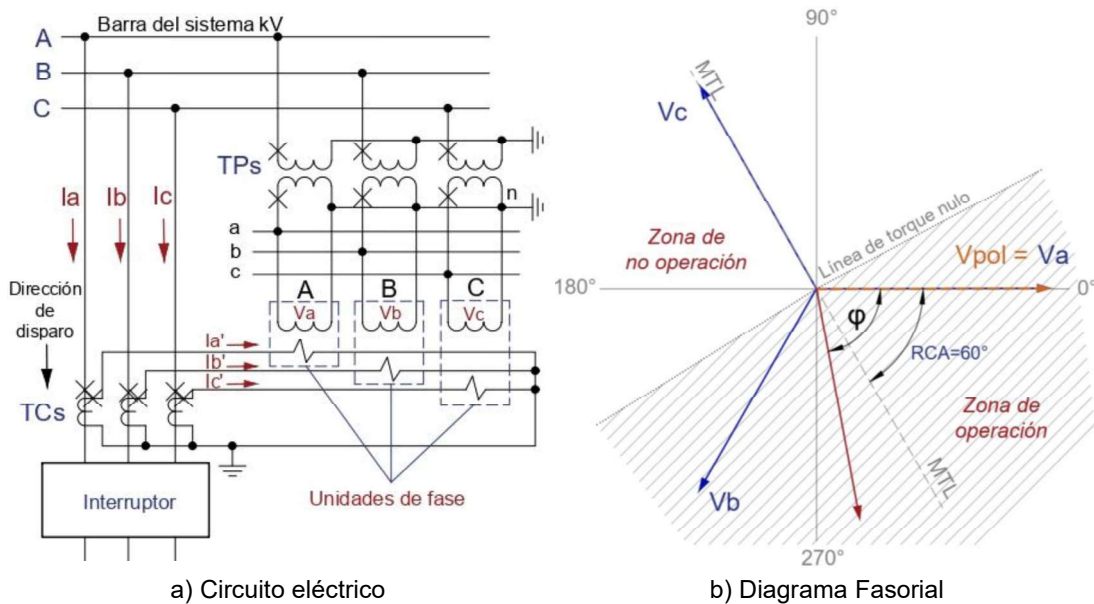


Figura 2.24. Método de polarización con voltaje de la propia fase

□ Características adicionales

- ♦ Es el método más simple para polarizar a la corriente, por lo que brinda cierta economía de funciones dentro de un relé [21].
- ♦ La cantidad de polarización de este método se ve seriamente afectada ante cualquier tipo de falla, puesto que el voltaje de fase puede colapsar a cero cuando la falla se encuentra muy cerca de la posición del relé [21].
- ♦ Enfrenta problemas críticos en relación con el desfaseamiento que pueden sufrir sus cantidades de polarización ante fallas bifásicas, lo cual puede alterar a la zona de operación en cada fase y provocar actuaciones incorrectas del relé [21].
- ♦ Es un método cuya cantidad de polarización es poco precisa para la comparación fasorial, de modo que su aplicación requiere de técnicas adicionales para evitar este problema de precisión y otros más como el relacionado al colapso del voltaje. Estas técnicas pueden llegar a proveer inclusive un mejor desempeño que otros métodos [26].

2.4.5.1.2 Método de polarización en cuadratura

El método más usado actualmente es la polarización en Cuadratura [9]. Este método polariza a la corriente de fase con los voltajes de línea ajenos a la respectiva fase según

se muestra en la Figura 2.25a. Su nombre proviene de que el voltaje de polarización se encuentra en cuadratura o en ángulo recto con respecto a la corriente cuando existe un factor de potencia unitario. En este sentido, la corriente de fase I_a es polarizada por el voltaje V_{bc} , la corriente I_b se polariza por el voltaje V_{ca} y la corriente I_c por el voltaje V_{ab} .

En el diagrama de la Figura 2.25b se muestra la zona de operación definida en la unidad direccional de la fase A. En este método el RCA típico es de 30° en sentido antihorario con respecto al voltaje de polarización; de modo que una corriente con un desfase entre -60° y 120° con respecto al voltaje de polarización puede provocar el arranque del relé.

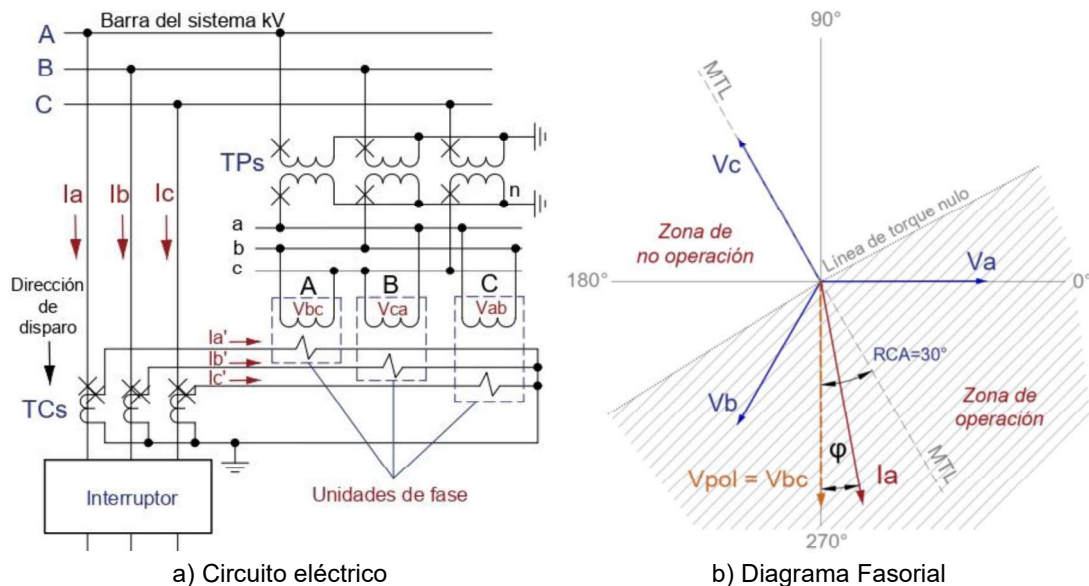


Figura 2.25. Método de polarización en cuadratura

□ Características adicionales

- ♦ El voltaje de polarización de este método no es propenso al colapso ante fallas asimétricas, puesto que, ante cualquiera de estas fallas, su cantidad de polarización se compone con al menos un voltaje no fallado [21].
- ♦ El desfaseamiento de su cantidad de polarización es relativamente bajo ante diferentes tipos de falla, por lo que es muy probable que su funcionamiento sea adecuado [21].
- ♦ La zona de operación puede desfasarse ligeramente ante fallas bifásicas aisladas, no obstante, la corriente de operación tiende a desfasarse en el mismo sentido, por lo que no existe una tendencia a la operación defectuosa [21].
- ♦ El funcionamiento puede ser afectado por elevadas corrientes de secuencia cero [27].

- ♦ Es un método efectivo en líneas que poseen una fuente de secuencia cero detrás de la posición del relé y cuando se usa un RCA de 30°. Por otro lado, un ajuste de 45° es favorable en líneas con una fuente de secuencia cero delante del relé [28].
- ♦ Mediante cálculos se ha determinado que puede funcionar incorrectamente ante fallas bifásicas a tierra con magnitudes elevadas de corrientes de secuencia cero [29].

2.4.5.1.3 Polarización cruzada

La polarización cruzada utiliza como cantidad de polarización los voltajes de línea compuestos por el voltaje de la propia fase y el voltaje de fase anterior, es decir, el voltaje V_{ac} para polarizar a la corriente I_a , el voltaje V_{ba} para polarizar a la corriente I_b y el voltaje V_{cb} para polarizar a la corriente I_c según se expone en la Figura 2.26a.

En el diagrama de la Figura 2.26b se aprecia la zona de operación definida en la fase A. El valor típico del RCA en este método es de 30° en sentido horario con respecto al voltaje de polarización, de manera que toda corriente de fase con un desfase entre -120° y 60° con respecto al voltaje de polarización es capaz de provocar el arranque del relé.

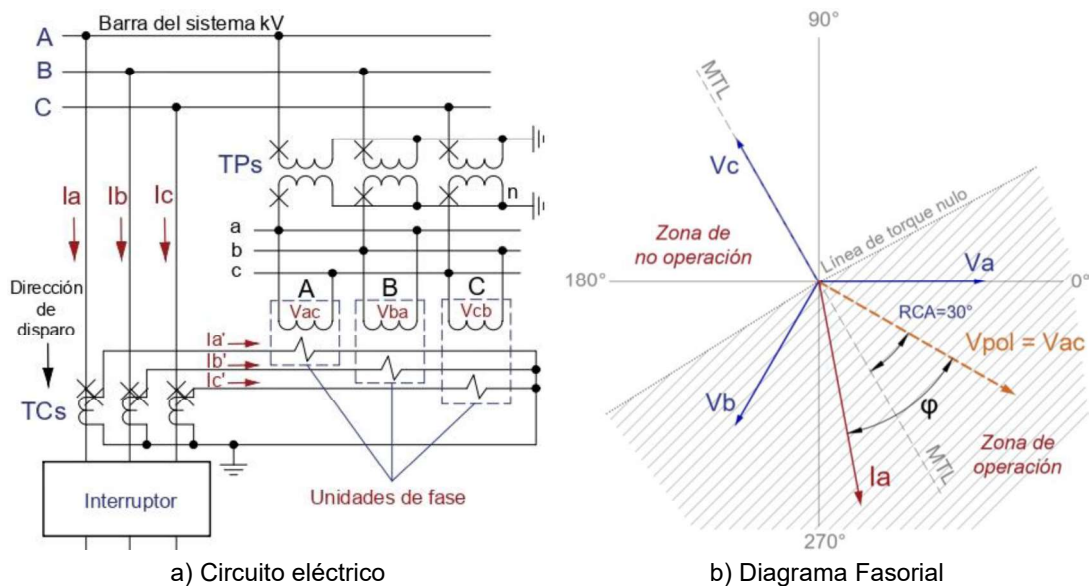


Figura 2.26. Método de polarización cruzada

❑ Características adicionales

- ♦ Este método usa la fase fallada en su cantidad de polarización ante fallas monofásicas con el fin de considerar el desfase que sufre el voltaje fallado, pero a la vez evita el colapso de dicha cantidad al usar también un voltaje no fallado [28].

- ♦ El voltaje de polarización puede colapsar ante fallas bifásicas y presentar desfases críticos que alteren a la zona de operación definida en cada fase [28].
- ♦ El funcionamiento puede ser erróneo ante elevadas corrientes de secuencia cero [28].
- ♦ Se concibe como una polarización en la protección de fallas entre fases [28].
- ♦ Es probable que existan funcionamientos incorrectos del método ante ciertas topologías [29]. Por otro lado, en [30] se demostró que este método es menos propenso a funcionamientos incorrectos ante otras topologías.

2.4.5.2 Métodos de polarización de la Unidad direccional de Tierra

Los métodos de esta unidad se caracterizan porque emplean cantidades de secuencia como cantidades de polarización y operación. Según la Figura 2.27, el empleo de estas cantidades mantiene la misma lógica para discriminar la dirección de una falla hacia adelante o hacia atrás (ver Figura 2.14). En este sentido, es como si existiera un relé conectado en la red de secuencia cero o negativa para realizar esta discriminación [24].

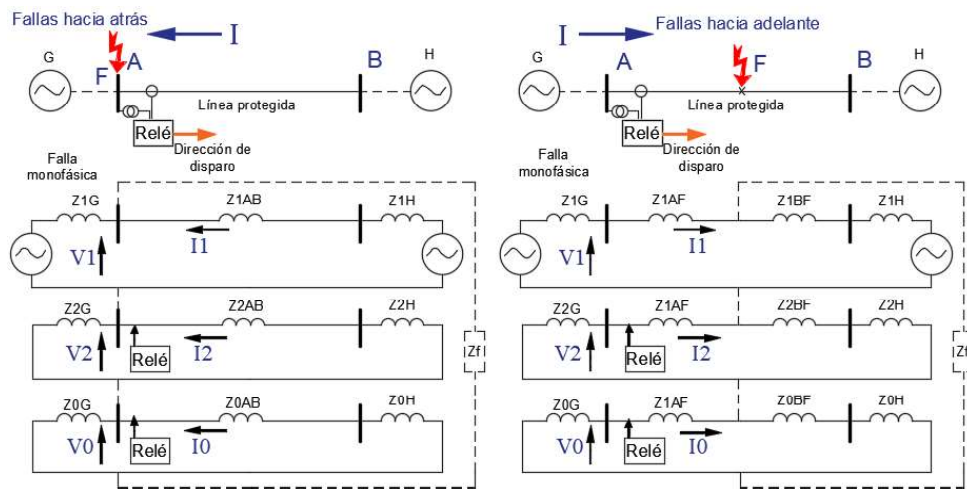


Figura 2.27. Redes de secuencia ante fallas hacia adelante y hacia atrás

Cabe indicar que la unidad de tierra es más precisa para determinar la dirección de una falla que la unidad de fase, dado que *el ángulo entre el voltaje y la corriente de secuencia (cero o negativa) es prácticamente constante*. Esto debido a que, ante una falla hacia adelante o hacia atrás, existen solo impedancias equivalentes detrás o delante del relé, las mismas que no depende del tipo de falla, resistencia de falla o proximidad de la falla [31].

En la Tabla 2.4 se muestran las cantidades de polarización (C_{pol}) y operación (C_{op}) de los métodos de polarización clásicos junto con su ángulo RCA típico [24]. A continuación, se describen los dos primeros métodos, los cuales forman parte del alcance de este trabajo.

Tabla 2.4. Métodos de polarización de la unidad direccional de tierra

Método de polarización	RCA	Variables de comparación	
		Cpol	Cop
Voltaje de secuencia cero	-60°	$-3V0$	$3I0$
Voltaje de secuencia negativa	-60°	$-3V2$	$3I2$
Corriente de secuencia cero	0°	$3I0_N$	$3I0$
Dual (aditiva)	-60°	$-3V0 + 3I0_N \times e^{jRCA}$	$3I0$
Dual (exclusiva)	$-60^\circ-0^\circ$	$-3V0$ OR $3I0_N$	$3I0$

2.4.5.2.1 Polarización con Voltaje de Secuencia Cero

Esta polarización es una de las más utilizadas convencionalmente en la protección direccional. Es preciso destacar que la empresa transmisora en el país utiliza esta polarización en gran parte de sus instalaciones. Dicha polarización emplea el voltaje de secuencia cero como cantidad de polarización y la corriente de secuencia cero como cantidad de operación. Antiguamente, en los relés electromecánicos se aprovechó una conexión en delta-abierta en los TPs a fin de obtener en los terminales el voltaje de secuencia cero ($3V0$) según se muestra en la Figura 2.28a [9].

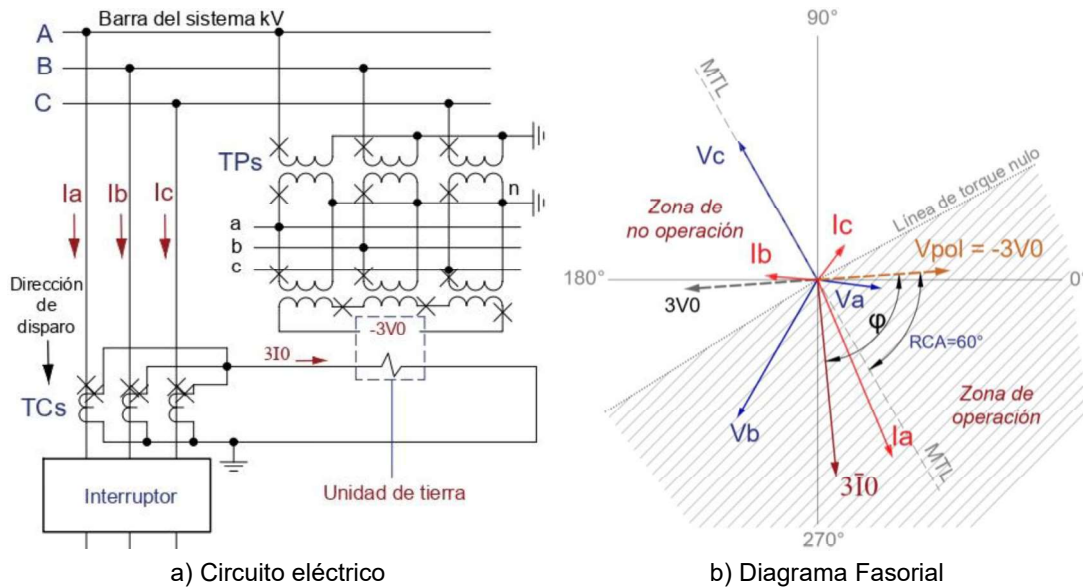


Figura 2.28. Método de polarización con voltaje de secuencia cero

En la Figura 2.28b se muestra el diagrama fasorial de este método ante una falla en la fase A. Se debe destacar que la unidad direccional polariza a la corriente a través del voltaje $-3V0$, es decir, al voltaje de secuencia cero invertido en 180° , puesto que esto facilitó su implementación en relés electromecánicos. En varios relés numéricos actuales aún se utiliza el voltaje $-3V0$ de forma convencional dado tal antecedente [17] y [20].

❑ Características adicionales

- ♦ La conexión para la obtención de sus variables de comparación es simple [24].
- ♦ Es un método preciso para definir la dirección de una falla [9].
- ♦ Es un método que puede ser afectado por el efecto del acoplamiento mutuo en líneas [24].
- ♦ El funcionamiento del método puede tener problemas cuando el voltaje de polarización que aparece como producto de una falla es muy reducido [24].

2.4.5.2.2 Polarización con Voltaje de Secuencia Negativa

Este método utiliza el voltaje de secuencia negativa como cantidad de polarización y la corriente de secuencia negativa como cantidad de operación. La implementación de este método en relés antiguos implicó el uso de filtros para poder obtener el voltaje y la corriente de secuencia negativa a través de los voltajes y corrientes de fase. Los relés numéricos actuales calculan internamente las cantidades de secuencia [17].

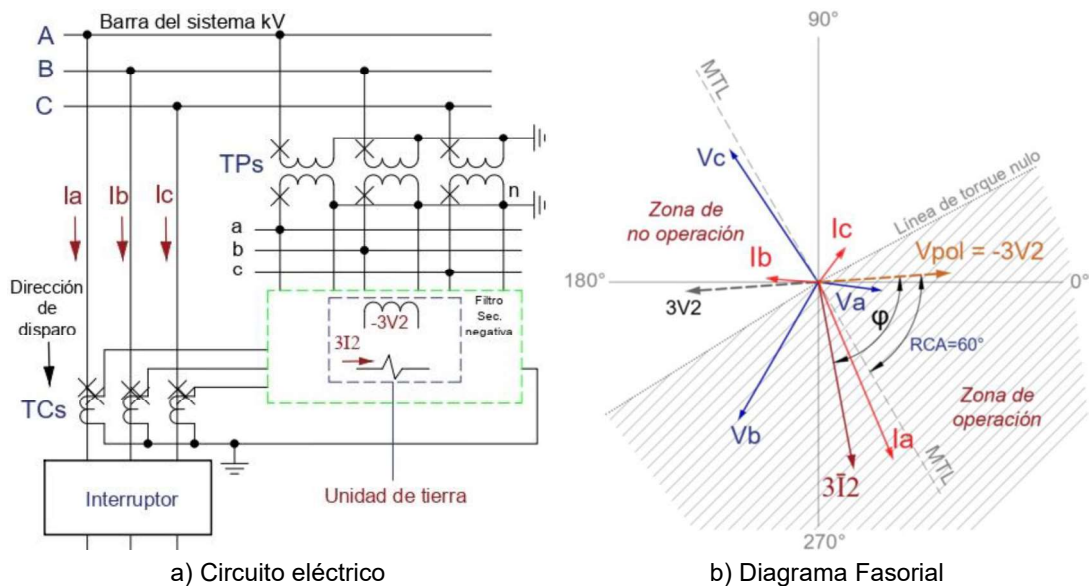


Figura 2.29. Método de polarización con voltaje de secuencia negativa

En la Figura 2.29 se esquematiza el circuito eléctrico de este método. El filtro de secuencia negativa representa un filtro pasivo o el mismo procesamiento interno de un relé numérico. Además, el diagrama fasorial muestra que para polarizar a la corriente es necesario del uso del voltaje invertido $-3V_2$ por la razón expuesta antes. En esta polarización, al igual que la polarización con voltaje de secuencia cero, el ángulo RCA típico es de 60° con respecto al voltaje de polarización en sentido horario, de modo que una corriente entre -

150° y 30° con respecto al voltaje de polarización es capaz de provocar la operación de un relé [24].

□ Características adicionales

- ♦ Es un método preciso para definir la dirección de una falla [24].
- ♦ El funcionamiento de este método es inmune a la incidencia del acoplamiento mutuo en líneas de transmisión [9].
- ♦ El funcionamiento correcto de este método puede tener problemas cuando el voltaje de polarización que aparece como producto de una falla es muy reducido [24].

2.4.6 SENSIBILIDAD DE LOS MÉTODOS DE POLARIZACIÓN

Una condición para que una unidad direccional funcione correctamente es que las cantidades de polarización y operación de los métodos de polarización presenten una magnitud suficiente para que el relé pueda procesarlas. Existen situaciones en las que las magnitudes pueden verse reducidas y dar lugar a operaciones indeseables del relé [24].

Una situación probable en la unidad de fase es el colapso del voltaje de polarización ante fallas cercanas. Ante esto, el relé puede carecer de una referencia de polarización. Una solución al problema es la denominada Memoria de Polarización. Ésta es una función en relés modernos para medir continuamente los voltajes de polarización de las unidades de cada fase y crear fasores ficticios. Ante una falla que colapse los voltajes, el relé utiliza los fasores ficticios y los proyecta en el tiempo durante varios ciclos para simular los voltajes que existirían si la falla no hubiera ocurrido. En este sentido, los fasores ficticios son un adecuado respaldo ante un colapso de voltaje. En la actualidad, es común el uso de la memoria de polarización, de modo que el problema del colapso del voltaje en los diferentes métodos se encuentra resuelto y no representa un obstáculo para decidir el uso de uno u otro método. Además, esto permite que en esta unidad no se definan ajustes de umbrales mínimos de voltaje para la operación del relé [21].

Con relación a las unidades de tierra, específicamente las que usan la polarización de secuencia cero y negativa, se presenta una problemática distinta. Existen factores como los desbalances inherentes, errores en la precisión de los TPs y TCs o ruido que provocan voltajes y corrientes de secuencia espurias de pequeña magnitud. Ante una falla, todas estas señales espurias se adicionan a los voltajes y corrientes de secuencia generados por la falla modificando su desfase hasta el punto de afectar a la polarización. Para evitar esto, los relés se configuran para que omitan su operación cuando las magnitudes de las cantidades de polarización no han superado cierto umbral. Cuando las cantidades se

encuentran por debajo de este umbral, se asume que las mediciones del relé corresponden principalmente a señales espurias, mientras que cuando si superan este umbral, se considera que el relé ha medido una señal que corresponde mayoritariamente a la generada por una falla. El circuito lógico para esto se muestra en la Figura 2.30 [32].

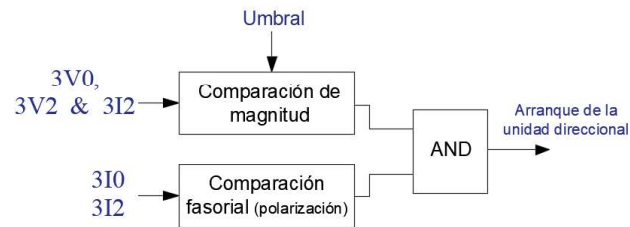


Figura 2.30. Diagrama funcional de la unidad direccional de tierra

2.4.6.1 Parámetros de las cantidades umbrales

La configuración de los umbrales solo existe para las cantidades de la unidad de tierra en los relés actuales. Es usual que, para la polarización con voltaje de secuencia cero y negativa, los relés permitan definir los umbrales de los voltajes de polarización y, además, de la corriente de operación en el caso de la polarización de secuencia negativa según se muestra en la Figura 2.30. Se debe destacar que no se define un umbral para la corriente de la polarización de secuencia cero, dado que esta variable es la corriente de secuencia cero, ante la cual ya se define un ajuste de la I_{TAP} para la unidad de sobrecorriente.

Cabe resaltar que los umbrales no son ajustes como tal de un método. Estos son parámetros establecidos por los fabricantes o por las empresas transmisoras y su modificación obedece estrictamente a un trabajo en campo, en donde se analizan las cantidades de secuencia que mide un relé en estado normal de operación para establecer un valor umbral por encima de las señales espurias medidas; a condición de que esto no limite la capacidad para detectar fallas hacia adelante que generan bajas cantidades de secuencia, es decir, que no limite el alcance por sobrecorriente de la protección [11] y [17].

2.4.7 REPRESENTACIÓN GRÁFICA A TRAVÉS DE LA CARACTERÍSTICA DIRECCIONAL

La representación típica de un método de polarización es el diagrama de su característica direccional. Este diagrama ya fue presentado en descripciones anteriores; sin embargo, en este punto se precisan sus términos. En la Figura 2.31 se muestra la característica de un método con sus elementos en forma genérica. La nomenclatura se describe en la Tabla 2.5. Es usual que el ángulo de la corriente se exprese con respecto a la MTL (ángulo de torque) y que los ángulos RCA, α y β se midan con referencia al voltaje de polarización [9].

Cabe mencionar que la cantidad de polarización de cada método es la que define la zona de operación. En este sentido, cada método tiene una característica y una zona de operación diferente, puesto que los voltajes de polarización de los métodos no son los mismos. Es por esto que es posible que un método identifique una falla dentro de su zona de operación y otro método identifique la misma falla fuera de su respectiva zona [24].

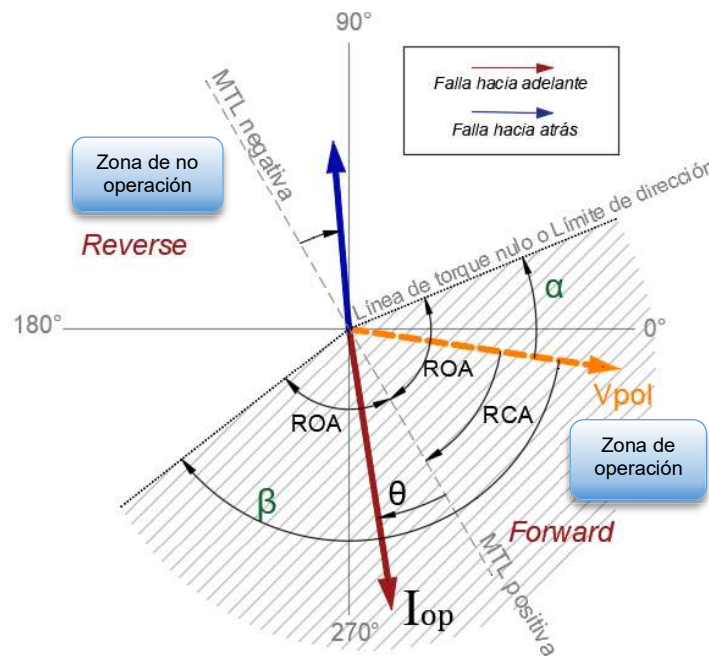


Figura 2.31. Característica direccional de un método de polarización

Tabla 2.5. Descripción de elementos de un diagrama tipo característica direccional

Elemento	Descripción
MTL	Línea de máximo torque: <ul style="list-style-type: none"> • Positiva si se encuentra dentro de la zona de operación. • Negativa si se encuentra fuera de la zona de operación.
RCA o MTA	Ángulo característico del relé o de máximo torque.
ROA	Ángulo de operación del relé.
α	Ángulo del límite de dirección superior.
β	Ángulo del límite de dirección inferior.
Límite direccional o de dirección	Frontera entre la zona de operación y no operación.
θ	Ángulo de torque o ángulo de la corriente con respecto a la MTL.
Zona de operación	Región en la que la unidad direccional opera (Forward).
Zona de no operación	Región en la que la unidad direccional no opera (Reverse).
I_{op} (o también Cop)	Cantidad o corriente de operación.
V_{pol} (o también Cpol)	Cantidad o voltaje de polarización.

2.4.8 SELECCIÓN Y AJUSTE DE MÉTODOS DE POLARIZACIÓN

Dentro de una unidad direccional típica es usual poder seleccionar el método de polarización y ciertos ajustes a ser empleados en esos métodos para rotar a la zona de operación o modificar libremente los límites de dirección [19] y [20].

2.4.8.1 Selección de un método de polarización

La selección del método a emplear en un caso práctico involucra factores como el hecho de que teóricamente todos los métodos son vulnerables a presentar inconsistencias para discriminar la dirección de una falla [8] y [29]; de modo que es necesario encontrar aquel método con la operación más confiable. Hasta la actualidad, ha sido usual seleccionar los métodos cuya cantidad de polarización sea menos afectada ante una falla [24].

Con relación a la unidad de tierra, en [24] se recomienda que la selección entre los métodos de polarización con voltaje de secuencia cero y negativa debe basarse en su nivel de polarización, es decir, en la magnitud del voltaje de polarización frente a una falla en el extremo remoto de la línea. Este criterio surge por la necesidad de encontrar aquel método que brinde una mayor sensibilidad. En el mismo estudio también se recomienda la selección de un método en función de la relación SIR y de la incidencia del efecto del acoplamiento mutuo en una línea, lo cual se muestra en la Tabla 2.6. Finalmente, se recomienda que en sistemas en anillo o en malla se emplee el mismo método de polarización en ambos extremos para evitar operaciones incorrectas ante fallas externas.

Tabla 2.6. Recomendaciones para la selección de un método de polarización [24]

Configuración	Incidencia del acoplamiento mutuo	Pol. Voltaje de secuencia negativa	Pol. Voltaje de secuencia cero
Línea corta y mediana ($SIR \geq 0.5$)	No	Ok*	Ok*
	Si	Ok*	NR
Línea larga ($SIR < 0.5$)	No	ER	Ok*
	Si	ER	NR

* - Ok, pero se recomienda un estudio

NR – No recomendado

ER – Estudio requerido

2.4.8.2 Ajuste de los ángulos de dirección

2.4.8.2.1 Ángulo Característico del Relé (RCA) o de máximo torque (MTA)

Como se indicó antes, es posible ajustar el RCA para obtener una división apropiada de la característica direccional en una zona de operación y no operación. El ajuste debe considerar las variaciones que pueda presentar el desfaseamiento de una falla, de modo

que la zona de operación abarque todas las fallas hacia adelante y excluya todas las fallas hacia atrás [22].

Es deseable que las fallas se localicen cerca de la MTL, dado que esto las aleja de los límites y así se evita que el desfase adicional de las fallas por factores como errores de precisión de los TCs y TPs, tolerancias del relé, desbalances inherentes o ruido provoquen una variación tal en el ángulo de las corrientes de falla que las acerque a los límites y su dirección no se detecte correctamente. En definitiva, la cercanía a la MTL incrementa la probabilidad de una detección correcta. Además, se debe indicar que, en las cercanías de los límites, el procesamiento angular en algunos relés tiene tolerancias en su precisión de hasta $\pm 5^\circ$; de modo que es incierta la dirección que se defina en las cercanías [20].

Debido a que el desfase de una falla depende de la relación de impedancias del sistema, existen recomendaciones para el valor del *RCA* con relación a si la protección se ubica en un sistema de transmisión o distribución. Es típico que en la polarización en cuadratura se use un *RCA* de 60° en transmisión y 45° en distribución [20].

2.4.8.2.2 *Ángulo de Operación del Relé (ROA)*

Según la Figura 2.31, este ángulo permite incrementar o reducir el área de la zona de operación y mantiene una simetría entre la separación angular de la *MTL* con los límites de dirección superior e inferior. En la sección 2.4.4.1 se describió que la zona de operación ocupa 180° , es decir, un *ROA* de 90° , sin embargo, es común modificar este valor para normalmente disminuir esta región a fin de reducir la posibilidad de que una falla hacia atrás se presente erróneamente dentro de la zona de operación [19].

Es por esto que la zona de operación (Forward) que se indicó en la Figura 2.31 corresponde en la mayoría de los casos de relés a la parte cóncava delimitada por los límites de dirección. En este sentido, diversos fabricantes recomiendan valores del *ROA* mayores o iguales a 72° y menores a 90° [19] y [20].

2.4.8.2.3 *Ángulos de los límites de dirección α y β*

En varios relés numéricos no existen los parámetros *RCA* y *ROA*; y, en su lugar, se deben definir los ángulos α y β para configurar la zona de operación. Según la Figura 2.31, es evidente que estos ángulos permiten modificar la zona de operación de tal manera que no necesariamente exista simetría con respecto a la *MTL*, como sucede cuando se especifica el *ROA*. Se ha demostrado que esto es útil en aplicaciones muy atípicas [33]; sin embargo, la convención más común, considerada en este documento, es el uso simétrico de la zona

de operación con respecto a la *MTL*. Por lo tanto, para mantener la simetría de esta zona, los ángulos α y β deben ser calculados según las expresiones 2.18 y 2.19. Para esto, los ángulos *ROA* y *RCA* deben ser conocidos. Estos pueden obtenerse de las recomendaciones dadas para otros relés que si especifican estos ángulos [31].

$$\alpha = RCA + ROA \quad (2.18)$$

$$\beta = RCA - ROA \quad (2.19)$$

2.4.9 DIRECCIÓN REAL DE UNA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

Cuando la topología de un sistema es radial, la dirección real de la corriente es un flujo desde la fuente hacia el punto de la falla según se esquematizó antes en la Figura 2.14; sin embargo, existen casos en los que la definición de la dirección real de la corriente no se puede definir directamente. Esto es usual ante ciertas fallas externas en circuitos paralelos, en redes en anillo o en malla [24].

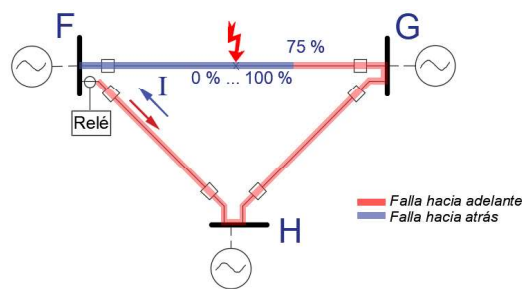


Figura 2.32. Cambio de dirección de la corriente *I* que fluye por la línea *FH* ante un barrido de cortocircuito en la línea *FG*

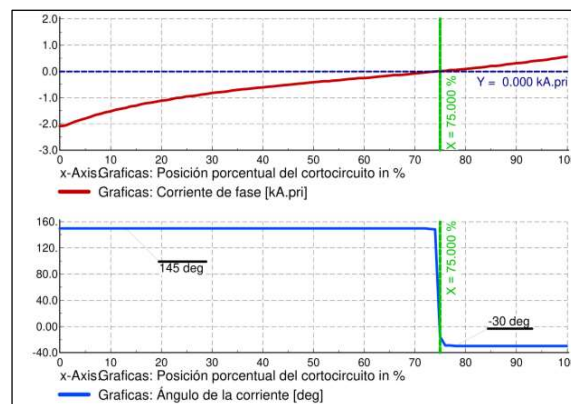


Figura 2.33. Corriente fasorial que fluye por la línea *FH* ante un barrido en la línea *FG*

En [24] se muestra que, ante un barrido de cortocircuito⁴ externo en un sistema en anillo (ver Figura 2.32), la corriente que mide el relé cambia de dirección en cierto punto. En la Figura 2.33 se muestra el aporte de corriente por la línea FH ante un barrido en la línea FG. La magnitud disminuye hasta una falla al 75% de la línea FG y luego su magnitud aumenta en sentido positivo. Alrededor de esta posición, el ángulo de la corriente rota cerca de 180°, lo que matemáticamente implica que el fasor invierte su dirección, es decir, la corriente fluye hacia atrás de la posición del relé ante cortocircuitos calculados desde el 0% al 75% de la línea FG y fluye hacia adelante frente a cortocircuitos más allá del 75%.

El ejemplo muestra que, con circuitos paralelos, en anillo o en malla, existen puntos de cambio de la dirección de la corriente que delimitan la dirección real de una falla. Esto debido a que la distribución de impedancias a lo largo del barrido cambia y modifica el camino de menor impedancia por el cual la corriente puede fluir [24].

2.4.10 APLICACIONES DE LA PROTECCIÓN

La protección direccional se usa en sistemas en anillo, en malla o con fuentes en ambos extremos de una línea para evitar desconexiones innecesarias que podrían producirse con la protección de sobrecorriente convencional según se ejemplifica en el sistema de la Figura 2.34. Como se mencionó en la sección 2.3, es posible el uso de una protección no unitaria en cada extremo de una línea o una teleprotección.

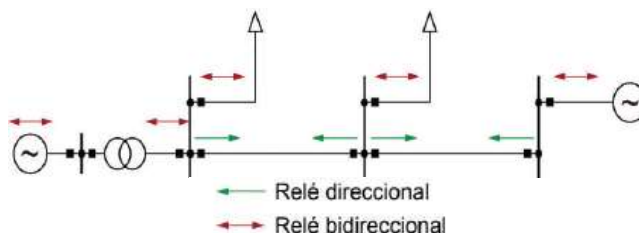


Figura 2.34. Uso de relés de sobrecorriente direccionales y convencionales [28]

Una protección no unitaria temporizada puede proveer inherentemente un respaldo local en la región protegida por la función instantánea (teleprotección) y también puede proveer posibles respaldos remotos en elementos adyacentes (ver Figura 2.18). Una particularidad en estos respaldos es que no se puede definir de forma precisa el alcance del respaldo, es decir, hasta qué punto la protección puede detectar fallas [13].

⁴ Cortocircuitos simulados en un elemento con variación en su tipo, posición o resistencia de falla.

2.4.10.1 Configuraciones generales actuales de la protección

La protección en estudio se aplica como respaldo en los sistemas actuales incluyendo los existentes en el país. La configuración usual es emplear la protección diferencial como principal y luego hacer uso de la protección de distancia y/o de la protección de sobrecorriente de tierra como una protección no unitaria para cada extremo de la línea y, a la vez, dentro de esquemas de teleprotección.

Cabe mencionar que la función de fase es poco utilizada por las dificultades de coordinación de esta protección y su alta sensibilidad a los cambios topológicos. Por otra parte, el uso de la protección de tierra es deseable porque en muchos casos ésta posee una alta sensibilidad para poder detectar cortocircuitos con elevadas resistencias de falla.

Cuando se trata de una protección no unitaria, la protección se configura con una temporización por curva inversa con una corriente I_{TAP} que permita cubrir cortocircuitos con una elevada resistencia de falla (en el país es usual un valor de $R_f = 20\Omega$) hasta el extremo remoto de la línea; de esta manera, el alcance de la protección es la misma línea protegida y posibles respaldos en los elementos adyacentes según se muestra en la Figura 2.35. Con relación al Dial, éste se coordina con respecto a la operación de todas las protecciones temporizadas (usualmente la protección de distancia).

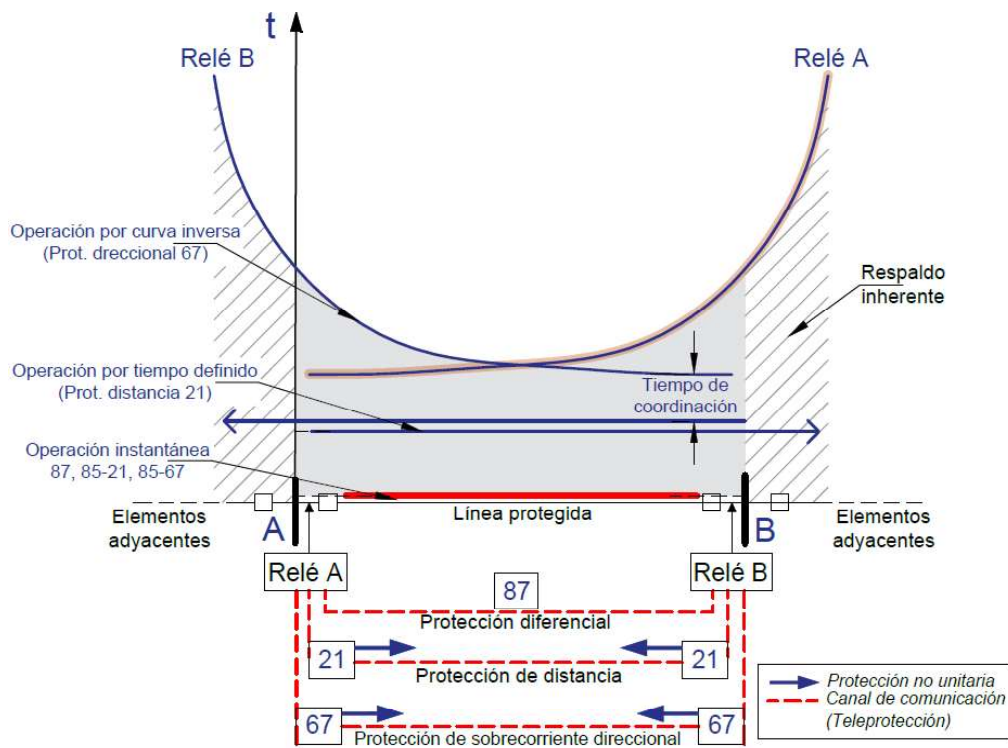


Figura 2.35. Sistema de protección con funciones múltiples

Existen varias formas de utilizar la protección temporizada por curva inversa. Una de ellas es que la protección solo se active cuando se ha interrumpido el canal de comunicación (teleprotección) entre los relés de ambos extremos, otra forma es que la protección se encuentre siempre activa independientemente de este canal [20].

