

GRADO EN
INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA INDUSTRIAL
TRABAJO FIN DE GRADO

***SELECTOR DE FASES BASADO EN
LAS CORRIENTES TOTALES DE
FALTA PARA PROTECCIÓN
DIFERENCIAL DE LÍNEA***

Alumno: Rodríguez Rincón, Yeray
Director: Uriondo Arrue, Felipe

Curso: 2018-2019

Fecha: 11 de junio de 2019

RESUMEN

Se propone un nuevo selector de fases basado en las corrientes totales de falta para protección diferencial de línea. Analizando el comportamiento teórico de las corrientes de falta en las redes de secuencia, se modelará un selector que determinará el tipo de falta y, por tanto, las fases que estarán siendo afectadas en cada caso. Con el método propuesto se logrará un aumento considerable en la sensibilidad de la protección diferencial. Además, a través de las simulaciones realizadas se verificará tanto su fiabilidad como su efectividad.

Palabras clave: ingeniería eléctrica, protección diferencial, selector de fase, redes de secuencias, falta, línea, sensibilidad, *SimPowerSystems*

LABURPENA

Lineen babes diferentzialetan suertatzen diren guztizko korronteetako faltetan oinarritutako fase-selektore berri bat proposatzen da. Sekuentzia-sareetako falta-korronteen ibilera teorikoa aztertuz, falta-mota zehaztuko duen selektorearen eredu egingo da, eta, hortik, kasu bakoitzean faltagatik eragindako faseak zehaztuko dira. Proposatutako metodoarekin batera, babes-diferentzialeko sentsibilitatearen handipen nabarigarria lortuko da. Gainera, egindako simulazioen bitartez, fidagarritasuna ez ezik, eraginkortasuna ere egiaztatuko da.

Hitz gakoak: ingeniariatza elektrikoa, babes diferentzial, sekuentzia-sare, falta, linea, sentsibilitate, SimPowerSystems

ABSTRACT

A new phase selector is presented based on the total fault currents for line differential protection. Analysing the theoretical behaviour of fault currents in sequence networks, a selector will be modelled to determine the type of fault and, therefore, the phases that will be affected in each type of fault. With the proposed method, a considerable increase in the sensitivity of the differential protection will be achieved. Furthermore, through simulations both, its reliability and its effectiveness will be verified.

Keywords: electrical engineering, differential protection, phase selector, sequence network, fault, line, sensitivity, SimPowerSystems

ÍNDICE

RESUMEN	2
LABURPENA	2
ABSTRACT.....	2
LISTA DE ILUSTRACIONES Y TABLAS	5
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	5
ÍNDICE DE TABLAS	6
INTRODUCCIÓN	7
1. CONTEXTO	9
2. ALCANCE Y OBJETIVOS.....	10
3. BENEFICIOS	11
4. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE	13
4.1. CONTEXTUALIZACIÓN TEÓRICA.....	13
4.2. ANÁLISIS.....	15
5. ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS	17
5.1. ANÁLISIS TEÓRICO	17
5.2. ANÁLISIS DE LAS HERRAMIENTAS	17
5.3. ANÁLISIS EXPERIMENTAL.....	20
6. METODOLOGÍA	21
6.1. TAREAS, FASES Y PROCEDIMIENTOS.....	21
6.2. DIAGRAMA DE GANTT	23
6.3. CONCEPTOS TEÓRICOS.....	24
6.3.1 Faltas en el sistema eléctrico. Origen.....	24
6.3.2 Tipos de faltas.....	24
6.3.3 Metodología de análisis	25
6.3.4 Desarrollo teórico de las faltas.....	32
6.4. MODELO DE LÍNEA	38
6.4.1 Contextualización del modelo	38
6.4.2 Parámetros de línea.....	40
6.4.3 Selector de faltas.....	40
6.5. TOMA DE DATOS Y RESULTADOS	47
6.5.1 Variables de entrada	47
6.5.2 Datos obtenidos.....	48

7.	PRESUPUESTO	52
7.1.	COSTE DE PERSONAL.....	52
7.2.	AMORTIZACIONES	52
7.3.	OTROS GASTOS.....	53
7.4.	COSTES INDIRECTOS.....	53
7.5.	PRESUPUESTO TOTAL.....	54
8.	CONCLUSIONES.....	55
9.	BIBLIOGRAFÍA	56
9.1.	LIBROS.....	56
9.2.	TRANSPARENCIAS.....	56
9.3.	PUBLICACIONES	56
9.4.	MANUALES DE FUNCIONAMIENTO	59
10.	ANEXO I.....	60
10.1.	PROGRAMA DE RECOGIDA DE DATOS.....	60
10.2.	LOCALIZADOR DE PARÁMETROS DE LÍNEA	66
	11.2.2 Datos de las líneas	66
	11.2.2 Programa de asignación de valores a las variables del modelo.....	69
10.3.	ESPECIFICACIONES DEL MODELO	70
11.	ANEXO II	77
11.1.	Manual de Matlab y Simulink	77
11.2.	Manual de Microsoft Office	77
11.3.	Manual de Protección Diferencial en línea	77

LISTA DE ILUSTRACIONES Y TABLAS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1 - Funcionamiento de la protección diferencial en régimen de no falta</i>	13
<i>Ilustración 2 - Funcionamiento de la protección diferencial en régimen de falta</i>	13
<i>Ilustración 3 - Característica Función Diferencial</i>	14
<i>Ilustración 4 - Sistema vectorial de secuencia directa</i>	26
<i>Ilustración 5 - Sistema vectorial de secuencia inversa</i>	26
<i>Ilustración 6 - Sistema vectorial de secuencia homopolar</i>	27
<i>Ilustración 7 - Circuito con conexión en estrella</i>	29
<i>Ilustración 8 - Circuito en conexión triángulo</i>	31
<i>Ilustración 9 - Esquema eléctrico de una falta monofásica</i>	32
<i>Ilustración 10 - Red de secuencias de falta monofásica</i>	33
<i>Ilustración 11 - Circuito de secuencias de falta monofásica</i>	33
<i>Ilustración 12 - Esquema eléctrico de una falta bifásica a tierra</i>	34
<i>Ilustración 13 - Red de secuencias de falta bifásica a tierra</i>	34
<i>Ilustración 14 - Circuito de secuencias de falta bifásica a tierra</i>	34
<i>Ilustración 15 - Esquema eléctrico de una falta bifásica</i>	35
<i>Ilustración 16 - Red de secuencias de falta bifásica</i>	36
<i>Ilustración 17 - Circuito de secuencias de falta bifásica</i>	36
<i>Ilustración 18 - Esquema eléctrico de una falta trifásica</i>	36
<i>Ilustración 19 - Red de secuencias de falta trifásica</i>	37
<i>Ilustración 20 - Circuito de secuencias de falta trifásica</i>	37
<i>Ilustración 21 - Modelo de línea</i>	38
<i>Ilustración 22 - Suma de intensidades local y remota</i>	40
<i>Ilustración 23 - Caída de tensión homopolar por el condensador</i>	42
<i>Ilustración 24 - Intensidad derivada en los condensadores</i>	43
<i>Ilustración 25 - Intensidad resultante en la línea</i>	43
<i>Ilustración 26 - Conversión de intensidades de fase a secuencias</i>	44
<i>Ilustración 27 - Modelo de selector de falta</i>	70
<i>Ilustración 29 - BP Fuente de tensión local</i>	71
<i>Ilustración 30 - BP Fuente de tensión remota</i>	71
<i>Ilustración 31 - BP Inductancias trifásicas locales</i>	72
<i>Ilustración 32 - BP Inductancias trifásicas del sistema equivalente</i>	72
<i>Ilustración 33 - BP Inductancias trifásicas remotas</i>	73
<i>Ilustración 34 - BP Resistencias trifásicas para reducción de ruido</i>	73
<i>Ilustración 35 - BP Modelo en Pi local</i>	74
<i>Ilustración 36 - BP Falta</i>	75
<i>Ilustración 37 - BP Medidor V-I trifásico</i>	76