Con relación al uso de la protección direccional dentro de una teleprotección, diversos relés disponen de canales en paralelo independientes al usado por la protección diferencial para que la protección de sobrecorriente direccional (principalmente de tierra) pueda funcionar con un esquema de teleprotección autónomo y brinde una protección local redundante para la zona primaria. En ciertos relés esto se conoce como canales asistidos de protección.

La configuración con teleprotección más protecciones no unitarias permite que exista más de una forma de despeje de una falla en una línea (ver Figura 2.35). La protección direccional es típicamente la última línea de defensa del sistema de protección.

Es común que se configuren los relés que forman parte de la teleprotección con los mismos ajustes de la unidad direccional y de la I_{TAP} de las protecciones no unitarias en cada extremo. Otra alternativa es que la teleprotección opere con la señal de detección de una falla obtenida por la protección no unitaria.

De esta manera, la protección no unitaria puede arrancar al mismo tiempo que el envío de la señal de detección hacia el otro extremo de la teleprotección con el fin de brindar un respaldo en el caso de un fallo en el esquema. Según la Figura 2.35, cada relé puede operar como una teleprotección o como una protección no unitaria [34].

3. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN Y METODOLOGÍA DE ESTUDIO DE MÉTODOS DE POLARIZACIÓN

La herramienta computacional propuesta brinda al usuario la capacidad para simular el comportamiento de diferentes métodos de polarización a partir de datos obtenidos de redes modeladas en PowerFactory. Además, las simulaciones entregan resultados gráficos y textuales que permiten determinar el funcionamiento de dichos métodos.

Los resultados obtenidos de la herramienta computacional y del análisis del funcionamiento de los métodos de polarización componen una información de gran utilidad para desarrollar estudios más detallados como la identificación de ventajas y desventajas del uso de los métodos mencionados, con lo cual se pueden establecer los métodos de polarización más adecuados que deben ser utilizados en casos particulares y complementariamente encontrar ajustes adecuados para tales métodos.

De esta manera, el presente trabajo, de forma adicional al desarrollo de la herramienta computacional, incluye un análisis para establecer métodos de polarización y sus ajustes más adecuados con el fin de demostrar la utilidad de la información obtenida de la herramienta y del análisis que ésta permite.

El desarrollo general del presente trabajo de titulación se esquematiza en la Figura 3.1.

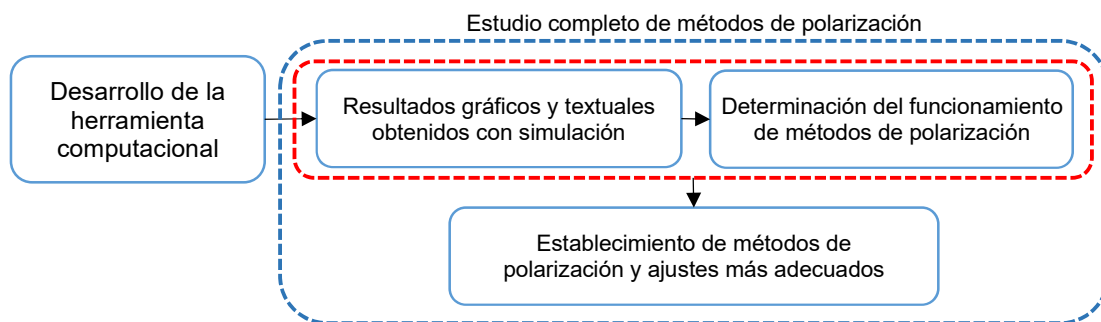


Figura 3.1. Desarrollo general del trabajo de titulación

Es por esto que la metodología de este trabajo de titulación se compone de dos partes. La primera corresponde a la forma llevada a cabo para el desarrollo de la herramienta propuesta, mientras que la segunda consiste en una metodología para un estudio de métodos de polarización; esta última aborda la forma para, a través del uso de dicha herramienta, determinar el funcionamiento de varios métodos de polarización y adicionalmente establecer los métodos y sus ajustes más adecuados en líneas particulares.

En este capítulo, en primer lugar, se indican los métodos de polarización a ser simulados. Después, se describe el entorno de programación utilizado para el desarrollo de la herramienta propuesta. Luego, se detalla el diseño e implementación de dicha herramienta. Por último, se describe la metodología de estudio de métodos de polarización mencionada.

3.1. IDENTIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE POLARIZACIÓN A SIMULAR

Este trabajo se desarrolló en torno a los métodos indicados en la Figura 3.2, cuyo detalle de sus características y su representación gráfica se mostró en la sección 2.4.5.

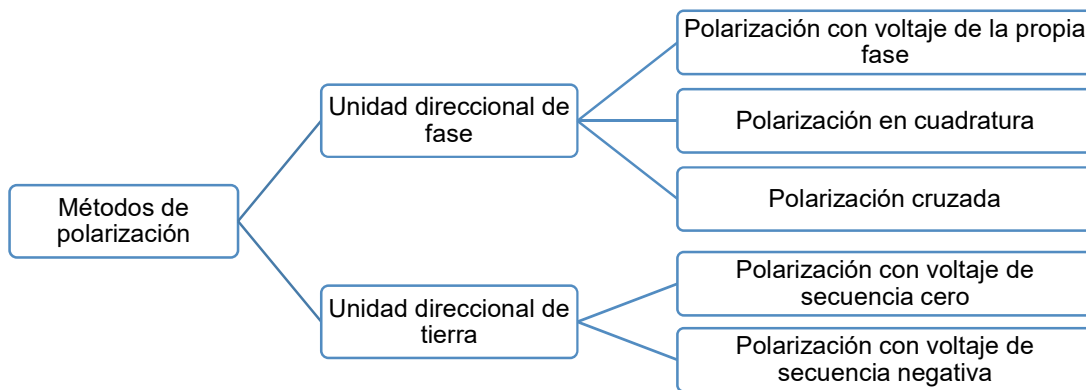


Figura 3.2. Identificación de los métodos de polarización a ser simulados en el software PowerFactory

Las razones para considerar estos métodos son múltiples. En el caso de la unidad de fase, pese a que la polarización en cuadratura es la utilizada por convención, el desarrollo de las nuevas tecnologías de los relés numéricos ha hecho posible que diversos métodos, específicamente la polarización con voltaje de la propia fase y la polarización cruzada, en desuso por funcionar incorrectamente en relés antiguos, puedan nuevamente ser planteados como alternativas para ser usados en nuevos relés. Es por esto que se pretende determinar si en sistemas específicos los métodos alternativos pueden ahora funcionar mejor que el método convencional a fin de que estos puedan ser aprovechados en futuras aplicaciones. En relación con los dos métodos de la unidad de tierra, usados típicamente en relés actuales, en el país aún se discute entre cuál es el método que se debería utilizar en líneas en particular para obtener los mejores beneficios.

3.2. ENTORNO DE PROGRAMACIÓN

El entorno de programación utilizado para el desarrollo de la herramienta computacional fue el software PowerFactory⁵ y, específicamente, el lenguaje de programación de DIgSILENT (DPL, por sus siglas en inglés). De manera previa al diseño de la herramienta, se describe en forma breve este entorno de programación.

3.2.1 SOFTWARE POWERFACTORY

3.2.1.1 Descripción general

El software PowerFactory es un producto orientado a la simulación y análisis de sistemas de generación, transmisión y distribución eléctrica a través de algoritmos de última generación. Además, brinda capacidades extensas y flexibles para la modelación de redes eléctricas al contar con una amplia gama de modelos de elementos incorporados en su interfaz. El software es capaz de manejar tales elementos, como componentes de la red, diagramas unifilares, comandos de cálculo o gráficas a modo de *objetos*⁶, los cuales ostentan una estructura ordenada propia de DIgSILENT [35].

Los objetos de un mismo tipo se agrupan a través de *clases* dentro del software. Por ejemplo, las líneas de transmisión pertenecen a la clase ElmLne, los transformadores de dos devanados pertenecen a la clase ElmTr2 y los elementos de cálculo de cortocircuitos pertenecen a la clase ComShc.

Cabe destacar que la herramienta computacional se desarrolló en la versión PowerFactory 2018 Service Pack 4 (versión 18.0.6).

3.2.1.2 Principales funcionalidades

El programa cuenta con una extensa gama de funcionalidades, desde herramientas estándar hasta operaciones de gran complejidad, que permiten desarrollar diversos estudios como análisis de flujos de potencia, cortocircuitos, contingencias, reducción de redes o coordinación de protecciones. Adicionalmente, el programa dispone de un modelo de base de datos único que brinda facilidades para el manejo de información extensa [36].

Por otra parte, el software ofrece una interfaz gráfica que es capaz de trabajar con tres tipos de gráficos: diagramas unifilares, diagramas de bloques y gráficos de resultados; estos últimos permiten al usuario visualizar resultados de las distintas funciones de

⁵ PowerFactory es una aplicación de © DIgSILENT GmbH ampliamente utilizada en el país.

⁶ Un objeto (en software) es una unidad que tiene una serie de características propias.

PowerFactory a través de diferentes tipos de diagramas predefinidos por el programa según la función utilizada. Además, el software tiene en su pantalla principal una ventana de salida *Output Window* que muestra mensajes de error, advertencias, mensajes de comandos, resultados de cálculos, reportes generados, etc.

3.2.1.3 Complementos de programación y simulación del software

La potencialidad del software brinda la flexibilidad para crear herramientas e interfaces que pueden interactuar con sus funcionalidades para ser adaptadas por el usuario a soluciones particulares [36]. Esto es posible a través de dos complementos que son: el lenguaje de programación DPL y el lenguaje de simulación DSL.

El lenguaje DPL es un medio de programación robusto que funciona enlazado a PowerFactory para la automatización de tareas. Este lenguaje fue usado en el desarrollo de este trabajo de titulación y se describe en detalle más adelante en la sección 3.2.2.

El lenguaje de simulación de DIGSILENT (DSL, por sus siglas en inglés) se trata de un lenguaje propio basado en diagramas de bloques que se usa para desarrollar comúnmente sistemas de control y otros tipos de modelos que se relacionan con elementos de una red eléctrica a través de simulaciones en estado estable y dinámico. PowerFactory brinda al usuario la posibilidad de usar modelos preestablecidos en la librería del programa o de desarrollar modelos personalizados.

Cabe mencionar que, de manera particular, los elementos relacionados al área de protecciones, tales como relés o transformadores de medida, se pueden modelar en este software a través de DSL, el cual permite efectuar estudios de cortocircuito en estado estable o con simulaciones dinámicas de tipo RMS y EMT [37].

3.2.1.4 Área de protecciones

PowerFactory cuenta con distintos elementos relacionados al área de protecciones, entre los cuales se destaca su extensa librería de relés basada en modelos de dispositivos de protección de varios fabricantes. Además, permite realizar estudios específicos como coordinación de relés o configuraciones automáticas de la protección de distancia. El programa facilita la simulación de varias representaciones gráficas de las características de funcionamiento de los relés, las cuales se muestran en la Tabla 3.1. Estas representaciones gráficas se complementan con las herramientas de PowerFactory para cálculos de flujos de potencia, cortocircuitos, oscilaciones, etc., con el fin de permitir al usuario el análisis del desempeño de las distintas protecciones en una red [36].

Tabla 3.1. Representaciones gráficas específicas para dispositivos de protección

Dispositivo de protección	Representación disponible en PowerFactory
Relé de sobrecorriente	Diagrama de tiempo-sobrecorriente
Relé de distancia	Diagrama de impedancia tipo R-X Diagrama de tiempo-distancia
Relé diferencial	Diagrama de comparación diferencial de corriente Diagrama de comparación diferencial de fase

Con respecto al relé de sobrecorriente direccional, el software dispone de un modelo básico de esta protección elaborado a través de diagrama de bloques (simulación DSL), el cual está encriptado y, por lo tanto, la información interna del modelo se encuentra bloqueada para los usuarios; de esta manera, resulta imposible interactuar con la modelación de esta protección o acceder a las ecuaciones que componen el diagrama de bloques. Por último, el usuario está limitado a emplear las funciones que ofrece este modelo y no dispone de una representación gráfica específica de esta protección [38].

3.2.2 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN DE DIGSILENT (DPL)

3.2.2.1 Descripción general

DIGSILENT cuenta con un lenguaje de programación propio denominado DIGSILENT Programming Language (DPL) disponible en PowerFactory. Este lenguaje se encuentra adaptado para usar las funcionalidades del software y automatizarlas. Además, se basa en el lenguaje de C++, lo que facilita la programación por presentar una sintaxis familiar [39].

La fortaleza de DPL es tener a su alcance funciones de PowerFactory y las redes modeladas en éste, lo que permite diseñar programas complejos que usan tales funciones sobre los elementos de la red eléctrica. Esto hace posible extender las capacidades del software a tareas particulares, optimizarlas e inclusive crear nuevas herramientas.

El lenguaje tiene facilidades para el acceso y manipulación de elementos y parámetros de PowerFactory en virtud de que éste define a sus elementos como objetos con una estructura ordenada a través de clases. Se debe resaltar que DPL permite interfaces con programas como Microsoft Excel para el manejo de datos.

3.2.2.2 Estructura del comando DPL

Los programas en DPL trabajan con información de entrada que puede provenir de la red eléctrica y la procesan con algoritmos para generar resultados, los cuales son exportados a elementos de salida. Esto es posible a través del editor de programas DPL o comando DPL (clase ComDpl) esquematizado en la Figura 3.3.

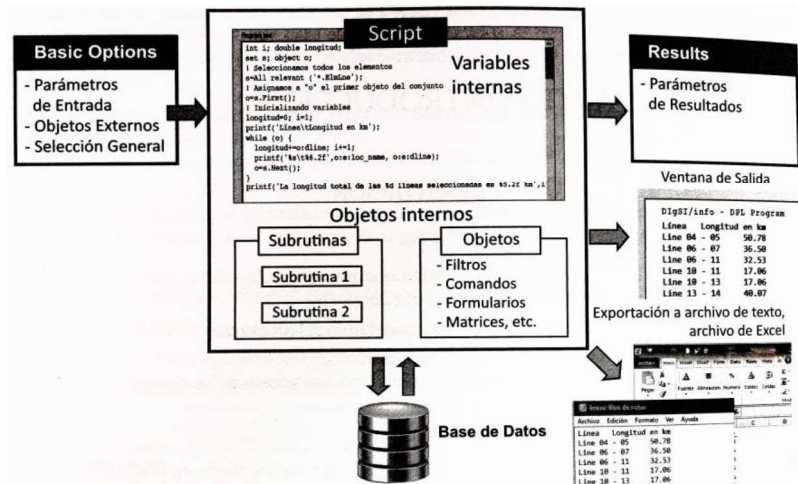


Figura 3.3. Estructura de un comando DPL [39]

El comando DPL permite el desarrollo de programas a través de una interfaz para editar código, definir los parámetros de entrada/salida y asignar los objetos internos y externos que manipulará el programa durante su ejecución. Este comando posee las ventanas: Basic Options, Results, Script, Description y Version; las tres primeras, mostradas en la Figura 3.4, permiten el ingreso de información, mientras que las dos últimas tienen fines de documentación. Los campos de estas ventanas se muestran en la Tabla 3.2.

a) Ventana Basic Options

Type	Name	Value	Unit	Description
1	int	VariableEntrada1		
2	double	VariableEntrada2		
3	string	VariableEntrada3		
4	object	VariableEntrada4		
5	set	VariableEntrada5		

Name	object	Description
1	ObjetoExterno1	
2	ObjetoExterno2	
3	ObjetoExterno3	

b) Ventana Script

```

1
2
3
4
5
6 ! Sentencias del programa ...
7
8
9
10
11
12
13
14

```

c) Ventana Results

Type	Name	Unit	Description
1	int	VariableSalida1	
2	double	VariableSalida2	
3	string	VariableSalida3	
4	object	VariableSalida4	
5	set	VariableSalida5	

Figura 3.4. Ventanas relevantes de un comando DPL

Para terminar, a la derecha del editor se encuentran los botones para ejecutar (Execute), cerrar (Close), cancelar (Cancel), guardar (Save), revisar (Check), encriptar (Encrypt) y

abrir los contenidos del programa (Contents). Este último permite acceder a los objetos almacenados dentro del programa, los cuales pueden ser subrutinas (otros programas escritos en DPL), filtros, funciones de PowerFactory y otros elementos más a ser usados por el programa. Además, se pueden almacenar matrices, vectores y otros elementos similares que pueden funcionar como bases de datos del programa.

Tabla 3.2. Funciones de los campos de un comando DPL

Ventana	Campo	Función
Basic Options	Name	Definir el nombre del programa.
	General Selection	Agregar un conjunto de objetos como variables de entrada al programa.
	Input Parameters	Definir las variables de entrada al programa y modificar su valor sin intervenir en el código.
	External Objects	Agregar objetos a ser usados por el programa como una línea, un caso de estudio o una librería.
Results	Result parameters	Definir variables en las que se escriben datos de salida, lo que es útil si el comando es una subrutina y se requiere que sus resultados sean accesibles por el programa general.
Script	Remote Script	Ejecutar el código de un programa (DPL) que se encuentra en alguna ubicación externa al programa en cuestión.
	Code	Este campo es el núcleo del programa, puesto que permite escribir las sentencias del algoritmo a ser ejecutado y tiene a su alcance todos los campos del comando DPL.
Description	(...)	Escribir información acerca de la documentación del programa;
Version	(...)	ésta no interfiere en su ejecución.

3.2.2.3 Desarrollo de un programa en DPL

La creación de un programa en DPL puede efectuarse de varias formas. A continuación, se describe la utilizada para el desarrollo de la herramienta propuesta; dicha forma está ordenada en cuatro etapas: creación del comando DPL, declaración de variables, escritura de las instrucciones del programa y parametrización y ejecución del comando DPL [39].

3.2.2.3.1 Creación del comando DPL

Inicialmente, se debe disponer de un elemento editor de escritos o comando DPL que permita la consecución del proceso de desarrollo del programa *Ejemplo*. La creación de este comando requiere de dos pasos.

Paso 1: En la subcarpeta *Scripts* de la librería de un proyecto de PowerFactory se selecciona el botón *New Object* mostrado en la Figura 3.5.

Paso 2: En la ventana desplegada se escoge el elemento DPL Command (ComDpl), de acuerdo con la Figura 3.6 y se presiona el botón *OK*. La nueva ventana desplegada corresponde al editor de programas en DPL o comando DPL. En este punto ya es posible usar esta interfaz DPL para editar los diferentes campos descritos en la Tabla 3.2.

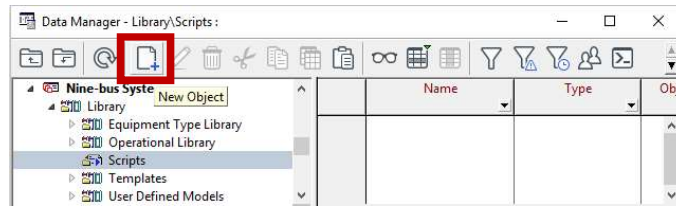


Figura 3.5. Ventana ilustrativa del paso 1 para la creación de un comando DPL

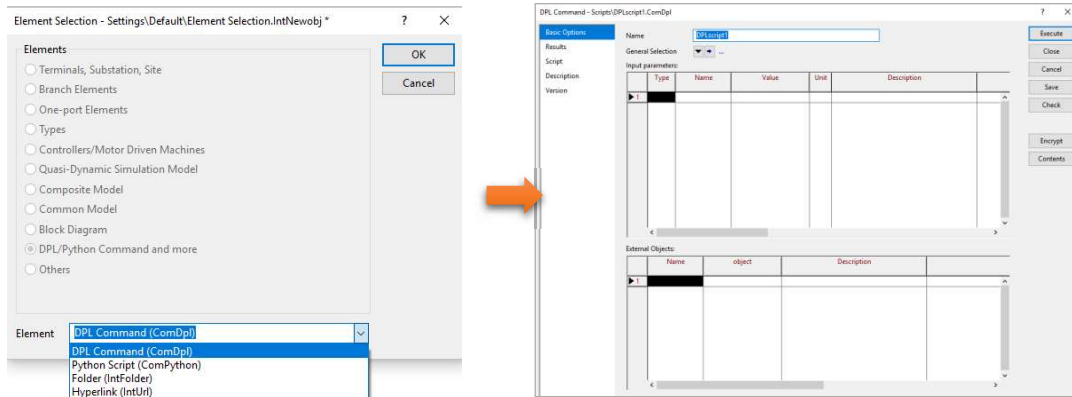


Figura 3.6. Ventana ilustrativa del paso 2 para la creación de un comando DPL

3.2.2.3.2 Declaración de variables

Un programa en DPL exige que las variables usadas sean declaradas explícitamente. Las variables internas deben declararse a través de código, a menos de que éstas sean destinadas a ser usadas como objetos internos, en cuyo caso basta con ubicarlas dentro de la carpeta *Contents*. Por otra parte, las variables externas deben declararse en el comando DPL mediante los campos de parámetros de entrada, resultados u objetos externos, de acuerdo con lo descrito en la sección 3.2.2.2.

Las variables admisibles pueden ser de tipo entero (int), doble (double), cadena (string), objeto (object) o conjunto (set). Los tres primeros dependen de si la variable representa un número entero, un número real o una cadena de caracteres. Una variable de tipo objeto (object) puede hacer referencia a elementos como líneas, generadores y otros elementos de la red. Las subrutinas, los comandos de cálculo de cortocircuitos, librerías, gráficas y muchos otros elementos más que forman parte de PowerFactory también son objetos que pueden ser accesibles por DPL si son representados a través de variables de tipo object. Finalmente, una variable de tipo (set) no es más que un conjunto que contiene varios objetos. La Figura 3.7 muestra las distintas formas para declarar variables.

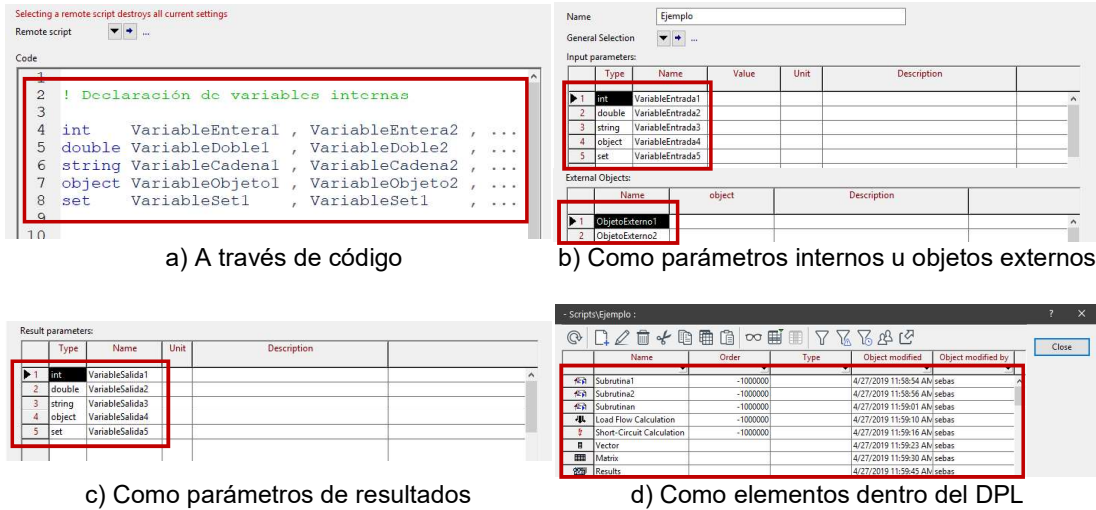


Figura 3.7. Formas genéricas de declaración de variables en un comando DPL

3.2.2.3.3 Escritura de las instrucciones del programa

Una vez concluida la definición de variables, se procede con la escritura como tal de las instrucciones o sentencias que forman parte del algoritmo del programa. Éstas deben respetar la sintaxis impuesta por el lenguaje DPL, que es similar al lenguaje C++ y posee un conjunto de funciones que se deriva de éste.

En la Tabla A.1 (ANEXO A) se ilustran diferentes tareas básicas que usan la sintaxis y algunas funciones del lenguaje DPL, mientras que en la Tabla A.2 se presentan las funciones matemáticas estándar de PowerFactory. Muchas de éstas permitieron el desarrollo de la herramienta. Todas las posibles sintaxis y funciones de DPL constituyen un conjunto extenso de información que no es pertinente ser mostrado en este documento, sin embargo, esto puede ser revisado en la documentación del software [36] y [40].

3.2.2.3.4 Parametrización y ejecución del comando DPL

Después de la escritura del código, el comando DPL aún no está listo para ser ejecutado, puesto que previamente se debe asignar un valor a cada variable de entrada que fue declarada al comienzo del desarrollo del programa. Esto se conoce como asignación o parametrización. De no realizarse este paso, el programa no se ejecutará adecuadamente.

Una manera apropiada de realizar la parametrización es a través del botón *Execute Script* de la barra de tareas de PowerFactory. Éste desplegará una lista de los programas disponibles en el proyecto, en la cual se debe buscar el script desarrollado y seleccionarlo, en este caso de nombre *Ejemplo*, según se muestra en la Figura 3.8. Luego, el comando DPL que se despliega es una simulación que se almacena en el caso de estudio activo

para usar el escrito del programa y hacer una parametrización de éste sin modificar el comando original. Como se aprecia al final de la Figura 3.8, el usuario debe parametrizar el comando DPL asignando el valor de cada variable interna (input parameters) y seleccionar a qué hacen referencia los objetos externos.

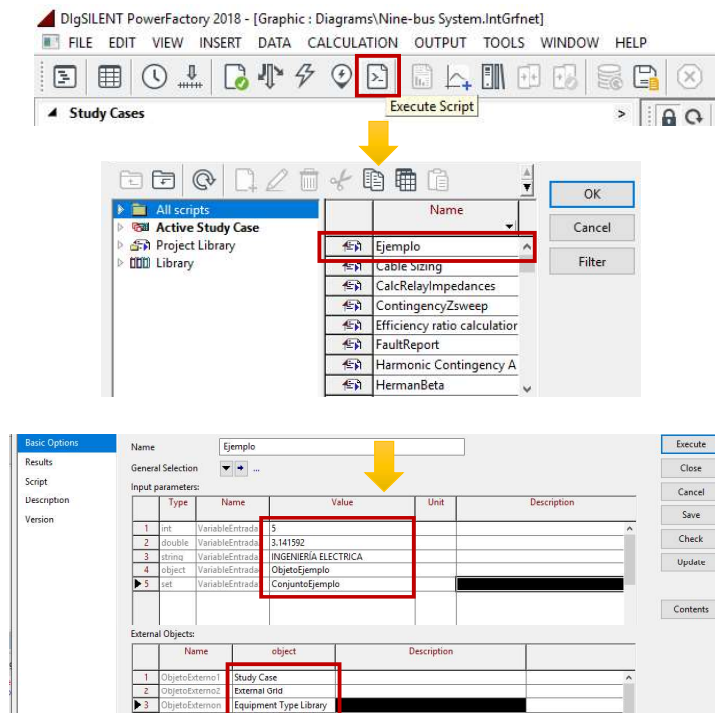


Figura 3.8. Ventanas ilustrativas de la parametrización del comando DPL

Una vez realizada la parametrización, es posible presionar *Execute* para la ejecución del programa. La ventana de salida reportará los resultados y si existe algún error.

3.2.2.4 Ejemplo de un programa en lenguaje DPL

En este apartado se muestra un ejemplo de un programa en DPL denominado *Ejemplo*, de acuerdo con las etapas de declaración de variables, escritura de instrucciones y parametrización y ejecución descritas antes. Este programa ejecuta cortocircuitos distribuidos regularmente a lo largo de una línea (barrido de cortocircuito), la cual es seleccionada por el usuario en el sistema *IEEE Nine-bus System*, los resultados son la posición y la magnitud de la corriente de cortocircuito para cada iteración.

□ Declaración de variables

El Segmento de código 3.1 ilustra la declaración de variables en el código: tipo *int i* para contar las iteraciones y *numero_iteraciones* para almacenar el número de las iteraciones totales y tipo *double corriente_cortocircuito* para obtener la corriente en cada iteración.

Además, se usa el parámetro de entrada tipo double *barrido*, el objeto externo *Linea_seleccionada* y el comando de cálculo de cortocircuitos *shc* junto con el vector *Magnitud* como contenidos u objetos internos, según se muestra en la Figura 3.9.

```
3 int i , numero_iteraciones ;
4 double corriente_cortocircuito;
```

Segmento de código 3.1. Declaración de variables internas del programa *Ejemplo*

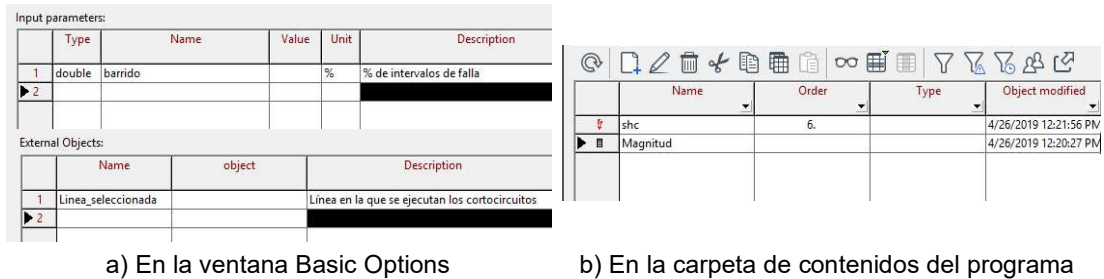


Figura 3.9. Declaración de variables fuera del código

□ Escritura de las instrucciones del programa

En el Segmento de código 3.2 se muestra el conjunto de sentencias completo del programa, el cual emplea diferentes sentencias y funciones de PowerFactory.

<pre>6 ! Inicialización de variables 7 numero_iteraciones = floor((100)/barrido) + 1 ; 8 Magnitud.Init(numero_iteraciones) ; 9 shc:shcobj = Linea_seleccionada ; ! Elemento a cortocircuitar 10 shc:ppro = 0 ; ! Inicio de cortos al 0% 11 12 ! Impresión de texto 13 printf(' PROGRAMA: EJEMPLO') ; 14 printf('Línea seleccionada: %0' , Linea_seleccionada) ; 15 printf('Posición\tCorriente de cortocircuito') ; 16 17 ! Bucle del programa 18 for(i = 1 ; i <= numero_iteraciones ; i = i+1) { 19 20 shc:ppro=barrido*(i-1) ; ! Incremento de la posición 21 shc.Execute() ; ! Ejecución del cortocircuito 22 corriente_cortocircuito = Linea_seleccionada:m:lkss:bus1:A 23 Magnitud.Set(i , corriente_cortocircuito);! Almacenar 24 ! Impresión de resultados 25 printf('%5.1f %% \t\t %4.2f kA' , shc:ppro , Magnitud.Get(i)) 26</pre>	<p>Pseudocódigo</p> <p>→ Obtener la parte entera de la división con floor</p> <p>→ Inicializar el Vector Magnitud con valores nulos</p> <p>→ Asignar Linea_seleccionada a shc:shcobj</p> <p>→ Asignar 0 a shc:ppro</p> <p>→ Imprimir 'PROGRAMA: EJEMPLO'</p> <p>→ Imprimir '(Nombre de Linea_seleccionada)'</p> <p>→ Imprimir títulos</p> <p>→ Abrir bucle for</p> <p>→ Asignar barrido*(i-1) a shc:ppro</p> <p>→ Ejecutar el comando shc</p> <p>→ Asignar Linea(...)m:lkss:bus1:A a corriente(...)</p> <p>→ Asignar corriente(...) al elemento i de Magnitud</p> <p>→ Imprimir shc:ppro y el valor i de Magnitud</p> <p>→ Cerrar bucle for</p>
---	--

Segmento de código 3.2. Sentencias del programa *Ejemplo*

□ Parametrización y ejecución del comando DPL

La parametrización de este programa consiste en ingresar el paso porcentual del barrido de cortocircuito en la variable *barrido* y seleccionar la línea a cortocircuitar *Linea_seleccionada*, en este caso la línea 7-8, según se muestra en la Figura 3.10. Finalmente, como se observa en la Figura 3.11, la ejecución del programa muestra resultados en la ventana de salida y almacena valores en el vector *Magnitud*.

Name: Ejemplo

General Selection: ▾ ▸ ...

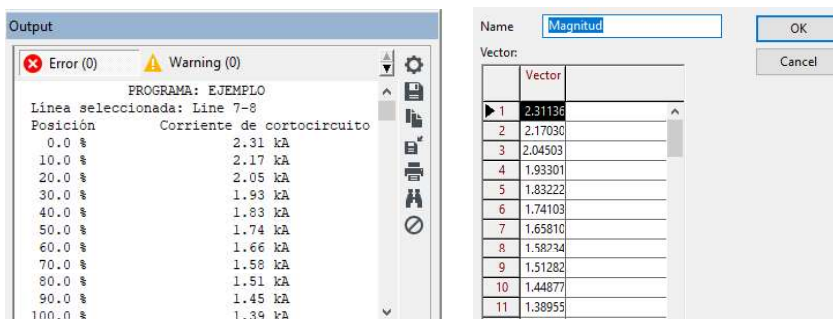
Input parameters:

	Type	Name	Value	Unit	Description
▶ 1	double	barrido	10	%	% de intervalos de falla

External Objects:

	Name	object	Description
▶ 1	Linea_seleccionada	Line 7-8	

Figura 3.10. Parametrización del programa Ejemplo



a) Ventana de salida b) Vector almacenado

Figura 3.11. Resultados de la ejecución del programa

3.3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL

En este apartado se describe cómo se desarrolló la herramienta computacional para cumplir con el alcance planteado en este trabajo de titulación. En primer lugar, se presenta una perspectiva general de las características esperadas en dicha herramienta. Luego, se detalla el diseño de la herramienta. Finalmente, se exponen las generalidades de la herramienta una vez que ésta ha sido implementada.

3.3.1 REQUERIMIENTOS FUNCIONALES BÁSICOS DE LA HERRAMIENTA

La herramienta propuesta debe ser capaz de simular el desempeño de varios métodos de polarización en los extremos de líneas modeladas en PowerFactory (en donde se ubicarían protecciones direccionales) y entregar resultados gráficos y textuales relevantes para determinar (evaluar) el funcionamiento de dichos métodos. Adicional a esto, se requiere que la herramienta exporte parte de la información de las simulaciones a una hoja de cálculo de Excel, puesto que, como se verá más adelante en la sección 3.4, esta información será útil para encontrar ventajas y desventajas en el uso de cada método de polarización y poder determinar los métodos y sus ajustes más adecuados. En la Figura 3.12 se muestra la estructura básica de la funcionalidad de la herramienta propuesta.

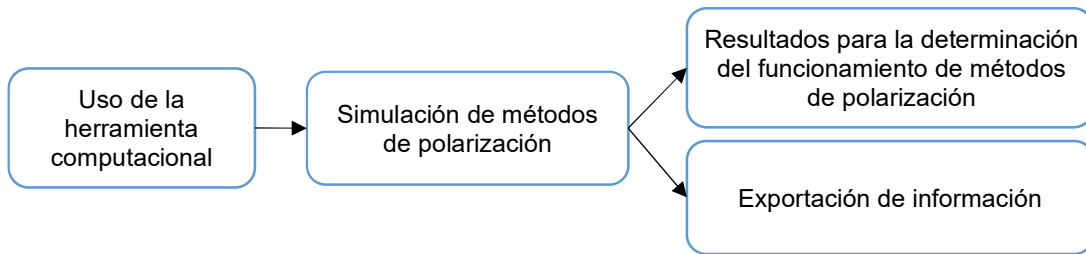


Figura 3.12. Funcionalidad básica de la herramienta de simulación

La simulación de un método de polarización consiste en que la herramienta obtenga y represente la información de las variables que caracterizan el comportamiento de ese método, es decir, las cantidades de polarización y operación, ángulo de torque y dirección definida por el método. Estas variables deben obtenerse para un conjunto extenso de cálculos de cortocircuito efectuados en redes modeladas en PowerFactory.

Por otro lado, los resultados de la simulación para poder determinar si el funcionamiento de un método de polarización es apropiado o no deben mostrar al usuario de una forma clara si tal método es capaz de definir la dirección del conjunto de cortocircuitos mencionado de manera consistente (igual) con la dirección real de tales cortocircuitos.

Por último, la exportación de información consiste en almacenar algunas variables que se procesan en la simulación de los métodos de polarización en un archivo de Excel; estas variables se especificarán más adelante.

Para proveer a la herramienta de las funcionalidades indicadas, son necesarios diferentes elementos de PowerFactory y del lenguaje DPL, los cuales se mencionan a continuación.




3.3.2 FUNCIONALIDADES ESPECÍFICAS DE POWERFACTORY Y DEL LENGUAJE DPL PARA EL DISEÑO

Una vez planteados los requerimientos básicos de la herramienta computacional, se determinaron diversas funcionalidades del software PowerFactory y del lenguaje DPL con las que se dispone para poder diseñar e implementar dicha herramienta. El conjunto de funcionalidades abarca tanto a funciones internas de código como a objetos de distintas clases. A continuación, se describe el uso general de varios elementos incluidos entre estas funcionalidades y considerados como básicos para el desarrollo de una herramienta con los requerimientos expuestos.

3.3.2.1 Comandos requeridos

Los comandos son funciones para la ejecución automática de flujos de potencia, cortocircuitos, reducción de red, etc. Los comandos necesarios son los de la clase ComDpl, ComShc y ComLdf. En la Tabla 3.3 se muestra la descripción del uso de cada uno.

Tabla 3.3. Comandos funcionales para la herramienta de simulación

Clase	Comando	Uso
ComDpl 	Comando editor de programas en DPL	Desarrollar el programa general y cada una de las subrutinas que forman el programa
ComShc 	Comando de cálculo de cortocircuitos	Calcular cortocircuitos de diferente tipo con resistencia de falla y posición variable
ComLdf 	Comando de cálculo de flujos de potencia	Calcular flujos de potencia de forma periférica a la estructura del programa

3.3.2.2 Elementos para el manejo de datos

El conjunto de datos con los que debe trabajar la herramienta es extenso, por lo tanto, es necesario su manejo adecuado. Esto requiere de los elementos listados en la Tabla 3.4. Además, es necesario emplear funciones dentro del código para realizar una interacción con Excel. Las funciones para esto se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.4. Elementos para el manejo de datos en la herramienta de simulación





Clase	Elemento	Uso
SetSelect 	Conjunto de una selección	Guardar el conjunto de elementos de la red que forman parte del barrido de cortocircuito
IntMatrix 	Matriz	Almacenar datos de voltaje, corriente, ángulo de torque y otros más obtenidos en la simulación.
IntVec 	Vector	Almacenar variables en una dimensión, por ejemplo, los valores de resistencia de falla
ElmRes 	Variable de resultados	Almacenar el conjunto de variables que será utilizado en distintos resultados gráficos




Tabla 3.5. Funciones básicas para una interfaz con Excel

Función	Uso
xIStart ()	Iniciar la interfaz con Excel
xIOpenWorkbook (Directorio)	Abrir una hoja de cálculo ubicada en <i>Directorio</i>
xIActivateWorksheet (i)	Activar la hoja <i>i</i> de una hoja de cálculo abierta en la interfaz
xIGetValue (No.Col,No.Fila,valor_obtenido)	Obtener un valor
xISetValue (No.Col,No.Fila,valor_asignado)	Asignar un valor
xISaveWorkbook ()	Almacenar las modificaciones realizadas durante la interfaz
xITerminate ()	Terminar la interfaz con Excel

3.3.2.3 Elementos para mostrar resultados

Los resultados obtenidos por parte de la herramienta deben ser gráficos y textuales. Con respecto a los primeros, se deben usar elementos especiales de PowerFactory para que la obtención de resultados sea un proceso eficiente sin tener la necesidad de recurrir a otro software para la visualización de diagramas. En la Tabla 3.6 se presentan tres elementos básicos utilizados. Con respecto a los resultados textuales, se emplean las funciones básicas para imprimir texto en la ventana de salida de PowerFactory *Output Window*.

Tabla 3.6. Elementos gráficos para la herramienta de simulación

Clase	Elemento	Uso
SetVipage 	Página de gráficos	Incluir diferentes tipos de gráficos en la interfaz de salida de PowerFactory.
VisPlot 	Gráfica de curvas	Graficar diagramas en función de la distancia del cortocircuito.
VisVec 	Diagrama fasorial	Graficar la característica direccional de un método de polarización.

3.3.3 DISEÑO DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL

Considerando las distintas funcionalidades con las que se dispone en PowerFactory y en el lenguaje DPL, se diseñó la herramienta de simulación según la arquitectura general de la Figura 3.13. Esta arquitectura satisface los requerimientos mostrados en la Figura 3.12.