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 - Resumen de Tareas e Hitos</i>	22
<i>Tabla 2 - Diagrama de Gantt</i>	23
<i>Tabla 3 - Tipo de falta según el valor asignado</i>	46
<i>Tabla 4 - Ejemplo de resultados obtenidos BCG</i>	48
<i>Tabla 5 - Ejemplo de resultados obtenidos CAG</i>	49
<i>Tabla 6 - Ejemplo de resultados obtenidos ABG</i>	49
<i>Tabla 7 - Listado de valores de Resistencias a las que se produce el cambio de faltas bifásicas a faltas bifásicas a tierra</i>	50
<i>Tabla 8 - Resumen del Presupuesto</i>	54
<i>Tabla 9 - Parámetros de línea</i>	68

INTRODUCCIÓN

La finalidad de este documento es la de introducir al lector al Trabajo de Fin de Grado: *Selector de fases basado en las corrientes totales de falta para protección diferencial de línea*.

Este trabajo es un informe técnico de investigación realizado en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Escuela de Ingeniería de Bilbao por el estudiante del Grado en Ingeniería en Tecnología Industrial Yeray Rodríguez Rincón y dirigido por el Dr. Felipe Uriondo Arrue, en el que se pretende trabajar el desarrollo de los conceptos de protección diferencial, redes de secuencias y faltas en las líneas del sistema eléctrico de potencia.

En primer lugar, se contextualizará el enfoque de este Trabajo de Fin de Grado para exponer cuáles han sido los motivos por los que se realiza.

Seguido de la contextualización del mismo, se procederá a establecer el alcance y, por tanto, los objetivos propios de este trabajo. Así pues, se comentará cuál es la trayectoria que se seguirá en esta línea de investigación y los correspondientes hitos para llegar a su finalidad.

El siguiente punto tratará sobre los beneficios que aporta el estudio, ya no sólo en cuanto a la línea de investigación, sino que también se discutirá acerca de una supuesta implementación del mismo en el mercado; esto es, si pudiera ser, a priori, una aplicación innovadora viable o no.

Tras el detalle sobre los beneficios del trabajo, se realizará el análisis del estado del arte. Este estudio comparará la línea de trabajo a desarrollar con las alternativas vigentes para determinar si la línea de la investigación escogida es innovadora o, por el contrario, ya ha sido desarrollada.

Para acabar con esta fase inicial, se realizará un análisis de las herramientas, en el que se expondrán los tres pasos a realizar para el correcto desarrollo del estudio; es decir, se detallará el trabajo necesario para realizar el análisis teórico, la modelización o simulación del sistema y, por último, el análisis experimental.

Con esta apropiada contextualización sobre la fase inicial, se da pie a introducir la fase más extensa del Trabajo de Fin de Grado: la metodología seguida en el desarrollo del mismo.

En una primera instancia, a modo ilustrativo, se describirán todos los conceptos teóricos que se han tenido en cuenta para la realización de este proyecto. En una segunda parte, en cambio, se contextualizarán las simulaciones del modelo realizadas y se analizarán los correspondientes resultados obtenido en el software informático SimPowerSystems, de Simulink y de Matlab.

A continuación, se adjunta una explicación sobre los costes que ha generado la realización de este Trabajo de Fin de Grado.

Por último, se detallarán las conclusiones generales del estudio sobre el selector de faltas basado en las corrientes totales de falta para protección diferencial de línea, si su base teórica es adecuada y si es viable su implantación a nivel de mercado.

De forma adicional se adjuntan las referencias de información consultadas y los anexos correspondientes para la contextualización completa del estudio. Cabe mencionar que, para el uso correcto de los archivos de simulación, será necesario emplear el software: SimPowerSystems.

1. CONTEXTO

Las líneas de transporte y distribución son elementos básicos para que el sistema eléctrico de potencia pueda ser capaz de desarrollar, con calidad, los fines de transporte y de distribución de la energía demandada.

Es por ello que se hace necesario el continuo estudio e investigación de protecciones en la materia de las líneas de transporte y de distribución, para así lograr la menor alteración posible en cuanto a lo que a las mismas atañe. De esta forma, no sólo se intenta mejorar con el fin de abastecer con la mayor calidad posible la energía que se demanda, sino que además se intenta reducir los costes que se generarían en, por ejemplo, una pérdida de energía debida a cualquier falta en las citadas líneas.

Para contextualizar las consecuencias que podría generar una alteración negativa en la red, se procederá a ilustrar un ejemplo: supóngase que se ha generado un cortocircuito en una línea. Debido a ese cortocircuito, las protecciones intentarán desconectar el elemento protegido del resto del sistema lo más rápido posible, ya que, a mayor tiempo de duración de la falta, mayores serán los costes de reparación. Además, y en caso de propagarse la falta, ésta podría alcanzar elementos colindantes, lo que generaría un mayor coste de reparación. Coste de reparación sumado al propio coste de la incapacidad de trabajo de los elementos afectados hasta que se consiguiera restablecer el estado de funcionamiento habitual de dicha línea. Como es lógico, estos costes se reducen enormemente gracias a la innovación tecnológica.

A través de este Trabajo de Fin de Grado, se intentará estudiar y encontrar una solución innovadora que mejore la sensibilidad de las protecciones diferenciales ya que, en ocasiones, en las que se comercializan a día de hoy se hace prácticamente imposible determinar qué fases están siendo afectadas por una falta, lo que genera, con el fin de evitar la propagación de la misma, un salto automático de todas las fases.

Así pues, y como base genérica del estudio, se estudiarán las redes de secuencias para establecer, en cada una de las faltas posibles, las fases afectadas. De esta forma, la protección diferencial en faltas monofásicas sólo tendría que disparar en aquellas fases en las que se produjera una alteración.

2. ALCANCE Y OBJETIVOS

La protección diferencial, o también llamada Función de Protección ANSI 87, es empleada en diversos elementos del sistema eléctrico de potencia con el fin de protegerlos contra faltas internas. Entre otros, los elementos del sistema en los que tiene labor dicha protección son los siguientes:

- Barras
- Generadores
- Transformadores de potencia
- Motores de alta potencia
- Líneas de transporte

En este trabajo nos centraremos en el estudio de la protección diferencial en las líneas de transporte, aunque, bien es cierto que la base teórica de este estudio podría ser válida para extrapolarla a otros elementos del sistema, como las líneas de distribución.

Así pues, y tras el exhaustivo estudio teórico que se desarrollará en el trabajo, se pretende que esta línea innovadora pueda estar al alcance de las empresas que trabajen en el sector del transporte y la distribución de la energía eléctrica y que, tras el correspondiente desarrollo del diseño, pueda ser implementado.

Este estudio tendrá como objetivo principal evaluar la adecuación teórica de la selección de las fases que estén afectadas por las distintas faltas que se pudieran generar, basándose en las redes de secuencias. De esta forma, se reduciría considerablemente el umbral de sensibilidad de las protecciones diferenciales hábiles hasta la fecha.

Para la realización del trabajo, se creará, a través del software SimPowerSystems de Simulink y de Matlab, un modelo de línea de transporte del sistema eléctrico de potencia.