En primer lugar, en la arquitectura se encuentra definido el subproceso *Parametrización o ingreso de datos*, el cual hace referencia a los datos de entrada a ser asignados por el usuario según el detalle de la Tabla 3.7. Los datos generales son la selección de los componentes de la red que forman parte del análisis, la configuración preliminar de los métodos de polarización a simular y la configuración de los cálculos de cortocircuito.

Luego, el subproceso *Barrido de cortocircuito en un elemento* conlleva a la ejecución de cortocircuitos de diferente tipo con variación en la posición o distancia y en la resistencia de falla en los componentes de la red que están dentro del conjunto establecido para el análisis. Todo esto automatizado por la misma herramienta computacional. La Figura 3.14 ilustra la ejecución del barrido de cortocircuito. En cada cortocircuito se almacenan internamente las variables que simulan un método de polarización, es decir, las variables que caracterizan el funcionamiento de un método (respuesta del método); estas variables son: las cantidades de polarización y operación, el ángulo de torque y la dirección definida. Además, para la protección de tierra también se incluye la corriente de secuencia cero.

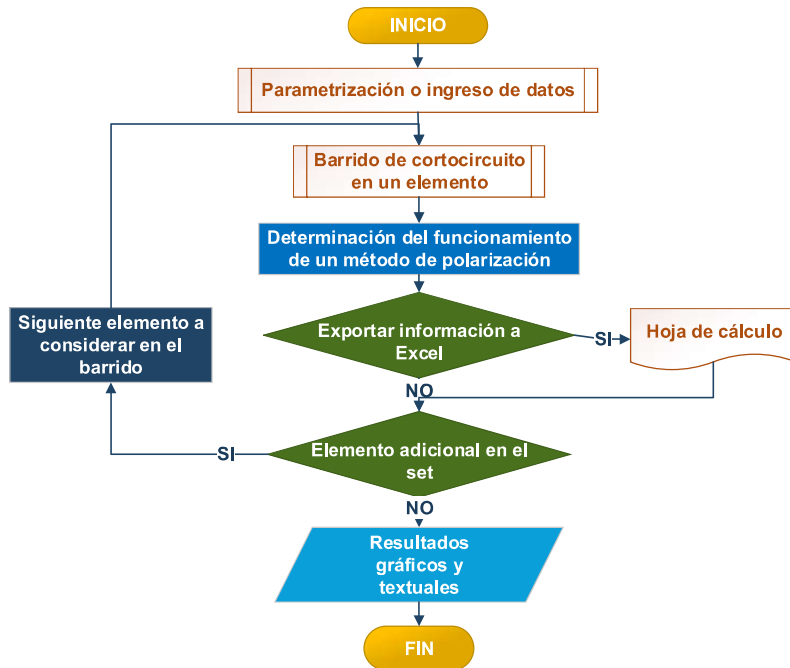


Figura 3.13. Arquitectura general de la herramienta de simulación

Tabla 3.7. Datos de entrada generales de la Parametrización o ingreso de datos

Datos	Detalle
Componentes de la red	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Selección de la línea en la que se simularán los métodos de polarización. ▪ Selección del conjunto de elementos en los que se calcularán cortocircuitos.
Configuración de los métodos de polarización	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ingreso de los parámetros de la unidad direccional de fase más la I_{TAP}. ▪ Ingreso de los parámetros de la unidad direccional de tierra más la I_{TAP}.
Configuración del cálculo de cortocircuitos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Definición de las posiciones para el cálculo de los cortocircuitos. ▪ Definición de los valores de resistencia de falla a considerar. ▪ Definición de los tipos de falla a considerar.

Después, el proceso *Determinación del funcionamiento* evalúa el funcionamiento de los métodos de polarización comparando la dirección definida por tales métodos con la dirección real de una falla, lo cual se realiza para todas las simulaciones efectuadas en el barrido de cortocircuito ejecutado en cada elemento. Esto tiene el propósito de que el programa entregue al usuario el resultado de la evaluación del funcionamiento de un método de polarización para ayudar a éste en el análisis. El resultado de esta comparación también se almacena internamente en el programa para su posterior interpretación una vez terminada la simulación.

Una vez que el conjunto de cortocircuitos ejecutados en un elemento se ha analizado, se puede exportar cierta información a Excel. Esta información se compone del valor del ángulo de torque y del fasor de la corriente de cortocircuito (magnitud de la corriente y dirección definida por el método de polarización) para cada falla ejecutada en el barrido de

cortocircuito. Además, para la unidad de tierra se incluye la cantidad de polarización y la corriente de secuencia cero.

La secuencia se repite iterativamente con la selección de un nuevo elemento de entre los componentes de la red definidos en el ingreso de datos (en el caso de que se encuentren disponibles componentes adicionales).

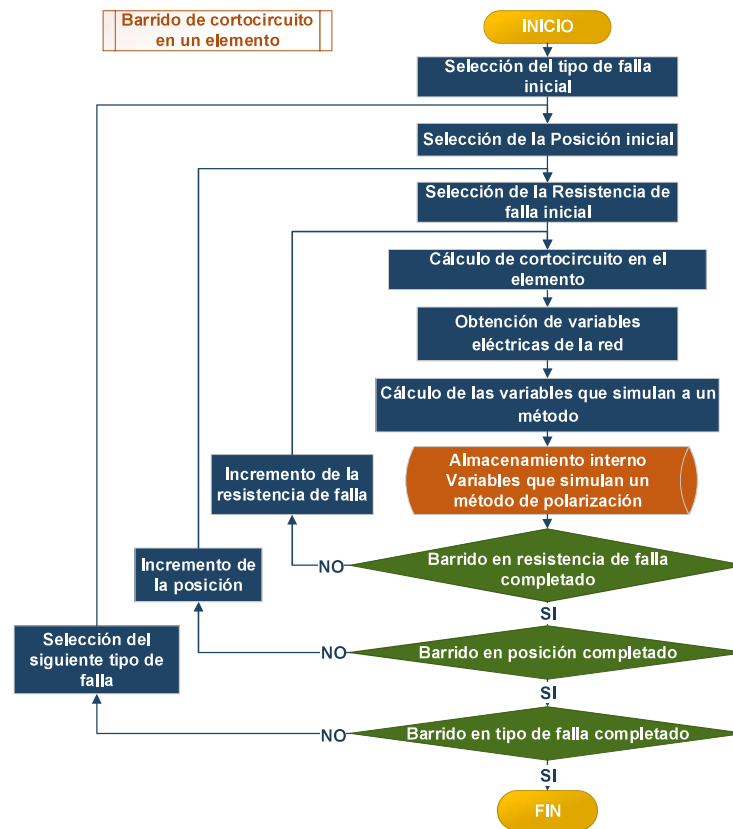


Figura 3.14. Estructura de la ejecución de un barrido de cortocircuito

Finalmente, el proceso de salida *Resultados gráficos y textuales* expone los resultados de la ejecución total del programa.

3.3.4 GENERALIDADES DE LA HERRAMIENTA IMPLEMENTADA

La herramienta implementada simula métodos de polarización en cada extremo de alguna línea de dos terminales o extremos, es decir, la comparación fasorial que realizaría un relé en esas ubicaciones. Para esto, la herramienta utiliza los fasores de voltaje y corriente en cada extremo obtenidos de barridos de cortocircuito y los procesa para calcular las ecuaciones de dichos métodos y así evaluar el funcionamiento de estos. Los fasores utilizados son los mismos que mediría un relé en tales extremos.

En definitiva, la simulación del Script puede entenderse como si se hubieran colocado relés de sobrecorriente direccional de fase y tierra en cada extremo de una línea y se estuviera examinando el funcionamiento de los métodos de polarización configurados en dichos relés. En este sentido, es preciso señalar que la herramienta no utiliza propiamente relés modelados en las líneas consideradas.

Por lo anterior, en el documento se hará referencia en ocasiones a relés ubicados en las líneas consideradas. Sin embargo, se advierte al lector que los relés que se mencionen no han sido modelados propiamente en PowerFactory y solo se hace referencia a ellos para las explicaciones de las simulaciones de los métodos de polarización.

A continuación, se describe la herramienta computacional en forma general para una comprensión de su uso. En el ANEXO B se encuentra disponible el comando DPL de la herramienta en formato *.pfd para ser examinado con profundidad por el lector.

3.3.4.1 Descripción general del comando DPL

Como se comentó antes, el comando DPL es la estructura esencial de un programa en este lenguaje. En tal virtud, se explica la funcionalidad de la herramienta a partir del comando DPL del programa general sin profundizar en la función de cada campo. El detalle al respecto puede ser consultado en la guía de usuario presentada en el ANEXO C. En dicho anexo también se detallan los pasos para poder usar tal herramienta.

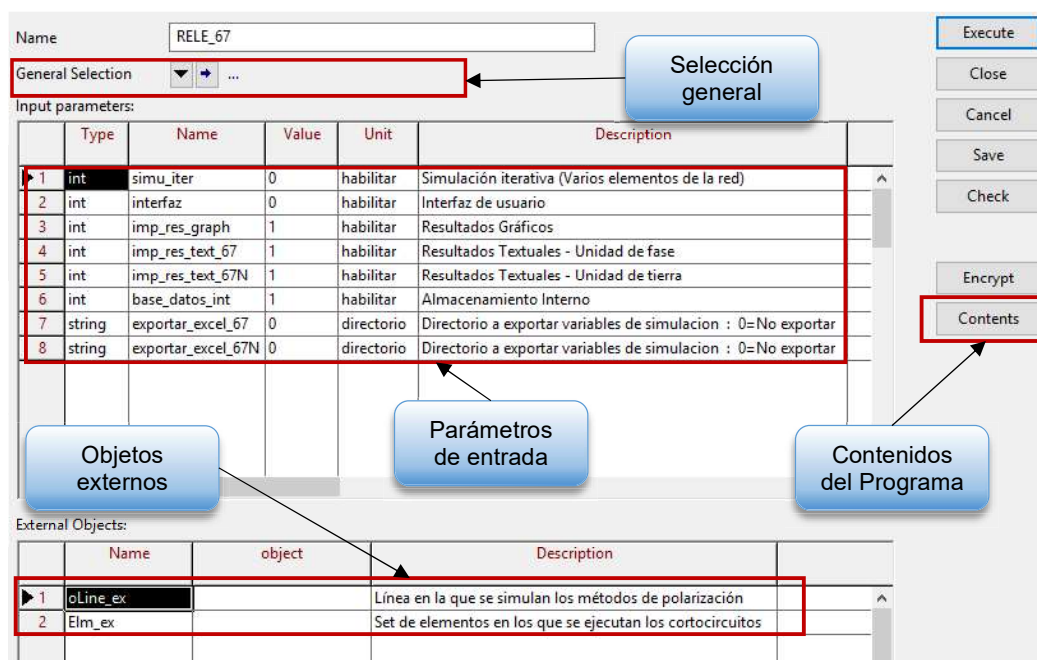


Figura 3.15. Ventana *Basic Options* del comando DPL de la herramienta desarrollada

La herramienta brinda al usuario la flexibilidad para controlar las simulaciones a ejecutarse y los resultados a obtenerse. En la Figura 3.15 se ilustra la ventana de opciones básicas del programa principal llamado *RELE_67*. Los campos de esta ventana permiten habilitar la interfaz gráfica y textual del programa, así como el proceso para exportar resultados a Excel. La herramienta se ha implementado de esta forma para que el usuario pueda escoger entre mostrar los resultados de la determinación del funcionamiento de un método, exportar la información de las simulaciones a Excel o inclusive ambas tareas a la vez. Además, en esta ventana se deben ingresar la línea en la que se simulan los métodos de polarización y el conjunto de elementos en los que se ejecutarán los cortocircuitos.

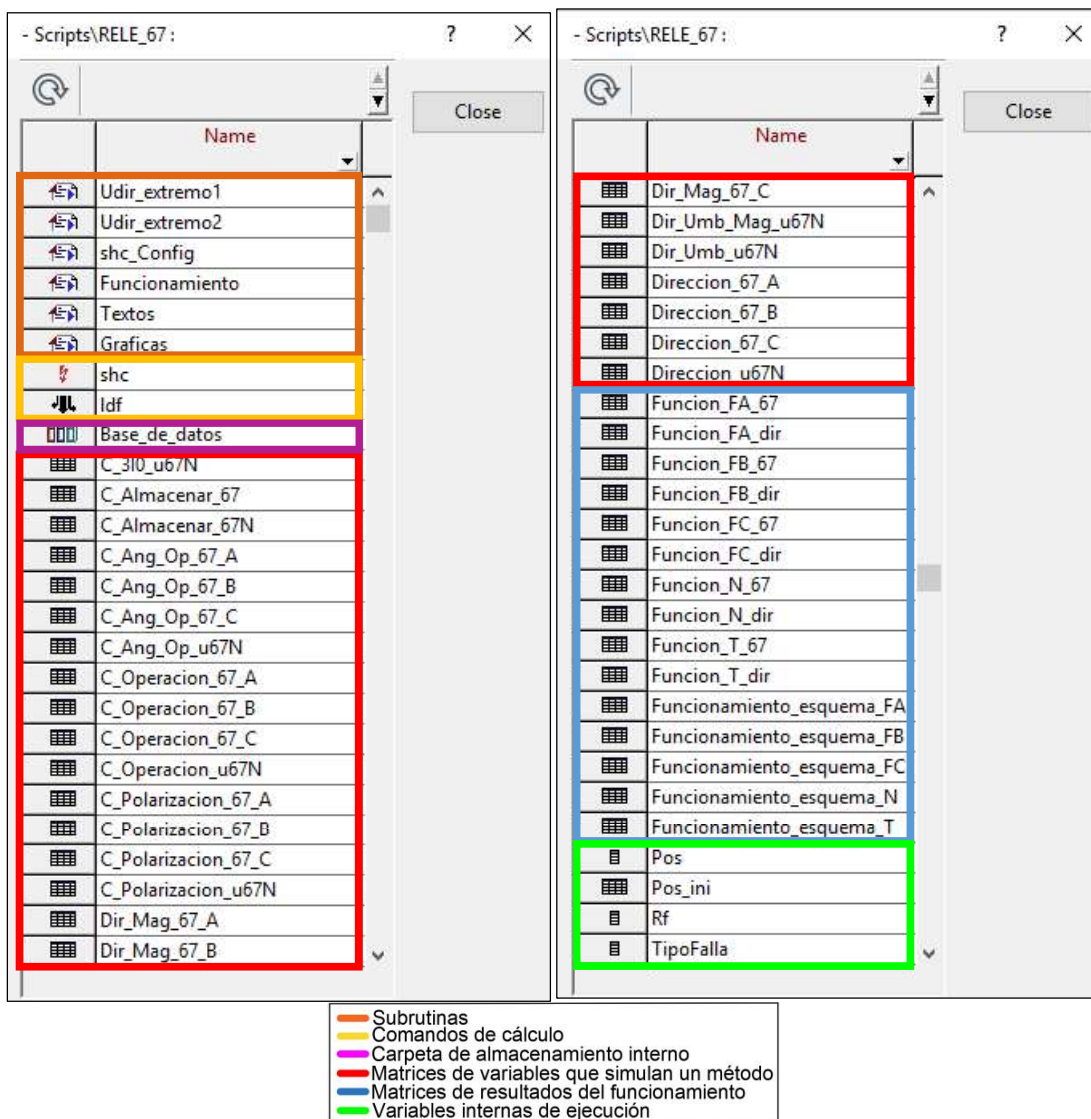


Figura 3.16. Carpeta de contenidos del comando DPL de la herramienta desarrollada

Por otra parte, en la carpeta de contenidos mostrada en la Figura 3.16 se observan los objetos que constituyen al programa. Se pretende que el nombre de cada uno permita intuir fácilmente su utilidad. De manera general, la nomenclatura usada en las matrices hace referencia a la variable que almacenan y a la fase correspondiente, a excepción de cuando se trata de resultados totales (para lo cual se usa el sufijo T) o cuando se trata de la unidad de tierra, en cuyo caso se usa como sufijo 67N o simplemente N.

3.3.4.2 Subrutinas del comando DPL

El programa implementado cuenta con seis subrutinas, las cuales dividen las tareas de ejecución del programa en módulos. En la Figura 3.17 se muestra el flujo de información entre las subrutinas y el programa general. Las funciones generales de cada subrutina se exponen en la Tabla 3.8. En la guía de usuario del anexo correspondiente se detallan los campos de cada subrutina.

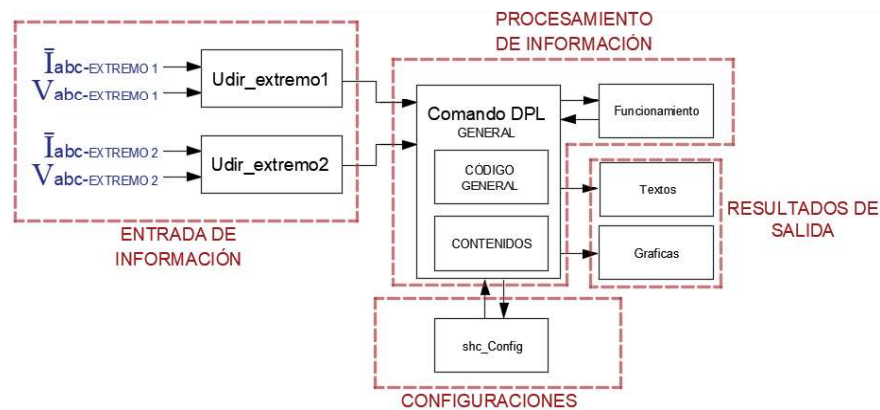


Figura 3.17. Flujo de información del comando DPL

Tabla 3.8. Función de las subrutinas de la herramienta computacional

Subrutina	Función
Udir_extremo1	♦ Procesar las variables eléctricas de los métodos de polarización obtenidas desde el extremo 1.
Udir_extremo2	♦ Procesar las variables eléctricas de los métodos de polarización obtenidas desde el extremo 2.
shc_Config	♦ Realizar la configuración completa de los cálculos de cortocircuito a ejecutar.
Funcionamiento	♦ Analizar la consistencia direccional de los métodos de polarización en ambos extremos.
Textos	♦ Imprimir resultados textuales.
Gráficas	♦ Imprimir resultados gráficos.

Es preciso destacar las dos primeras subrutinas *Udir_extremo1* y *Udir_extremo2*, las cuales obtienen los valores de voltaje y corriente por cada fase para formular matemáticamente las ecuaciones de los respectivos métodos y enviar estos datos

procesados, tales como las cantidades de polarización o los ángulos característicos, al resto del programa. Además, según la Figura 3.18, estas subrutinas permiten parametrizar el método de polarización en el extremo respectivo. En este sentido, ambas subrutinas son idénticas en estructura, pero procesan las variables de los dos extremos independientemente. Esta implementación permite una estructura ordenada que facilita la configuración del programa.

	Type	Name	Value	Unit	Description
1	int	metodo	1		0=Pol. Propia : 1=Pol. Cuadratura : 2=Pol. Cruzada - U. fase
2	double	I_tap_f	1	kA.pri	Corriente Itap de la unidad de sobrecorriente - U. fase
3	double	angle_char	30	deg	Angulo caracteristico RCA o MTA - U. fase
4	double	angle_op	80	deg	Angulo de operacion ROA - U. fase
5	int	metodo_67N	0		0=Pol. V. Sec. Cero : 1=Pol. V. Sec. Negativa - U. tierra
6	double	Umbral_Operacion_67N	0	kA.pri	Umbral de la cantidad de operación - U. tierra
7	double	Umbral_Polarizacion_67N	1.000	kV.pri	Umbral de la cantidad de polarización - U. tierra
8	double	I_tap_N	0.120	kA.pri	Corriente Itap de la unidad de sobrecorriente - U. tierra
9	double	angle_char_67N	-60	deg	Angulo caracteristico RCA o MTA - U. tierra
10	double	angle_op_67N	72	deg	Angulo de operacion ROA - U. tierra

Figura 3.18. Comando DPL de la subrutina *Udir_extremo1*

3.3.4.3 Generalidades del código del programa

El código del programa se ha desarrollado para cumplir con los requerimientos esperados por parte de la herramienta. Debido a su extensión, no se presenta en el texto de este documento. El código completo puede ser examinado en el anexo correspondiente. A continuación, se presentan breves detalles del código de la herramienta según las funcionalidades mostradas en la Figura 3.12.

□ Simulación de un método de polarización

Como se puede ver en el Segmento de código 3.3, se obtienen parámetros de los elementos de la red (en este caso del objeto *línea*) para configurar las variables relacionadas con los métodos de polarización, las cuales son el insumo para que el programa realice sus diferentes tareas. En dicha figura, a manera de ejemplo, también se aprecia la formulación de las ecuaciones del método de polarización en cuadratura.

La simulación permite un estudio en estado estable de cortocircuitos, en el que se toman las cantidades primarias fasoriales de voltaje y corriente (kV.pri y kA.pri) en cada extremo de la línea para establecer las ecuaciones de los métodos de polarización y así simular la comparación fasorial que realizarían relés en tales extremos. Es preciso resaltar que se simulan las unidades direccionales de las tres fases y de la unidad direccional de tierra.

```

I2r_A=(linea:m:Ikss:busl:A)*cos(linea:m:phii:busl:A*(pi()/180));
I2i_A=(linea:m:Ikss:busl:A)*sin(linea:m:phii:busl:A*(pi()/180));

I2r_B=(linea:m:Ikss:busl:B)*cos(linea:m:phii:busl:B*(pi()/180));
I2i_B=(linea:m:Ikss:busl:B)*sin(linea:m:phii:busl:B*(pi()/180));

I2r_C=(linea:m:Ikss:busl:C)*cos(linea:m:phii:busl:C*(pi()/180));
I2i_C=(linea:m:Ikss:busl:C)*sin(linea:m:phii:busl:C*(pi()/180));

U2r_A=(linea:n:U:busl:A)*cos(linea:n:phiu:busl:A*(pi()/180));
U2i_A=(linea:n:U:busl:A)*sin(linea:n:phiu:busl:A*(pi()/180));

U2r_B=(linea:n:U:busl:B)*cos(linea:n:phiu:busl:B*(pi()/180));
U2i_B=(linea:n:U:busl:B)*sin(linea:n:phiu:busl:B*(pi()/180));

U2r_C=(linea:n:U:busl:C)*cos(linea:n:phiu:busl:C*(pi()/180));
U2i_C=(linea:n:U:busl:C)*sin(linea:n:phiu:busl:C*(pi()/180));

! Unidad direccional de la fase A
Ur_ref=U2r_B - U2r_C;          ! VOLTAJE BC
Ui_ref=U2i_B - U2i_C;          ! VOLTAJE BC
Iopr_67_A=I2r_A;
Iopi_67_A=I2i_A;
! Unidad direccional de la fase B
Ur_ref_B=U2r_C - U2r_A;        ! VOLTAJE CA
Ui_ref_B=U2i_C - U2i_A;        ! VOLTAJE CA
Iopr_67_B=I2r_B;
Iopi_67_B=I2i_B;
! Unidad direccional de la fase C
Ur_ref_C=U2r_A - U2r_B;        ! VOLTAJE AB
Ui_ref_C=U2i_A - U2i_B;        ! VOLTAJE AB
Iopr_67_C=I2r_C;
Iopi_67_C=I2i_C;

```

Segmento de código 3.3. Obtención de variables eléctricas para la simulación

Por otra parte, el Segmento de código 3.4 muestra una parte del código que permite calcular la dirección de la corriente y el ángulo de torque a través de los ángulos RCA y ROA ingresados por el usuario. Las variables *angle_C* y *angle_MTL* son los ángulos de la corriente y de la MTL con respecto a la referencia del sistema. Es preciso señalar que el término dentro del condicional *if* representa expresiones coseno de la ecuación de torque (ver Ecuación 2.17) considerando el ángulo de operación ROA (variable *angle_op*).

Cabe señalar que el cálculo del ángulo de torque es fundamental en el programa, puesto que esto refiere el ángulo de la corriente con respecto a la MTL, lo que permite situar a los fasores de todas las simulaciones en un mismo marco de referencia o base angular.

```

if(      cos(angle_C-angle_MTL+(pi()/2-Udir_extremol:angle_op*pi()/180)) >= 0
    .and. cos(angle_C-angle_MTL-(pi()/2-Udir_extremol:angle_op*pi()/180)) >= 0 ){
    Direccion_67_A.Set( ... , ... , 1);    ! FORWARD
}else{
    Direccion_67_A.Set( ... , ... , 0);    ! REVERSE
}
C_Ang_Op_67_A.Set( ... , ... , (angle_C-angle_MTL)*180/pi() );

```

Segmento de código 3.4. Cálculo de la dirección de la corriente y del ángulo de torque

- Resultados para la determinación del funcionamiento de los métodos

Los resultados que ofrece la herramienta se muestran de forma textual y con distintos tipos de gráficos, lo cual se realiza con las subrutinas *Textos* y *Graficas*. La herramienta ha sido implementada para mostrar resultados de las simulaciones en diferentes diagramas diseñados especialmente para el análisis del funcionamiento de varios métodos de

polarización. En una misma gráfica es posible observar los resultados de las variables de simulación de un método ante todo un barrido de cortocircuito efectuado por la herramienta.

En el código se han usado funciones especiales y el objeto *variable de resultados* (clase *ElmRes*) para mostrar resultados gráficos mediante diagramas en función de la distancia del cortocircuito (diagramas *variable-distancia*) y diagramas fasoriales de la *característica direccional* de un método. Con respecto al primer tipo de gráfico, el Segmento de código 3.5 muestra la creación de una gráfica de ángulo de torque - distancia.

	Pseudocódigo
Resultados.AddVars(this, 'b:posicion'); (...)	→ Asignar la variable <i>posición</i> a la variable de resultados <i>Resultados</i> .
Resultados.AddVars(this, 'b:Ang_67_A'); (...)	→ Asignar la variable de ángulo de torque <i>Ang_67_A</i> a la variable de resultados.
Ang_67_A=C_Ang_Op_67_A.Get(...); (...)	→ Obtener los puntos de simulación de la variable del ángulo de torque <i>C_Ang_Op_67_A</i> .
Resultados.Write(); (...)	→ Escribir los valores actuales de posición y ángulo en la variable de resultados.
GetGraphBoard();	→ Acceder a la interfaz gráfica de PowerFactory.
oPagVI=oVentana.GetPage('U67phii');	→ Crear una nueva página gráfica <i>U67phii</i> .
oPagVI.SetResults(Resultados);	→ Asignar la variable de resultados a la página.
oVi=oPagVI.GetVI('Ang_fase_A','VisPlot');	→ Crear un gráfico de tipo VisPlot (oVi).
oVi.AddVars(this, 'b:Ang_67_A');	→ Añadir el ángulo de torque al eje Y de la gráfica.
oVi.SetXVar(this, 'b:posicion');	→ Añadir la posición al eje X de la gráfica.

Segmento de código 3.5. Sentencias que grafican el ángulo de la corriente de un barrido

Cabe indicar que la *característica direccional* es un tipo de gráfico que no existe dentro de PowerFactory y su construcción, a través del objeto *diagrama fasorial* de la clase *VisVec*, requirió del uso de un artificio propio del autor, debido a que este objeto es especial y no admite variables de resultados para crear gráficas, por lo tanto, se usó un objeto de tipo matriz para simular la función de una variable de resultados.

Es preciso señalar que los resultados gráficos y textuales constituyen un importante medio de análisis que ofrece la herramienta desarrollada. La Tabla 3.9 resume la utilidad de los diferentes diagramas diseñados especialmente para estudiar métodos de polarización (algunos de estos son originales del presente trabajo de titulación). Una misma simulación presentará resultados a través de un diagrama fasorial o de uno de tipo variable-distancia, es decir, desde diferentes perspectivas. En la guía de usuario de la herramienta desarrollada pueden consultarse ejemplos de estos diagramas.

Adicionalmente, el programa efectúa la evaluación del funcionamiento de los métodos de polarización en la subrutina *Funcionamiento*, en donde se compara la dirección real de la corriente con la dirección definida por un método en particular para todas las fallas de un barrido de cortocircuito. El análisis en el caso de las unidades de fase se efectúa de acuerdo con las fases que han fallado, es decir, para una falla monofásica o trifásica, el

programa determina el funcionamiento considerando la unidad direccional de la fase A; mientras que, cuando se trata de una falla bifásica (aislada o a tierra), el análisis se efectúa considerando las unidades direccionales de las fases B y C de forma independiente⁷.

Tabla 3.9. Utilidad básica de los diagramas disponibles en la herramienta computacional

Diagrama	Utilidad
Cantidad de operación-distancia	♦ Observar la magnitud y dirección de la corriente de operación en función de la posición de los cortocircuitos.
Cantidad de polarización-distancia	♦ Observar la magnitud del voltaje de polarización en función de la posición de los cortocircuitos.
Ángulo de torque-distancia	♦ Observar el ángulo de la corriente de falla con respecto a la MTL (ángulo de torque) en función de la posición de los cortocircuitos.
Arranque de la protección-distancia	♦ Observar el arranque de la protección en función de la posición de los cortocircuitos.
Característica direccional	♦ Observar el diagrama fasorial (magnitud y ángulo) de las corrientes de falla durante un barrido de cortocircuito.

El análisis efectuado en la subrutina *Funcionamiento* se muestra de forma textual en la ventana de salida de PowerFactory para que el usuario pueda corroborar el análisis a través de otros elementos como los resultados gráficos.

- ❑ Exportación de información

El proceso para exportar la información indicada antes a Excel se efectúa con las sentencias mostradas previamente en la Tabla 3.5. Se considera una estructura ordenada para efectuar esto, la cual se muestra en la guía de usuario.

3.4. METODOLOGÍA DE ESTUDIO DE MÉTODOS DE POLARIZACIÓN

La metodología de estudio propuesta considera a la herramienta desarrollada como un medio para estudiar métodos de polarización. Este estudio comprende, en primer lugar, en simular y determinar el funcionamiento de dichos métodos en los extremos de líneas modeladas en PowerFactory y, en segundo lugar, en usar parte de la información obtenida de la herramienta y de la evaluación del funcionamiento de tales métodos para desarrollar un análisis más detallado que consiste en determinar los métodos de polarización y sus ajustes más adecuados para las líneas consideradas.

La metodología puede ser utilizada completamente para el caso de una línea en la que se asume que se han instalado protecciones de sobrecorriente direccional de fase y tierra en ambos extremos y, además, en donde se asume que los relés tienen siempre activa su

⁷ En este proyecto se considera el método de cálculo de cortocircuitos Std. IEC 60909 (utilizado en el país). Este método calcula fallas monofásicas en la fase A y fallas bifásicas en las fases B y C.

protección no unitaria de respaldo local temporizada y que estos funcionan también con un esquema de teleprotección. Además, en la metodología se admiten las configuraciones generales de estas protecciones que se indicaron en la sección 2.4.10.

La metodología de estudio se divide en cuatro etapas descritas a continuación. Las dos primeras pertenecen propiamente al planteamiento para la determinación del funcionamiento de los métodos de polarización, mientras que las dos últimas obedecen a la forma llevada a cabo para la determinación de los métodos y sus ajustes más adecuados.

- ETAPA 1: Simulación independiente de métodos en cada extremo de una línea.
- ETAPA 2: Simulación conjunta de métodos en ambos extremos de una línea.
- ETAPA 3: Comparación entre métodos de polarización.
- ETAPA 4: Determinación de métodos de polarización y sus ajustes más adecuados.

3.4.1 SIMULACIÓN INDEPENDIENTE DE MÉTODOS EN CADA EXTREMO DE UNA LÍNEA

La primera etapa, considerada como diagnóstica, tiene como fin determinar con un enfoque cualitativo el funcionamiento de los métodos de polarización en cada extremo de una línea en particular (en donde se ubicarían protecciones no unitarias) considerando ajustes utilizados por defecto en cada método.

3.4.1.1 Características de la simulación y del cálculo de cortocircuitos

La determinación del funcionamiento de un método de polarización consiste en la evaluación del desempeño de dicho método para definir la dirección de un conjunto de cortocircuitos de diferente tipo con variación en la resistencia de falla y en su posición. Todo esto con el fin de analizar distintos desfases que puede tomar la corriente de falla y la actuación del método simulado ante tales desfases.

Las fallas que se consideran para la evaluación mencionada son, específicamente, barridos de cortocircuito con las características de la Tabla 3.10. Los barridos se calculan en la línea protegida y en elementos detrás del extremo analizado de dicha línea. Los valores de resistencia de falla considerados son parte de la filosofía de protecciones de la empresa transmisora en el país. Además, los barridos se efectúan en escenarios de corrientes máximas y mínimas de cortocircuito para examinar si existen variaciones significativas del sistema que alteran el funcionamiento de un método de polarización.

Cabe indicar que para la unidad direccional de tierra solo se consideran cortocircuitos monofásicos y bifásicos a tierra.

Tabla 3.10. Características del barrido de cortocircuito

Variación	Descripción
Tipo de falla	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Fallas entre fases sin contacto a tierra. <ul style="list-style-type: none"> - Falla Bifásica aislada. - Falla Trifásica. ♦ Fallas con contacto tierra. <ul style="list-style-type: none"> - Falla Monofásica a tierra. - Falla Bifásica a tierra.
Resistencia de falla	<ul style="list-style-type: none"> ♦ $R_f = 0 \dots 10 [\Omega]$ para fallas entre fases sin contacto a tierra. ♦ $R_f = 0 \dots 20 [\Omega]$ para fallas con contacto a tierra.
Posición	<ul style="list-style-type: none"> ♦ En el caso de líneas a cortocircuitar desde el 0% al 100% de la longitud de la línea en pasos de 10%.
Elementos para el cálculo de cortocircuitos	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Varios elementos (líneas o barras) en los que las fallas calculadas superan la I_{TAP} de las protecciones consideradas. ♦ En la unidad de tierra se consideran elementos en los que las cantidades de polarización y operación también superan los respectivos umbrales configurados en un relé. ♦ Si se dispone del modelo, se pueden considerar regiones adicionales al sistema de transmisión.
Escenarios	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Máximas y mínimas corrientes de cortocircuito.*

* En la primera etapa se considera un solo escenario si no existe un cambio considerable entre los resultados de los dos escenarios.

3.4.1.2 Modo de análisis

Los gráficos obtenidos de la herramienta desarrollada, como el de la característica direccional, se usan para determinar, mediante observación, el funcionamiento de los métodos de polarización⁸, es decir, si tales métodos son capaces de definir la dirección de varias fallas de manera consistente (igual) con su dirección real. Para esto, se verifica que las fallas delante de la posición del relé se posicionen dentro de la zona de operación definida por el método en análisis y que las fallas detrás se encuentren fuera de dicha zona. Si se cumplen ambas condiciones para todas las fallas consideradas, se determina que el funcionamiento de un método de polarización es correcto y, por el contrario, si existe al menos un fasor de una corriente de falla con el que no se satisfacen tales condiciones, se determina que el funcionamiento de un método es incorrecto.

La Figura 3.19 ejemplifica el análisis. Se aprecia que, para el Método A, todas las fallas hacia adelante y hacia atrás se sitúan consistentemente en sus respectivas zonas de operación y no operación, por lo tanto, el funcionamiento de dicho método es correcto. Por otra parte, en el caso del Método B, se aprecia que existe al menos un fasor con el que no

⁸ La herramienta computacional admite la simulación de un método de polarización de fase y tierra a la vez en cada extremo de una línea.

se cumplen las condiciones mencionadas, por lo tanto, el funcionamiento del Método B es incorrecto.

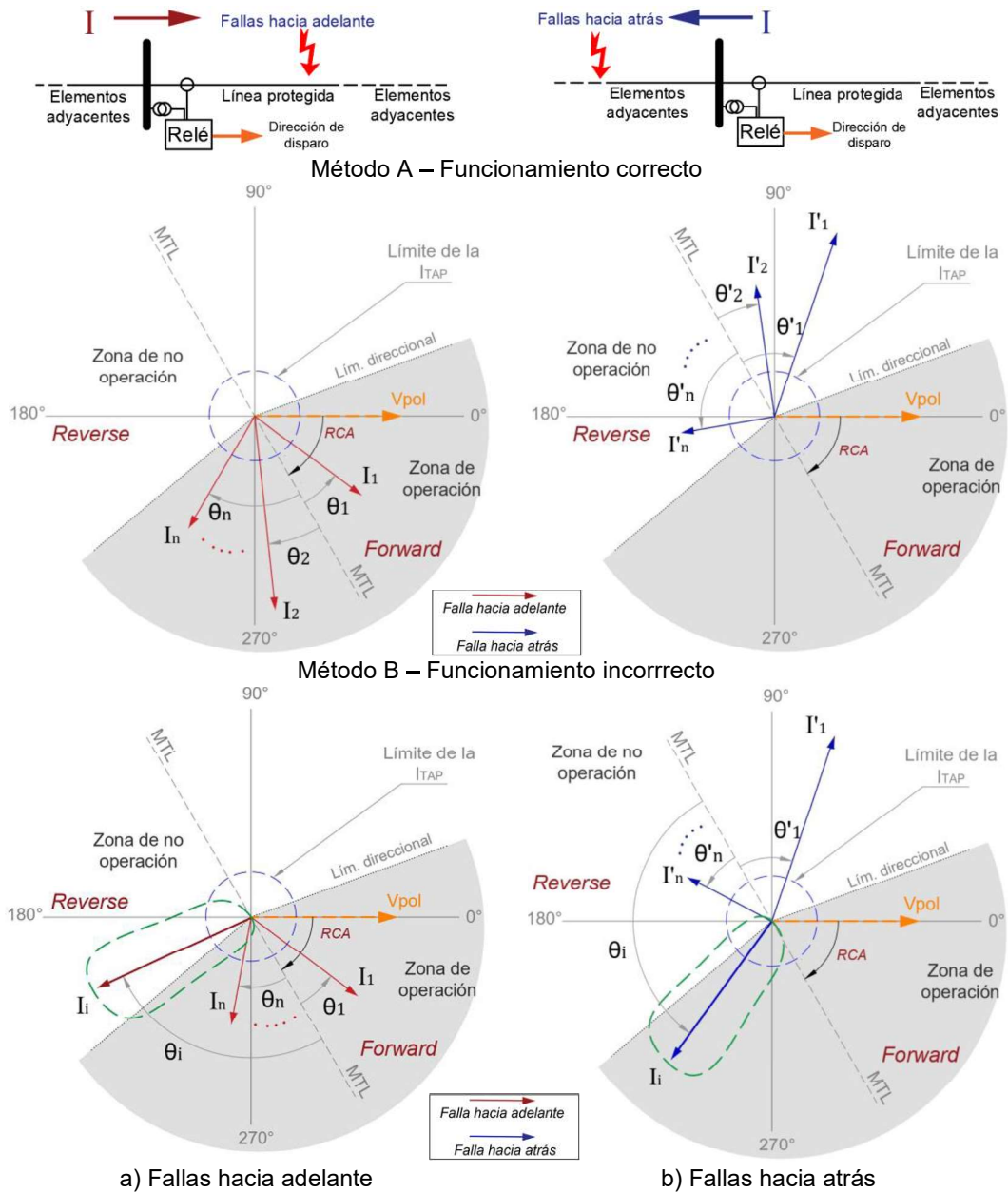


Figura 3.19. Ejemplo de análisis con el diagrama *característica direccional* de un método

Las condiciones mencionadas se analizan solo para aquellas fallas del barrido de cortocircuito que son detectadas por la unidad de sobrecorriente de la protección considerada, es decir, aquellas cuya magnitud supera la I_{TAP} de tal protección. Esto debido a que solo estas fallas pueden provocar la operación de la protección y, por consiguiente, el análisis de su dirección es relevante. La Figura 3.20 ilustra estas consideraciones.

Cuando los fasores superan la I_{TAP} , su dirección se toma en cuenta en la actuación de la protección; mientras que, cuando no superan la I_{TAP} , su dirección no se toma en cuenta al no actuar la unidad de sobrecorriente. Una consideración análoga se aplica en las unidades de tierra; en donde tampoco se toman en cuenta fallas que generan cantidades de polarización u operación inferiores a los respectivos umbrales configurados en un relé.

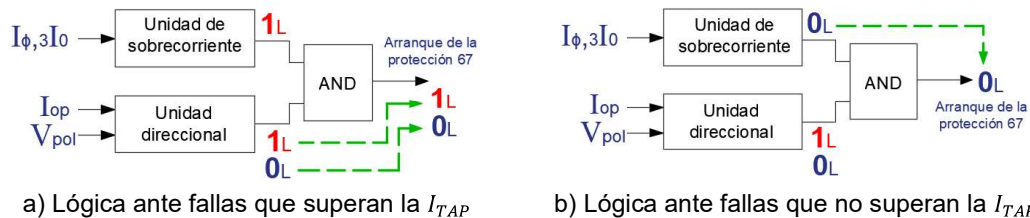


Figura 3.20. Diagramas lógicos de la protección de sobrecorriente direccional

Cabe mencionar que es posible que la unidad de sobrecorriente pueda detectar fallas en varios elementos hacia atrás y hacia adelante de la posición del relé (respaldos inherentes de la protección); no obstante, la prioridad de la protección no unitaria de respaldo local es solo cubrir fallas en la línea protegida (confiabilidad en la zona primaria).

Es por esto que se *prioriza* el resultado obtenido ante fallas en la línea protegida. El resultado ante fallas externas hacia adelante no se considera por ser de menor relevancia. Por otro lado, el resultado ante fallas hacia atrás sigue siendo igual de importante que el obtenido ante fallas en la línea protegida, dado que dichas fallas son el componente de análisis de la seguridad de la no operación que ofrece un método de polarización.

Por lo anterior, será suficiente considerar fallas en la línea protegida y en un elemento hacia atrás si en la tendencia de resultados se comprueba que en las fallas en estos elementos se obtienen desfases relevantes de la corriente de cortocircuito. Todo esto a fin de evitar considerar simulaciones con información redundante o poco relevante.

Por otro lado, se debe indicar que el uso del diagrama de la *característica direccional* es suficiente para determinar el funcionamiento de un método de polarización; sin embargo, el diagrama *ángulo de torque - distancia* también puede ser usado para añadir al análisis la información de los ángulos de las corrientes de falla en función de las posiciones en las que dichas corrientes fueron calculadas.

Con relación a las unidades de tierra, es necesario que sus cantidades de polarización también sean analizadas; puesto que el correcto funcionamiento de estas unidades exige una adecuada detección de la dirección de una falla y de la existencia de cantidades de polarización suficientes que superen un umbral establecido cuando dichas unidades deben

operar (ver sección 2.4.6). Frente a estos casos, se propone el uso adicional de un diagrama de *voltaje de polarización – distancia* para verificar que los voltajes de polarización son superiores al umbral de voltaje configurado en cada relé ante barridos de cortocircuito en la línea protegida.

Según la Figura 3.21, el barrido en la línea protegida se efectúa para verificar que, ante todas las fallas, el voltaje de polarización supera su umbral (Método A). Si, por el contrario, los voltajes no superan tal umbral (Método B), la protección pierde su fiabilidad en zona primaria y, por lo tanto, se cataloga al funcionamiento del método de polarización como incorrecto. Esto debido a que estas fallas no serán detectadas por la unidad direccional a pesar de que su dirección si pudo haber sido definida consistentemente. En este caso, la región en la que se presenta este efecto indeseable constituye una zona muerta.

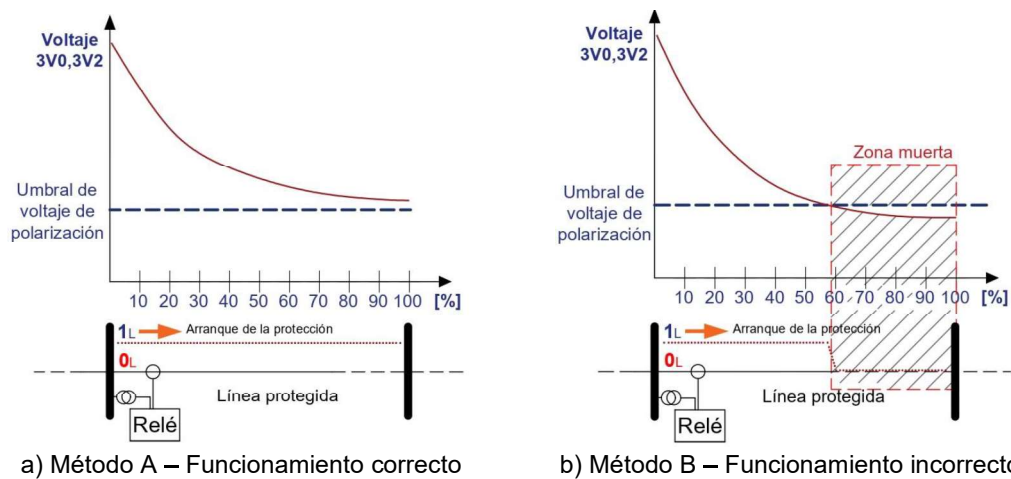


Figura 3.21. Ejemplo de análisis con el diagrama *voltaje de polarización - distancia*

Por otra parte, es preciso resaltar que para la polarización de secuencia negativa también se requiere que se verifique que su cantidad de operación supera su respectivo umbral frente a cortocircuitos en la línea protegida, dado que, según se describió en la sección 2.4.6, esta polarización también define un umbral para su cantidad de operación.

Para terminar, se debe indicar que la herramienta propuesta entrega en forma textual la evaluación del funcionamiento del método de polarización simulado en cuanto a si la definición de la dirección de las fallas fue correcta o no. Esto con el fin de facilitar y guiar al usuario en el estudio. Dicha herramienta indica en qué puntos no se ha definido la dirección de las fallas correctamente (ver ejemplo de la Guía de usuario). La información debe ser utilizada de forma apropiada por el usuario para interpretar acertadamente los resultados.

3.4.2 SIMULACIÓN CONJUNTA DE MÉTODOS DE AMBOS EXTREMOS DE UNA LÍNEA

En la exposición anterior se mostró la forma para determinar el funcionamiento de métodos de polarización en cada extremo de una línea. Sin embargo, el planteamiento para analizar el funcionamiento de estos métodos aún no está completo. Todavía resta considerar el desempeño de los métodos de polarización de ambos extremos de manera paralela o como un conjunto, es decir, la determinación de la consistencia direccional de dichos métodos como si estos fueran utilizados en los relés de un esquema de teleprotección.

La determinación mencionada es fundamental, puesto que existen dos problemas que pueden provocar que el funcionamiento conjunto de los métodos de polarización en ambos extremos de una línea sea incorrecto. Esto a pesar de que dichos métodos hayan demostrado por separado que funcionan de forma correcta en cada extremo según la etapa de simulación independiente descrita previamente. En definitiva, la adecuada consistencia que haya sido determinada en el funcionamiento de los métodos de polarización en ambos extremos de forma separada no es suficiente para un correcto funcionamiento de dichos métodos dentro de los relés de un esquema de teleprotección [24].

Un primer problema ocurre cuando se emplean métodos distintos en los extremos de una línea ubicada en sistemas en anillo o en malla, lo cual puede causar inconsistencias en el funcionamiento de un esquema de teleprotección. Ante fallas externas en estos sistemas, existe la posibilidad de ocurrencia de falsos disparos en el circuito protegido.

Un segundo problema ocurre en situaciones en las que el efecto del acoplamiento mutuo en líneas paralelas incide lo suficiente en el funcionamiento de la polarización de secuencia cero de relés de un esquema de teleprotección, de tal manera que fallas externas pueden provocar falsos disparos en un circuito protegido con el uso de esta polarización [16].

En ambos problemas, la posibilidad de falsos disparos en el esquema de teleprotección de la línea aparece porque las unidades direccionales de las protecciones de los dos extremos son propensas a detectar aparentemente una corriente de falla que fluye hacia adelante y, por ende, provocar que las protecciones envíen una señal de detección de falla hacia el extremo opuesto causando la operación de la teleprotección.

Es preciso indicar que las problemáticas no se presentan en líneas de simple circuito que no se ubican en sistemas en anillo o en malla. En estas líneas, el correcto funcionamiento de los métodos de polarización en cada extremo (como parte de las protecciones no

unitarias de la línea) garantiza un correcto funcionamiento conjunto dentro de un esquema de teleprotección [24].

Es por todo lo expuesto que la metodología de estudio planteada incluye el análisis de las dos problemáticas descritas. La forma para abordar cada una se expone a continuación.

3.4.2.1 Análisis frente al uso de métodos de polarización distintos en los extremos de una línea

Un cortocircuito fluye desde una fuente hacia el punto de falla. Esto es evidente en sistemas que no forman circuitos en anillo o en malla. Cuando el sistema si forma estos anillos o mallas, la determinación de la dirección *real* de la corriente no es clara y, según se expuso en el apartado 2.4.9, el flujo de corriente por una línea en particular puede cambiar de dirección durante un barrido de cortocircuito externo a un circuito protegido. En las cercanías en las que existe tal cambio puede suceder que las unidades direccionales de ambos extremos del circuito protegido mencionado detecten direcciones inconsistentes de las corrientes de falla que fluyen por tal circuito.

El peor caso es aquel en el que las unidades direccionales de ambos extremos detectan una falla externa fluyendo aparentemente hacia adelante como se ejemplifica en la Figura 3.22. En [24] se identificó que este problema puede suceder con el uso de distintos métodos de polarización en los extremos de una línea para las unidades de tierra, de modo que se recomendó no emplear esta configuración. En relación con la unidad de fase, no hay un estudio que se haya pronunciado sobre el tema por la escasa aplicación de tal unidad.

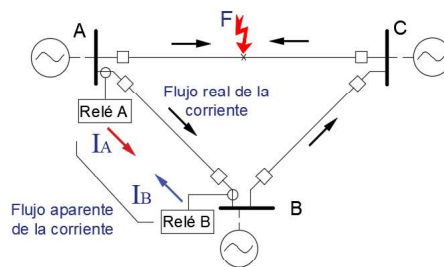


Figura 3.22. Inconsistencia en dos relés entre el flujo aparente y real de una falla

Con el propósito de estudiar si el problema anterior se presenta para las unidades de fase o de tierra, en esta etapa se propone el cálculo de barridos de cortocircuito externos en líneas ubicadas en sistemas en anillo o en malla. Esto con el fin de identificar la existencia de la problemática ejemplificada en la Figura 3.22 en las cercanías de los puntos en los que la corriente de falla cambia de dirección durante tales barridos.

El análisis propuesto es cualitativo y consiste en observar simultáneamente cómo los métodos de polarización de las unidades direccionales de ambos extremos de una línea detectan a las fallas calculadas durante un barrido de cortocircuito. El análisis solo se centra en examinar la existencia del problema. Para esto, se puede hacer uso del diagrama *arranque de la protección – distancia* proporcionado por la herramienta desarrollada; en el que se puede ver el arranque de los relés de ambos extremos en la misma gráfica y, de este modo, un funcionamiento inconsistente se manifiesta cuando ambos relés arrancan ante fallas externas, es decir, cuando existe traslape o superposición en la gráfica del arranque de los dos relés.

La Figura 3.23 ejemplifica el análisis indicado. Cuando el funcionamiento de la combinación de métodos de polarización considerada es correcto (Caso 1), no existe un traslape en el arranque de las protecciones ante fallas externas; mientras que, cuando el funcionamiento es incorrecto (Caso 2), si existe dicho traslape.

Por último, se debe mencionar que el análisis propuesto, al igual que en la etapa anterior, considera solo las fallas que superan la I_{TAP} y, para el caso de la unidad direccional de tierra, solo las fallas que también generan cantidades de polarización y operación superiores al umbral configurado en los relés.

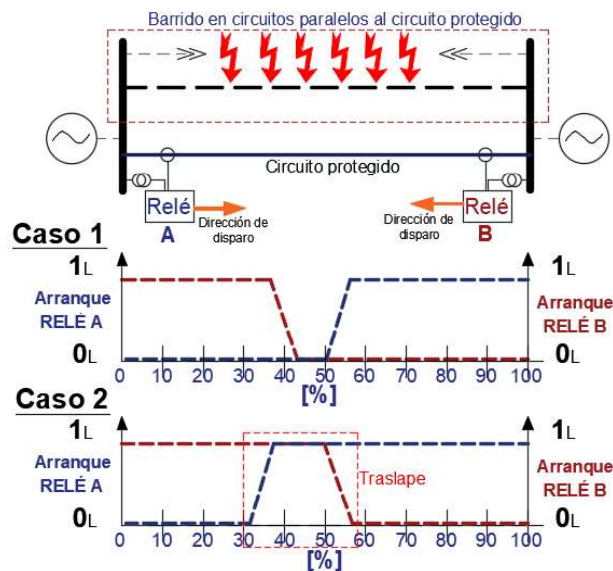


Figura 3.23. Ejemplo de análisis con el diagrama *arranque de la protección – distancia*

3.4.2.2 Análisis frente al efecto del acoplamiento mutuo

El efecto del acoplamiento mutuo tiene incidencia en el funcionamiento de los relés que detectan fallas con contacto a tierra, como es el caso de la unidad direccional de tierra,

específicamente, en la polarización de secuencia cero, de manera que el efecto es típicamente estudiado solo con respecto a esta polarización [16].

Con el fin de estudiar la existencia del problema mencionado, en las simulaciones se plantea el cálculo de fallas externas en ciertos circuitos acoplados magnéticamente, de manera particular, en aquellos circuitos que se ubican en estructuras cercanas o inclusive en la misma torre y con topologías como las presentadas en la Figura 3.24 [7]. En [16] se recomienda que para la topología de la Figura 3.24a también puede considerarse la apertura del interruptor del extremo indicado en el circuito fallado para encontrar la afectación ante tal cambio topológico, cuya ocurrencia es probable.

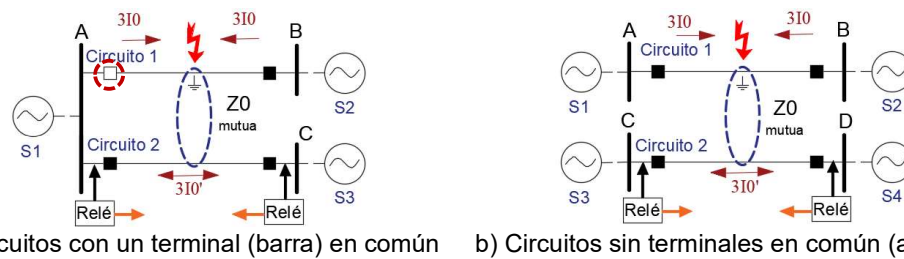


Figura 3.24. Circuitos con afectación del acoplamiento mutuo en líneas a la polarización con voltaje de secuencia cero

El análisis frente al efecto del acoplamiento mutuo es cualitativo y solo incluye el examinar si existe o no el problema. Para esto, la gráfica de la *característica direccional* puede ser usada a fin de determinar si los métodos de polarización de ambos extremos detectan o no de forma simultánea una falla con dirección hacia adelante ante barridos externos.

Cabe mencionar que la simulación conjunta de métodos de polarización puede efectuarse en escenarios de máximas y mínimas corrientes de cortocircuito con el fin de encontrar la existencia de los problemas indicados en diversas condiciones del sistema.

3.4.3 COMPARACIÓN ENTRE MÉTODOS DE POLARIZACIÓN

En esta etapa comparativa se propone encontrar indicadores cuantitativos para diferenciar de forma clara el desempeño de los métodos de polarización en cada extremo de una línea (como parte de protecciones no unitarias). Evidentemente, esto permite al usuario identificar *ventajas* y *desventajas* en el uso de cada método de polarización. Los indicadores son de utilidad por ser un medio para escoger los métodos de polarización más adecuados a ser utilizados en alguna línea en particular como se verá más adelante en la sección 3.4.4.

3.4.3.1 Comparación entre métodos de la unidad de fase

La forma para comparar diferentes métodos de polarización de la unidad de fase se sustenta en que cada método detecta fallas con desfases variables con respecto a la MTL como se muestra en la Figura 3.25. Es por esto que es de interés encontrar aquel método con el que las corrientes de cortocircuito se dispersan menos entre sí para que puedan aproximarse más a la MTL o alejarse más de los límites de dirección [31].

Para buscar el método de polarización con el que las corrientes se dispersan menos entre sí, se propone analizar de forma estadística los ángulos de dichas corrientes con respecto a la MTL (ángulos de torque) obtenidos con la simulación de cada método de polarización. El análisis consiste en calcular medidas de dispersión de dichos ángulos como indicadores comparativos entre los métodos de polarización.

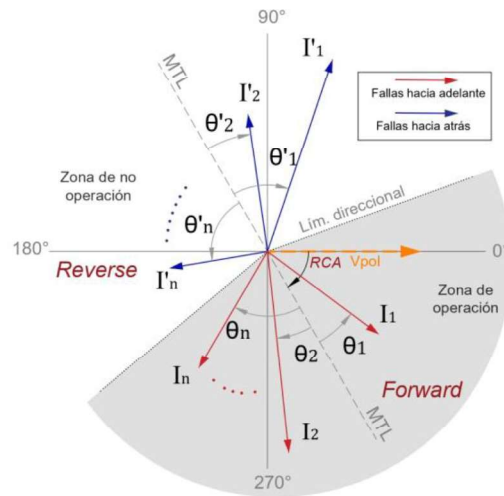


Figura 3.25. Conjunto de desfases de diferentes cortocircuitos

Cabe aclarar que el planteamiento no es calcular la cercanía de los fasores a la MTL, sino la dispersión de los ángulos de los fasores entre sí. El tema de la cercanía de los fasores a la MTL se aborda más adelante en el apartado 3.4.4, en donde se verá que la selección del método de polarización con la menor dispersión de los ángulos de torque permite un mejor acercamiento.

Antes que nada, se debe considerar que los ángulos de torque son datos que, entre otras características, tienen una naturaleza periódica por ser variables angulares; lo que los hace diferentes de datos lineales comúnmente tratados, por ejemplo, magnitudes físicas. Es por esto que, de acuerdo con [41] y [42], la estadística convencional no puede ser aplicada plenamente y, en su lugar, es más coherente tratar a estas variables con medidas de dispersión de la estadística angular⁹. Las medidas empleadas para el análisis son: la

⁹ Rama de la estadística que describe características de datos circulares o angulares.

distancia o rango circular (r) y la desviación estándar angular o circular (s), las cuales brindan una aceptable cuantificación de la dispersión de un conjunto de datos angulares. En este caso, se usan estas medidas para cuantificar la dispersión de los ángulos de los fasores de corrientes de falla obtenidos de distintos barridos de cortocircuito.

La distancia o rango circular (r) hace referencia a la separación angular entre los ángulos extremos de un conjunto de datos, como se muestra en la Figura 3.26. El rango es la menor diferencia angular entre los fasores $I_{\theta_{max}}$ e $I_{\theta_{min}}$ ubicados a θ_{max} y θ_{min} unidades angulares de la MTL respectivamente, en donde $I_{\theta_{max}}$ es el fasor con el mayor valor de ángulo de torque y $I_{\theta_{min}}$ es el fasor con el menor valor de ángulo de torque. Esta medida de dispersión puede obtenerse a través de la Ecuación 3.1 [43].

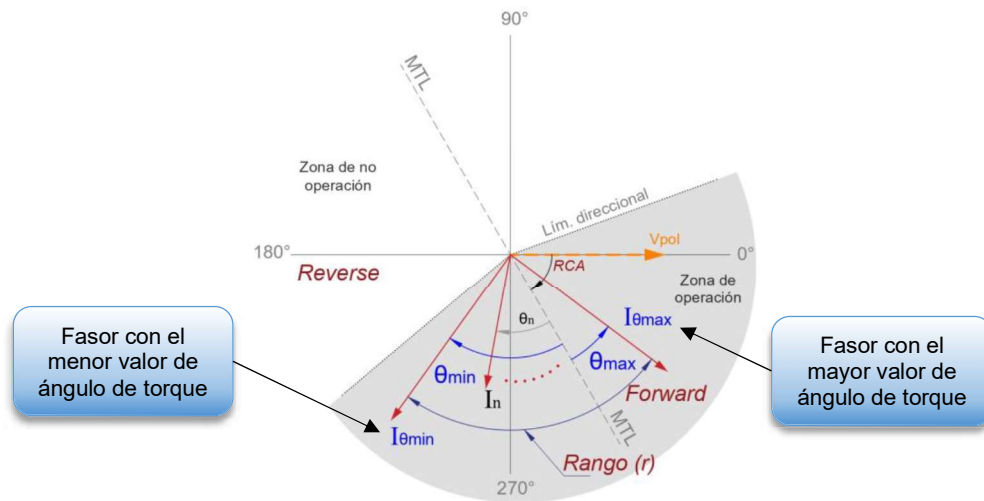


Figura 3.26. Distancia o rango circular (r) entre los fasores extremos $I_{\theta_{max}}$ e $I_{\theta_{min}}$

$$r = d_0(\theta_{max}, \theta_{min}) = \min(\theta_{max} - \theta_{min}, 2\pi - (\theta_{max} - \theta_{min})) \quad (3.1)$$

$$= \pi - |\pi - |\theta_{max} - \theta_{min}||$$

Por otra parte, la desviación estándar circular (s) cuantifica la separación angular de un conjunto de datos con respecto a su valor medio. Para entender visualmente este concepto, la Figura 3.27 ejemplifica dos conjuntos de fasores (A y B) que tienen diferente desviación estándar. En este caso, el conjunto B tiene una desviación menor que el conjunto A. En [41] se describe el cálculo de la desviación estándar a través de la Ecuación 3.2, donde θ_i es el ángulo de la i -ésima cantidad angular de un conjunto de n datos. La unidad de la desviación estándar es la misma que la de los datos analizados.

Las medidas (r) y (s) son utilizadas para calcular la dispersión de los ángulos de fallas obtenidos con la simulación de cada método de polarización ante distintos barridos de cortocircuito. Dichos barridos se efectúan según el detalle de la Tabla 3.10. Se incluyen

también los resultados de fallas externas hacia adelante (que no se consideraron en la etapa de simulación independiente) para que el cálculo estadístico sea más global (barrido de cortocircuito completo).

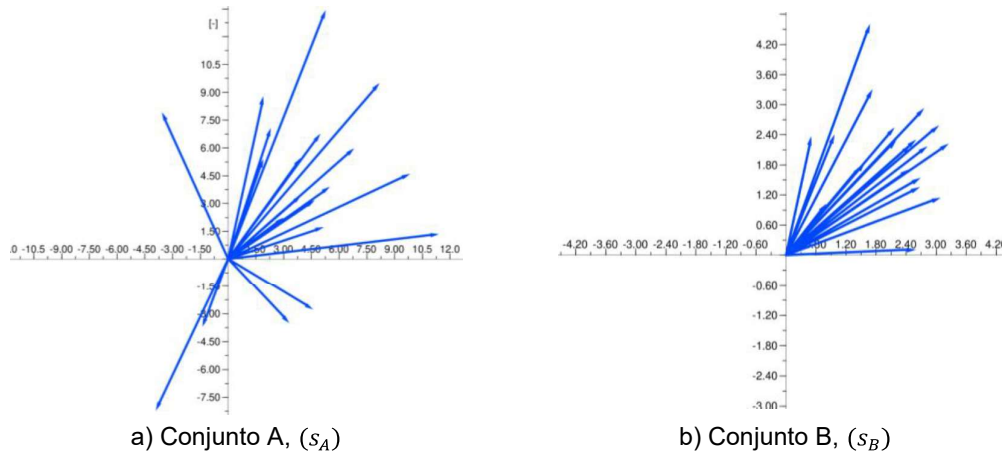


Figura 3.27. Ejemplo de dos conjuntos de fasores (A y B), en donde $s_A > s_B$

$$s = \sqrt{-2 \ln \left(\frac{\sqrt{(\sum_{i=1}^n \cos \theta_i)^2 + (\sum_{i=1}^n \sin \theta_i)^2}}{n} \right)} \quad (3.2)$$

Cabe indicar que en esta parte de esta etapa comparativa y durante la obtención de ajustes de un método que se describe en la siguiente etapa se considera un mayor número de datos o cortocircuitos; esta vez calculados en elementos (barras o líneas) hacia adelante de la línea protegida e inclusive elementos externos al Sistema de Transmisión (si se dispone del modelo) para analizar más información que la utilizada en las etapas de simulación, puesto que ahora el enfoque es cuantitativo y más minucioso, a diferencia de las etapas de simulación, en las que solo basta la evaluación cualitativa de casos relevantes.

La herramienta desarrollada en este proyecto permite exportar la información del ángulo de torque de los barridos de cortocircuito considerados a una hoja de cálculo de Excel para poder efectuar los cálculos de las medidas de dispersión. Además, se incluye la magnitud de la corriente de falla para considerar solo fallas que superan la I_{TAP} y, en la unidad de tierra, se incluyen también las cantidades de polarización y operación para considerar solo fallas que también generan cantidades superiores a los umbrales configurados en los relés.

Además, se debe señalar que, cuando se calculan las medidas de dispersión indicadas entre fallas hacia adelante y hacia atrás, es necesario que los ángulos de las fallas hacia adelante sean expresados con respecto a la MTL positiva y los de las fallas hacia atrás con

respecto a la MTL negativa, como se muestra en la Figura 3.25. Esto es equivalente geoméricamente a desfasar 180° las corrientes de falla hacia atrás, de modo que todas las fallas puedan situarse en un contexto o base angular equiparable que considera una misma referencia para fines de simplificación.

Cabe aclarar que las medidas de dispersión usadas son independientes del eje de referencia, dado que miden la dispersión de datos entre sí, es decir, si en el desfaseamiento de todos los fasores considerados en el análisis se adiciona cierto valor, tales medidas siguen siendo las mismas. Por lo tanto, el cambio del *RCA*, cuya variación desfazaría los ángulos de torque de dichos fasores en la misma cantidad, tampoco cambia las medidas. Esto es sustancial en el estudio, puesto que permite realizar la comparación de métodos de polarización de manera previa a la obtención y modificación de los ángulos *RCA*, α y β que se describe más adelante.

3.4.3.2 Comparación entre métodos de la unidad de tierra

La metodología de comparación en esta unidad no tiene un enfoque estadístico de cálculo de las medidas de dispersión, dado que los métodos de polarización de la unidad de tierra no se comportan igual que los de la unidad de fase (ver sección 2.4.5.2). Esta vez se sigue lo recomendado en [24] para establecer una comparación que considera como indicador el mínimo valor del voltaje de polarización que aparece con cada método de polarización ante un barrido de cortocircuito en la línea protegida. Esta forma de comparación se justifica porque en la práctica es de interés encontrar los métodos que tienen una mayor magnitud del voltaje de polarización, debido a que dichos métodos permiten que la unidad direccional pueda tener una mayor sensibilidad para detectar fallas.

Por lo anterior, se propone calcular barridos de cortocircuito en la línea protegida con una alta resistencia de falla (20Ω) y en diferentes escenarios operativos. Todo esto con el fin de obtener los mínimos voltajes de polarización que aparecen en la simulación de cada método de polarización.

Cabe destacar que este proceso de comparación no requiere que la herramienta propuesta en este proyecto exporte información a Excel, puesto que en este caso basta con identificar los mínimos voltajes de polarización obtenidos con simulación. Es posible que estos valores ya hayan sido determinados en la primera etapa de la metodología.

Por último, se debe resaltar que los planteamientos aquí expuestos para comparar el funcionamiento de métodos de polarización son criterios alternativos a todos aquellos posibles que pueden ser planteados. Otros factores pueden ser considerados también

cuando estos son determinantes, como el grado de afectación frente al acoplamiento mutuo de las líneas o a la relación SIR, no obstante, su consideración reside en aplicaciones muy puntuales y depende de la persona que realiza el estudio.

3.4.4 DETERMINACIÓN DE MÉTODOS DE POLARIZACIÓN Y SUS AJUSTES MÁS ADECUADOS

En el área de protecciones eléctricas es común la aplicación de técnicas de protección basadas en criterios surgidos por la experiencia de las empresas responsables del manejo de los relés. Es por esto que, de manera ocasional, las protecciones se configuran con simples convenciones sin estudiar con profundidad el grado de adaptabilidad de dichas configuraciones para líneas en particular [9].

En el caso de la protección de sobrecorriente direccional, en el país aún no se ha definido una filosofía de estudio de su unidad direccional, de modo que su configuración se basa usualmente en recomendaciones de varios fabricantes de relés sin considerar estudios puntuales donde tal unidad es utilizada. En este sentido, se debe señalar que la efectividad de dicha unidad es una variable que depende de las características de la red, de modo que los métodos y ajustes típicos usados pueden no brindar el mejor desempeño e inclusive poner en riesgo una operación confiable de la protección [31].

Con el fin de establecer un desempeño apropiado de la unidad direccional en una línea en particular y aprovechar la potencialidad de los resultados que pueden obtenerse de la herramienta propuesta, se propone dentro de la metodología de estudio una etapa final en la que se seleccionan los métodos de polarización más adecuados y se determina un ajuste de sus ángulos de los límites de dirección a través de optimización matemática.

3.4.4.1 Selección de los métodos de polarización más adecuados

Este paso tiene el objetivo de seleccionar los métodos más adecuados a ser utilizados en las protecciones de cada extremo de una línea en particular. Esto se efectúa sobre la base de los resultados obtenidos en las etapas anteriores, sobre todo, considerando el resultado de la comparación entre métodos de polarización obtenido en la etapa anterior.

3.4.4.1.1 Selección para la unidad direccional de fase

Con respecto a la unidad de fase, se plantea como criterio el seleccionar el método de polarización con el que se haya obtenido la desviación estándar total más baja en la etapa de comparación descrita antes. Se considera el valor de la desviación porque es una medida mucho más representativa de todo un conjunto de datos que el rango [42].

Al escoger el método de polarización con la menor desviación estándar, se obtiene un método que concentra de mejor forma los fasores de corrientes de falla en torno a una media y que, por lo tanto, permite establecer un acercamiento más efectivo de tales fasores a la MTL con un ajuste apropiado del ángulo *RCA*.

En la selección se deben descartar los métodos de polarización con los que se haya obtenido un rango ante fallas hacia adelante que excede la zona de operación o un rango ante fallas hacia atrás que excede la zona de no operación. Esto debido a que, según la Figura 3.28, solo para los métodos que cumplen con las condiciones indicadas (Método A) se puede contener dentro de la zona de operación todas las fallas hacia adelante y excluir todas las fallas hacia atrás con un ajuste apropiado del *RCA*. Por el contrario, cuando no se cumplen tales condiciones (Método B) no existen un ajuste que permita aquello.

En el caso de que ningún método cumpla con las condiciones mencionadas, de todos modos, se seleccionará aquel método que presente la menor desviación estándar. Sin embargo, se deberá aceptar un riesgo en la confiabilidad de la actuación de ese método.

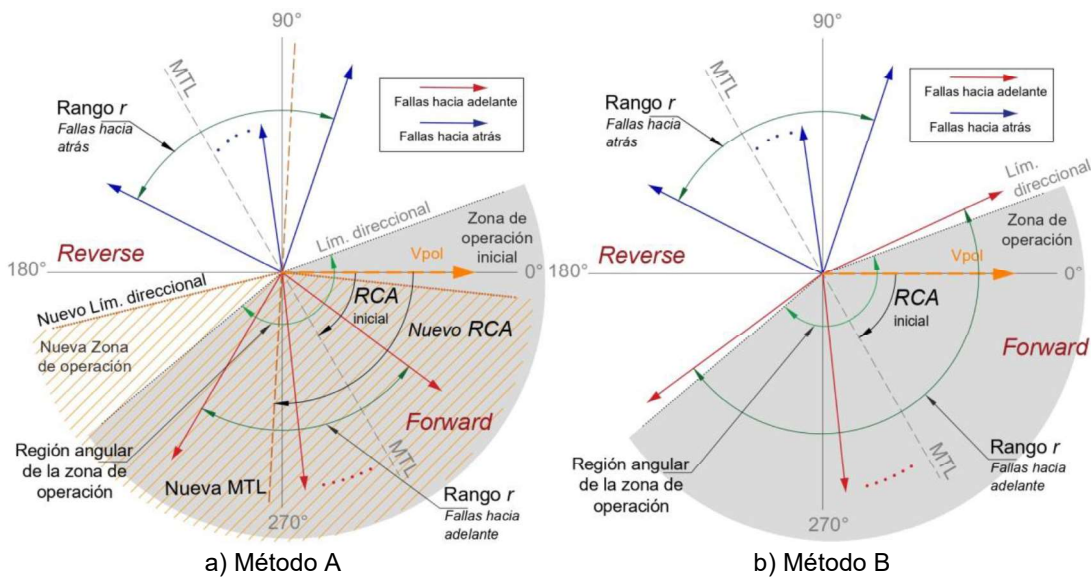


Figura 3.28. Ajuste de un método de polarización a través del ángulo *RCA*

Es preciso indicar que las condiciones mencionadas antes pueden ser previstas también en los diagramas de la *característica direccional* en la primera etapa de la metodología de estudio. Además, según la Figura 3.28, a pesar de que un método de polarización con ajustes por defecto pudo haber presentado un funcionamiento incorrecto en dicha etapa, si éste cumple con las condiciones indicadas es posible que un ajuste apropiado del *RCA* permita corregir su mal funcionamiento con la rotación precisa de la zona de operación para detectar de mejor forma los fasores que presentan una posición incorrecta.

3.4.4.1.2 Selección para la unidad direccional de tierra

Con relación a la unidad de tierra, el criterio de selección considera los mínimos voltajes de polarización determinados en la etapa de comparación, de manera que aquel método con un valor mayor de esta cantidad se cataloga como más sensible ante fallas internas y, por lo tanto, considerado como más adecuado para el extremo de una línea.

En el caso de que el método seleccionado no haya demostrado en la primera etapa que tiene la suficiente sensibilidad para brindar cobertura ante fallas en la línea protegida, se seleccionará de todas formas dicho método asumiendo un riesgo para la fiabilidad de la protección. En la práctica, esto conlleva a usar métodos especiales para solventar el problema [25]. Sin embargo, esto no será abordado en el trabajo de titulación.

Por otro lado, la selección de los métodos de polarización en cada extremo de la línea (para la unidad de fase y la unidad de tierra) debe ser contrastada con los resultados obtenidos de la etapa de simulación conjunta de métodos de polarización para, de ser el caso, replantear dicha selección. Esto debido a que en tal etapa puede determinarse que existe una operación confiable en un esquema de teleprotección solo si se emplean ciertos métodos en particular o inclusive solo con el uso del mismo método en ambos extremos. Ante esto, los criterios comparativos mencionados antes quedan en segundo plano y quien realiza el estudio debe optar por la selección de aquellos métodos que no afecten la confiabilidad de dicho esquema. *Estas situaciones pueden ocurrir solo ante aquellos sistemas indicados antes en dicha etapa.*

Una vez que se han seleccionado los métodos de polarización más adecuados, se consideran a estos como aptos para someterse a un proceso de obtención de sus ajustes.

3.4.4.2 Obtención de los ajustes de un método de polarización

Un ajuste adecuado en un método de polarización, a través de los ángulos de dirección RCA , α o β , permite que las corrientes de cortocircuito se localicen de forma cercana a la MTL o, visto de otro modo, se alejen de los límites de dirección. Esto es deseado porque incrementa la confiabilidad de la protección de sobrecorriente direccional en aplicaciones reales [25] y [31]. Es por esto que la optimización matemática es usada para conseguir un ajuste apropiado en los métodos de polarización que han sido seleccionados como más adecuados en la unidad de fase y tierra para cada extremo de una línea. El ajuste propuesto es el cálculo de los ángulos de los límites de dirección α y β . A continuación, se expone un proceso basado en [31] para calcular dichos ángulos.

3.4.4.2.1 Función objetivo

El cálculo de los ángulos α y β puede efectuarse a través de la obtención del ángulo RCA (ver sección 2.4.8.2). En [31] se plantea la función objetivo (FO) dada por las expresiones 3.3 y 3.4 para encontrar un ajuste óptimo del ángulo RCA que permita minimizar las separaciones angulares de los fasores de corriente con respecto a la MTL (ángulos de torque) según se esquematiza en la Figura 3.29.

$$\min FO = \sum_{i=1}^n k_i |\varphi_i - RCA| \quad (3.3)$$

$$\text{sujeto a: } RCA_{\min} \leq RCA \leq RCA_{\max} \quad (3.4)$$

Donde:

φ_i = Ángulo de la i -ésima corriente de cortocircuito con respecto al voltaje de polarización.

k_i = Factor de ponderación i -ésimo de la probabilidad de ocurrencia por tipo de falla.

RCA = Ángulo característico del relé (variable).

n = Número de cortocircuitos considerados.

RCA_{\min} y RCA_{\max} = Límites de ajuste del RCA que constituyen la restricción de la FO.

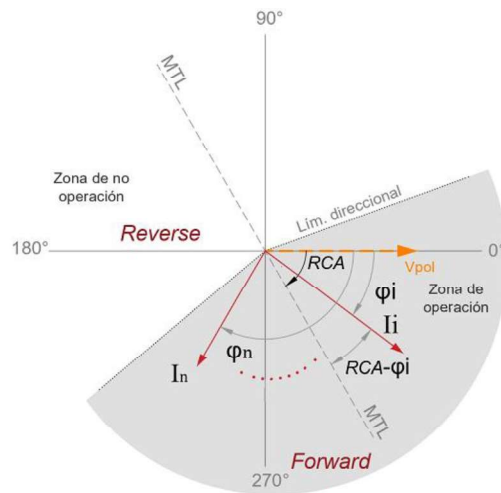


Figura 3.29. Separación angular respecto a la MTL del i -ésimo fasor de una corriente de falla

Los ángulos φ_i deben obtenerse de un conjunto extenso de cortocircuitos como se especifica en [31]. En este sentido, se pretende hacer uso de la herramienta desarrollada para ejecutar todos los cortocircuitos necesarios y poder calcular tales términos.

Antes de describir en detalle el problema de optimización, es necesario efectuar ciertas modificaciones en la función objetivo. Se debe considerar que, en la ejecución de cortocircuitos, la herramienta desarrollada calcula ángulos de torque, es decir, los ángulos de las corrientes de falla con respecto a la MTL y no los ángulos de dichas corrientes con respecto al voltaje de polarización como se considera en la expresión 3.3, por lo que tal función objetivo ha sido modificada para que ésta se exprese según los ángulos de torque.

En este sentido, se hace uso de la expresión 3.5 como artificio para ser reemplazada en la función objetivo y, además, se restan los tres términos de la restricción de la función objetivo por el ángulo RCA_o . Con todo esto se obtienen las expresiones 3.6 y 3.7. Una vez efectuadas tales modificaciones, se describe en detalle el problema de optimización.

$$RCA = RCA_o + \Delta RCA \quad (3.5)$$

Donde:

RCA_o = Ángulo RCA medido desde el voltaje de polarización utilizado inicialmente o por defecto en el método de polarización (Ejm: $RCA = 30^\circ$ en la polarización en cuadratura).

ΔRCA = Ángulo de diferencia entre el RCA (variable) y el RCA_o (constante).

$$\text{mín } FO = \sum_{i=1}^n k_i | \theta_i - \Delta RCA | \quad (3.6)$$

$$\text{sujeto a: } \Delta RCA_{\text{mín}} \leq \Delta RCA \leq \Delta RCA_{\text{máx}} \quad (3.7)$$

Donde:

θ_i = Ángulo de la i -ésima corriente de falla con respecto a la MTL (ángulo de torque).

$\Delta RCA_{\text{mín}}$ y $\Delta RCA_{\text{máx}}$ = Límites de la variación del RCA o ΔRCA .

En la función objetivo, los ángulos θ_i se obtienen de la ejecución del i -ésimo cálculo de cortocircuito con ayuda de la herramienta desarrollada. Además, a pesar de que en la Figura 3.29 se esquematizan solo fallas hacia adelante, las fallas hacia atrás también se consideran en la determinación del RCA ; en el caso de estas fallas, sus ángulos se deben expresar con respecto a la MTL negativa (o lo que es equivalente a rotar tales fallas 180° adicionales) por las razones expuestas antes acerca de que esto permite situar a todas las fallas con una misma referencia.

Por otro lado, el factor k_i es aquel que penaliza aquellos tipos de falla que tienen una baja probabilidad de ocurrencia; para esto, se consideran los valores de la Tabla 3.11.

Es preciso señalar que el ángulo ΔRCA es la única variable de optimización (también llamada variable de decisión o controlable) de la función objetivo y su rango admisible de ajuste (ΔRCA_{\min} , ΔRCA_{\max}) es la única restricción de la función objetivo. Estos límites en el rango de ajuste del ΔRCA son *constantes* y corresponden a aquellos ajustes que permiten que, en el resultado final del cálculo del ángulo RCA , la posición de la zona de operación se defina de tal manera que todas las fallas hacia adelante se encuentren dentro de la zona de operación y que todas las fallas hacia atrás se encuentren fuera de dicha zona. De este modo, la restricción garantiza que la solución obtenida permite que el funcionamiento del método de polarización analizado en el proceso de optimización sea correcto.

Tabla 3.11. Factor de ponderación de la probabilidad de ocurrencia por tipo de falla [44]

Tipo de falla	Factor k_i	
	Unidad de fase	Unidad de tierra
Monofásica	0.70	0.875
Bifásica	0.15	-
Bifásica a tierra	0.10	0.125
Trifásica	0.05	-

El cálculo de los límites de la restricción ΔRCA_{\min} y ΔRCA_{\max} puede efectuarse conociendo el ángulo ROA y las fallas que presentan el mayor y menor ángulo de torque con dirección hacia adelante y hacia atrás, las cuales se esquematizan en la Figura 3.30. A partir de este diagrama, los límites se calculan con las expresiones 3.8 y 3.9.

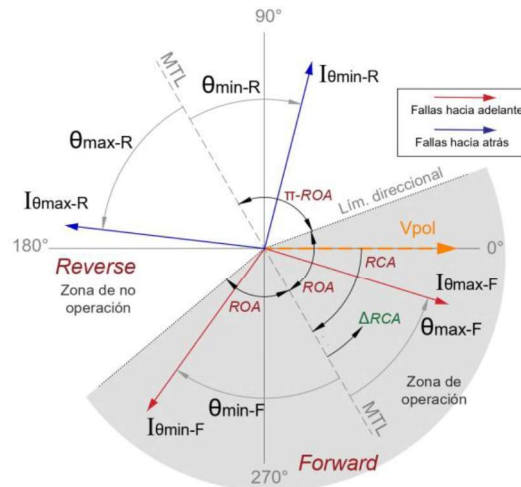


Figura 3.30. Fasores extremos de un conjunto de cortocircuitos

$$\Delta RCA_{\max} = \min(\theta_{\min-F} + ROA, \theta_{\min-R} + (\pi - ROA)) \quad (3.8)$$

$$\Delta RCA_{\min} = \max(\theta_{\max-F} - ROA, \theta_{\max-R} - (\pi - ROA)) \quad (3.9)$$

Donde:

$\theta_{m\acute{a}x-F}$ y $\theta_{m\acute{i}n-F}$ = Mayor y menor valor de ángulo de torque obtenido de un conjunto de fasores de cortocircuitos hacia adelante (Forward).