Tras la realización de las simulaciones de las faltas, se detallarán las correspondientes explicaciones detalladas sobre la adecuación de los valores y las conclusiones obtenidos.

3. BENEFICIOS

La protección diferencial es un integrante fundamental en la estructura del sistema eléctrico de potencia. Si esta protección no estuviera implementada, cualquier falta interna en los elementos protegidos tendría una mayor repercusión tanto técnica como económica.

Por tanto, la función que tiene la protección diferencial ante cualquier falta es la de disparar; esto es, aislar y proteger un elemento, para que dicho elemento sufra el menor daño posible, y, por ello, que genere el menor coste posible. Además, la desconexión de dicho elemento del resto del sistema es crucial para que dicha falta no se propague y genere daños en otros elementos.

No obstante, si bien es cierto que el coste que pudiera suponer una rotura de algún elemento de una línea de transporte no es muy elevado en comparación con otros elementos del sistema, es indispensable intentar buscar una mejora en las protecciones diferenciales de dichas líneas ya que, independientemente de la reducción del coste que pudiera ocasionar, se estaría mejorando la protección contra la propagación de las faltas a otros elementos del sistema de mayor coste de reparación.

Dado que en este estudio se va a trabajar para mejorar la sensibilidad de la protección diferencial, un mayor ratio de acción en la selección de las fases que estén sufriendo la falta conlleva una menor pérdida de dinero. Esto es así debido a que, durante el proceso de disparo y de desconexión, la empresa responsable tendrá unos sobrecostes. Por tanto, si se consigue desconectar sólo las fases que están siendo afectadas, habrá fases que podrán seguir trabajando en su forma habitual sin tener, en primer lugar, esos sobrecostes por disparo y, en segundo lugar, una mayor pérdida de ganancia por cortar el flujo de energía en toda la línea.

Dejando un poco al margen los beneficios correspondientes a la parte económica de una empresa o a la propia parte científico-técnica, cabe destacar el beneficio social que este Trabajo de Fin de Grado proporciona. La innovación que pudiera aportar esta línea investigadora corresponde a un aumento en cuanto a la responsabilidad para con la sociedad. De hecho, y dado que la sociedad es completamente dependiente de la electricidad, es lógico asumir que cualquier mejora que ayude a eliminar las faltas que se puedan generar dentro del sistema eléctrico de potencia ayudará a cubrir esta necesidad con la mayor calidad posible.

Por último, cabría destacar el beneficio que este estudio le aporta al autor, ya que el desarrollo de este trabajo le repercute directamente. Mediante este trabajo, el estudiante no sólo pone en práctica lo estudiado en las asignaturas cursadas del Grado en Ingeniería en Tecnología Industrial, sino que, además, y para la realización del mismo, ha tenido que aumentar su conocimiento en la materia, ya que la línea investigadora del proyecto excede en las competencias que el estudiante ha adquirido durante el Grado. Por último, cabe destacar que, a través de esta aplicación, el autor ha adquirido experiencia en la realización de un proyecto de investigación.

4. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE

El objetivo principal de este capítulo es el de contextualizar el estado en el que se encuentra la materia a estudiar; en el caso concreto de este informe, la protección diferencial.

Para ello, este apartado se dividirá en dos grandes bloques. En la primera parte se contextualizará de forma teórica la función de protección 87L. En la segunda, se desarrollará el análisis relativo a lo que se ha innovado hasta la fecha en las protecciones diferenciales, con el objeto de asegurar que la innovación a desarrollar no ha sido publicada con anterioridad.

4.1. CONTEXTUALIZACIÓN TEÓRICA

El principio de operación de las protecciones diferenciales de líneas de transporte, o funciones de protección 87L, es muy sencillo. Consiste en anotar la intensidad que entra en la línea y compararla con la intensidad que sale de la misma. Así pues, el protector opera siempre y cuando la diferencia entre ambas exceda un valor predeterminado, llamado pickup. Esta diferencia se consigue gracias al Dispositivo Electrónico Inteligente, IED, que hay en cada uno de los extremos de la línea, que, al estar conectados entre sí por fibra óptica, comparten la información sobre las corrientes que pasan por la misma.

Es por ello que cada uno de los IEDs compara la intensidad, en magnitud y fase, del extremo remoto, I_R o I_1 , con la del extremo local, I_L o I_2 . Por tanto, si la diferencia entre ambas es nula, el interruptor no deberá actuar.

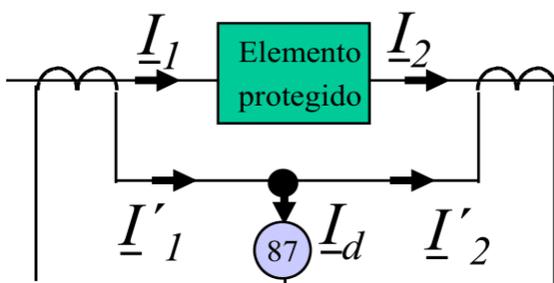


Ilustración 1 - Funcionamiento de la protección diferencial en régimen de no falta

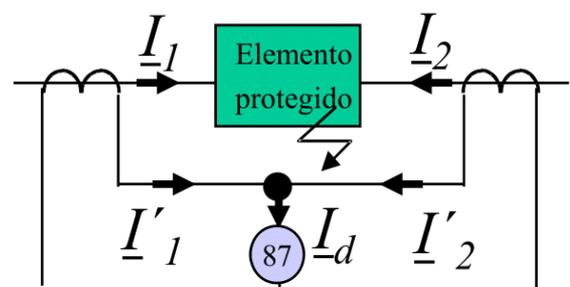


Ilustración 2 - Funcionamiento de la protección diferencial en régimen de falta

El ser una corriente diferencial nula significa que las corrientes de ambos relevadores, remoto y local, son exactamente del mismo valor. Por tanto, se hace trivial suponer que, en cualquier otro caso, siempre y cuando se exceda el pickup, el protector deberá actuar.

Llamamos corriente diferencial a la diferencia de corrientes, en valor absoluto, entre las corrientes local y remota, y corriente de paso a la mitad del cociente de la suma de ambas corrientes, en valores absolutos. Por tanto, la característica de la protección diferencial vendría dada por las siguientes ecuaciones, y sus correspondientes aplicaciones:

$$I_d = |I_1 + I_2| \quad (1)$$

$$I_p = \frac{|I_1| + |I_2|}{2} \quad (2)$$

Dado que los dispositivos no son perfectos, las protecciones cuentan con un margen de error o sensibilidad. Para ilustrarlo, se adjunta la característica de operación del diferencial de protección que relaciona las dos corrientes nombradas anteriormente; esto es, se muestra la característica de disparo en función de las corrientes diferencial y de paso.

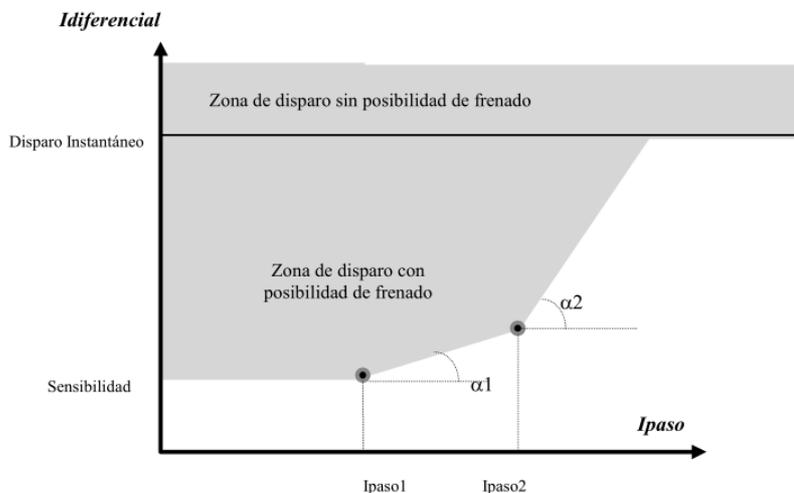


Ilustración 3 - Característica Función Diferencial

Cada uno de los relevadores actúa para todas y cada una de las fases; es decir, cada uno de los relevadores estará comparando las corrientes local y remota de la fase A, de la fase B y de la fase C.