$\theta_{m\acute{a}x-R}$ y $\theta_{m\acute{i}n-R}$ = Mayor y menor valor de ángulo de torque obtenido de un conjunto de fasores de cortocircuitos hacia atrás (Reverse).

Cabe indicar que es probable que, para un método de polarización, el rango de las fallas hacia adelante exceda la zona de operación o que el rango de las fallas hacia atrás exceda la zona de no operación, lo cual fue descrito antes en la sección 3.4.4.1.1. Ante esta situación desfavorable, el uso de los límites indicados carece de sentido porque no se podrá satisfacer la restricción para la cual estos límites son destinados. En este caso, se acepta un riesgo para la confiabilidad del funcionamiento del método de polarización analizado y se usan (arbitrariamente) las expresiones 3.10 y 3.11 para que el problema de optimización pueda ser resuelto.

$$\Delta RCA_{m\acute{a}x} = 90^\circ \quad (3.10)$$

$$\Delta RCA_{m\acute{i}n} = -90^\circ \quad (3.11)$$

Por otra parte, se debe mencionar que el valor absoluto en la función objetivo es una función convexa; el sumatorio de términos positivos en valor absoluto también es una función convexa por propiedad [45]. Es por esto que la función objetivo representa lo que en optimización se conoce como un problema convexo, cuya característica especial es que tiene una sola solución óptima (óptimo global) cuando la restricción, como en este caso, es una función lineal (límites constantes) y, por lo tanto, no hay riesgo de obtener un óptimo local durante la resolución del problema [46]. La Figura 3.31 muestra un ejemplo de una función convexa. Por la forma curvada de ésta, existe solo un valor mínimo y, por lo tanto, la solución óptima es global o única.

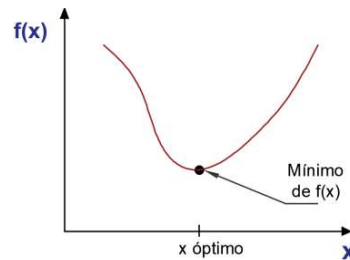


Figura 3.31. Solución óptima (valor mínimo) de una función convexa

3.4.4.2.2 Características de la simulación

Para obtener los datos que serán evaluados en la función objetivo, es necesario el cálculo de un conjunto de fallas relevante que represente posibles desfasamientos de la corriente

de falla que pueden presentarse en algún sistema y, con esto, incrementar la probabilidad de que el ajuste obtenido mejore la efectividad del método de polarización analizado. En este sentido, en [31] se recomienda considerar fallas en varios escenarios operativos e inclusive ante elementos fuera de servicio alrededor de la topología en estudio.

Es por esto que, para la obtención de datos a evaluar en la función objetivo, se consideran los barridos de cortocircuito que se ejecutan en la etapa de comparación de métodos (unidad de fase), es decir, aquellos indicados en la Tabla 3.10; y, también, los mismos barridos considerando varios elementos fuera de servicio en los alrededores de las líneas analizadas. Un ejemplo de lo expresado antes es considerar barridos ante la salida de uno de los circuitos de una línea de doble circuito cercana. El retiro de elementos se admite siempre y cuando esto no conlleve a cambios drásticos que no representan condiciones normales en una red.

Cabe indicar que el número de fallas a calcular es extremadamente extenso; la razón para considerar tal número ya fue discutida antes. Esto es abordado por la herramienta desarrollada, la cual realiza automáticamente las simulaciones y efectúa el cálculo de los términos θ_i de la función objetivo. Los resultados son después exportados a un archivo Excel para crear una base de datos que permita un manejo flexible de estos. La guía de usuario de la herramienta desarrollada indica la configuración necesaria ante esta tarea.

3.4.4.2.3 *Herramienta de cálculo*

Como se mencionó antes, la función objetivo constituye un problema convexo y, dada su simplicidad, el mismo puede ser abordado con la herramienta-complemento *Solver* de Excel a través del método de resolución denominado *Evolutionary* (algoritmo evolutivo), el cual se basa en los postulados de la evolución biológica para encontrar una solución aceptable a un problema en tiempos reducidos [47].

La base de datos en la que se exportan los resultados de las simulaciones se emplea para poder realizar los cálculos pertinentes de la función objetivo y minimizar su valor con ayuda del complemento *Solver*. En el ANEXO D se presenta una guía de uso de *Solver* para obtener la solución de minimización de la función objetivo.

3.4.4.2.4 *Cálculo de los ángulos de los límites de dirección*

El resultado de la minimización de la función objetivo es el valor del *RCA*. A partir de este ángulo resultante, para fines de este proyecto, se propone el cálculo de los ángulos de los límites de dirección α y β como los ajustes de un método de polarización. Dichos ángulos se calculan específicamente a través del *RCA* y *ROA* con la Ecuación 2.18 y 2.19 para

obtener una zona de operación simétrica con respecto a la MTL. Esto debido a que es común que en varios relés se deban especificar estos ángulos en lugar del *RCA* y *ROA*, según se indicó en el apartado 2.4.8.2.

En este sentido, el *RCA* será la solución del problema de optimización, mientras que para el *ROA*, a criterio del autor, se usarán los valores recomendados por el fabricante ABB; el cual establece un ángulo de 80° y 72° en los métodos de polarización de la unidad de fase y tierra respectivamente para garantizar una actuación segura [19].

3.4.5 RESUMEN DE LA METODOLOGÍA DE ESTUDIO

El resumen de la metodología de estudio se muestra en la Figura 3.32. Esta metodología de estudio puede efectuarse como un solo proceso según se muestra en la Figura 3.33. Es preciso resaltar que las dos etapas finales necesitan considerar los resultados de las primeras etapas, de manera que éstas no pueden efectuarse independientemente.

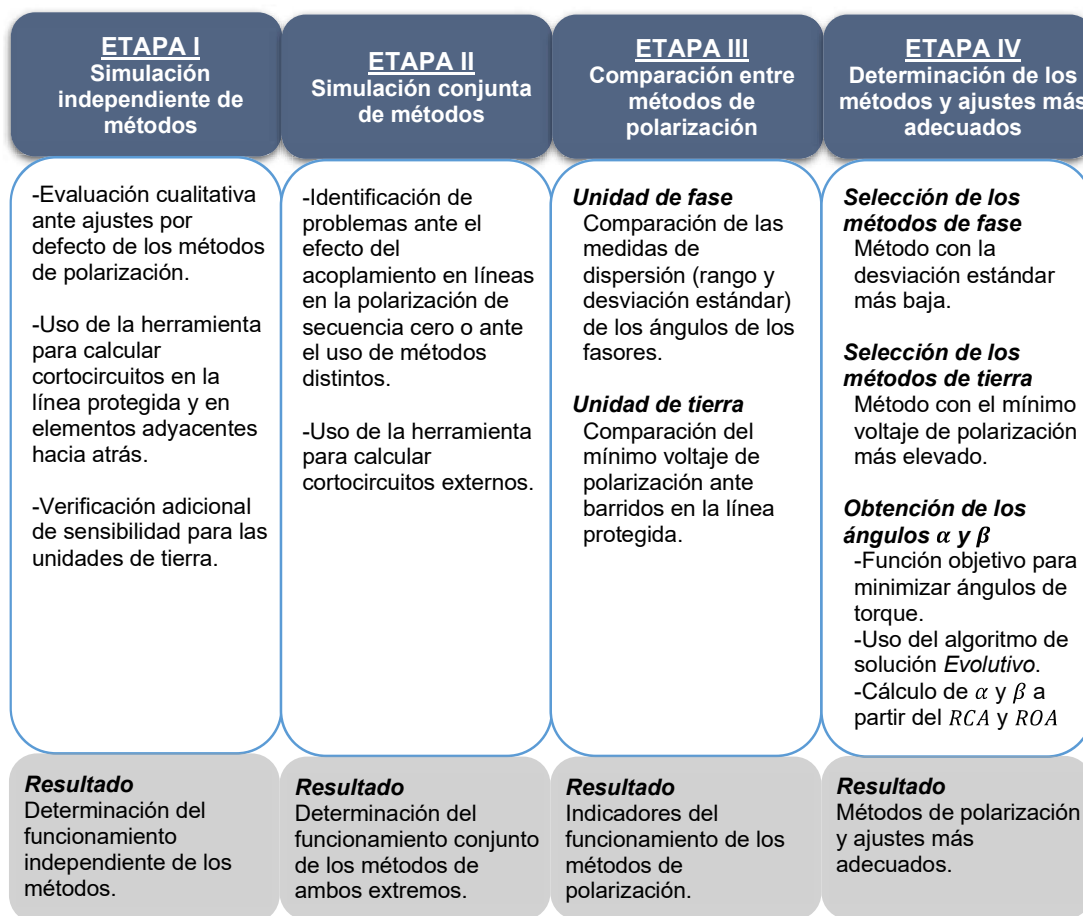


Figura 3.32. Resumen de las etapas de la metodología de estudio

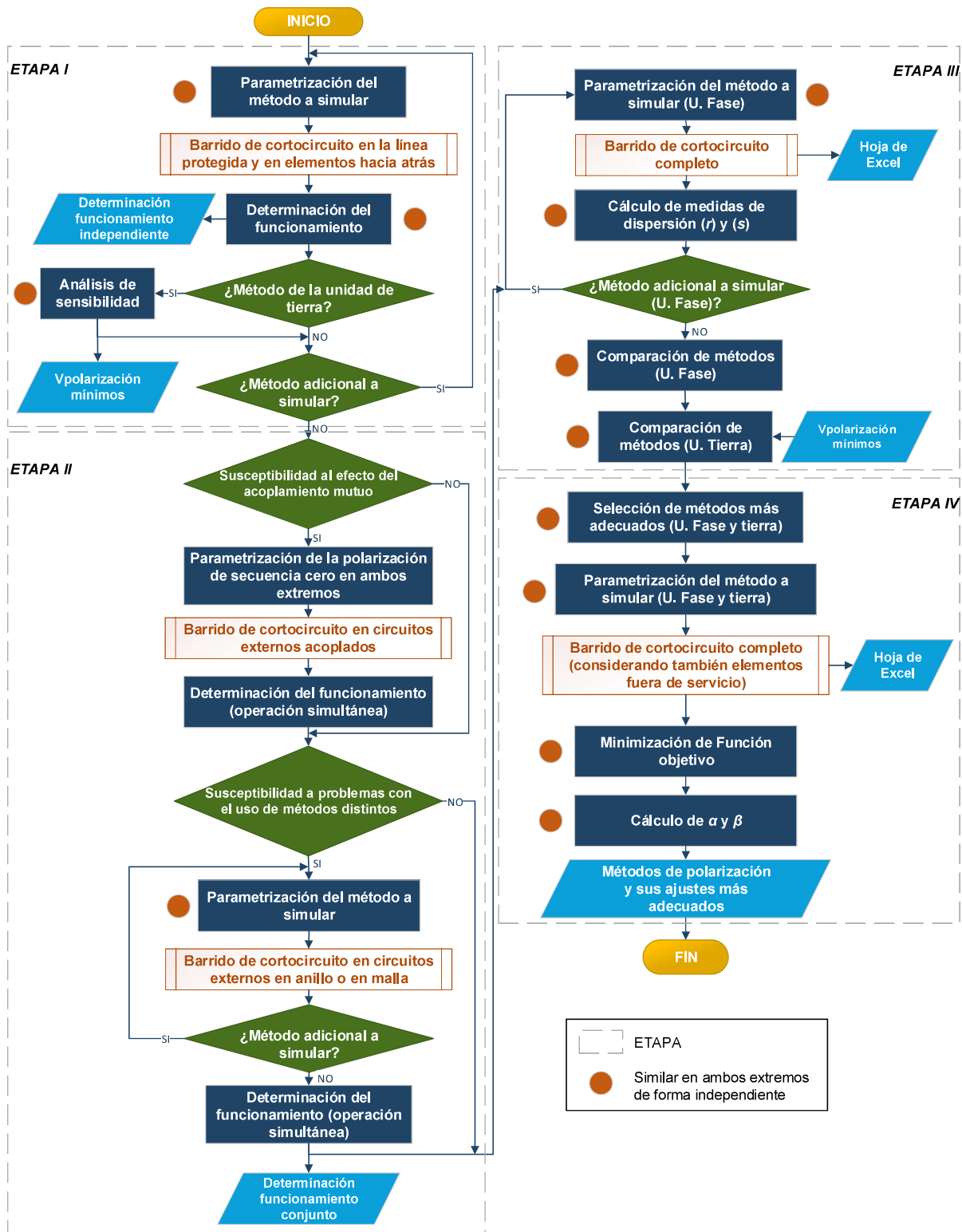


Figura 3.33. Flujoograma de la metodología de estudio de métodos de polarización en un solo proceso

4. APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las funcionalidades de la herramienta desarrollada se utilizaron en varios ejercicios de aplicación, a través de lo cual se evidenciaron las facilidades que tal herramienta brinda para la simulación de métodos de polarización. En las secciones presentadas a continuación se exponen y analizan los resultados obtenidos de estos ejercicios, en los que se desarrolló un estudio de distintos métodos de polarización en torno a líneas con diferentes topologías.

4.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ESTUDIO

4.1.1 SISTEMA DE PRUEBA

El sistema de prueba de este proyecto comprende un segmento de la zona Molino-Milagro del Sistema Nacional de Transmisión (SNT) ecuatoriano, el cual fue modelado en el software PowerFactory, según se muestra en la Figura 4.1. La modelación se efectuó con información proporcionada por CELEC EP TRANSELECTRIC del SNT al año 2018. Debido a la extensión de elementos en el SNT, se modeló en detalle solo la parte del diagrama unifilar mostrado y se utilizó la función de reducción de red *Network Reduction* de PowerFactory para obtener modelos equivalentes del resto del sistema. Además, el sistema se modeló en escenarios de máximas y mínimas corrientes de cortocircuito. El ANEXO E presenta esta modelación.

En este proyecto se escogió modelar este sistema real para la aplicación de la herramienta computacional porque se pretende mostrar la utilidad de los resultados de dicha herramienta exponiendo varias problemáticas investigadas en la literatura técnica (algunas planteadas solo teóricamente) en un modelo del SNT ecuatoriano.

Tabla 4.1. Líneas de transmisión consideradas en los ejercicios de aplicación

Ejercicio de aplicación	Línea	Topología
I	L/T Limón-Méndez 138kV	Simple circuito
II	L/T Molino-Zhoray 230kV	Doble circuito – 2 extremos comunes
III	L/T Mazar-Zhoray 230kV	Doble circuito – 1 extremo común

En el sistema mencionado se realizaron estudios de varios métodos de polarización en torno a las líneas de la Tabla 4.1. Las dos primeras líneas se consideraron por separado en dos ejercicios de aplicación que abarcan un estudio completo de métodos de polarización de acuerdo con la metodología propuesta en la sección 3.4. Esto permite satisfacer en primera instancia el alcance de este trabajo de titulación.

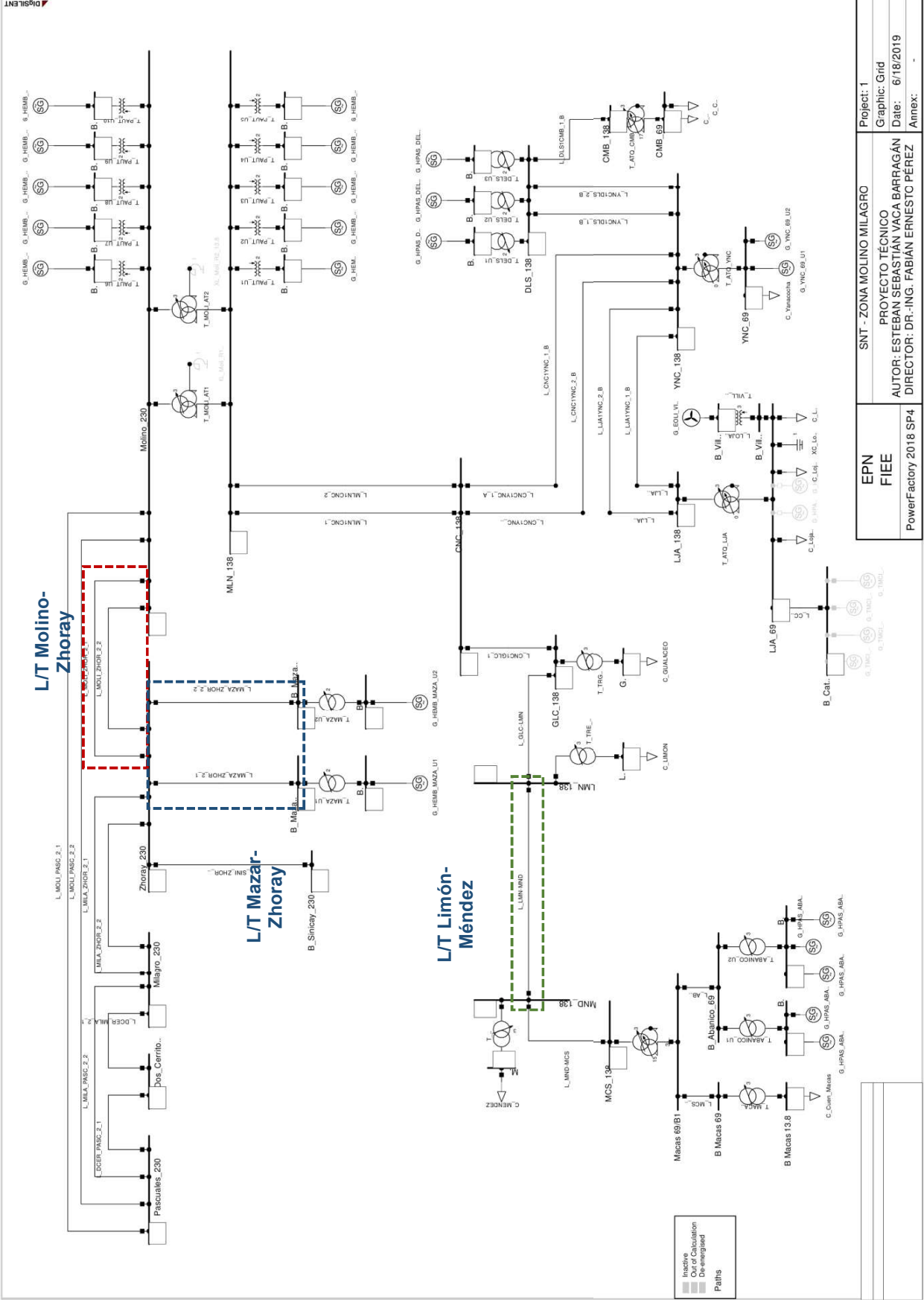


Figura 4.1. Segmento de la zona Molino-Milagro modelado en PowerFactory 2018

Por último, pese a no formar parte del alcance, se usó adicionalmente la herramienta computacional para demostrar aún más la importancia de sus resultados en un breve estudio del funcionamiento de la polarización con voltaje de secuencia cero frente al efecto del acoplamiento mutuo en modificaciones topológicas de la tercera línea considerada.

4.1.2 PARAMETRIZACIÓN GENERAL DE LA HERRAMIENTA

El estudio de los métodos de polarización parte de sus ajustes por defecto, los cuales fueron obtenidos de la literatura técnica y de información proporcionada por la empresa transmisora. En la Tabla 4.2 y en la Tabla 4.3 se muestran los parámetros de la unidad de fase y tierra respectivamente. Los parámetros complementarios, correspondientes a la unidad de sobrecorriente, se muestran en el ANEXO F.

Tabla 4.2. Parámetros de los métodos de polarización de la unidad direccional de fase

Parámetro	Pol. Propia	Pol. Cuadratura	Pol. Cruzada
RCA	-60°	30°	-30°
ROA	±80°	±80°	±80°
α	20°	110°	50°
β	-140°	-50°	-110°

Tabla 4.3. Parámetros de los métodos de polarización de la unidad direccional de tierra

Parámetro	Pol. Voltaje de sec. Cero	Pol. Voltaje de sec. negativa
RCA	-60°	-60°
ROA	±72°	±72°
α	12°	12°
β	-132°	-132°
Umbral de Polarización	1.0 [kV.pri]	1.0 [kV.pri]
Umbral de Operación	*	0.06 [kA.pri]

* El método no posee este parámetro

Las unidades de tierra de las líneas consideradas en los ejercicios de aplicación se encuentran configuradas actualmente con la polarización con voltaje de secuencia cero. Por otro lado, la protección direccional de fase no se encuentra activa en la actualidad en las líneas consideradas, no obstante, con el propósito de aplicar plenamente la metodología, se asume que si se dispone de dicha protección en los Ejercicios de aplicación I y II y que ésta se encuentra configurada con un esquema de teleprotección y protección no unitaria de respaldo local por curva de tiempo inverso siempre activa. Los ajustes asumidos en la protección de fase obedecen convenciones típicas que se detallan en el ANEXO F.

Las configuraciones generales de la protección no unitaria y de la teleprotección para la unidad de fase y tierra consideradas en el estudio son las descritas en la sección 2.4.10.

4.2. EJERCICIO DE APLICACIÓN I – LÍNEA DE SIMPLE CIRCUITO

El primer ejercicio se realizó en torno a la L/T Limón-Méndez 138kV; con relación a la cual existen fuentes y, por consecuencia, aportes de corriente de cortocircuito desde ambos extremos de la línea según se muestra en la Figura 4.2. Es por esto que las corrientes de falla pueden presentar diferentes direcciones, de este modo, tal configuración responde a un caso apto y básico para un estudio de métodos de polarización.

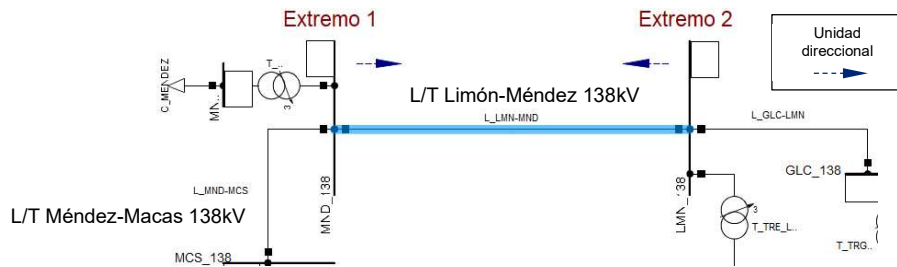


Figura 4.2. L/T Limón-Méndez 138kV dentro de la modelación de la zona Molino-Milagro

4.2.1 SIMULACIÓN INDEPENDIENTE DE MÉTODOS EN CADA EXTREMO

En este apartado se expone el resultado de la simulación de métodos de polarización según la primera etapa de la metodología correspondiente, lo cual permitió determinar el funcionamiento de cada método de polarización con sus ajustes clásicos (ver Tabla 4.2).

Por la extensión de los resultados, se expone un resumen representativo de estos, específicamente, los resultados con relación a las unidades direccionales del extremo 1 de la línea protegida ante barridos de cortocircuito en dicha línea (fallas hacia adelante) y en la línea adyacente L/T Méndez-Macas 138kV (fallas hacia atrás) en el escenario de máximas corrientes de cortocircuito.

Los resultados adicionales de simulación, correspondientes a barridos de cortocircuito en otros elementos del sistema, y el resultado textual obtenido de la herramienta computacional pueden ser consultados en el ANEXO G. Además, en este anexo también se presentan los resultados que corresponden al extremo 2 de la L/T Limón-Méndez 138kV, los cuales mostraron gran similitud con los obtenidos con relación al extremo 1.

Los resultados indicados son representativos porque muestran características generales obtenidas en las simulaciones y tienen la misma tendencia que los resultados obtenidos en otros casos; por ejemplo, en el escenario de mínimas corrientes de cortocircuito.

4.2.1.1 Unidad direccional de fase

4.2.1.1.1 Polarización con voltaje de la propia fase (polarización propia)

Según la metodología propuesta, el funcionamiento de éste y el resto de métodos se examinó inicialmente a través de la gráfica de la *característica direccional*, específicamente, con la observación de la posición de los fasores de distintas corrientes de falla en este diagrama. En la Figura 4.3 se presenta el diagrama mencionado para esta polarización frente a cortocircuitos hacia adelante y hacia atrás¹⁰.

La simulación expone los distintos desfases de las fallas y, dentro de esto, se evidencian varias inconsistencias por parte de esta polarización, dado que no todas las fallas hacia adelante se ubican en la zona de operación (como se espera). Existen distintas fallas bifásicas que presentan desfases excesivos con respecto a la MTL positiva e inclusive superan el límite direccional, de este modo, tales fallas son detectadas inconsistentemente como fallas hacia atrás al localizarse fuera de la zona de operación.

En relación con otros tipos de fallas hacia adelante, la dirección si se define de manera consistente, no obstante, varios de estos cortocircuitos tienen un desfase amplio que los sitúa cerca del límite direccional, como es el caso de las fallas bifásicas a tierra.

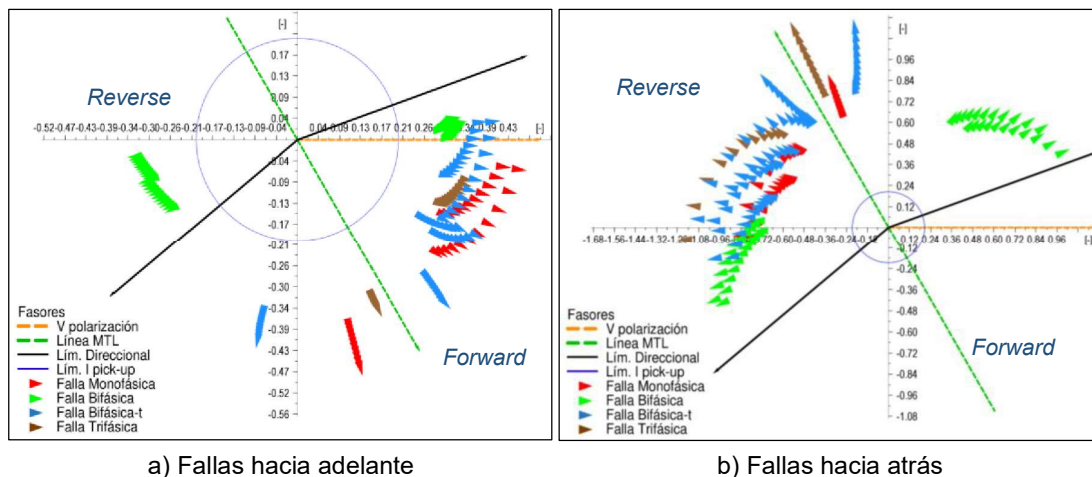


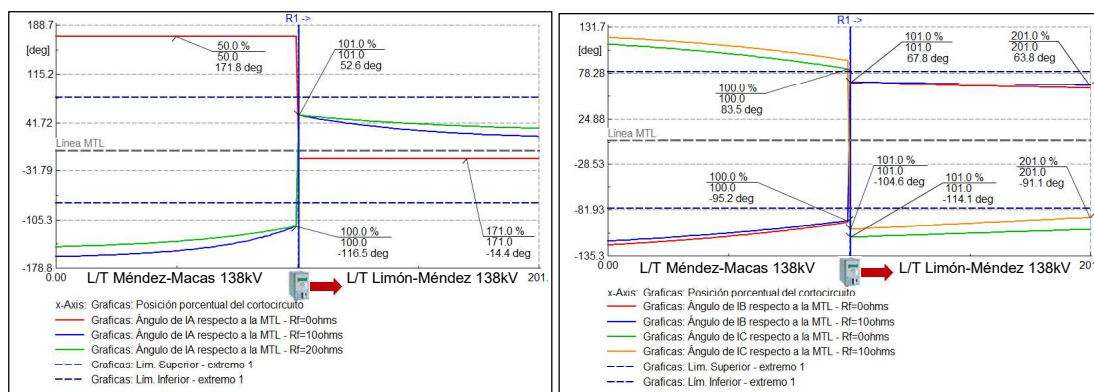
Figura 4.3. Característica direccional de la polarización propia

Por otro lado, en el resultado ante fallas hacia atrás, las corrientes tienden a desfasarse hacia el lado opuesto de la zona de operación; lo cual se espera dado que éstas no deben provocar la operación de la protección. El diagrama muestra que todo el conjunto de fallas

¹⁰ En esta primera etapa, para este ejercicio de aplicación y el próximo, se consideraron simulaciones con resistencias de falla de 0 y 10 Ω en fallas aisladas y 0, 10 y 20 Ω en fallas a tierra

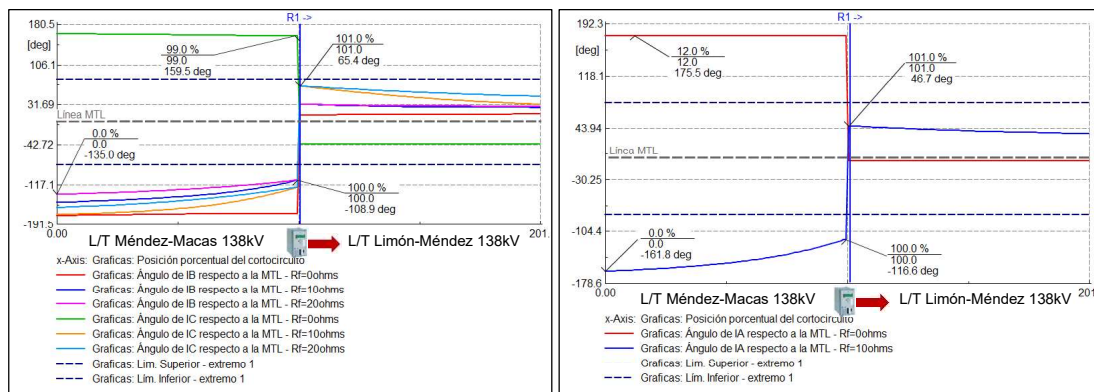
se localiza en la zona de no operación y, por lo tanto, la definición direccional es consistente, sin embargo, esta definición es deficiente, puesto que se presentan varias fallas bifásicas que se localizan cerca de la zona de operación.

A fin de tener un detalle adicional, se presenta el diagrama de ángulo de torque-distancia de la Figura 4.4, en el cual se observa desde otra perspectiva el funcionamiento de esta polarización frente a los cortocircuitos mostrados en la característica direccional. De manera general, el diagrama muestra una influencia considerable de la resistencia de falla durante el barrido de los distintos cortocircuitos; en especial, en el caso de las fallas a tierra. La línea MTL graficada en estos diagramas corresponde específicamente a la MTL positiva.



a) Fallas monofásicas

b) Fallas bifásicas aisladas



c) Fallas bifásicas a tierra

d) Fallas trifásicas

Figura 4.4. Diagrama de ángulo de torque – distancia de la polarización propia

Además, a medida que una falla se acerca a la posición del relé, las corrientes tienden a alejarse de la MTL positiva para fallas en la línea protegida y se acercan a la zona de operación cuando se trata de fallas hacia atrás. Algo similar se obtendrá para otros métodos. Esto valida el hecho de que las simulaciones más relevantes obedecen, en general, a las obtenidas ante barridos en un elemento hacia adelante y en uno hacia atrás.

Por lo anterior, el fasor más lejano (falla hacia adelante) tiene un ángulo de -114.1° , el cual excede significativamente el límite de la zona de operación ubicado a $\pm 80^\circ$ de la MTL (positiva); mientras que el fasor más cercano (falla hacia atrás) tiene un ángulo de 83.5° , cuyo valor es muy próximo a dicho límite.

Es importante resaltar que, de acuerdo con la Figura 4.4b, el ángulo de la corriente de la fase C se encuentra fuera de la zona de operación frente a todas las fallas; ilustrando con otra perspectiva el defecto del funcionamiento de esta polarización.

Los resultados obtenidos permiten determinar que el funcionamiento de este método no es correcto, dado que existen fallas hacia adelante que comprometen la fiabilidad del método y, por otra parte, existen fallas hacia atrás cuyos fasores son muy cercanos a la zona de operación, lo cual disminuye la seguridad de dicho método.

Finalmente, se debe indicar que el comportamiento de los métodos ante cortocircuitos trifásicos es el mismo por las condiciones balanceadas de estas fallas. El lector puede corroborar esto al observar que estas fallas se encuentran en la misma posición en la característica direccional de cada método, por lo tanto, el diagrama ángulo de torque - distancia frente a estas fallas se presenta solo para la polarización propia y se omite para los demás métodos con el fin de evitar la redundancia en la presentación de los resultados.

4.2.1.1.2 Polarización en cuadratura

La característica de esta polarización se muestra en la Figura 4.5. En ésta se aprecia que todos los cortocircuitos en la línea protegida se localizan dentro de la zona de operación y que el conjunto de fallas hacia atrás se posiciona en la zona de no operación; de modo que el método presenta un desempeño consistente para definir la dirección de estas fallas.

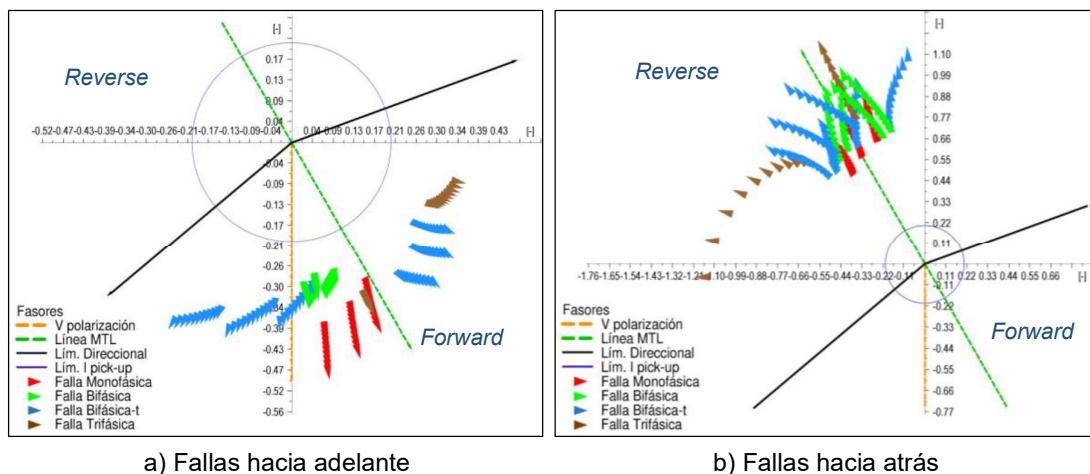
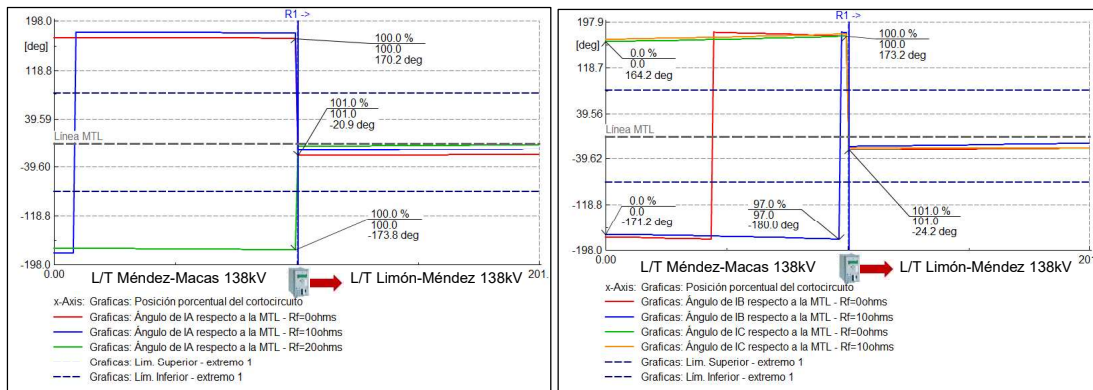


Figura 4.5. Característica direccional de la polarización en cuadratura

En la Figura 4.5a se aprecia que las fallas bifásicas a tierra son las que más se separan de la MTL positiva y, además, se posicionan cerca del límite direccional inferior. Por otra parte, se observa que las fallas monofásicas y bifásicas aisladas presentan una localización cercana a la MTL y sus desfases son bajos.

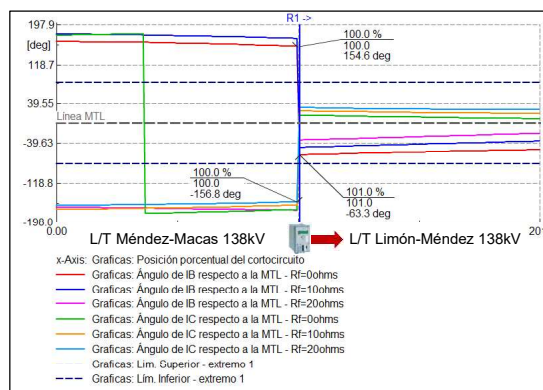
En lo que concierne al resultado frente a fallas hacia atrás, es notable que la dispersión de los fasores, sin tomar en cuenta a las fallas trifásicas, es significativamente menor que el caso de las fallas hacia adelante; además, los cortocircuitos monofásicos y bifásicos aislados se posicionan muy cerca de la MTL negativa, lo cual evidencia gran precisión de esta polarización para definir la dirección de esas fallas.

Por su parte, el diagrama de la Figura 4.6 muestra que la influencia de la resistencia de falla frente a cortocircuitos monofásicos y bifásicos aislados es poco significativa y, además, el desfase durante el barrido varía en el orden de las unidades de grados.



a) Fallas monofásicas

b) Fallas bifásicas aisladas



c) Fallas bifásicas a tierra

Figura 4.6. Diagrama de ángulo de torque – distancia de la polarización en cuadratura

Adicionalmente, el diagrama expone que los mayores desfases con respecto a la MTL positiva (frente a fallas hacia adelante) y los desfases más próximos a los

límites de dirección (frente a fallas hacia atrás) ocurren con posiciones cercanas al relé; no obstante, no se presentan valores críticos que comprometan el funcionamiento del método. El fasor más cercano a los límites (falla hacia atrás) tiene un ángulo de 154.6° , mientras que el más alejado de la MTL positiva (falla hacia adelante) tiene un ángulo de -63.3° .

4.2.1.1.3 Polarización cruzada

Con respecto a la polarización cruzada, en el resultado observado en la Figura 4.7 es evidente que las corrientes de falla hacia adelante y hacia atrás se posicionan en la zona de operación y no operación respectivamente. De esta manera, el funcionamiento de este método de polarización es correcto.

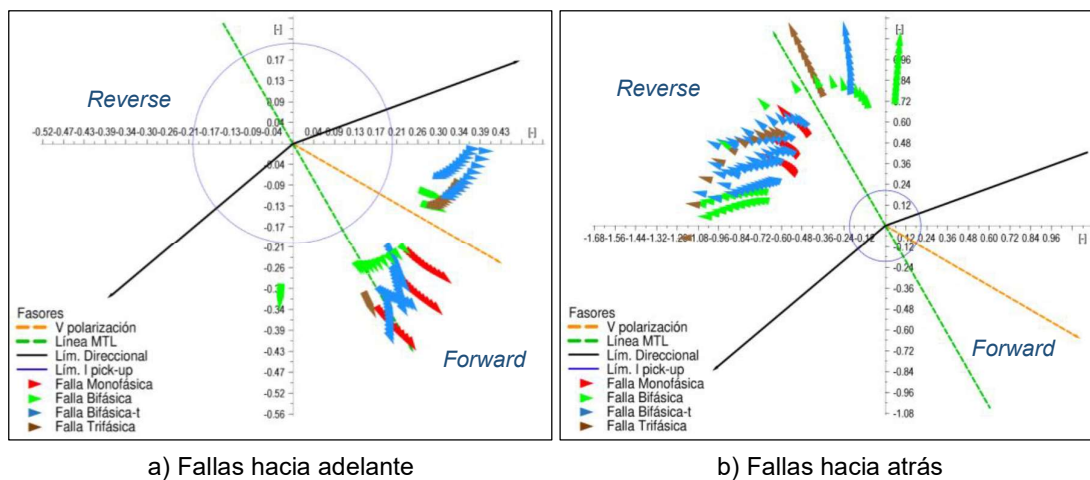


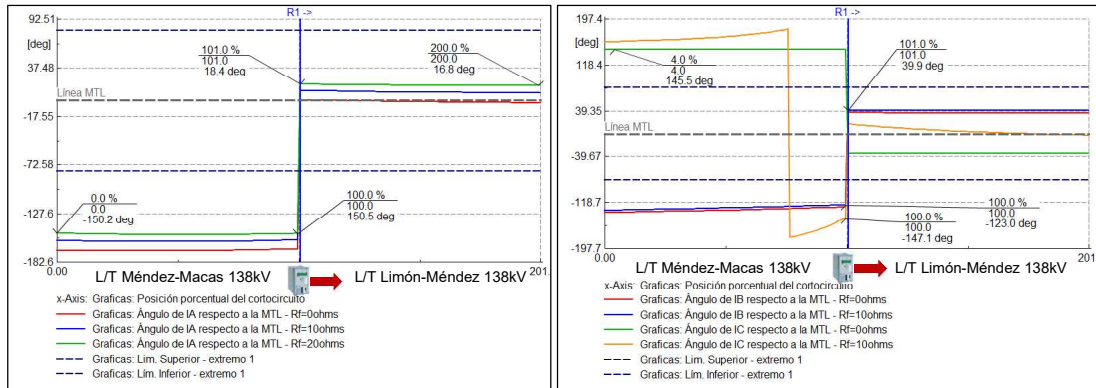
Figura 4.7. Característica direccional de la polarización cruzada

El resultado ante fallas hacia adelante muestra que los cortocircuitos bifásicos aislados y con contacto a tierra son los que presentan los mayores desfases con respecto a la MTL positiva; no obstante, estos no se localizan cerca de los límites, por el contrario, varios de estos se encuentran próximos a la MTL.

En el resultado ante fallas hacia atrás, sin considerar a las fallas trifásicas, se observa que los cortocircuitos bifásicos aislados son los que tienen los mayores desfases, sin embargo, no existe una cercanía significativa a los límites de dirección.

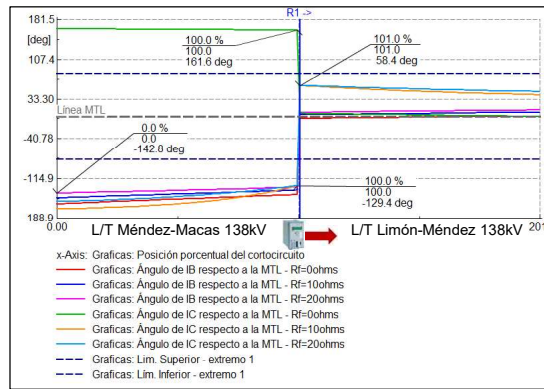
Por otro lado, el resultado mostrado en la Figura 4.8 indica que los desfases significativos ocurren ante fallas cercanas al relé. En este caso, el máximo desfase con fallas hacia adelante es de 58.4° y con fallas hacia atrás el desfase más cercano a los límites es de -123.0° ; estos valores no suponen un resultado crítico. Además, la figura indica que las altas resistencias de falla provocan un cambio apreciable en el

desfasamiento de los cortocircuitos bifásicos hacia adelante y hacia atrás. En cuanto a los cortocircuitos monofásicos, el efecto de la resistencia de falla es menor.



a) Fallas monofásicas

b) Fallas bifásicas aisladas



c) Fallas bifásicas a tierra

Figura 4.8. Diagrama de ángulo de torque – distancia de la polarización cruzada

4.2.1.2 Unidad direccional de tierra

4.2.1.2.1 Polarización con voltaje de secuencia cero

La Figura 4.9 muestra que el funcionamiento de la polarización es consistente ante todos los cortocircuitos. Además, se observa que el ángulo entre el voltaje y la corriente es constante para las fallas hacia adelante y hacia atrás. Esto es una consecuencia de que, ante una falla, el relé determina una impedancia de secuencia equivalente cuya magnitud y ángulo, de acuerdo con la Figura 2.27, no depende de la resistencia de falla, tipo de cortocircuito o posición porcentual de la falla, lo que se traduce en que el desfasamiento de la corriente con respecto al voltaje sea constante.

Cabe indicar que el ángulo de torque es de 19.7° ante fallas hacia adelante, mientras que el ángulo de torque (negativo) ante fallas hacia atrás es de 14.4° , de este modo, se obtiene que las corrientes tienen una separación aceptable con respecto a los límites.

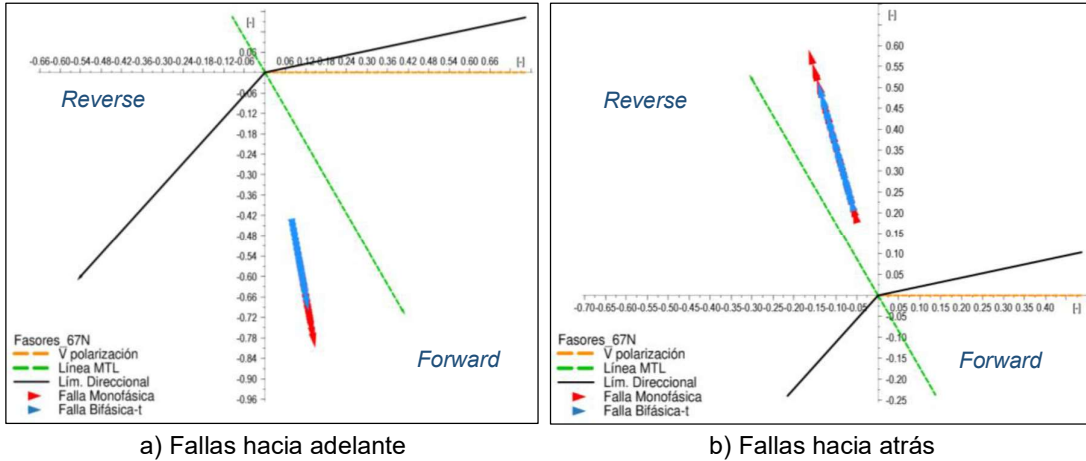


Figura 4.9. Característica direccional de la polarización con voltaje de secuencia cero

Con relación a la magnitud del voltaje de polarización, es necesario verificar que su valor sea lo suficientemente elevado para brindar una operación confiable ante fallas en la línea protegida de acuerdo con lo mencionado en la sección 3.4.1. En tal virtud, en la Figura 4.10 se muestra la magnitud de este voltaje durante un barrido de cortocircuito en la línea protegida con una alta resistencia de falla (20Ω). El resultado muestra que el mínimo voltaje, encontrado en el escenario de corrientes mínimas de cortocircuito, ocurre en el extremo remoto de la línea y es de 58.92 kV.pri. Este valor es significativamente superior al umbral configurado en la unidad direccional de este extremo, cuyo valor es de 1.0 kV.pri, por lo tanto, la sensibilidad del método permite una fiabilidad en zona primaria adecuada.

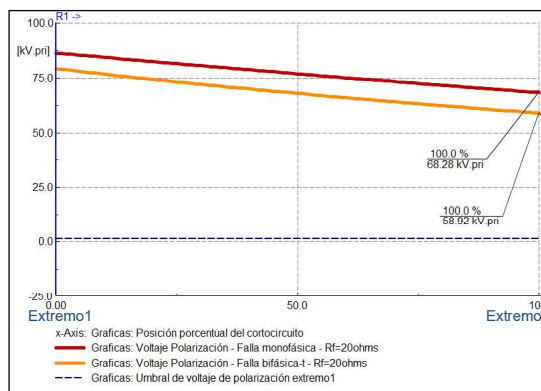


Figura 4.10. Voltaje de polarización frente a fallas internas

En definitiva, los resultados de la adecuada definición de la dirección de las corrientes de falla y de la suficiente magnitud del voltaje de polarización en el barrido de fallas internas permiten determinar que el funcionamiento de este método de polarización es correcto.

4.2.1.2.2 Polarización con voltaje de secuencia negativa

En la Figura 4.11 se muestra que la posición de los fasores en el diagrama permite que la definición de la dirección sea consistente frente a fallas hacia adelante y hacia atrás. Además, la característica muestra que el ángulo de torque es constante en cada caso, debido a la misma razón comentada antes para la polarización de secuencia cero. Se debe indicar que el ángulo de torque, frente a fallas hacia adelante, es de 24.14° , mientras que, frente a fallas hacia atrás, los fasores presentan un ángulo de torque (negativo) de 6.7° , lo que refleja que no existe una cercanía crítica de los fasores a los límites.

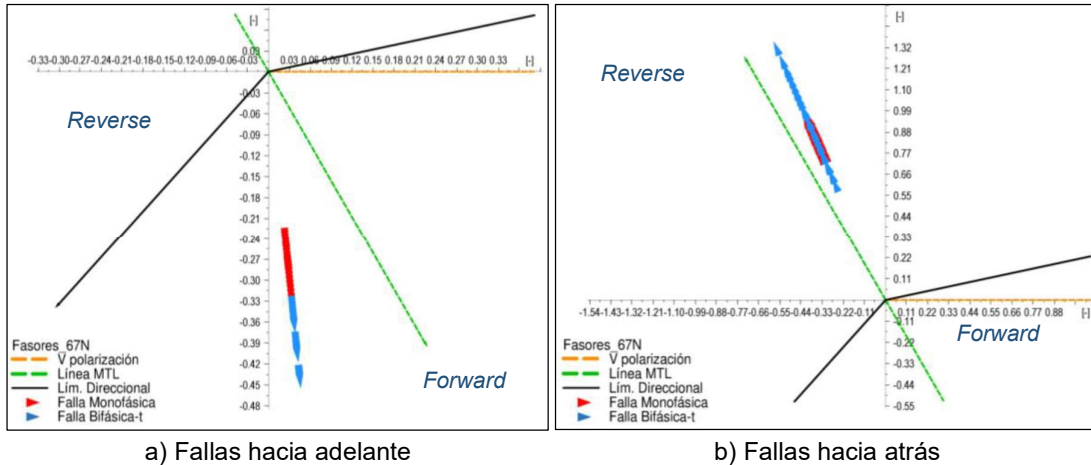


Figura 4.11. Característica direccional de la polarización de secuencia negativa

Por otro lado, el resultado del barrido de cortocircuitos internos, expuesto en la Figura 4.12, permite apreciar que el mínimo voltaje de polarización es 50.95 kV.pri, cuyo valor es ampliamente superior al voltaje umbral de 1.0 kV.pri configurado en el relé de este extremo. Por su parte, la mínima corriente de operación es 0.183 kA.pri, cuya magnitud supera considerablemente el umbral de 0.06 kA.pri configurado en el relé.

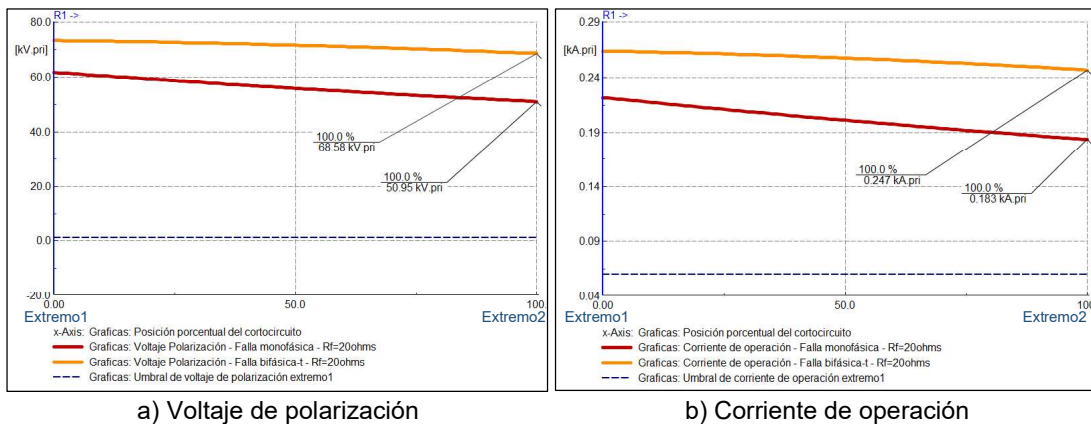


Figura 4.12. Cantidades de polarización y operación – Pol. V. de secuencia negativa

Por lo anterior, se encuentra que la sensibilidad que presenta el método es adecuada para la detección de fallas en la zona primaria. Esto, en complemento con la adecuada consistencia direccional observada, permite determinar que el funcionamiento de este método de polarización es correcto.

4.2.2 SIMULACIÓN CONJUNTA DE MÉTODOS DE AMBOS EXTREMOS

Según la sección 3.4.2, por la topología del sistema, en este ejercicio no es necesaria la simulación conjunta de métodos de polarización dentro de un esquema de teleprotección, dado que el resultado se obtiene directamente del desempeño de los métodos en cada extremo por separado, lo cual ya se analizó antes. Esto ocurre debido a que en este sistema las unidades direccionales de la L/T Limón-Méndez 138kV no enfrentan las problemáticas del uso de métodos distintos o del acoplamiento mutuo en líneas, las cuales pueden afectar al funcionamiento de dichas unidades dentro de un esquema y hacen necesaria la verificación con la simulación especificada en tal sección.

Más adelante, en el Ejercicio de aplicación II, se mostrará que, dada la topología, el resultado del funcionamiento conjunto no puede ser obtenido directamente como en este caso, por lo que es indispensable efectuar un proceso de simulación.

Por lo anterior, solamente se destaca que el uso de la polarización propia en algún extremo de la línea incide en la correcta actuación del esquema, dado que esta polarización presenta deficiencias en la consistencia direccional para cada extremo.

4.2.3 COMPARACIÓN ENTRE MÉTODOS DE POLARIZACIÓN

Según se describió en la metodología correspondiente, en esta etapa comparativa es posible que el usuario pueda identificar ventajas y desventajas en el uso de los diferentes métodos de polarización en cuanto a la efectividad de dichos métodos para definir la dirección de un conjunto considerable de cortocircuitos. En el caso de la unidad de fase, la efectividad de cada método de polarización se traduce en la dispersión de los ángulos fasoriales observados antes en cada característica direccional; mientras que, en la unidad de tierra, la efectividad se analiza predominantemente desde la perspectiva de la sensibilidad del voltaje de polarización de dichos métodos.

En este apartado se exponen los resultados correspondientes a la comparación de métodos en el extremo 1 de la línea. Los resultados relacionados al extremo 2 pueden ser consultados en el ANEXO H. Al finalizar este apartado, se indicarán, a modo de resumen, las ventajas y desventajas de los métodos de polarización simulados.

Adicionalmente, en el ANEXO I se presenta la información de los barridos de cortocircuito (exportada de la herramienta computacional a Excel) usada en esta etapa comparativa (unidad de fase) y en la siguiente etapa. En dicho anexo también pueden consultarse los elementos que fueron considerados en tales barridos de cortocircuito.

4.2.3.1 Unidad direccional de fase

La comparación de métodos de polarización se efectúa según el cálculo de las medidas de dispersión de los ángulos fasoriales del conjunto de fallas que presenta cada método.

Se debe señalar que, para tener un mayor detalle en los datos, en esta etapa, para este ejercicio de aplicación y el próximo, se consideraron cortocircuitos con resistencias de falla de 0, 5 y 10 ohmios para fallas sin contacto a tierra y 0, 5, 10, 15 y 20 ohmios para fallas a tierra. Además, a pesar de que aparentemente puede resultar útil solo analizar los resultados totales de las medidas de dispersión, también se muestran resultados por tipo de falla para poder apreciar el resultado estadístico con mayor detalle.

Para iniciar, se considera el resultado de la Figura 4.13, en donde se muestra que la polarización propia presenta el mayor rango de desfaseamiento frente a fallas asimétricas. Con respecto a la desviación estándar, esta polarización también presenta la mayor dispersión; a excepción de lo obtenido ante fallas bifásicas a tierra.

Se debe destacar que la dispersión ante fallas trifásicas es la misma en todos los métodos de polarización por las condiciones balanceadas de estas fallas.

Por otra parte, se visualiza que el método en cuadratura distingue la dirección de las fallas bifásicas aisladas con una dispersión considerablemente baja, lo que evidencia una significativa precisión del método. En otros tipos de fallas el resultado para la polarización en cuadratura y cruzada es muy similar.

Con relación a los resultados de la Figura 4.14, se evidencia que la dispersión total ante fallas externas hacia adelante tiene la misma tendencia que la dispersión ante fallas en la línea protegida, lo que justifica que en el análisis efectuado en la primera etapa haya sido suficiente con considerar fallas hacia adelante solo en la línea protegida.

Además, se destaca el hecho de que la polarización cruzada es menos dispersa en los resultados totales ante fallas hacia adelante.

En la Figura 4.14a se ha incluido en línea entrecortada roja los ángulos que comprenden la zona de operación (Lím. Forward) y no operación (Lím. Reverse), cuyos valores son iguales a 160° y 200° respectivamente. Esto con el fin de resaltar aquellos métodos con

los que es posible contener a las fallas hacia adelante dentro de la zona de operación y abarcar a las fallas hacia atrás en la zona de no operación.

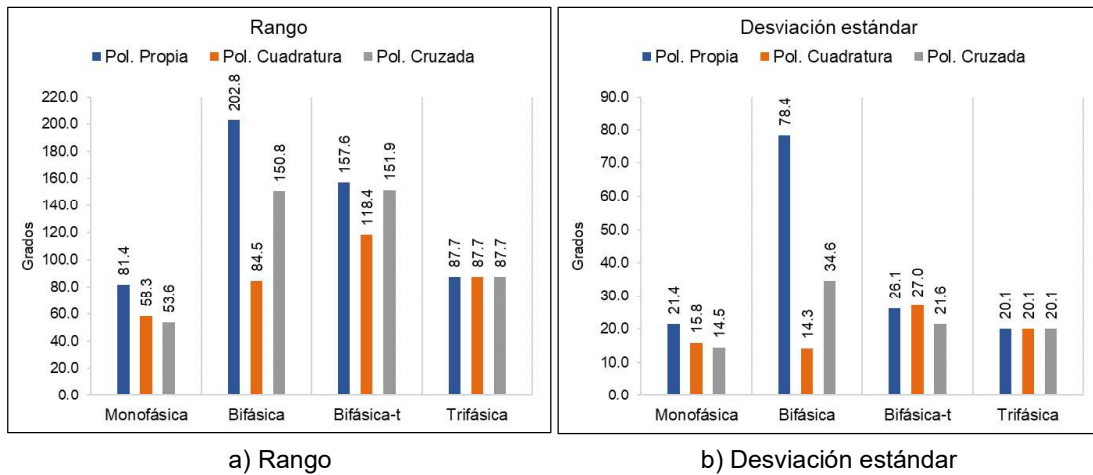


Figura 4.13. Medidas de dispersión por tipo de falla

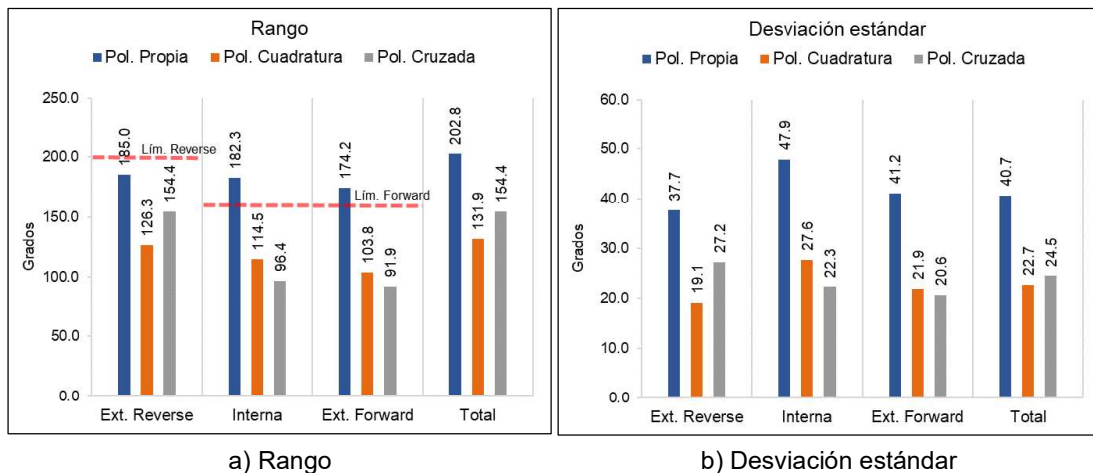


Figura 4.14. Medidas de dispersión total frente a fallas en varias posiciones

Cabe resaltar que la polarización en cuadratura es la que presenta la menor desviación estándar en el total de las fallas con una ligera diferencia con respecto a la polarización cruzada. Los resultados de la comparación de métodos en el extremo 2 tienen similitud con los obtenidos para este extremo; de manera coincidente, se encontró que la polarización en cuadratura también presenta la menor desviación en el total de fallas.

4.2.3.2 Unidad direccional de tierra

Con relación a la unidad de tierra, en este punto se presenta la comparación de los mínimos voltajes de polarización que presentan los métodos de la unidad del extremo 1

considerando fallas en la línea protegida. En este sentido, el diagrama de la Figura 4.15 permite apreciar dichos voltajes. En este resultado es evidente que el mínimo voltaje de secuencia cero, cuyo valor es de 58.92 kV.pri, supera el mínimo voltaje de secuencia negativa, cuyo valor es de 50.95 kV.pri, por lo tanto, hablando en términos de sensibilidad de la unidad direccional, la polarización de secuencia cero tiene un mejor desempeño.

Cabe resaltar que los resultados en el extremo 2 mostraron similitud con los de este extremo de la línea; de este modo, se determinó que la polarización de secuencia cero también presenta mayor sensibilidad con respecto a la polarización de secuencia negativa.

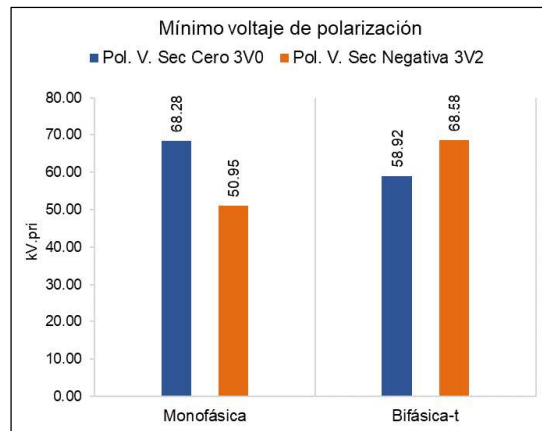


Figura 4.15. Mínimo voltaje de polarización frente a fallas internas

4.2.3.3 Ventajas y desventajas de los métodos de polarización

En la Tabla 4.4 y en la Tabla 4.5 se resumen comparativamente las ventajas y desventajas de los métodos de polarización simulados. Es preciso señalar que este resumen contempla los resultados obtenidos en el extremo 1 y 2, los cuales presentan gran similitud.

Tabla 4.4. Resumen de ventajas y desventajas de los métodos de polarización de fase

Variable	Falla	Pol. Propia	Pol. Cuadratura	Pol. Cruzada
Funcionamiento	1 ϕ t	✓	✓	✓
	2 ϕ	X	✓	✓
	2 ϕ t	✓	✓	✓
	3 ϕ	✓	✓	✓
Dispersión	1 ϕ t	Media	Baja	Baja
	2 ϕ	Alta	Baja	Media
	2 ϕ t	Alta	Media	Media
	3 ϕ	Media	Media	Media
	Total	Alta	Baja	Media

✓ = Funcionamiento incorrecto

X = Funcionamiento correcto

Tabla 4.5. Resumen de ventajas y desventajas de los métodos de polarización de tierra

Variable	Falla	Pol. Voltaje de Sec. Cero	Pol. Voltaje de Sec. Negativa
Funcionamiento	$1\phi t$	✓	✓
	$2\phi t$	✓	✓
V. Polarización mínimo		Mayor	Menor
Dispersión total		Baja	Baja

4.2.4 DETERMINACIÓN DE MÉTODOS DE POLARIZACIÓN Y SUS AJUSTES MÁS ADECUADOS

A continuación, se presentan los resultados de la selección de los métodos de polarización más adecuados para las unidades direccionales de la L/T Limón-Méndez 138kV y los resultados obtenidos del cálculo de sus ajustes.

En el ANEXO I el lector puede consultar el detalle de los barridos de cortocircuito considerados para la obtención de los términos de la función objetivo utilizada en esta etapa, de acuerdo con lo explicado en la sección 3.4.4.2.

4.2.4.1 Unidad direccional de fase

La información de las medidas de dispersión analizadas antes permitió seleccionar a la polarización en cuadratura como la más adecuada en ambos extremos de la línea, debido a que ésta presenta la desviación estándar más baja en todo el conjunto de datos con respecto a los otros métodos y, además, presenta rangos ante fallas hacia adelante y hacia atrás lo suficientemente bajos como para satisfacer un desempeño confiable.

Por lo anterior, se desarrolló el proceso de obtención de los ajustes de un método de polarización descrito en la sección 3.4.4.2 considerando a la polarización en cuadratura en la unidad direccional de fase de ambos extremos.

En la Tabla 4.6 se muestra el valor resultante del problema de optimización, el cual corresponde al valor del *RCA* óptimo. Además, se muestra el ajuste de los ángulos de los límites de dirección, los cuales fueron calculados a partir del valor del *RCA* considerando un *ROA* igual a 80° según recomienda el fabricante ABB [19].

Tabla 4.6. Ajustes del método de polarización en cuadratura en cada extremo

Posición del relé	RCA inicial	RCA óptimo	α	β
Extremo 1	30°	28.20°	108.20°	-51.80°
Extremo 2	30°	33.23°	113.17°	-46.83°

En cierto modo, estos valores no presentan una variación drástica con respecto a los usados por defecto en esta polarización (ver Tabla 4.2), sin embargo, responden al análisis técnico efectuado, el cual justifica su uso para las protecciones de la línea considerada.

4.2.4.2 Unidad direccional de tierra

Los resultados de la unidad de tierra analizados antes permitieron seleccionar a la polarización con voltaje de secuencia cero como la más adecuada, dado que presentó mayor sensibilidad que la polarización con voltaje de secuencia negativa. Además, se debe resaltar que este resultado es similar al obtenido con relación al otro extremo de la línea.

Por lo anterior, se obtuvieron los ajustes de la polarización con voltaje de secuencia cero, los cuales se exponen en la Tabla 4.7. Es preciso indicar que la obtención de los ángulos α y β se efectuó considerando un ROA de 72° de acuerdo con lo recomendado por el fabricante ABB [19].

Tabla 4.7. Ajustes del método de polarización con voltaje de secuencia cero

Posición del relé	RCA inicial	RCA óptimo	α	β
Extremo 1	-60°	-77.27°	-5.27°	-149.27°
Extremo 2	-60°	-75.11°	-3.11°	-147.11°

A manera de ejemplo, en la Figura 4.16 se muestra la característica direccional de la polarización de secuencia cero con distintos ajustes frente a una porción de las fallas consideradas en esta etapa. Los nuevos ajustes suponen un cambio significativo con respecto a los ajustes empleados por defecto (Tabla 4.3) y permiten posicionar a la MTL más cerca del conjunto de fallas o, visto de otro modo, permiten posicionar a los límites más lejos de las fallas incrementando la operación confiable de la unidad direccional.

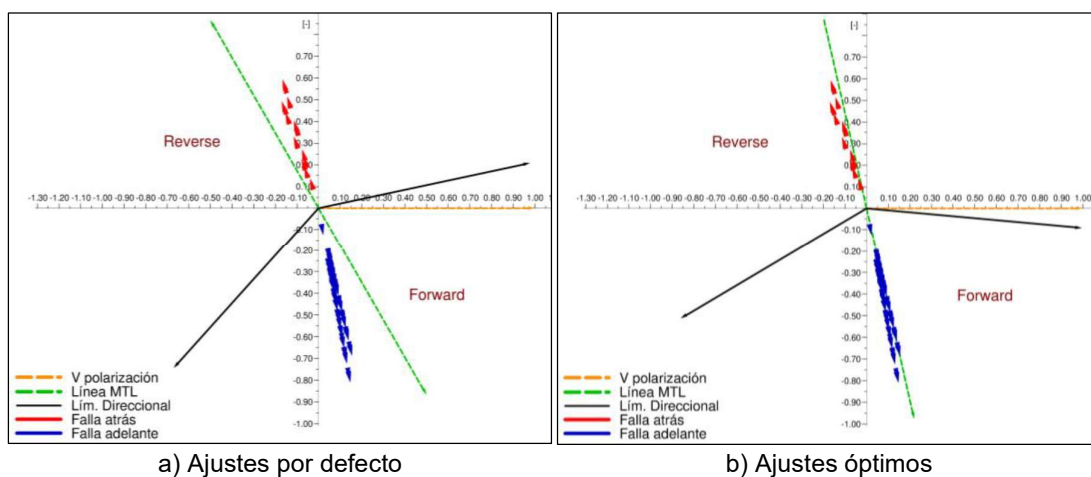


Figura 4.16. Característica direccional de la polarización de secuencia cero – Extremo 1

4.3. EJERCICIO DE APLICACIÓN II – LÍNEA DE DOBLE CIRCUITO

El presente trabajo continuó con la aplicación de la metodología de estudio, esta vez, en torno a las unidades direccionales del circuito 1 de la L/T Molino-Zhoray 230kV de doble circuito, cuya modelación se muestra en la Figura 4.17.

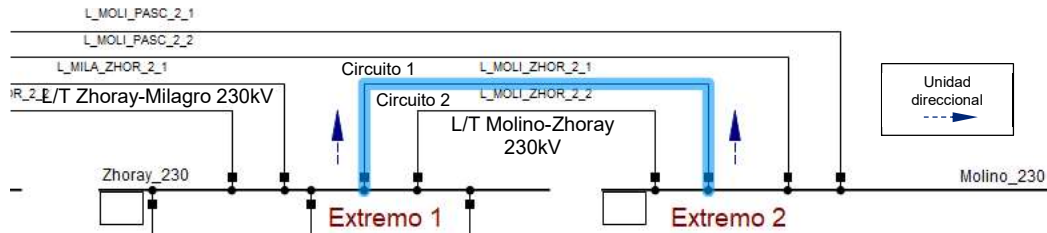


Figura 4.17. L/T Molino-Zhoray 230kV dentro de la modelación de la zona Molino-Milagro

Cabe mencionar que en las etapas de simulación independiente y conjunta de métodos de polarización se presenta un resumen relevante de resultados. Los resultados adicionales obtenidos en estas etapas pueden ser consultados en el ANEXO J.

4.3.1 SIMULACIÓN INDEPENDIENTE DE MÉTODOS EN CADA EXTREMO

A continuación, se exponen resultados de la simulación independiente de métodos de polarización según la primera etapa de la metodología de estudio. Los resultados corresponden a la simulación de cada método en el extremo 1 del circuito 1 de la L/T Molino-Zhoray 230kV frente a fallas en dicho circuito y en la L/T Zhoray-Milagro 230kV; en estos elementos las fallas tienen una dirección real hacia adelante y hacia atrás respectivamente. Los resultados corresponden al escenario de máximas corrientes de cortocircuito.

Es preciso indicar que los resultados relacionados al relé del extremo 2 de la línea mostraron gran similitud con los obtenidos con relación al extremo 1, razón por la cual también se optó por presentar a estos en el ANEXO J. En dicho anexo también se presentan los resultados obtenidos en forma textual por la herramienta desarrollada.

4.3.1.1 Unidad direccional de fase

4.3.1.1.1 Polarización propia

En la Figura 4.18 se expone la característica direccional de este método, cuyo resultado ilustra los distintos desfases que toma la corriente de cortocircuito y, de manera atípica, es evidente que una porción considerable de cortocircuitos se posiciona de forma

inconsistente. Varias fallas bifásicas hacia adelante se posicionan fuera de la zona de operación. Además, existen otros tipos de falla que se posicionan cerca de los límites.

Con respecto a las fallas hacia atrás, existe otro defecto en la polarización, puesto que los desfases son amplios y se acercan a los límites; de manera particular, se evidencia que el desfase es tal que un fasor se localiza erróneamente en la zona de operación.

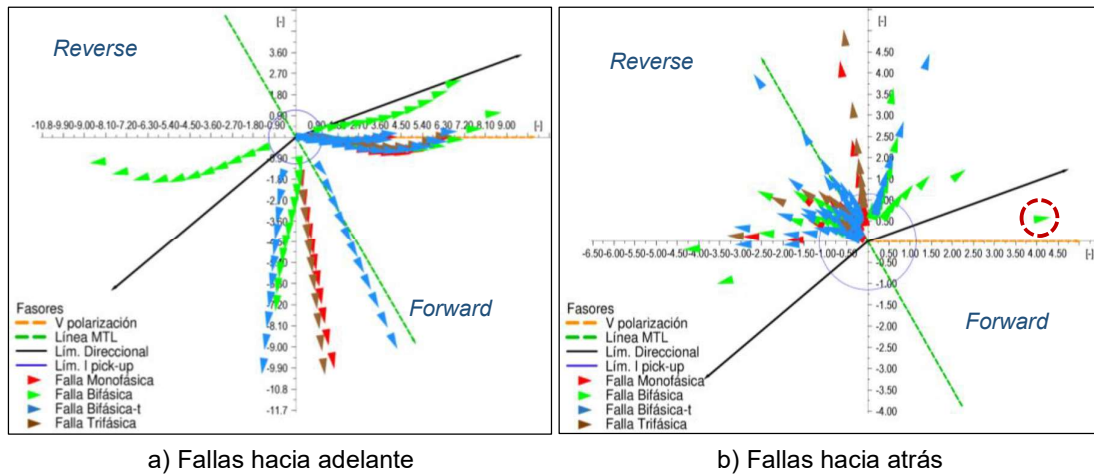


Figura 4.18. Característica direccional de la polarización propia

Con respecto al diagrama de ángulo de torque – distancia de la Figura 4.19, previo a su exposición, es necesario indicar que la región que aparentemente muestra a las curvas como incompletas tiene relación con las fallas que no superan la I_{TAP} y, considerando que dichas fallas no son relevantes para el análisis, su ángulo correspondiente no es graficado, razón por la cual se observan esas particularidades en los diagramas.

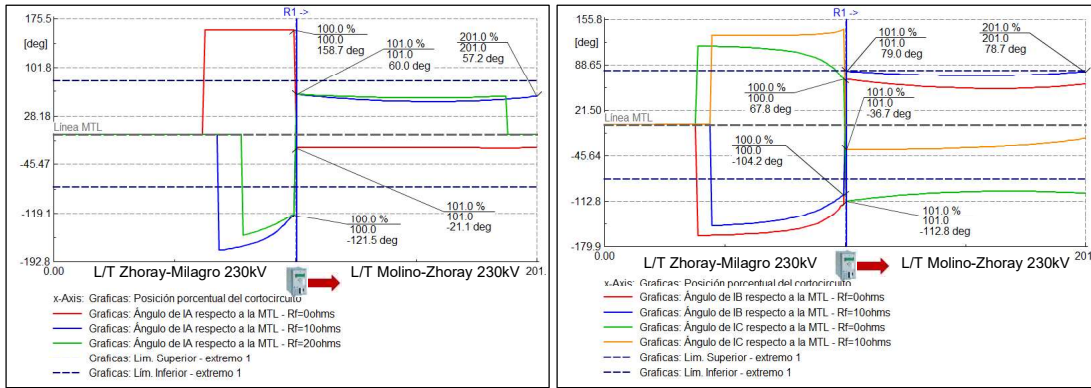
El diagrama indicado permite observar las inconsistencias a lo largo del barrido bifásico desde otra perspectiva. En este caso particular, es evidente que ocurren dos situaciones indeseables ante fallas hacia adelante: la primera, que las corrientes de la fase C no son detectadas dentro de la zona de operación y, la segunda, que las corrientes de la fase B se posicionan muy cerca de los límites.

Cabe mencionar que el desfase cambia considerablemente frente a altas resistencias de falla en el trayecto del barrido de cortocircuito y, de manera general, a medida que las fallas se acercan a la posición del relé, los ángulos se alejan más de la MTL positiva frente a fallas hacia adelante y se acercan a la zona de operación cuando se trata de fallas hacia atrás.

Por lo anterior, ante fallas hacia adelante, el máximo desfase es de -112.8° , de modo que los fasores exceden la región de la zona de operación; por otro lado, el desfase

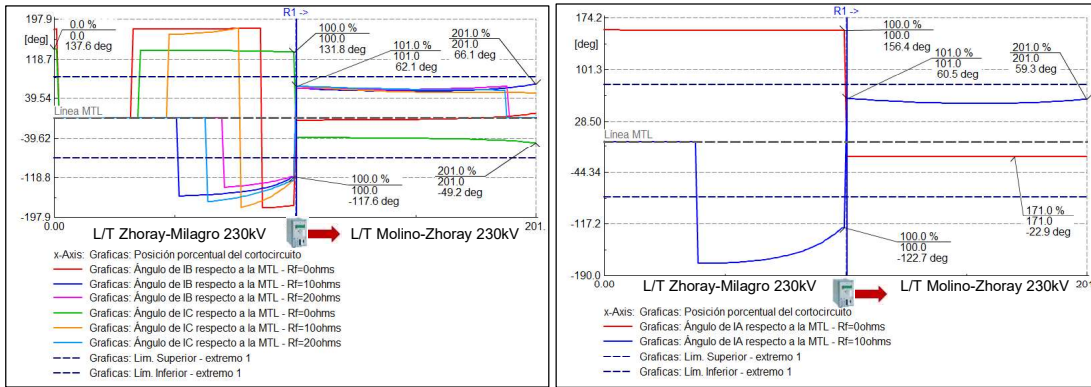
más próximo a la zona de operación frente a fallas hacia atrás es de 67.8° , cuyo fasor correspondiente se encuentra dentro de la zona de operación.

Los resultados obtenidos permiten determinar que el funcionamiento de este método es incorrecto, dado que la fiabilidad y seguridad se ven afectadas por fallas en la línea que no son detectadas y por fallas hacia atrás detectadas dentro de la zona de operación.



a) Fallas monofásicas

b) Fallas bifásicas aisladas



c) Fallas bifásicas a tierra

d) Fallas trifásicas

Figura 4.19. Diagrama de ángulo de torque – distancia con la polarización propia

4.3.1.1.2 Polarización en cuadratura

En relación con la Figura 4.20, es posible apreciar que existe consistencia en la definición de la dirección de todas las fallas, dada la correcta posición relativa que toman los fasores de corriente. En este sentido, el resultado frente a fallas hacia adelante muestra que los fasores presentan desfases bajos con respecto a la MTL positiva. En el caso de las fallas bifásicas a tierra es en el que existe el mayor desfase. Por otra parte, el resultado ante fallas hacia atrás ilustra que los cortocircuitos tienden a acercarse a la MTL negativa y que aquellos fasores más alejados no son casos críticos.

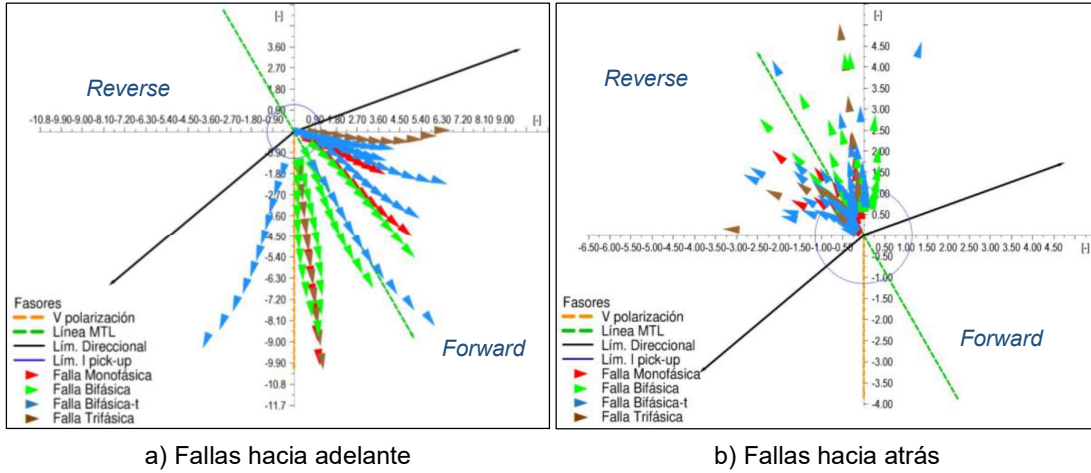
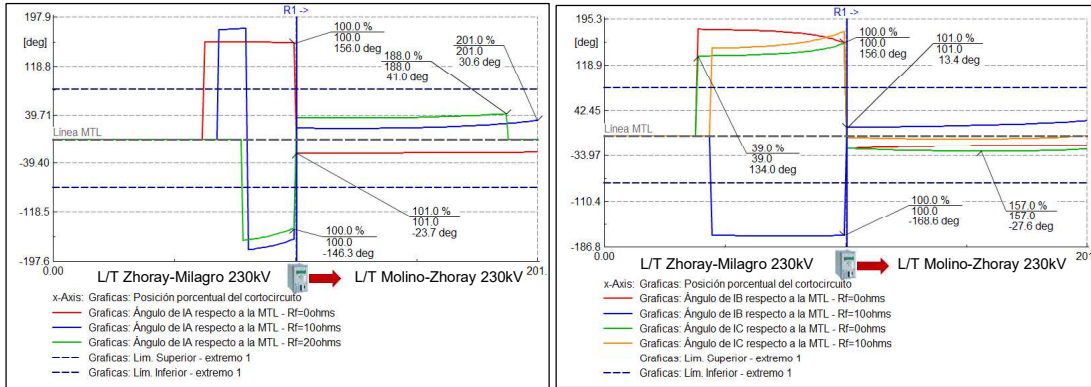
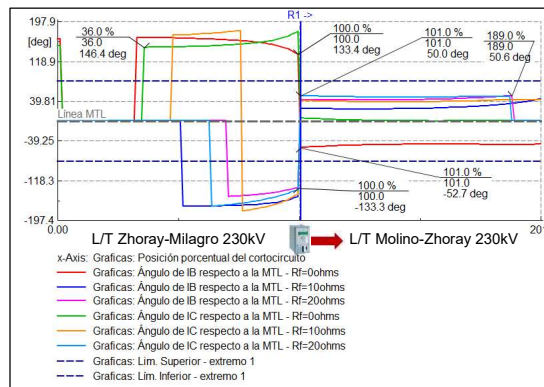


Figura 4.20. Característica direccional de la polarización en cuadratura



a) Fallas monofásicas

b) Fallas bifásicas aisladas



c) Fallas bifásicas a tierra

Figura 4.21. Diagrama de ángulo de torque – distancia con la polarización en cuadratura

Desde la perspectiva del diagrama de la Figura 4.21, se observa que la influencia de la resistencia de falla es considerable en las distintas familias de curvas del barrido de cortocircuito. Adicionalmente, se aprecia que generalmente los desfases críticos

ocurren con relación a la cercanía del cortocircuito a la posición del relé. De acuerdo con esto, el desfase máximo frente a fallas hacia adelante es de -52.7° ; mientras que, ante fallas hacia atrás, el fasor más próximo a los límites se posiciona a 133.3° .