Por tanto, una falta es declarada por el sistema si, y sólo si, cada elemento de fase o de falta contabiliza un exceso del pickup. Entonces, evalúa, a través de la característica, si cae en la zona de no disparo, y por tanto no actúa; o, en su defecto, si cae en la zona de disparo, y por tanto actúa en las fases afectadas.

Cabe la posibilidad de que durante un corto periodo de tiempo se produzcan altas corrientes diferenciales en alguna de las fases. Para que la protección no llegue a operar, se usan corrientes de armónicos para frenarlas. Es lo que se recoge en la característica como zona de disparo con posibilidad de frenado. No obstante, si el valor de la intensidad supera el ajuste del frenado, la protección activará el bloqueo por fase o general, según su configuración de bloqueo.

4.2. ANÁLISIS

Tras la contextualización teórica, se realizará el análisis del estado del arte para corroborar que no se haya publicado ningún avance que solape nuestro estudio. En este caso, dicho análisis se ha llevado a cabo a través del portal web del Institute of Electrical and Electronics Engineers' Xplore Digital Library.

Para realizar la observación en su totalidad, se exploraron dos ámbitos genéricos. Por un lado, sobre el selector de fase de falta, Fault Phase Selector, y, por otro lado, en relación al selector de fase de falta diferencial, Differential Fault Phase Selector.

En total se han analizado 18 estudios relacionados directamente con la materia. Estudios que han proporcionado una amplia gama de mejoras en cuanto a lo que la protección diferencial se refiere. No obstante, y aunque en este capítulo se van a mencionar los ejemplos que se considera tienen mayor relación con el tema, se adjuntan en las referencias la totalidad de los estudios consultados. He aquí la síntesis de algunos avances:

En primer lugar, en [12] estudian la forma en la que, al establecer para cada fase una referencia de comportamiento en régimen de no falta, al comparar dicha referencia con la mezcla de las tres secuencias se obtienen las fases afectadas.

Por otro lado, en [19] desarrollan un trabajo en el cual una relación de magnitudes y ángulos de fase entre las impedancias de fase y las de carga ayudan a la selección de la fase afectada.

Por último, y para cerrar la relación de ejemplos, en [20] nos muestran que mediante los fasores de tensión y de intensidad, se pueden detectar las faltas internas y externas respecto de la zona protegida.

Así pues, y con todo ello, cabe destacar que, entre las 18 publicaciones estudiadas, no ha habido ninguna que haya desarrollado una línea de investigación acerca de un aumento en la sensibilidad de la protección diferencial en líneas de transporte de cara a seleccionar las fases afectadas basándose en el estudio del comportamiento de las corrientes totales en las redes de secuencias.

Por tanto, y de cara a la realización de este trabajo, se concluye de este capítulo que emprender el estudio del aumento la sensibilidad en las funciones de protección 87L está fundamentado.

5. ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS

Las alternativas de desarrollo que se plantean para llevar a cabo este informe técnico sobre la selección de faltas mediante el estudio de las redes de secuencias son las siguientes:

5.1. ANÁLISIS TEÓRICO

Es imprescindible realizar el estudio correspondiente a la documentación teórica para poder realizar el análisis teórico del proyecto. Esta información se adquiere a través de diversos medios: libros, transparencias desarrolladas en las clases de las asignaturas relacionadas con la materia, publicaciones, normas y manuales, entre otros.

Es por ello que, en primer lugar, se debe dominar la materia correspondiente; en este caso, la protección diferencial y las redes de secuencias. Una vez realizado dicho estudio teórico, se evaluará la gama de alternativas de funcionalidad y uso relacionados con dicho elemento para que, con posterioridad, se pueda realizar un exhaustivo estudio de mejora. El caso particular de este trabajo, es el de la mejora de la sensibilidad en las protecciones diferenciales de las líneas de transporte.

Cabe destacar que esta idea de mejora se le ocurrió al Dr. Felipe Uriondo Arrue, director del presente estudio. No obstante, el autor del trabajo ha tenido que realizar el estudio de la documentación correspondiente a la protección diferencial y a las redes de secuencia, con el fin de ejecutar e interpretar de la mejor manera posible el análisis teórico a desarrollar.

5.2. ANÁLISIS DE LAS HERRAMIENTAS

Reunida, estudiada y comprendida la documentación correspondiente a la parte teórica, toca adentrarse en la modelización del sistema. Esta simulación deberá realizarse en un entorno controlado y fuera de todo peligro.

La elección del lugar de simulación deberá hacerse de tal forma que se obtengan características muy similares a las que se obtendrían de forma real, pero sin la necesidad del uso expreso de maquinarias reales y de dispositivos de difícil manejo.

Es por ello que, de forma habitual, se utilizan soportes informáticos para poder realizar dichas simulaciones. Estos soportes se dividen en dos: soportes gratuitos y soportes de pago. Se adjunta, por tanto, una gama de posibilidades para poder elegir el soporte óptimo para realizar la modelización:

1. Soportes informáticos gratuitos:

- **ProfiCAD:** Válido para diseñar diagramas eléctricos.
Disponible en <https://es.proficad.com/>
- **Circuit Lab:** Esquemizador y simulador de circuitos.
Disponible en <https://www.circuitlab.com/>
- **PartSim:** Simulador de circuitos.
Disponible en <http://www.partsim.com/>

Son softwares sin costes, válidos para la realización de modelos eléctricos básicos. El principal problema de este tipo de soportes es que no son válidos para realizar modelizaciones complejas, por lo que quedan directamente descartados.

2. Soportes informáticos de pago:

- **ORCAD:** Automatizador de diseños de circuitos electrónicos.
Disponible en <https://www.orcad.com/>
 - **Ventajas:**
Se puede analizar tanto en corriente alterna como en corriente continua, además del transitorio. Tiene una librería con una amplia gama de componentes reales.
 - **Desventajas:**
Su uso no es una competencia desarrollada en el Grado cursado, por lo que el aprendizaje del uso, en comparación con otros simuladores, ralentizaría el proceso de estudio.

- **PSCAD:** Válido para crear, simular o modelar sistemas. Disponible en <https://hvdc.ca/pscad/>
 - **Ventajas:**

Software para la creación, simulación y modelado de sistemas eléctricos de potencia. Al igual que el soporte anterior, dispone de una amplia gama de elementos para hacer un circuito lo más real posible.
 - **Desventajas:**

Este soporte también tiene el mismo punto negativo que el anterior. No es un soporte que se desarrolle durante los estudios del citado Grado.

- **SimPowerSystems:** Válido para modelar y simular sistemas eléctricos de potencia. Disponible en <https://es.mathworks.com/products/simscape-electrical.html>
 - **Ventajas:**

Este soporte desarrollado por *MathWorks*, de *Matlab*, es un software informático creado para la modelación y la simulación de sistemas eléctricos de potencia. Entre otras funciones, se pueden realizar análisis de armónicos y regímenes –tanto estacionarios como transitorios-, además de las funciones propias contenidas en el propio programa de *Matlab*.