Con los resultados anteriores es posible afirmar que esta técnica de polarización exhibe un funcionamiento satisfactorio.

4.3.1.1.3 Polarización cruzada

En la característica direccional de la Figura 4.22 se observa que este método de polarización funciona consistentemente frente a fallas hacia adelante y hacia atrás. En cuanto a las fallas hacia adelante, existe un conjunto apreciable de cortocircuitos bifásicos que se localiza relativamente próximo a los límites de dirección.

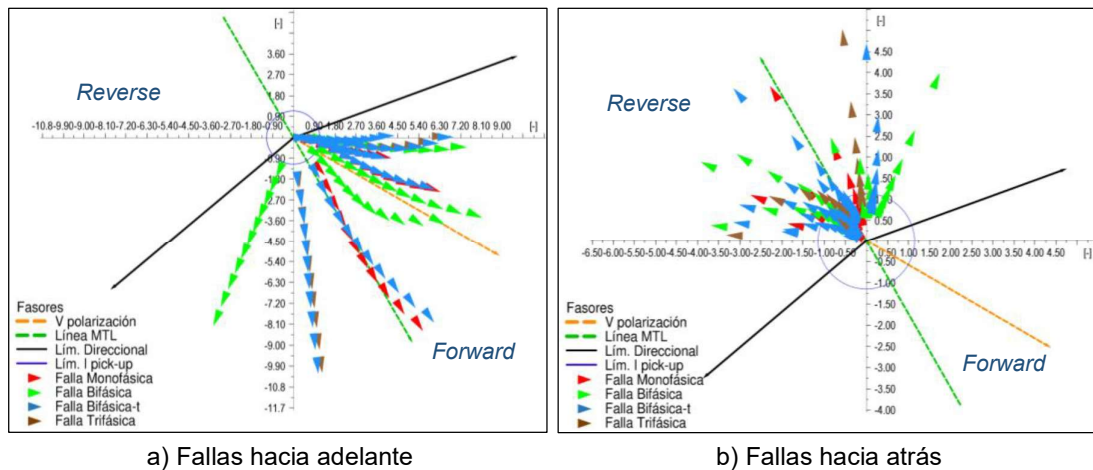
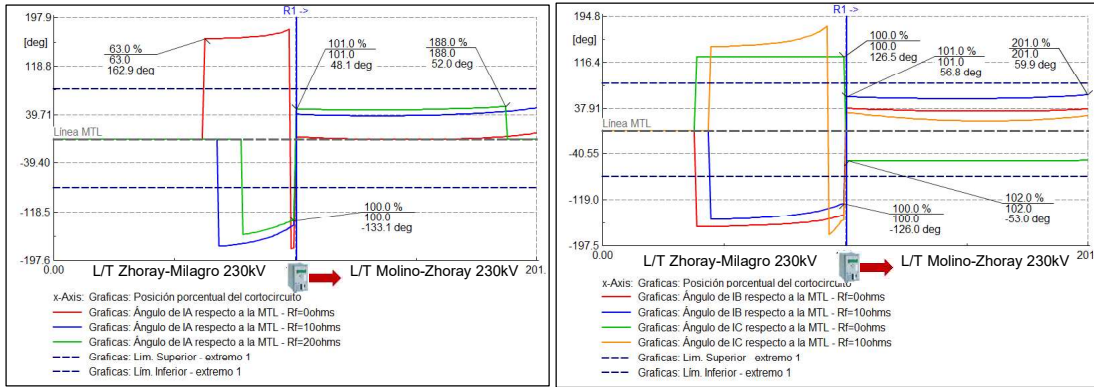


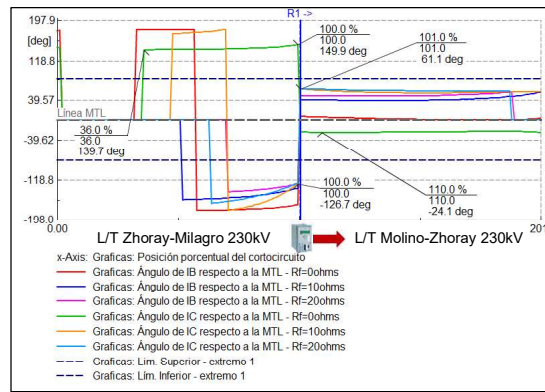
Figura 4.22. Característica direccional de la polarización cruzada

Por otra parte, a partir del diagrama expuesto en la Figura 4.23, se observa que la resistencia de falla tiene un efecto considerable en las distintas familias de curvas. Además, se evidencia que los desfases más significativos ocurren a medida que los cortocircuitos se acercan a la posición del relé. En este sentido, se aprecia que el máximo desfase frente a fallas hacia adelante es de 61.1° , mientras que la falla hacia atrás más cercana a la zona de operación se localiza a -126° con respecto a la MTL positiva.



a) Fallas monofásicas

b) Fallas bifásicas aisladas



c) Fallas bifásicas a tierra

Figura 4.23. Diagrama de ángulo de torque – distancia con la polarización cruzada

4.3.1.2 Unidad direccional de tierra

4.3.1.2.1 Polarización con voltaje de secuencia cero

La Figura 4.24 muestra la característica direccional de este método, a partir de la cual se evidencia la adecuada consistencia direccional ante fallas hacia adelante y hacia atrás. El desfaseamiento de las corrientes es aproximadamente el mismo en cada caso y no constituye un caso crítico de cercanía a los límites.

Con respecto al voltaje de polarización, en la Figura 4.25 se expone la magnitud de dicho voltaje frente a un barrido de cortocircuito con una alta resistencia de falla (20Ω). A partir de esto, se identifica que el mínimo voltaje es de 17.22 kV.pri, el cual supera considerablemente el umbral de 1.0 kV.pri establecido en el relé de esta posición.

Sobre la base de estos resultados, se determina que el funcionamiento de este método de polarización es correcto.

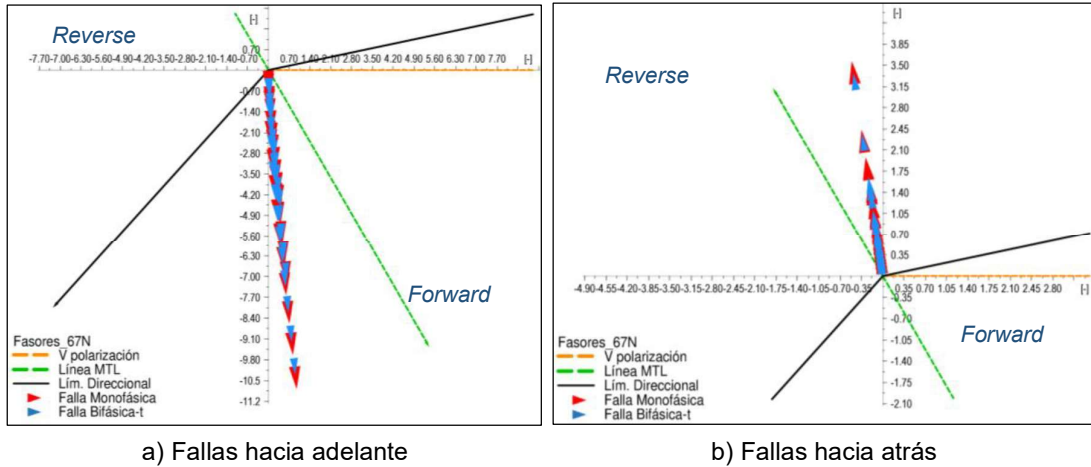


Figura 4.24. Característica direccional de la polarización de secuencia cero

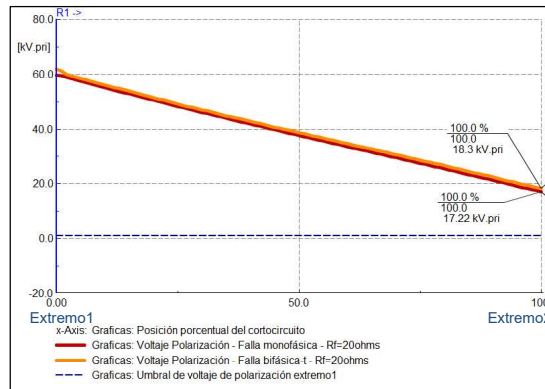


Figura 4.25. Magnitud del voltaje de polarización de secuencia cero

4.3.1.2.2 Polarización con voltaje de secuencia negativa

En la Figura 4.26 se identifica que, en la característica direccional de este método de polarización, la localización de los fasores de las corrientes de falla es consistente con la dirección real de dichas fallas. El conjunto de fallas presenta un desfase aproximadamente igual frente a fallas hacia adelante y hacia atrás. En este sentido, el ángulo que tienen los fasores en cada caso no representa una situación crítica de cercanía a los límites.

Por otro lado, en el resultado de la Figura 4.27, se determina un mínimo voltaje de polarización de 46.55 kV.pri y una mínima corriente de operación de 0.8 kA.pri, los cuales exceden de manera considerable sus respectivos umbrales de 1.0 kV.pri y 0.06 kA.pri. De esta manera, los resultados demuestran que el funcionamiento de este método de polarización es correcto.

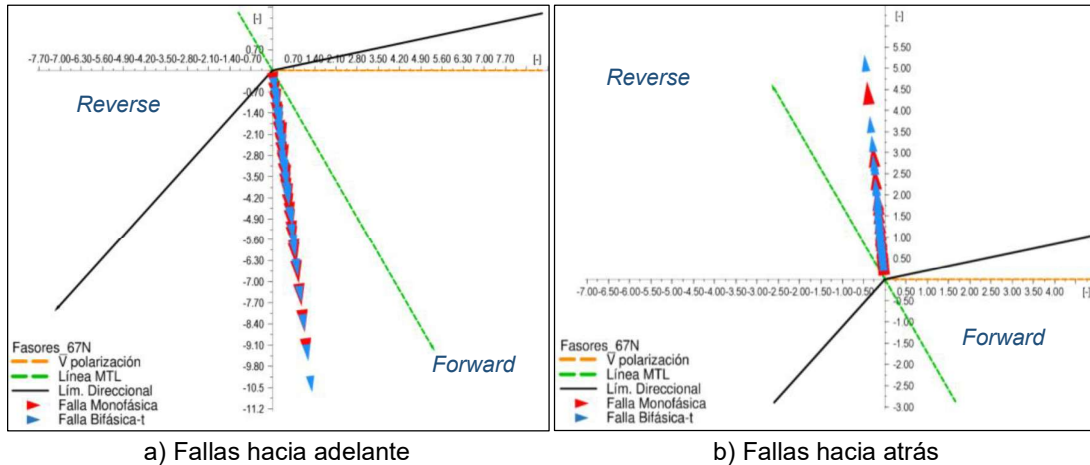


Figura 4.26. Característica direccional de la polarización de secuencia negativa

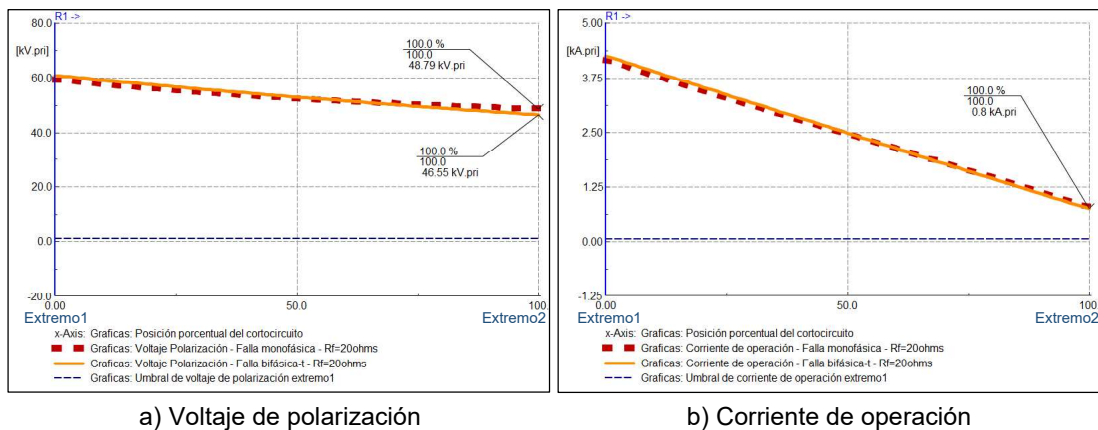


Figura 4.27. Cantidades de polarización y operación de secuencia negativa

4.3.2 SIMULACIÓN CONJUNTA DE MÉTODOS DE AMBOS EXTREMOS

Según la sección 3.4.2, dada la topología en anillo en la que se ubica la L/T Molino-Zhoray 230kV y, considerando que se trata de una línea de doble circuito, las unidades direccionales de las protecciones del esquema de teleprotección de esta línea son vulnerables a presentar inconsistencias si se emplean diferentes métodos de polarización en los extremos. Por otro lado, debido a que los circuitos paralelos de la línea tienen ambos extremos (barras) en común, las unidades direccionales se encuentran exentas de problemas en su funcionamiento por el efecto del acoplamiento mutuo en líneas.

Por lo anterior, en esta parte se presentan simulaciones considerando la actuación conjunta de los métodos de polarización en ambos extremos de la línea para examinar si existen problemas con el uso de diferentes métodos. Como se expuso en la sección 3.4.2, es necesario que se efectúen barridos de cortocircuito externos al circuito analizado para

encontrar la existencia del problema en las cercanías en las que ocurre un cambio de la dirección de las corrientes que fluyen por dicho circuito.

En este sentido, se determinaron previamente los puntos de cambio de dirección de la corriente de falla. Al tomar como referencia al circuito 1 de la L/T Molino-Zhoray 230kV, se encontraron cambios de dirección ante fallas en el circuito 2 de esta línea y en la L/T Molino-Pascuales 230kV, según se resalta en la Figura 4.28.

Sin embargo, para el estudio solo se consideran fallas en el circuito 2 de la L/T Molino-Zhoray 230kV, puesto que las fallas hacia atrás en la L/T Molino-Pascuales 230kV no provocan actuación de la unidad de sobrecorriente de las protecciones consideradas.

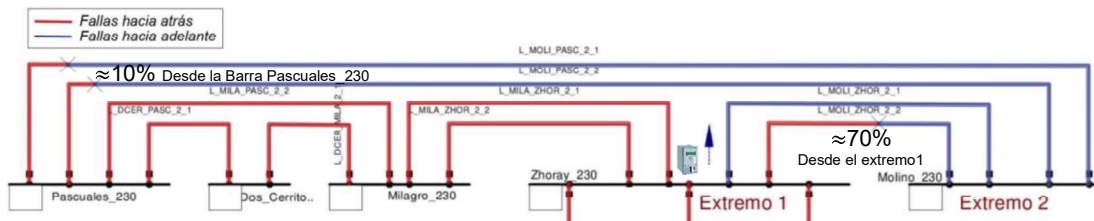


Figura 4.28. Dirección de la corriente de falla con respecto a un relé en el extremo 1

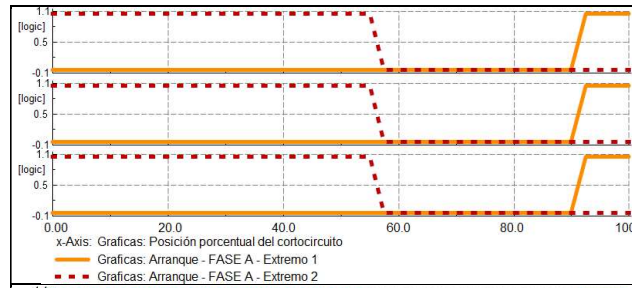
4.3.2.1 Esquema de las unidades de fase

En el diagrama de la Figura 4.29 se presenta el resultado del arranque de los relés de ambos extremos en función de un barrido de fallas en el circuito 2 de la L/T Molino-Zhoray 230kV (siendo 0% el Extremo 1 o Barra Zhoray 230kV). Como se describió en la metodología, la forma para determinar problemas en el funcionamiento conjunto de métodos de polarización es examinar si existe traslape en el arranque de las protecciones de ambos extremos cuando en éstas se emplea alguna combinación de métodos en particular; esto por cada fase, es decir, si se presenta dicho traslape entre el arranque de la fase A del extremo 1 con la fase A del extremo 2 y así con las fases B y C.

De esta manera, se determinó que la única posibilidad de que exista traslape ocurre en la Fase C ante fallas bifásicas y con el uso de la polarización propia en alguno de los extremos (ver Figura 4.29c). Esto es una consecuencia más de las inconsistencias presentadas antes en el funcionamiento de dicho método, por lo que no constituye en sí el problema ante el cambio de la dirección de la corriente.

Con el objeto de resaltar el traslape mencionado, en la Figura 4.30 se muestra el uso de la polarización propia en el extremo 1 (señal amarilla) y de la polarización en cuadratura en el extremo 2 (señal roja). El traslape ocurre desde el 0% hasta el 52.5% de la línea.

a) Falla Monofásica FASE A

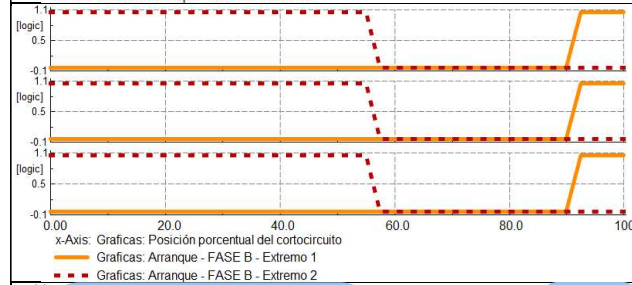


Pol. Propia

Pol. Cuadratura

Pol. Cruzada

b) Falla bifásica aislada FASE B

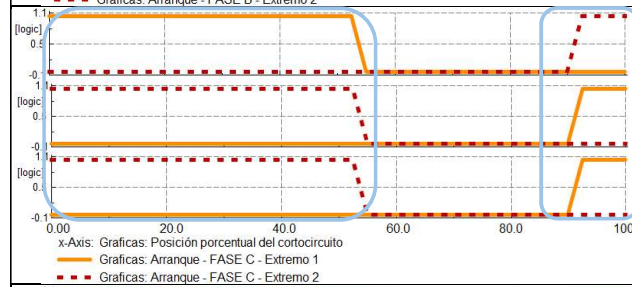


Pol. Propia

Pol. Cuadratura

Pol. Cruzada

c) Falla bifásica aislada FASE C

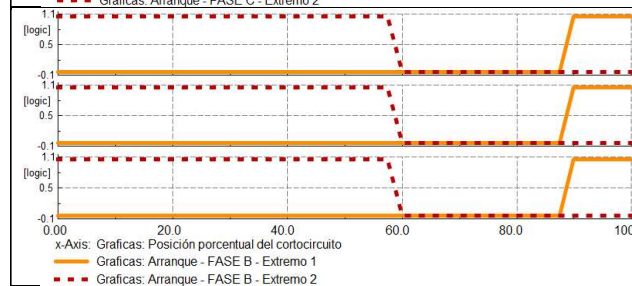


Pol. Propia

Pol. Cuadratura

Pol. Cruzada

d) Falla bifásica a tierra FASE B

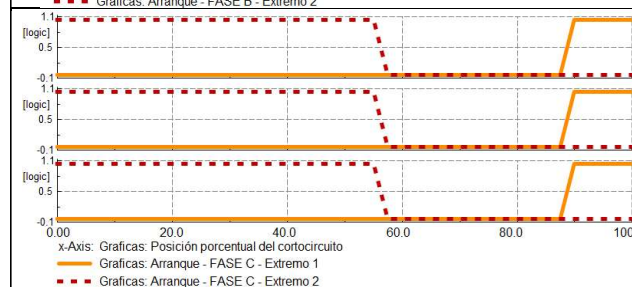


Pol. Propia

Pol. Cuadratura

Pol. Cruzada

e) Falla bifásica a tierra FASE C



Pol. Propia

Pol. Cuadratura

Pol. Cruzada

f) Falla trifásica

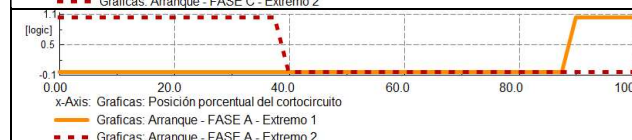


Figura 4.29. Arranque-distancia en el esquema de la unidad de fase ante un barrido en el circuito 2 de la L/T Molino-Zhoray 230kV (Máx. Corrientes de cortocircuito)

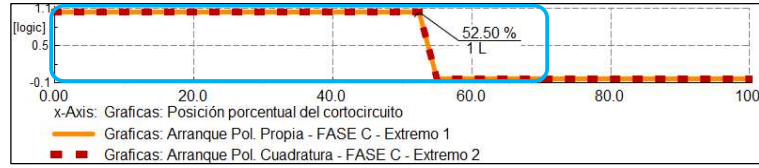


Figura 4.30. Traslape con el uso de métodos de polarización distintos en los extremos

Considerando solo a la polarización en cuadratura y cruzada es posible afirmar que el uso de diferentes métodos en los extremos si permite un funcionamiento correcto del esquema.

4.3.2.2 Esquema de las unidades de tierra

En la Figura 4.31 se presenta el resultado de un barrido monofásico en el circuito 2 de la L/T Molino-Zhoray 230kV (siendo 0% el Extremo 1). Esta vez, se grafica el arranque ante diferentes métodos en los extremos. Se aprecia que la polarización de secuencia cero en el extremo 1 y la polarización de secuencia negativa en el extremo 2 no provoca un traslaje; no obstante, con la polarización de secuencia negativa en el extremo 1 y la polarización de secuencia cero en el extremo 2 si existe traslaje ante fallas que ocurren desde el 65% hasta el 72.5% y, por lo tanto, existe un funcionamiento inconsistente en el esquema.

Se debe indicar que para las unidades de fase y tierra se efectuaron simulaciones sin resistencias de falla, puesto que esto supone el peor de los casos porque el alcance de la función de sobrecorriente es mayor y existe mayor posibilidad de un traslaje.

Los resultados obtenidos en otros escenarios, presentados en el ANEXO J, tienen gran parecido con los mostrados en esta parte.

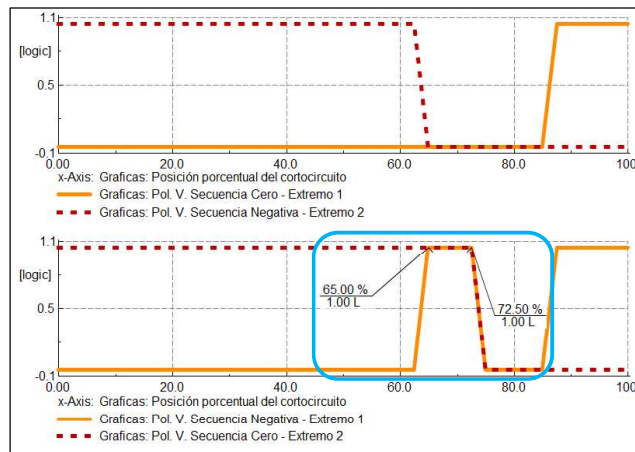


Figura 4.31. Arranque-distancia de las unidades de tierra ante un barrido en el circuito 2 de la L/T Molino-Zhoray 230kV (Mín. Corrientes de cortocircuito)

4.3.3 COMPARACIÓN ENTRE MÉTODOS DE POLARIZACIÓN

En este apartado se exponen los resultados de la comparación entre métodos de polarización de las unidades de fase y tierra del extremo 1. Los resultados de la comparación para el extremo 2 de la línea pueden ser consultados en el ANEXO K.

Por otro lado, en el ANEXO L se presenta la información de los barridos de cortocircuito (exportada de la herramienta computacional a Excel) para desarrollar esta etapa comparativa (unidad de fase) y la siguiente etapa. En dicho anexo también pueden consultarse los elementos considerados en tales barridos.

4.3.3.1 Unidad direccional de fase

En la Figura 4.32 se muestran las medidas de dispersión por tipo de falla. Algunas particularidades son: por una parte, la mayor dispersión de la polarización propia frente a todos los casos de fallas asimétricas y, por otra parte, la gran similitud de la dispersión total de la polarización en cuadratura con respecto a la polarización cruzada. Con relación a estos dos últimos métodos, se observa que, ante fallas bifásicas aisladas, la polarización en cuadratura tiene una dispersión significativamente menor.

En lo que respecta a la Figura 4.33, se aprecia que los resultados obtenidos ante fallas externas hacia adelante tienen una tendencia similar que los obtenidos ante fallas internas. Además, las polarizaciones en cuadratura y cruzada reflejan resultados similares, aunque, en definitiva, el método en cuadratura presenta la menor dispersión total.

Para terminar, se debe indicar que el resultado anterior fue coincidente con el obtenido en el extremo 2, en el que la polarización en cuadratura también presentó la menor dispersión.

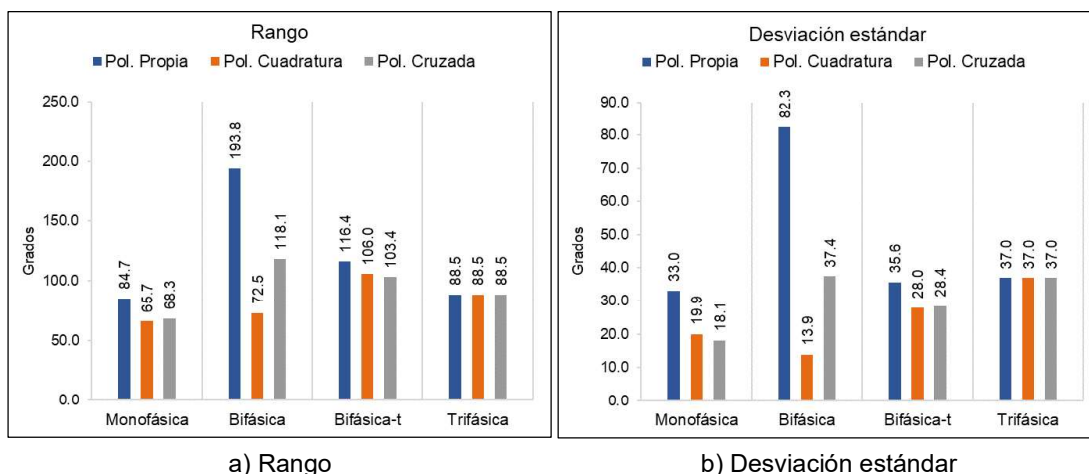


Figura 4.32. Medidas de dispersión por tipo de falla

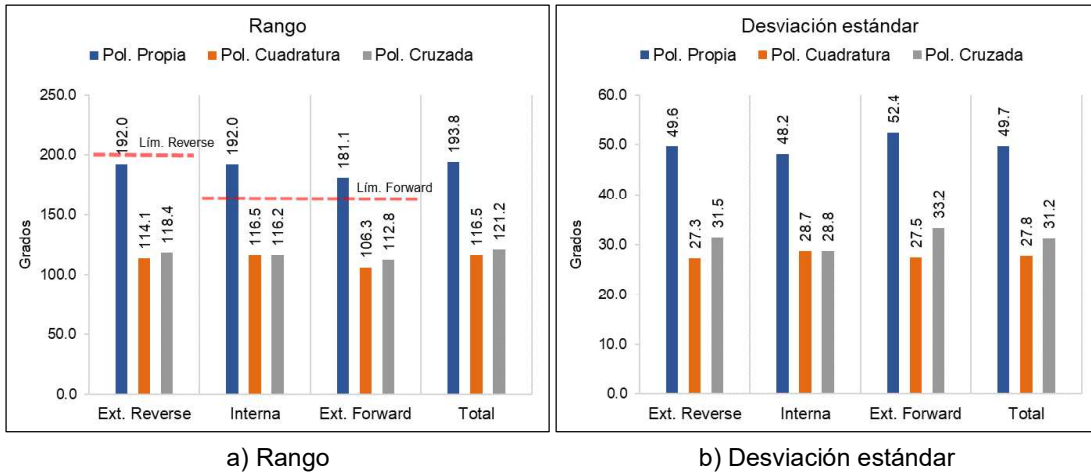


Figura 4.33. Medidas de dispersión total frente a fallas en varias posiciones

4.3.3.2 Unidad direccional de tierra

Con relación a la unidad de tierra, los mínimos voltajes de polarización obtenidos ante fallas internas, mostrados en la Figura 4.34, permiten apreciar que la polarización de secuencia negativa tiene un mayor voltaje de polarización en los dos tipos de falla, es decir, que la sensibilidad que provee dicha polarización es mayor en comparación con la polarización de secuencia cero. Además, con respecto a los resultados del extremo 2 de la línea, la polarización de secuencia negativa también presentó la mayor sensibilidad.

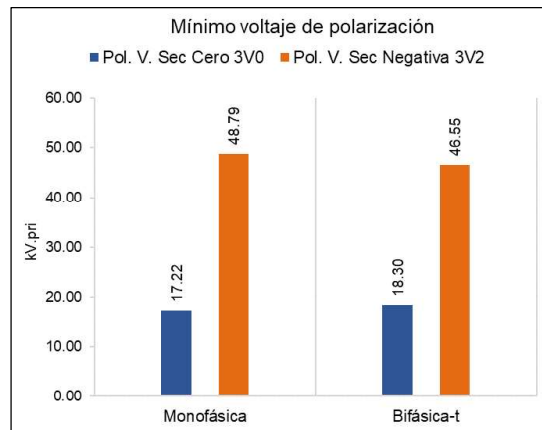


Figura 4.34. Mínimo voltaje de polarización ante fallas internas

4.3.3.3 Ventajas y desventajas de los métodos de polarización

En la Tabla 4.8 y Tabla 4.9 se resumen las ventajas y desventajas de los métodos de polarización simulados. El resumen contempla los resultados obtenidos tanto en el extremo 1 como en el extremo 2, los cuales presentan gran similitud.

Tabla 4.8. Resumen de ventajas y desventajas de los métodos de polarización de fase

Variable	Falla	Pol. Propia	Pol. Cuadratura	Pol. Cruzada
Funcionamiento (individual y en un esquema)	1 ϕ t	✓	✓	✓
	2 ϕ	X	✓	✓
	2 ϕ t	✓	✓	✓
	3 ϕ	✓	✓	✓
Dispersión	1 ϕ t	Media	Media	Media
	2 ϕ	Alta	Baja	Media
	2 ϕ t	Alta	Media	Media
	3 ϕ	Media	Media	Media
Total		Alta	Baja	Media

Tabla 4.9. Resumen de ventajas y desventajas de los métodos de polarización de tierra

Variable	Falla	Pol. Voltaje de Sec. Cero	Pol. Voltaje de Sec. Negativa
Funcionamiento	1 ϕ t	✓	✓
	2 ϕ t	✓	✓
Funcionamiento en un esquema (diferente método en los extremos)	✓	→ Extremo 1	→ Extremo 2
V. Polarización mínimo	X	→ Extremo 2	→ Extremo 1
Dispersión total		Menor Baja	Mayor Baja

4.3.4 DETERMINACIÓN DE MÉTODOS DE POLARIZACIÓN Y SUS AJUSTES MÁS ADECUADOS

4.3.4.1 Unidad direccional de fase

Con relación a la información previa de la comparación de métodos, la polarización en cuadratura presenta la desviación estándar más baja y, además, satisface la condición de presentar un rango lo suficientemente bajo para garantizar la confiabilidad de su funcionamiento. En el extremo 2 se obtuvo coincidentemente un resultado similar.

Cabe resaltar que, debido a la topología del sistema, según se mencionó en la sección 3.4.4, para la selección del método más adecuado en cada extremo se debe contrastar el resultado del párrafo anterior con el obtenido en la etapa de simulación conjunta de métodos, dado que puede darse el caso de que no sea posible establecer cierta combinación de métodos por acarrear riesgos a la confiabilidad del esquema de protección. Sin embargo, como en este caso se determinó como más apta a la polarización en cuadratura en ambos extremos, no hay ninguna restricción o afectación a la confiabilidad del esquema, puesto que el problema solo está ligado al uso de diferentes métodos.

Por lo anterior, se consideró a la polarización en cuadratura para el proceso de obtención de sus ángulos de dirección, a partir de lo cual se obtuvieron los valores expuestos en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10. Ajustes del método de polarización en cuadratura

Posición del relé	RCA inicial	RCA óptimo	α	β
Extremo 1	30°	32.06°	112.06°	-47.94°
Extremo 2	30°	32.53°	112.53°	-47.47°

4.3.4.2 Unidad direccional de tierra

El resultado comparativo previo en la unidad de tierra mostró que la polarización de secuencia negativa es la que presenta la mayor sensibilidad en ambos extremos de la línea. Además, no existe afectación a la confiabilidad del esquema por tratarse del mismo método en ambos extremos, por lo que es factible el uso de esta polarización.

Al considerar este método en el proceso de obtención de sus ángulos de dirección, se obtuvo el conjunto de ajustes mostrado en la Tabla 4.11. Evidentemente, la variación es significativa con respecto a los valores por defecto (ver Tabla 4.3). A manera de ejemplo, en la Figura 4.35 se expone la comparación con los nuevos ajustes para el extremo 1.

Tabla 4.11. Ajustes del método de polarización con voltaje de secuencia negativa

Posición del relé	RCA inicial	RCA óptimo	α	β
Extremo 1	-60°	-83.27°	-11.27°	-155.27°
Extremo 2	-60°	-84.08°	-12.08°	-156.08°

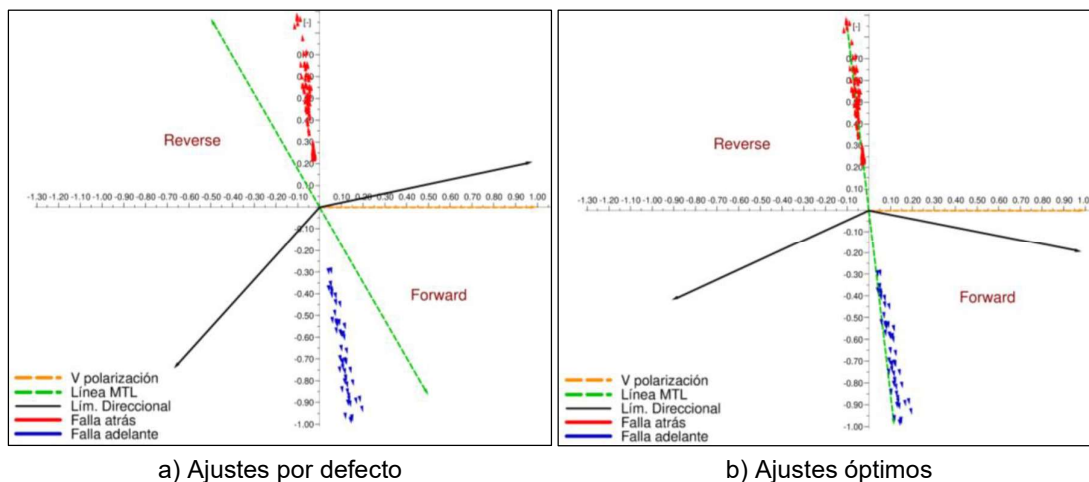


Figura 4.35. Característica direccional de la polarización de secuencia negativa

4.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS EJERCICIOS I Y II

El uso de la herramienta desarrollada en este trabajo de titulación permitió analizar el desempeño de varios métodos de polarización de una forma comprensible a través de los

diagramas propuestos. En este sentido, de la misma forma que en [25] y [48], con la consideración de extensos cálculos de cortocircuitos fue posible establecer conclusiones acerca del funcionamiento de dichos métodos y, de esta manera, se ha evitado realizar la misma tarea de forma aproximada a través de cálculos matemáticos estimados como los presentados en [29].

Además, las facilidades con las que ha sido posible el análisis del funcionamiento de los métodos de polarización tratados en este trabajo también son la consecuencia de la estructura ordenada de la metodología de estudio que ha guiado todo el proceso.

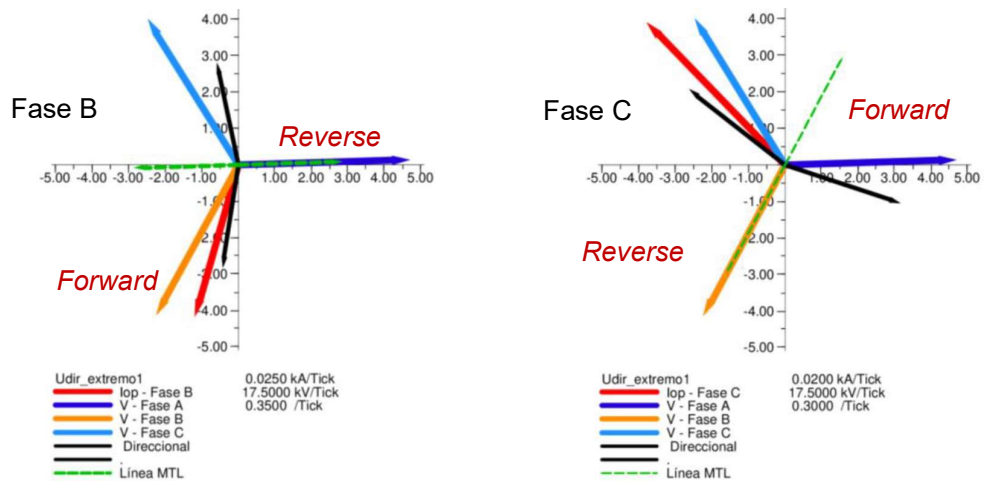
Una capacidad original de la herramienta desarrollada es que proporciona distintos elementos gráficos especiales para el estudio de métodos de polarización, los mismos que PowerFactory no dispone hasta su última versión y que son necesarios en el área de protecciones del país. A pesar de la simpleza de la forma de tales gráficos, el contenido de estos es de gran utilidad por proporcionar información relevante de forma automática sin la necesidad de emplear elementos de la librería de protecciones de PowerFactory.

Con relación a los resultados, se determinó que el funcionamiento de los métodos de polarización es diverso y que es probable que éste sea incorrecto si la rotación de la zona de operación no es lo suficientemente apropiada para que las fallas hacia adelante se encuentren contenidas en la zona de operación y que las fallas hacia atrás sean excluidas de dicha zona. Esto coincide con lo determinado en [8] y [9], en donde se ha destacado que cualquier método es propenso a funcionar de manera incorrecta teóricamente.

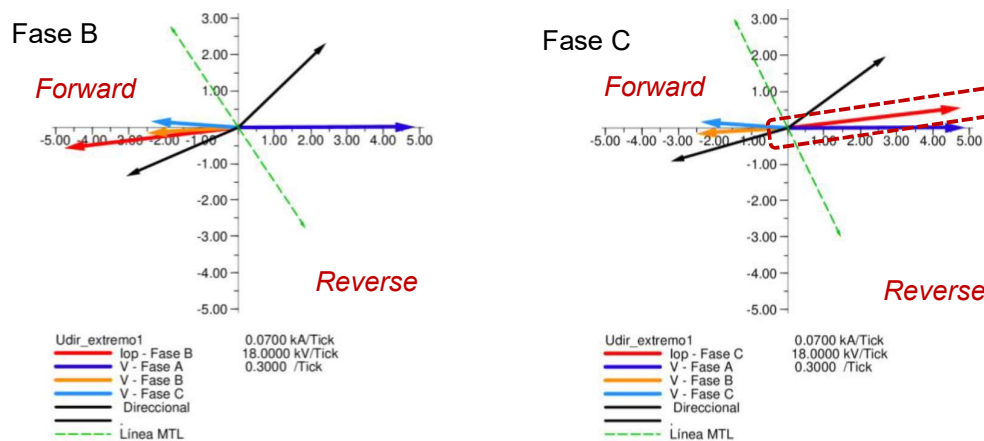
En el caso de los ejercicios de aplicación I y II, las inconsistencias observadas en la simulación de la polarización propia alarman sobre el uso de esta polarización en aplicaciones prácticas, puesto que esto incrementaría la probabilidad de falsos disparos o fallas para operar en el sistema de protecciones. El funcionamiento deficiente encontrado en el caso de esta polarización coincide con lo enfatizado en la literatura técnica en [9], [21] y [22] acerca de los problemas que conlleva el uso de esta polarización.