Contiene una librería muy extensa de componentes eléctricos reales. Gracias a toda la gama de elementos disponibles, se logra dotarle al circuito modelado de una mayor similitud en comparación con los resultados que se obtendrían si se experimentara de forma real.

En adición, este soporte ha sido trabajado en varias asignaturas del Grado en Ingeniería en Tecnología Industrial; tanto *Matlab* como el propio *SimPowerSystems*.

- **Power Factory:** Software de análisis de sistemas de generación, transporte y distribución de energía eléctrica. Disponible en <https://www.digsilent.de/en/powerfactory.html>
 - **Ventajas:**
Es el software líder en análisis de sistemas eléctrico dado que cubre una gama muy amplia de funciones; desde las características más estándares hasta las más avanzadas y sofisticadas como monitorización el rendimiento para pruebas, generación distribuida, simulación en tiempo real... Además, es altamente flexible de cara a las aplicaciones reales empresariales.
 - **Desventajas:**
Este soporte también tiene el mismo punto negativo que los anteriores. No es un soporte que se desarrolle durante los estudios del citado Grado.

Así pues, y teniendo en cuenta todas las opciones expuestas, se usará el software *SimPowerSystems* para la realización del modelo del sistema eléctrico. Este sistema eléctrico estará basado en un modelo de línea de transporte de la red eléctrica.

Para contextualizar el trabajo a realizar, y tras la modelización de la misma, se simularán las distintas faltas que se pudieran generar en la línea de transporte modelada, se tomarán los datos correspondientes y se discutirá acerca de los resultados obtenidos.

5.3. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

Una vez realizado el análisis teórico y la correspondiente modelización del sistema, se procedería a realizar un análisis experimental.

En este caso, y debido al tiempo establecido para la realización del TFG y las competencias a adquirir en el mismo, se hace inviable abarcar el análisis experimental. No obstante, cabe destacar que para llevarlo a cabo se deberán de tener en cuenta tanto el pliego de condiciones como la normativa correspondientes.

6. METODOLOGÍA

El apartado de Metodología es el apartado más extenso del Trabajo de Fin de Grado. En él se incluyen la descripción de tareas, fases y procedimientos, el análisis teórico para la realización del modelo con su explicación, y las conclusiones obtenidas.

6.1. TAREAS, FASES Y PROCEDIMIENTOS

Las líneas principales del trabajo comenzaron en el mes de julio de 2018 ya que tanto el profesor como el estudiante consideraron que era buena idea comenzar cuanto antes para tener tiempo de margen e ir poco a poco. Durante la última quincena de ese mes el estudiante analizó toda la normativa y documentación teórica relacionada con la protección diferencial y el análisis de la red de secuencias para cada una de las posibles faltas que se pudieran dar en la línea.

Tras la vuelta de vacaciones de verano, el estudiante, con la ayuda del tutor, empezó a realizar unos modelos de línea en *Simulink* para que fuera familiarizándose con el programa. Durante ese periodo realizó el estudio del arte. Completado el estudio del arte, el estudiante logró el **Hito 1**, preliminar, que da pie a la realización del modelo de línea.

Debido a la época de exámenes parciales, finales, trabajos y otras obligaciones del curso académico, hubo un parón de dos meses.

A finales del mes de enero de 2019, el estudiante, con la supervisión del tutor, realizó el modelo correspondiente a la línea para que, en última instancia, pudiera realizar la toma de datos y, con ello, redactar el trabajo.

La realización del modelo, con la correspondiente toma de datos, da lugar al alcance del **Hito 2**, con el que se finaliza la parte práctica del trabajo. Por último, la realización de la redacción del trabajo pone fin al mismo, alcanzando así el **Hito 3**.

Por tanto, el listado de tareas e hitos de cara a la realización del trabajo fueron las siguientes:

- T1 Análisis y comprensión teórico.
- T2 Introducción a los modelos de línea.
- T3 Estudio del arte.
- H1** Fin de la fase preliminar.
- T4 Realización del modelo de línea.
 - T4.1. Modelo de la línea.
 - T4.2. Modelo de redes de secuencias.
 - T4.3. Selector de faltas.
 - T4.4. Modelización del Sistema.
 - T4.5. Toma de datos y discusión.
- H2** Fin de la fase práctica.
- T5 Redacción del Trabajo de Fin de Grado.
- H3** Fin del Trabajo de Fin de Grado.

Nombre de la Actividad	Fecha de inicio	Duración en días	Fecha fin
T1	09-jul	18	27-jul
Vacaciones	27-jul	39	04-sep
T2	04-sep	24	28-sep
T3	04-sep	62	05-nov
H1	09-jul	119	05-nov
Parón	05-nov	85	29-ene
T4			
T4.1	29-ene	9	07-feb
T4.2	07-feb	12	19-feb
T4.3	19-feb	7	26-feb
T4.5	26-feb	51	18-abr
Semana Santa	18-abr	11	29-abr
T4.6	29-abr	20	19-may
H2	29-ene	110	19-may
T5	19-may	29	17-jun
H3	09-jul	345	17-jun

Tabla 1 - Resumen de Tareas e Hitos

6.2. DIAGRAMA DE GANTT

Se adjunta el Diagrama de Gantt con las tareas e hitos nombrados anteriormente:

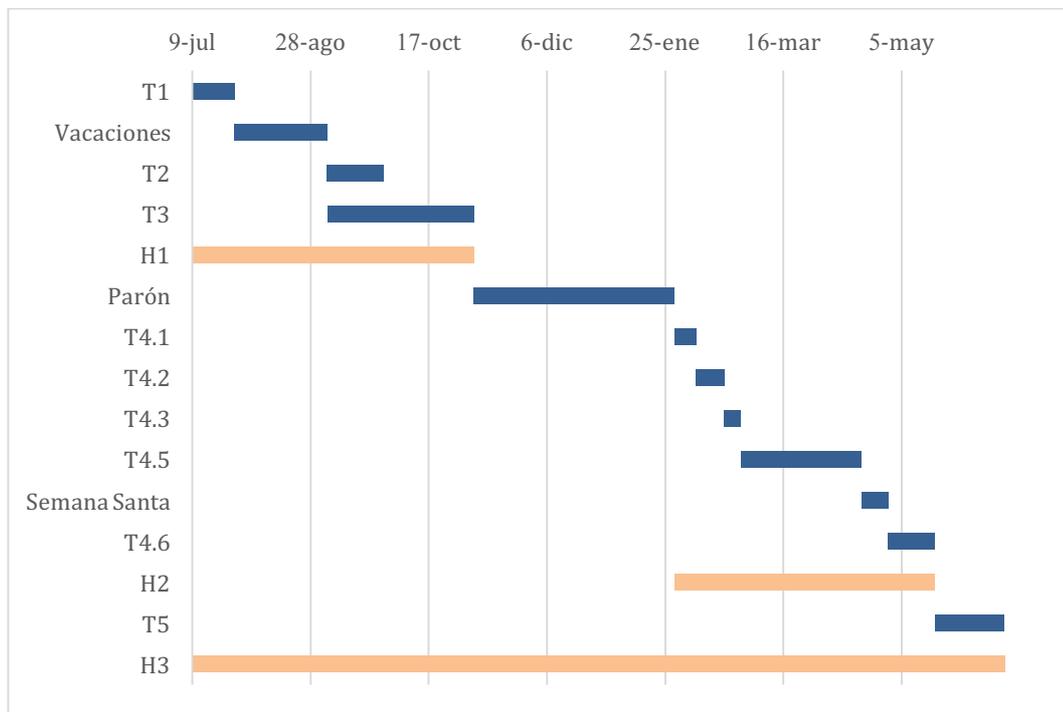


Tabla 2 - Diagrama de Gantt

6.3. CONCEPTOS TEÓRICOS

Tras la contextualización teórica descrita sobre la protección diferencial en el apartado 4.1 del presente proyecto, y de cara a poder comprender en toda su extensión el modelo realizado, es imprescindible entender los conceptos relacionados con las faltas; esto es: qué son faltas en el sistema eléctrico y su origen, qué tipos de faltas existen, cuál es la metodología para su análisis y cuál es su desarrollo teórico.

6.3.1 Faltas en el sistema eléctrico. Origen

Llamamos falta a todo fallo o forma de operación no deseada en el sistema eléctrico. Podemos diferenciar dos tipos de faltas principalmente: faltas de cortocircuito, conexiones accidentales a través de bajas impedancias, y faltas serie, ocasionadas por desequilibrios de impedancias. En el estudio de este proyecto nos centraremos en las faltas debidas a cortocircuitos.

Si bien es cierto que las faltas no son frecuentes, el daño que generan es muy grave y provocan, entre otros, los siguientes efectos: sobrecargas térmicas, esfuerzos electrodinámicos elevados y variaciones de tensión inadmisibles.

Estas situaciones están derivadas por razones muy variadas; por ejemplo, por una caída de fases a suelo debida a la destrucción de una torre de alta tensión, por la rotura de conductores debida a la acción de una carga de hielo, por la caída de objetos o rayos sobre la línea, por el contacto de dos conductores debido a la acción del viento o por una perforación de un cable subterráneo.

6.3.2 Tipos de faltas

Hay diez tipos de faltas de cortocircuito divididas en cuatro grandes grupos:

1. **Faltas monofásicas.** Son unas faltas asimétricas producidas por un cortocircuito entre una fase y la tierra. Son debidas a la caída de un árbol sobre una fase, a una caída debida al viento o al hielo... y representan el 70% de las faltas del sistema. Hay tres tipos de faltas monofásicas: AG, BG y CG, que corresponden a la fase afectada y la tierra (*ground* ó *earth*).

- 2. Faltas bifásicas a tierra.** Son unas faltas asimétricas originadas por las mismas causas que las monofásicas, pero con la diferencia de que éstas afectan a dos fases. Representan el 10% de las faltas. En este caso, diferenciaríamos otras 3 faltas distintas: BCG, CAG y ABG, que corresponden a las dos fases afectadas y a la tierra.
- 3. Faltas bifásicas.** Son unas faltas asimétricas producidas entre dos fases distintas de la línea debida al viento, roturas de cables... y representan el 15% de las faltas. Existen tres tipos de faltas bifásicas: BC, CA y AB, correspondientes a las fases afectadas.
- 4. Falta trifásica.** Es una falta simétrica producida entre las tres fases; esto es, todas las fases están siendo afectadas por igual. Ésta suele ser debida, por ejemplo, a caídas de objetos sobre la línea, y producen las mayores intensidades de cortocircuito. Representan el porcentaje restante.

6.3.3 Metodología de análisis

La metodología que se utiliza para analizar las faltas por cortocircuito está dividida en tres grandes bloques: Reducción a valores por unidad, cálculo de las componentes simétricas y construcción de circuitos y redes de secuencias.

6.3.3.1 Reducción a valores por unidad

Llamamos valor por unidad a un cambio de escala que relaciona a todas las variables que se van a utilizar respecto de una variable referencia; esto es, eligiendo la tensión y la potencia como valores nominales base ($S_{base} = S_N$ y $U_{base} = U_N$):

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \cdot U_{base}} \quad (3)$$

$$Z_{base} = \frac{U_{base}}{\sqrt{3} \cdot I_{base}} = \frac{U_{base}^2}{S_{base}} \quad (4)$$

Así pues, y a modo de generalización, para cualquier elemento A que tengamos que referenciar, usaremos la notación:

$$A_{pu} = \frac{A}{A_{base}} \quad (5)$$

Cabe destacar que si hay dos valores referenciados en distintas bases habrá que hacer un cambio de base con el fin de hallar la relación que tenga ambas variables referenciadas bajo la misma base.

6.3.3.2 Cálculo de las componentes simétricas

Al producirse una falta, el equilibrado de tensiones e intensidades; es decir, tres fases con igual módulo pero desfasadas 120° entre sí, pasa a ser un sistema desequilibrado que se descompensa en tres componentes distintas:

1. **Componentes de secuencia positiva o directa.** Son tres fasores de igual magnitud, desfasados 120° entre sí y con la misma secuencia de fases que el sistema original. Se designa por el subíndice 1.

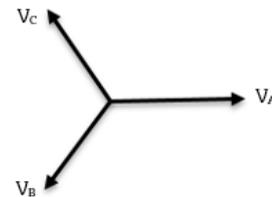


Ilustración 4 - Sistema vectorial de secuencia directa

2. **Componentes de secuencia negativa o inversa.** Son tres fasores de igual magnitud, desfasados 120° entre sí, pero con una secuencia de fases opuesta al sistema original. Se designa por el subíndice 2.

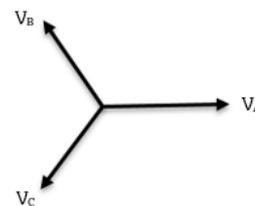


Ilustración 5 - Sistema vectorial de secuencia inversa

3. Componentes de secuencia cero u homopolar. Son tres fasores de igual magnitud, pero sin ángulo de desfase entre ellos. Se designa por el subíndice 0.



Ilustración 6 - Sistema vectorial de secuencia homopolar

Cada falta se compone de vectores de cada una de las componentes que, al sumarlas vectorialmente, producen el sistema desequilibrado generado por la falta. Para relacionar las tres componentes entre sí, referenciamos todas las fases con respecto a la fase A. Estableciendo $a = 1 \angle 120^\circ$ se dan las relaciones entre las fases A, B y C respectivamente:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (6)$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} = a^2 \cdot V_{a1} + a \cdot V_{a2} + V_{a0} \quad (7)$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} = a \cdot V_{a1} + a^2 \cdot V_{a2} + V_{a0} \quad (8)$$

Donde:

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} \quad (10)$$

Y, por tanto, los vectores componentes simétricos serán:

$$V_0 = \frac{1}{3} \cdot (V_a + V_b + V_c) \quad (11)$$

$$V_1 = \frac{1}{3} \cdot (V_a + a \cdot V_b + a^2 \cdot V_c) \quad (12)$$

$$V_2 = \frac{1}{3} \cdot (V_a + a^2 \cdot V_b + a \cdot V_c) \quad (13)$$

De forma análoga se hallarían las componentes simétricas en relación con la intensidad. Por tanto,

$$I_0 = \frac{1}{3} \cdot (I_a + I_b + I_c) \quad (14)$$

$$I_1 = \frac{1}{3} \cdot (I_a + a \cdot I_b + a^2 \cdot I_c) \quad (15)$$

$$I_2 = \frac{1}{3} \cdot (I_a + a^2 \cdot I_b + a \cdot I_c) \quad (16)$$

6.3.3.3 Circuitos y redes de secuencias

Los circuitos de secuencias se basan en hacer un equivalente del circuito teniendo como referencia las tres componentes halladas anteriormente. Si bien es cierto que hay distintos circuitos de secuencia dependiendo del elemento que estemos analizando, nos centraremos única y exclusivamente en los circuitos de secuencia de las líneas de transporte y de las cargas, tanto en circuitos estrella como en circuitos triángulo.