Por lo expuesto antes, se muestra en detalle una inconsistencia de la polarización propia a través de la Figura 4.36, la cual ilustra las características direccionales en las fases B y C en condiciones de prefalla y ante una falla bifásica al 50% de la L/T Limón-Méndez 138kV. En los diagramas se evidencia que la corriente de la fase C es detectada inconsistentemente. Este problema es una consecuencia de que el contacto entre las fases B y C (producto de la falla) deforma la simetría de los voltajes en falla, de manera que las zonas de operación (que se definen a partir de estos voltajes) se desfazan hasta el punto de que la corriente de la fase C se localiza fuera de su respectiva zona de operación. Es

preciso indicar que este efecto es casi inexistente con las otras polarizaciones y, por lo tanto, éstas no presentan tal inconveniente.



a) Condición normal de operación (prefalla)



b) Falla bifásica entre B y C al 50% de la L/T Limón-Méndez 138kV

Figura 4.36. Característica direccional de la polarización propia de las fases B y C

Por otra parte, las simulaciones relacionadas con las polarizaciones en cuadratura y cruzada mostraron un funcionamiento correcto de éstas en todos los casos. En gran medida, esto se debe a que, según lo descrito en [9] y [21], emplear fases independientes de las fases falladas en el voltaje de polarización, como es el caso de estos métodos, contribuye a evitar que la afectación que sufren los voltajes de polarización (debido a una falla) provoque que una unidad direccional funcione de forma inconsistente.

Con respecto a la comparación entre las polarizaciones en cuadratura y cruzada, las medidas de dispersión mostraron que la polarización en cuadratura tiene la menor desviación estándar en el total de fallas, razón por la que ésta fue seleccionada como la más adecuada a ser utilizada para las protecciones de las dos líneas correspondientes y

considerada en el proceso de obtención de sus ajustes. No obstante, es destacable que, durante el cálculo de las medidas de dispersión, la polarización cruzada también haya presentado una dispersión baja que ligeramente se diferencia de lo obtenido para la polarización en cuadratura. De este modo, surge una interrogante acerca de cuál habría sido el resultado de seleccionar a la polarización cruzada como la más adecuada y considerarla en la obtención de sus ajustes.

Por lo anterior, a fin de contrastar resultados, en la Tabla 4.12 se muestra el valor del ángulo *RCA* óptimo y la evaluación de la función objetivo con dicho ángulo para el caso de la L/T Limón-Méndez 138kV considerando ambas polarizaciones (en cuadratura y cruzada). Con estos datos se aprecia que la polarización en cuadratura presenta un mejor desempeño en la minimización de la función objetivo con respecto a la polarización cruzada, lo cual se complementa con el resultado obtenido de la desviación estándar para determinar que, en definitiva, la polarización en cuadratura tiene el mejor funcionamiento.

Tabla 4.12. Solución de la minimización de la función objetivo con varios métodos

Posición del relé	Método	RCA óptimo	Función Objetivo
Extremo 1	Pol. Cuadratura	28.20°	41 944.41°
	Pol. Cruzada	-20.92°	50 511.32°
Extremo 2	Pol. Cuadratura	33.23°	19 648.27°
	Pol. Cruzada	-11.75°	26 544.46 °

Por otra parte, en relación con los ajustes del *RCA* óptimo encontrados para la polarización en cuadratura en ambos ejercicios de aplicación, dichos ajustes se asemejan a los criterios emitidos en [21] y [29], los cuales establecen un ajuste de entre 30° y 70° para evitar operaciones disfuncionales en la polarización. En este sentido, la aplicación práctica del ajuste del ángulo *RCA* permitirá que las unidades direccionales mejoren la forma en la que detectan la dirección de distintas fallas, de manera que sea menos probable que tales fallas se posicionen en una zona errónea dentro de la característica direccional por diversos factores inherentes que provocan desfases adicionales en la corriente de cortocircuito.

Cabe mencionar que en [31] se efectuó un proceso análogo en un sistema con características similares a las de la L/T Molino-Zhoray 230kV, encontrándose un *RCA* de 22.27° para la polarización en cuadratura, el cual se diferencia del valor de 32.06° encontrado en este trabajo. De esta manera, tal contraste evidencia que el ángulo *RCA* es una variable que depende de cada situación en particular, puesto que la relación de impedancias de secuencia en un sistema, que incide en los desfases de la corriente de cortocircuito, es diferente en cada caso, inclusive, desde cada extremo de la línea.

En este punto, se debe resaltar que la similitud de los resultados obtenidos para ambos extremos de las líneas consideradas en cada ejercicio de aplicación es un evento coincidente que implica que las relaciones de impedancias desde ambos extremos de las líneas tienen cierta similitud, sin embargo, esto no es una regla, puesto que es posible que en otras líneas se obtengan resultados totalmente dispares desde ambos extremos.

Con relación a los métodos de polarización de la unidad direccional de tierra, la simulación para verificar si la sensibilidad del voltaje de polarización de dichos métodos es adecuada ante fallas internas fue un modo sencillo de abordar esta tarea, con lo que se evitó introducir cálculos matemáticos aproximados como los planteados en [24] para el mismo fin.

Es preciso indicar que el resultado del correcto funcionamiento de los dos métodos de polarización de la unidad de tierra en las líneas consideradas en los dos primeros ejercicios de aplicación (dentro de protecciones no unitarias) coincide con lo establecido genéricamente en [24] por el Comité de Protecciones de Sistemas de Potencia (PSRC, por sus siglas en inglés) de la IEEE (Tabla 2.6), en donde se indica que el funcionamiento de dichos métodos puede ser correcto en líneas con una relación $SIR \geq 0.5$, como es el caso de las dos líneas consideradas (los cálculos de la relación SIR para tales líneas se presentan en el ANEXO F).

Con relación al ejercicio de aplicación II, se determinó que el método más adecuado en la unidad de tierra de la línea correspondiente es la polarización con voltaje de secuencia negativa; no obstante, el método configurado en la actualidad es el de secuencia cero. Este contraste es un ejemplo de que en ocasiones los métodos utilizados se escogen por simple convención, dado que la polarización de secuencia cero es el método típicamente propuesto en la literatura técnica. Sin embargo, en este trabajo se demuestra un criterio para seleccionar a la polarización de secuencia negativa por presentar un mayor beneficio en cuanto a su sensibilidad.

Con relación al uso de diferentes métodos en el esquema de las unidades de tierra, se encontró que existen inconsistencias a pesar de que dichos métodos demuestran un funcionamiento correcto en cada extremo. Esto es altamente crítico en la práctica, dado que es probable que existan falsos disparos (inclusive instantáneos).

Las inconsistencias mencionadas son producto de que el uso de diferentes métodos en los extremos de una línea conlleva a la detección de una corriente de secuencia distinta en tales extremos; de manera que, al existir fallas externas que provocan cambios en la dirección de los aportes de corriente por una línea protegida (ver sección 3.4.2), es posible

que exista una región en la que las corrientes de secuencia cero y secuencia negativa son aparentemente detectadas con dirección hacia adelante (traslape) en los extremos.

Lo anterior motivó a que en [24] se recomiende no usar métodos distintos en ambos extremos, no obstante, se demostró que en el caso particular de la L/T Molino-Zhoray 230kV, el uso de diferentes métodos no necesariamente es un problema, dado que el uso de la polarización de secuencia cero en el extremo 1 y la polarización de secuencia negativa en el extremo 2 no provoca inconsistencias, mientras que, si se intercambia el orden de estos métodos en los extremos, si existe el problema.

Cabe resaltar que el resultado del traslape obtenido con métodos distintos en el esquema de las unidades de tierra del segundo ejercicio de aplicación corresponde a una situación poco crítica, dado que las inconsistencias ocurren para un porcentaje pequeño de la línea; sin embargo, la situación es más crítica si se considera un valor de I_{TAP} menor o una sobreestimación de la magnitud de la corriente por errores de medida de los TCs o adquisición de señales de los relés.

Finalmente, es preciso indicar que el resultado de simulación conjunta con métodos distintos fue hasta cierto punto irrelevante, puesto que de todos modos se encontró que la polarización de secuencia negativa es la más adecuada en ambos extremos a través del criterio comparativo correspondiente, de manera que se condicionó el uso del mismo método en el esquema. Sin embargo, en el caso de que en la selección se hubiesen determinado métodos distintos en los extremos; la contrastación con los resultados de la simulación conjunta habría sido un paso fundamental, dado que a través de esto se hubiera podido validar si la combinación de métodos a usar en los extremos es factible a fin de evitar inconsistencias en un esquema de teleprotección.

4.5. EJERCICIO DE APLICACIÓN III

La existencia de falsos disparos es posible en ciertos circuitos paralelos en los que el acoplamiento mutuo es significativo hasta el punto de interferir en el desempeño de la polarización de secuencia cero. Varios estudios como los planteados en [16] o [24] concluyen que el problema aparecerá siempre y cuando el acoplamiento sea lo suficientemente *fuerte* en ciertas topologías, las cuales se mostraron antes en la sección 3.4.2. Frente a esto, se ha recomendado examinar si el uso de la polarización de secuencia cero es lo más adecuado en algún caso en específico. En este sentido, a través de la herramienta desarrollada, se estudia el caso de la L/T Mazar-Zhoray 230kV, en la cual se han propuesto modificaciones topológicas para contrastar resultados.

4.5.1 CASOS DE PRUEBA

La L/T Mazar-Zhoray 230kV tiene dos circuitos paralelos dispuestos en la misma torre y, de manera atípica en el SNT, posee un solo terminal en común. Adicionalmente, se consideran también las modificaciones topológicas de la Figura 4.37. En estos tres casos se determinó el funcionamiento de la polarización de secuencia cero en las unidades direccionales de ambos extremos del circuito C1 (circuito protegido) ante un barrido de fallas en el circuito C2 (monofásicas y bifásicas en pasos de 20%).

Esta vez, se examina el comportamiento de dicho método ante la incidencia del acoplamiento mutuo según lo descrito en la sección 3.4.2. Se debe indicar que en este ejercicio de aplicación solo se considera la detección de la dirección de las fallas y se desprecia la magnitud de las mismas y la sensibilidad de la unidad direccional con fines ilustrativos.

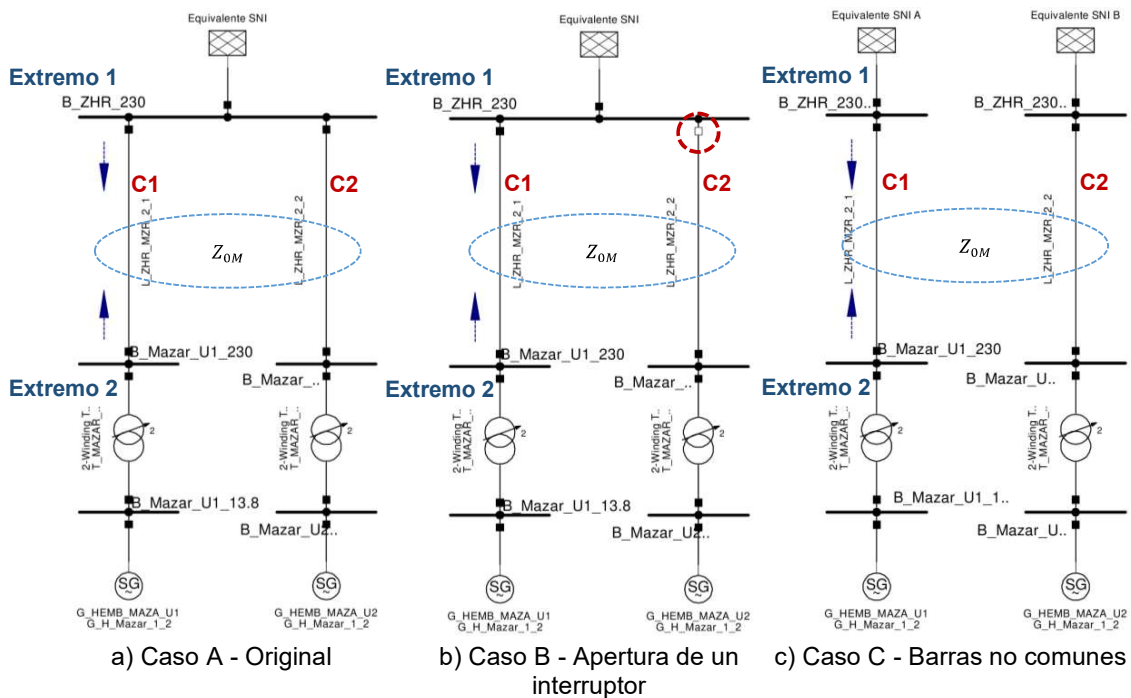


Figura 4.37. Variaciones topológicas en la L/T Mazar-Zhoray 230kV

4.5.2 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Con respecto a la topología original (Caso A), la Figura 4.38 ilustra que, desde el extremo 1, el conjunto de fasores se posiciona en la zona de no operación, es decir, que las fallas son detectadas aparentemente con dirección hacia atrás. Por su parte, en el extremo 2 se definen todos los fasores con una dirección hacia adelante. Todo esto coincide con la dirección real de las fallas.

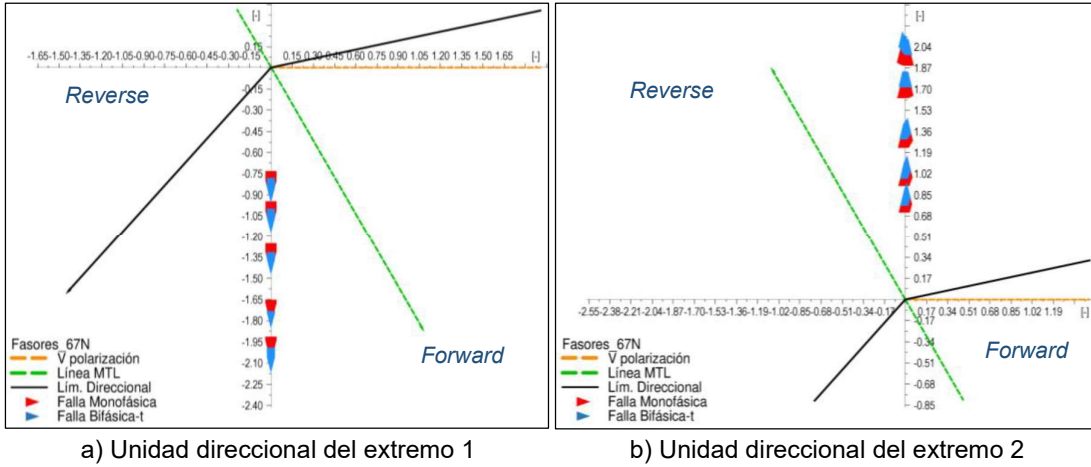


Figura 4.38. Característica direccional - caso A

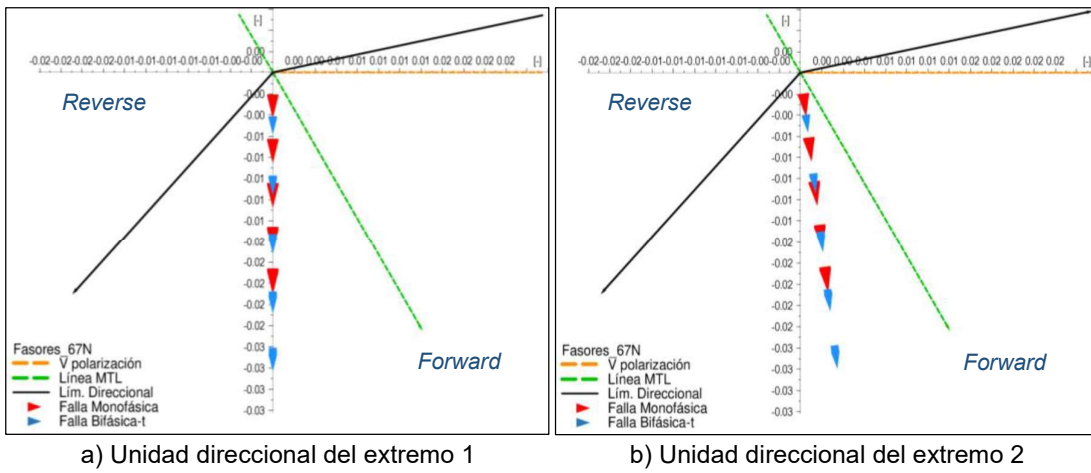


Figura 4.39. Característica direccional - caso B

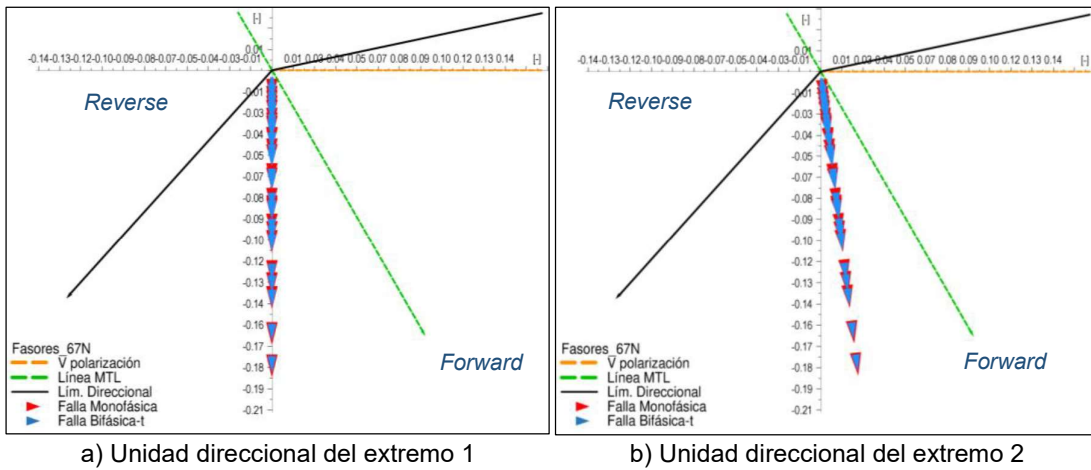


Figura 4.40. Característica direccional - caso C

La variación del caso B, que contempla una situación en la que las fallas calculadas han ocasionado la apertura de uno de los interruptores, indica que los circuitos paralelos se encuentran aislados eléctricamente, pero acoplados magnéticamente. De acuerdo con la Figura 4.39, ambas unidades direccionales declaran de manera inconsistente (en el esquema) una dirección hacia adelante para estas fallas externas.

Finalmente, frente al caso C, el resultado de la Figura 4.40 muestra que, análogamente al caso B, el comportamiento direccional del esquema es inconsistente, en virtud de que las unidades direccionales de ambos extremos del circuito no fallado definen aparentemente una dirección hacia adelante.

4.5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El caso A demostró ser el único en el que no se presentaron inconsistencias, lo cual surge como consecuencia de lo descrito en [16] acerca de la no existencia de tales inconsistencias cuando la conexión eléctrica predomina por sobre el efecto del acoplamiento mutuo. En este sentido, debido a que los circuitos de los casos B y C se encuentran aislados eléctricamente, pero acoplados magnéticamente, la incidencia del acoplamiento es predominante en dichos circuitos y provoca que las corrientes inducidas en el circuito no fallado sean detectadas aparentemente como fallas hacia adelante.

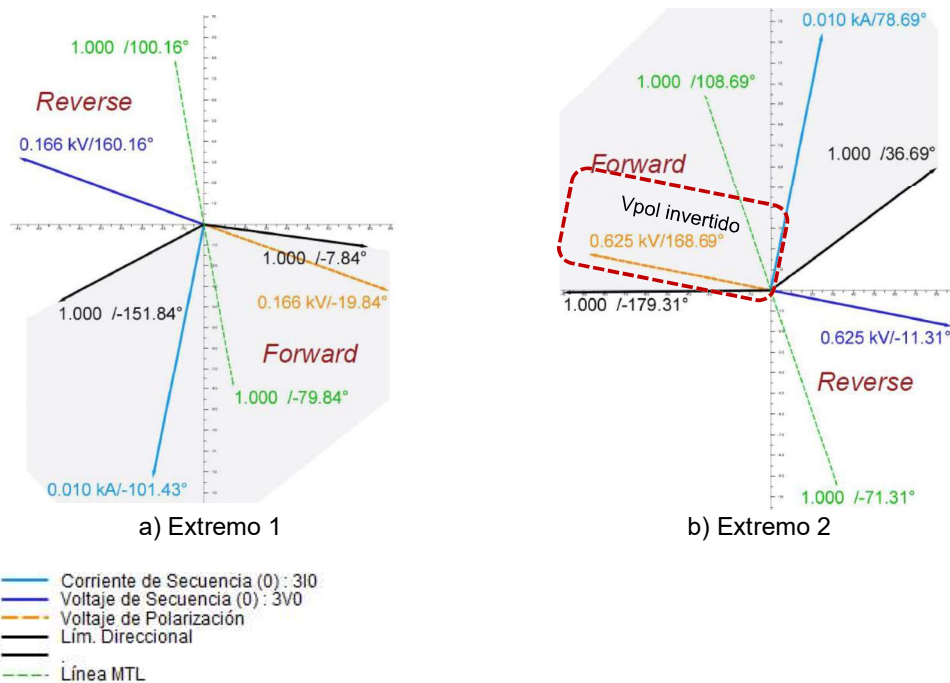


Figura 4.41. Característica direccional de la polarización con voltaje de secuencia cero

Por lo anterior, en la Figura 4.41 se muestra con más detalle un caso particular de la característica direccional de ambos extremos ante una falla externa al 50% del circuito

paralelo (Caso B). En estos diagramas se observa que el voltaje de polarización ($-3V_0$) que aparece en el circuito no fallado debido a la corriente inducida se invierte en uno de los extremos, de modo que la zona de operación se desfasa en sentido opuesto hasta el punto de que se detecta direccionalmente una falla externa como interna, es decir, una detección errónea (direccional) en el funcionamiento conjunto de las unidades de ambos extremos.

Si bien es cierto, en la L/T Mazar-Zhoray 230kV de 2 km de longitud, la situación mostrada no es un problema crítico en el caso real, puesto que la línea es corta y las corrientes inducidas son bajas, de modo que éstas no superan la I_{TAP} de los relés (configurada actualmente en 96A), no obstante, la problemática está latente y debe ser considerada en el área de protecciones en topologías similares.

Cabe mencionar que, si se considera una línea similar con una longitud mayor como 20 km, el efecto ya genera corrientes que provocan la operación del relé.

Los resultados coinciden con los obtenidos en topologías similares estudiadas en [16], en donde se recomendó el uso de la polarización de secuencia negativa en ambos extremos como solución ante inconsistencias que puedan presentarse en casos reales en los que las corrientes de secuencia cero inducidas si superen la I_{TAP} .

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

En relación con el objetivo general:

- En este trabajo de titulación se logró desarrollar una herramienta computacional utilizando lenguaje DPL para simular varios métodos de polarización de la protección de sobrecorriente direccional de líneas de transmisión. Esta herramienta permitió determinar el funcionamiento de los diferentes métodos de polarización en varios ejercicios de aplicación de una forma detallada, lo cual no puede ser efectuado con las herramientas convencionales de PowerFactory. Por lo tanto, la herramienta desarrollada es una contribución innovadora al conjunto de herramientas existentes en el software para estudios de métodos de polarización en el área de protecciones eléctricas del país.

En relación con los objetivos específicos:

- A través de la descripción de la protección de sobrecorriente direccional de líneas de transmisión, se consiguió identificar distintos métodos de polarización de esta protección que fueron simulados en PowerFactory. Los métodos identificados han sido catalogados en la literatura técnica como propensos a funcionar incorrectamente en teoría, razón por la cual los estudios de dichos métodos son necesarios para atender tal problemática.
- Se logró diseñar la herramienta propuesta considerando diversas funcionalidades disponibles en PowerFactory y en el lenguaje DPL, las cuales fueron determinadas como necesarias para que tal herramienta pueda cumplir con todos los requerimientos planteados. En esta determinación se encontró que una de las funcionalidades más importantes es la capacidad de DPL para manipular elementos de la red y automatizar cálculos de cortocircuitos, dado que la herramienta propuesta se concibe como un medio para simular métodos de polarización ante un conjunto extenso de cortocircuitos en múltiples elementos de la red.
- En este trabajo se consiguió implementar la herramienta propuesta con el uso del lenguaje DPL. Debido a que esta herramienta ha sido programada en su totalidad en lenguaje DPL y por la estructura orientada a objetos que maneja PowerFactory, tal herramienta constituye un medio de simulación de métodos de polarización compacto que puede ser usado en cualquier sistema modelado en el software.

- A través del uso de la herramienta desarrollada en los ejercicios de aplicación correspondientes, se consiguió determinar el funcionamiento de diferentes métodos de polarización en el SNT del Ecuador considerando líneas de transmisión con diferentes topologías. En esta determinación se encontró que el funcionamiento de los métodos es diverso y que algunos métodos tienen mejores prestaciones que otros e inclusive sus ajustes pueden permitir mejorar su desempeño. Además, mediante la información de las simulaciones, fue posible la determinación de los métodos y ajustes más adecuados para las protecciones correspondientes. De esta manera, se demuestra la utilidad de la herramienta propuesta en este trabajo por permitir obtener todos los resultados mencionados.

Conclusiones adicionales:

- La aplicación de la herramienta desarrollada demostró que los métodos de polarización se ven influenciados por factores como la severidad o la asimetría de la corriente de cortocircuito. Estos factores a su vez dependen de variables como las características del sistema, la resistencia de falla, la posición de la falla o el tipo de falla. De este modo, es fundamental verificar la adecuada actuación de dichos métodos, puesto que existe la probabilidad de funcionamientos incorrectos ante una incidencia significativa de los factores expuestos.
- En este trabajo fue posible resolver varias interrogantes de gran interés en el área de protecciones. Con respecto a la unidad de fase, se determinó que la polarización en cuadratura provee generalmente el mejor desempeño. Con relación a la unidad de tierra, se encontró que la sensibilidad de los métodos de polarización depende en gran medida del sistema, de modo que la selección de un método u otro es un tema específico para cada caso. Además, se demostró que el uso de diferentes métodos en ambos extremos de una línea, en el caso de la unidad de tierra, no siempre es un problema para el funcionamiento conjunto de los relés de un esquema de teleprotección.
- Los dos primeros ejercicios de aplicación mostraron que los ajustes óptimos en el caso de la unidad de tierra se diferencian considerablemente de los ajustes usados por defecto. Además, con el fin de obtener una mayor sensibilidad en la unidad direccional, el segundo ejercicio mostró la necesidad de reemplazar a la polarización de secuencia cero, instalada en las protecciones de la línea correspondiente, por la polarización de secuencia negativa. Todo esto demuestra

que el uso de un método y su ajuste en una línea en particular debe basarse en un estudio específico en lugar de emplear métodos y ajustes convencionales.

- En relación con el ejercicio de aplicación III, se determinó que, cuando un circuito protegido se encuentra aislado eléctricamente del circuito fallado, el efecto del acoplamiento mutuo puede provocar fallos en la polarización con voltaje de secuencia cero por la inversión de las cantidades de polarización y así comprometer el funcionamiento consistente de un esquema de teleprotección. Esto obliga a usar la polarización con voltaje de secuencia negativa como una solución al problema en el caso de que las corrientes de secuencia cero inducidas superen la I_{TAP} configurada en los relés.
- Las principales limitaciones de la herramienta son: la capacidad para permitir solo el cálculo de cortocircuitos en estado estable y la restricción para simular solo un método de polarización de fase y tierra a la vez. Por otro lado, los métodos y ajustes determinados como adecuados solo se alinean al modelo del SNT tratado en este proyecto, por lo tanto, es posible que, si existen cambios significativos en este modelo, los métodos y ajustes encontrados dejen de ser efectivos, lo cual obligaría a desarrollar nuevamente el estudio para encontrar resultados actualizados.

5.2. RECOMENDACIONES

- Utilizar los aportes de este proyecto como una guía para los trabajos futuros que se concentren en el análisis de métodos de polarización. Los aportes más destacados que pueden ser usados son la herramienta desarrollada, la cual demostró que permite efectuar tareas de evaluación y mejora del funcionamiento de dichos métodos, y la metodología de estudio propuesta en este trabajo que guía todo el proceso de análisis.
- Incluir el estudio de métodos de polarización con el uso de la herramienta desarrollada dentro de las etapas de configuración de protecciones que realiza la empresa transmisora en el país. Esto con el fin de que en futuras aplicaciones se evite la posibilidad de actuaciones erróneas de la protección de sobrecorriente direccional con su configuración más apta.
- Estudiar los métodos de polarización de las protecciones de líneas del SNT ecuatoriano con prioridad en aquellas expuestas, mayormente, a problemáticas por incidencia del acoplamiento mutuo o donde se requiera el uso de métodos distintos en ambos extremos.

- Reconfigurar las protecciones de las líneas analizadas en los ejercicios de aplicación I y II según los métodos y ajustes encontrados en este trabajo con el fin de mejorar el funcionamiento confiable de las protecciones correspondientes.
- Con relación al uso de la herramienta computacional, se recomienda considerar barridos de cortocircuito con un solo tipo de falla a la vez al momento de analizar los diagramas en función de la distancia en la que se calculan los cortocircuitos; así como se efectuó en los ejercicios de aplicación I y II durante el análisis del diagrama de ángulo de torque - distancia. Esto con el fin de poder obtener diagramas que permitan identificar fácilmente las fases falladas.
- La herramienta propuesta cuenta con varias subrutinas, las cuales pueden ser libremente modificadas a necesidad del usuario para experimentar y realizar mejoras en el programa como incrementar la eficiencia en el código del programa o disminuir la velocidad de ejecución. En especial, se recomienda modificar las subrutinas Udir_extremo1 y Udir_extremo2 para añadir otros métodos de polarización e inclusive incursionar en el análisis de los métodos de polarización de la protección de distancia. Además, también es posible modificar el código del programa con el fin de permitir el análisis en otros elementos como generación distribuida o transformadores.
- En virtud de que un fenómeno de cortocircuito tiene un carácter aleatorio, se recomienda complementar la metodología propuesta con un proceso de simulación aleatorio como el método de Montecarlo, con lo cual se consideraría la probabilidad de ocurrencia de fallas en determinado elemento, posición o resistencia de falla. Esto permitirá que el cálculo del rango o la desviación estándar considere el comportamiento aleatorio de la ocurrencia de un cortocircuito.
- Un trabajo futuro por realizar será acoplar un modelo dinámico DSL de la transformada discreta de Fourier (DFT) a la entrada de información del programa en DPL (subrutinas: Udir_extremo1 y Udir_extremo2) con el fin de obtener un fasor de corriente de cortocircuito en tiempos discretos (por muestras) que simule la adquisición real de señales de un relé ante eventos transitorios. Este trabajo futuro incluiría en el análisis el cambio transitorio de la magnitud y del ángulo de una falla brindando una simulación más real acerca del funcionamiento de los métodos de polarización, lo cual no se consideró en este trabajo por la magnitud de tal investigación.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE, The Institute of Electrical and Electronics Engineering, *IEEE 100 The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms*, Seventh Edition ed., New York: Standards Information Network IEEE Press, 2000.
- [2] J. J. Grainger and W. D. Stevenson, *Análisis de sistemas de potencia*, McGraw-Hill, 2000.
- [3] C. L. Fortescue, "Method of Symmetrical Co-Ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. XXXVII, no. 2, pp. 1027-1140, 1918.
- [4] P. M. Anderson, *Power System Protection*, New York: IEEE Power Engineering Society, 1999.
- [5] L. Brand and J. Moncada, *Protecciones de Sistemas Eléctricos*, Santiago de Chile: Hugo E. González A., 1976.
- [6] F. E. Pérez Yauli, "Wavelets adaptivas aplicadas a funciones de protección de líneas de transmisión," Universidad Nacional de San Juan, San Juan, 2012.
- [7] "IEEE Guide for Protective Relay Applications to Transmission Lines," *IEEE Std C37.113-2015 (Revision of IEEE Std C37.113-1999)*, pp. 1-141, 2016.
- [8] R. C. Mason, *The Art and Science of Protective Relaying*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1967.
- [9] J. L. Blackburn, *Protective Relaying*, Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [10] H. Bentarzi and A. Abdelmoumene, "A review on protective relays developments and trends," *Journal of Energy in Southern Africa*, vol. 2, no. 25, pp. 91-95, 2014.
- [11] SIEMENS, *SIPROTEC 5 Protección de distancia, diferencial de línea y Gestión del interruptor para disparo mono/tripolar 7SA87, 7SD87, 7SL87*, Siemens AG 2015, 2017.
- [12] IEEE Power and Energy Society, *IEEE Std C37.2: IEEE Standard for Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations*, New York: IEEE Standards, 2008.
- [13] S. H. Horowitz and A. G. Phadke, "Nonpilot Overcurrent Protection of Transmission Lines," in *Power System Relaying*, Baldock, John Wiley and Sons Ltd, 2014, pp. 80-95.
- [14] J. Viqueira Landa, "Desarrollo y características generales de los sistemas de energía eléctrica," in *Redes Eléctricas - Tomo I*, México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 2010, pp. 17-19.

- [15] C. Holt and M. J. Thompson, "Practical considerations when protecting mutually coupled lines," in *2016 69th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*, College Station, TX, 2016.
- [16] T. Demetrios, H. Altuve and F. Calero, "Protecting Mutually Coupled Transmission Lines: Challenges and Solutions," IEEE, Atlanta, 2014.
- [17] Siemens, "Siemens Customer Support for Power & Energy - SIPROTEC 5," 2019. [Online]. Available: support.energy@siemens.com. [Accessed 30 Enero 2019].
- [18] W. H. Hayt and J. A. Buck, *Teoría electromagnética*, México: The McGraw-Hill Companies, 2006.
- [19] ABB, "Line differential protection RED670 Version 2.2 IEC - Technical manual," RELION® 670 SERIES, 2018.
- [20] Schneider Electric, "Protección Diferencial de Intensidad MiCOM P543/P544/P545/546 - Manual Técnico," Schneider Electric, 2010.
- [21] J. Horak, "Directional Overcurrent Relaying (67) Concepts," *IEEE*, pp. 1-13, 2006.
- [22] C. Warrington, "Overcurrent Protection," in *Protective Relays - THEIR THEORY AND PRACTICE*, Stafford, Chapman & Hall, 1968, pp. 167-175.
- [23] G. Ziegler, *Numerical Distance Protection - Principles and Applications*, Fourth Edition ed., Erlangen: Publicis Publishing, 2011.
- [24] L. P. S. Working Group D-3, "Considerations in Choosing Directional Polarizing Methods for Ground Overcurrent Elements in Line Protection Applications," IEEE, College Station - TX, 2014.
- [25] A. Borgnino and M. Castillo, "Comparison of the Performance of Different Directional Polarizing Methods in Cross Country Fault Protection of a MV Loop," in *2018 Power Systems Computation Conference (PSCC)*, Dublín, 2018.
- [26] FESTO, *Electricity and New Energy - Directional Protection*, Quebec: Festo Didactic, 2016.
- [27] J. Roberts and A. Guzmán, "Directional Element Design and Evaluation," in *49th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference*, Georgia, 1995.
- [28] S. Ramírez Castaño, *Protección de Sistemas Eléctricos*, Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2003.
- [29] W. K. Sonnemann, "A Study of Directional Element Connections for Phase Relays," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 69, no. 2, pp. 1438-1451, 1950.
- [30] A. H. Bakar, H. Mokhlis, H. A. Illias and P. L. Chon, "The study of directional overcurrent relay and directional earth-fault protection application for 33 kV underground cable system in Malaysia," *Electrical Power and Energy Systems*, no. 40, pp. 113-119, 2012.

- [31] J. Jaramillo Serna and J. M. López Lezama, "An Alternative Method for Obtaining the Optimal Directional Characteristic Angle of Directional Overcurrent Relays in Transmission Networks," *Contemporary Engineering Sciences*, vol. 11, no. 4, pp. 149 - 164, 2018.
- [32] E. O. Schweitzer, N. Fischer and B. Kasztenny, "A Fresh Look at Limits to the Sensitivity of line protection," *2011 64th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, pp. 44-55, 2011.
- [33] M. Benitez and K. Smith, "Directional Element Design for Protecting Circuits with Capacitive Fault and Load Currents," in *2018 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*, College Station, TX, 2018.
- [34] R. Taylor, "Transmission line applications of Directional Ground Overcurrent Relays Texas A&M conference," in *2011 64th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, College Station, TX, 2011.
- [35] DIgSILENT GmbH, "DIgSILENT," [Online]. Available: <https://www.digsilent.de/en/>. [Accessed 24 April 2018].
- [36] DIgSILENT GmbH, *DIgSILENT PowerFactory User Manual*, Online Edition ed., Gomaringen: DIgSILENT GmbH, 2018.
- [37] F. A. Lema Chiliquinga, D. J. Viscarra Calero and F. E. Pérez Yauli, *Modelamiento de relés genéricos de sobrecorriente y de distancia utilizando lenguaje de simulación de DIgSILENT - DSL en el programa computacional PowerFactory*, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2017.
- [38] DIgSILENT GmbH, *DIgSILENT PowerFactory 2018 Protection Device Library*, Gomaringen: DIgSILENT GmbH, 2018.
- [39] F. Higa Uchima, *Programando en DPL con PowerFactory 2017*, F. Higa Uchima, Ed., Lima: Biblioteca Nacional del Perú, 2017.
- [40] DIgSILENT GmbH, *DIgSILENT PowerFactory 2018 DPL Function Reference*, Gomaringen, Germany: DIgSILENT GmbH, 2018.
- [41] N. I. Fisher, *Statistical Analysis of Circular Data*, Melbourne: Cambridge University Press, 1995.
- [42] J. Ketelaar, *It is all about the circle: An inventory of circular data*, Utrecht: Utrecht University, 2015.
- [43] S. R. Jammalamadaka and A. Sengupta, "Descriptive Statistics," in *Topics in Circular Statistics*, Singapur, World Scientific, 2001, pp. 9-21.
- [44] M. J. Thompson and D. L. Heidfeld, *Transmission Line Setting Calculations - Beyond the Cookbook*, Saint Paul, 2015.
- [45] M. Merino, "Programación Lineal y No Lineal," in *Técnicas Clásicas de Optimización*, Valencia, Universidad Politécnica de Valencia, pp. 57 - 77.

- [46] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*, New York: Cambridge University Press, 2004.
- [47] Microsoft, "Support Office," Office, 2019. [Online]. Available: <https://support.office.com/en-ie/article/define-and-solve-a-problem-by-using-solver-5d1a388f-079d-43ac-a7eb-f63e45925040>. [Accessed 8 mayo 2019].
- [48] H. Bakar, H. Mokhlis and A. Illias, "The study of directional overcurrent relay and directional earth-fault protection application for 33 kV underground cable system in Malaysia," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 40, no. 1, pp. 113-119, 2012.
- [49] DlgSILENT, "SCRIPTING," in *DlgSILENT PowerFactory Version 2018 User Manual*, Gomaringen, DlgSILENT GmbH, 2018, p. 344.

ANEXOS

Los anexos de este trabajo se presentan en formato digital en el CD adjunto.

ANEXO A. Sintaxis básica del lenguaje DPL.

ANEXO B. Herramienta computacional.

ANEXO C. Guía de usuario.

ANEXO D. Guía de uso de Solver para encontrar un RCA óptimo.

ANEXO E. Modelo de la zona Molino-Milagro.

ANEXO F. Parámetros y cálculos adicionales.

ANEXO G. Resultados adicionales de simulación en el Ejercicio de aplicación I.

ANEXO H. Comparación de métodos en el extremo 2 del Ejercicio de aplicación I.

ANEXO I. Base de datos del Ejercicio de aplicación I.

ANEXO J. Resultados adicionales de simulación en el Ejercicio de aplicación II.

ANEXO K. Comparación de métodos en el extremo 2 del Ejercicio de aplicación II.

ANEXO L. Base de datos del Ejercicio de aplicación II.

ORDEN DE EMPASTADO



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
Campus Politécnico "J. Rubén Orellana R."

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
DECANATO

ORDEN DE EMPASTADO

De conformidad al Artículo 101 del **REGLAMENTO DE RÉGIMEN ACADÉMICO DE LA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL** aprobado por Consejo Politécnico en Octubre de 2017 y al **INSTRUCTIVO PARA EL PROCEDIMIENTO DE TRABAJOS DE TITULACIÓN DE LAS CARRERAS DE PRE-GRADO Y PROGRAMAS DE POSGRADO DE LA FIEE**, aprobado por Consejo de Facultad el 24 de enero de 2019 que establece que *"El Decano de la FIEE, remitirá los informes de calificación al Director del Trabajo de Titulación y le solicitará un informe de conformidad en relación a las observaciones planteadas, este informe será presentado al Decano en un plazo no mayor a diez días, quien a su vez emitirá la autorización de impresión y encuadernación final del Trabajo de Titulación o Tesis de Grado."*, una vez verificado el cumplimiento del formato de presentación establecido, autorizo la impresión y encuadernación final del Trabajo de Titulación presentado por el señor:

ESTEBAN SEBASTIAN VACA BARRAGAN

Fecha de autorización: 6 de septiembre de 2019


M.Sc. Fabián González
Decano



Paola P.