6.3.3.3.1 Líneas de transporte

Las líneas de transporte presentan un valor idéntico tanto de impedancia Z como de admitancia Y frente a la circulación de corrientes en secuencia directa como en secuencia inversa: $Z_1=Z_2$ e $Y_1=Y_2$. No obstante, para la circulación de intensidades de corriente homopolar, dado que la impedancia tiene un valor superior, del orden de 2.5-3.5 veces Z_1 , la impedancia tiene un valor inferior que las secuencias anteriores. Cabe destacar que en el cálculo de cortos quedaría despreciada la rama de vacío por trabajar con el modelo de línea corta.

Por tanto, y teniendo como base los circuitos de secuencias, y extrapolándolo a cada elemento del sistema, obtendríamos las redes de secuencias. Estas redes son las encargadas de mostrar las trayectorias de la intensidad de cada frecuencia en cada fase del sistema real. Por tanto, y como es lógico, tendremos tres redes de secuencias:

1. **Red de secuencia positiva.** Red que representa el sistema que funciona de forma equilibrada; esto es, lo que viene siendo el monofásico equivalente.
2. **Red de secuencia negativa.** Esta red elimina las fuentes de la red de secuencia directa y sustituye los valores de Z_1 por los valores de Z_2 .
3. **Red de secuencia homopolar.** Red análoga al de secuencia inversa, pero con los valores de Z_0 en vez de Z_2 .

6.3.3.3.2 Circuitos estrella

Debido al formato de conexión de los circuitos de estrella, la ecuación genérica que relaciona las fases con el neutro es la siguiente:

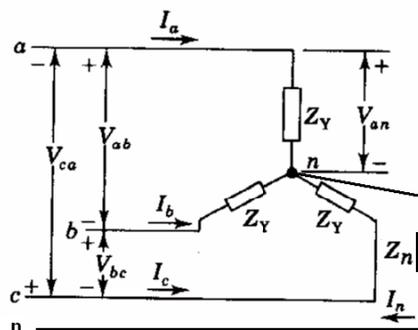


Ilustración 7 - Circuito con conexión en estrella

$$I_N = I_a + I_b + I_c \quad (17)$$

$$I_N = (I_{a0} + I_{b0} + I_{c0}) + (I_{a1} + I_{b1} + I_{c1}) + (I_{a2} + I_{b2} + I_{c2}) \quad (18)$$

$$I_N = (I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}) + (I_{a0} + a^2 \cdot I_{a1} + a \cdot I_{a2}) + (I_{a0} + a \cdot I_{a1} + a^2 \cdot I_{a2}) \quad (19)$$

$$I_N = 3 \cdot I_{a0} \quad (20)$$

Para que exista esta corriente homopolar, es necesario que haya una impedancia de conexión a tierra Z_N ; por tanto:

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_n \\ V_n \\ V_n \end{pmatrix} = Z_Y \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} + 3I_{a0}Z_n \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (21)$$

Que, transformando a componentes simétricas:

$$\begin{pmatrix} V_{a0} \\ V_{b0} \\ V_{c0} \end{pmatrix} = Z_Y \begin{pmatrix} I_{a0} \\ I_{b0} \\ I_{c0} \end{pmatrix} + 3I_{a0}Z_n \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (22)$$

Cabe destacar que estas ecuaciones de secuencias están desacopladas, por lo que sólo afectarían a la secuencia correspondiente.

6.3.3.3 Circuitos triángulo

Debido al formato de conexión de los circuitos en triángulo, las ecuaciones genéricas que relacionan las corrientes son las siguientes:

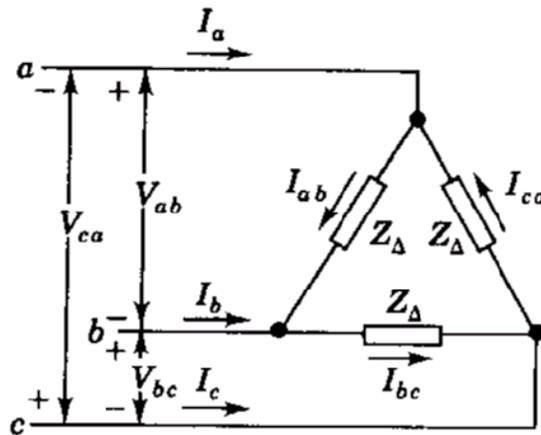


Ilustración 8 - Circuito en conexión triángulo

$$I_a = I_{ab} - I_{ca} \quad (23)$$

$$I_b = I_{bc} - I_{ab} \quad (24)$$

$$I_c = I_{ca} - I_{bc} \quad (25)$$

$$I_a + I_b + I_c = 0 \Rightarrow I_{a0} = 0 \quad (26)$$

Por lo que no puede existir componente homopolar en las intensidades de la línea.

6.3.4 Desarrollo teórico de las faltas

Una vez entendida la parte teórica de las faltas de cortocircuito, se pasará a exponer el desarrollo de la selección de los distintos tipos de faltas que se puedan dar. Este apartado es muy importante porque es básico entender qué condicionantes teóricos hacen que una falta sea monofásica, bifásica a tierra, bifásica o trifásica, para luego poder desarrollar el modelo.

Cabe destacar que se realizarán todos los ejemplos teniendo como referencia la fase A, por lo que, para el resto de las fases, se tendrían que extrapolar las ecuaciones de la forma correspondiente.

6.3.4.1 Faltas monofásicas

Como se ha explicado anteriormente, estas faltas se dan en un sistema desequilibrado que afecta única y exclusivamente a la falta afectada. Así pues, un esquema eléctrico tipo de falta monofásica es el siguiente:

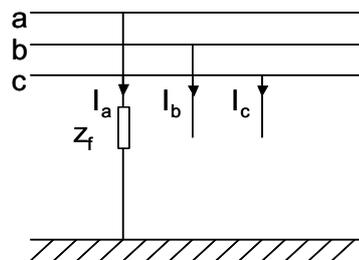


Ilustración 9 - Esquema eléctrico de una falta monofásica

En este esquema podemos observar que tanto las corrientes que pasan por la fase B como las que pasan por la fase C van a ser de valor nulo, mientras que las que pasan por la fase A tendrán un valor distinto de 0. Desarrollando la red de secuencias del circuito tenemos:

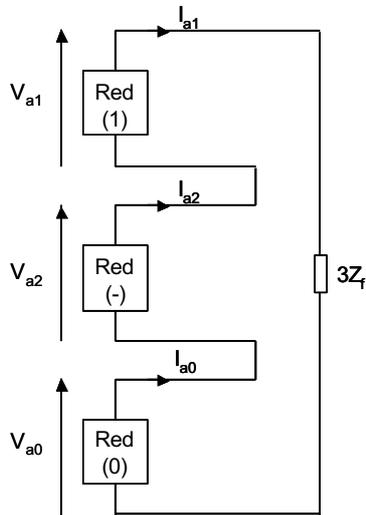


Ilustración 10 - Red de secuencias de falta monofásica

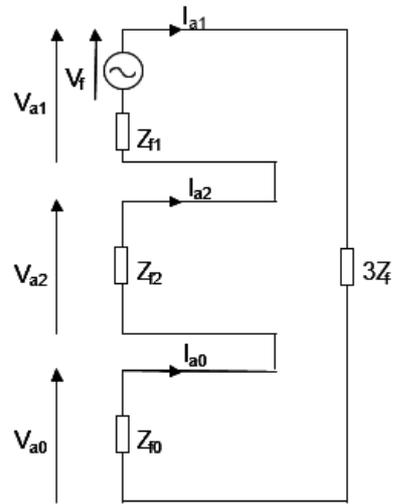


Ilustración 11 - Circuito de secuencias de falta monofásica

Por tanto, tenemos que, trabajando con la relación de ecuaciones (14), (15) y (16), desarrolladas en el apartado 6.3.3.2 del presente estudio, la corriente secuencial de cada componente es igual al tercio de la que circula por la red de secuencia directa; esto es:

$$V_a = Z_f \cdot I_a \quad (27)$$

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{1}{3} \cdot I_a \quad (28)$$

Por tanto, las condiciones que deberíamos imponerle al sistema para que estuviéramos ante una falta monofásica serían las siguientes:

$$I_b = I_c = 0 \rightarrow I_a \neq 0 \quad (27)$$

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{1}{3} \cdot I_a \quad (28)$$

6.3.4.2 Faltas bifásicas a tierra

Estas faltas se dan en un sistema desequilibrado en el que toman parte las dos fases afectadas y la tierra. Así pues, un esquema eléctrico modelo de una falta bifásica a tierra es el siguiente:

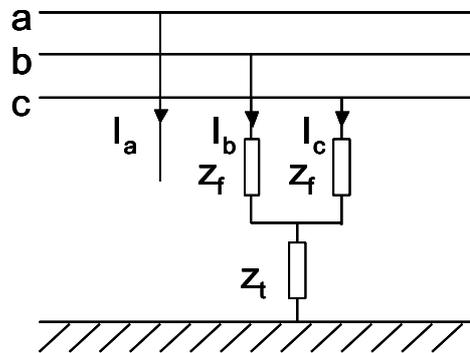


Ilustración 12 - Esquema eléctrico de una falta bifásica a tierra

En este esquema podemos observar que por la intensidad de la fase A tendrá valor nulo. Desarrollando por tanto la red de secuencias del circuito:

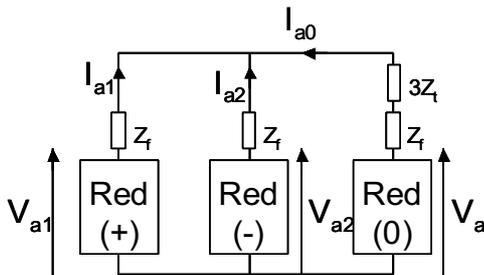


Ilustración 13 - Red de secuencias de falta bifásica a tierra

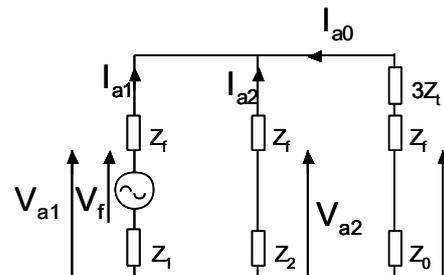


Ilustración 14 - Circuito de secuencias de falta bifásica a tierra

Así pues, a través de la relación (14), (15) y (16) del presente estudio:

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0 \quad (29)$$

Y, por tanto, las condiciones que tendríamos que imponerle al sistema para que fuera una falta bifásica a tierra serían las siguientes:

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0 \quad (30)$$

$$I_{a0} \neq 0 \quad (31)$$

6.3.4.2 Faltas bifásicas

Estas faltas se dan en un sistema desequilibrado que afecta únicamente a las dos fases afectadas. Así pues, un esquema eléctrico tipo de falta bifásica es el siguiente:

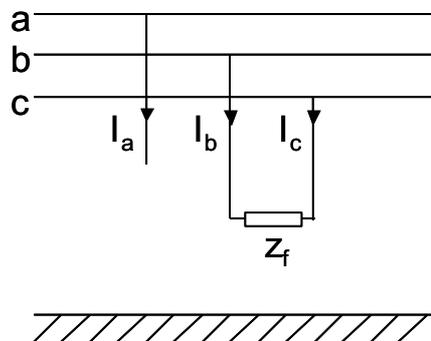


Ilustración 15 - Esquema eléctrico de una falta bifásica

En el mismo se puede observar que la corriente por la fase A es nula y que las corrientes B y C son exactamente iguales, pero con ángulos de fase opuestos.

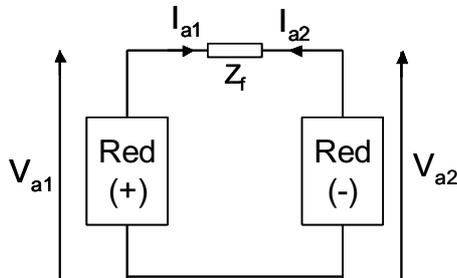


Ilustración 16 - Red de secuencias de falta bifásica

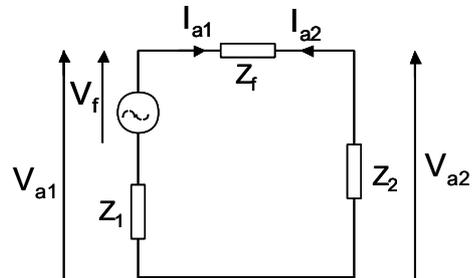


Ilustración 17 - Circuito de secuencias de falta bifásica

Por tanto, las condiciones que le tendríamos que imponerle al sistema para que fuera una falta bifásica serían las siguientes:

$$I_a = 0 \quad (32)$$

$$I_{a1} + I_{a2} = 0 \rightarrow I_{a0} = 0 \quad (33)$$

6.3.4.2 Faltas trifásicas

Estas faltas se dan en un sistema equilibrado que afecta a absolutamente todas las fases. Así pues, un esquema eléctrico tipo de falta trifásica es el siguiente:

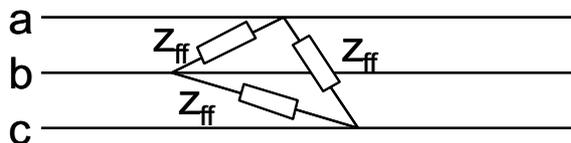


Ilustración 18 - Esquema eléctrico de una falta trifásica

Desarrollando las redes de secuencias podemos observar que, al ser un sistema equilibrado, su comportamiento se asemeja al de un circuito equivalente. Es por ello que no tendrá componentes inversa ni homopolar, y la condición que impondremos será la siguiente:

$$I_{a2} = I_{a0} = 0 \quad \forall \quad I_a \neq 0 \quad (34)$$

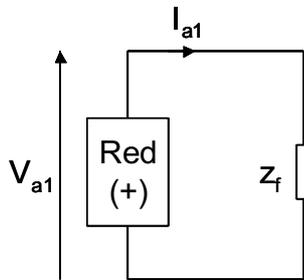


Ilustración 19 - Red de secuencias de falta trifásica

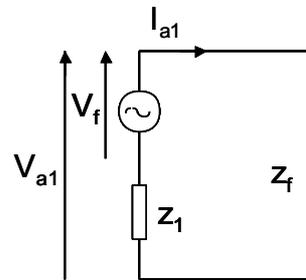


Ilustración 20 - Circuito de secuencias de falta trifásica

6.4. MODELO DE LÍNEA

Expuestos los conceptos teóricos, se procede a desarrollar el modelo de línea realizado para que, posteriormente, se puedan recoger los datos correspondientes.

Este apartado estará dividido en tres subapartados: contextualización del modelo, parámetros de línea y selector de faltas.

6.4.1 Contextualización del modelo

En este apartado se va a explicar el modelo de la línea que se ha realizado; esto es, qué elementos toman parte y cuáles son las variables asignadas. Los valores que irán tomando estas variables a lo largo de la simulación vienen especificados en el Anexo II del presente documento. Así pues, se adjunta el modelo de línea realizado:

Como se puede observar, este modelo está compuesto por doce elementos constituidos en seis bloques distintos:

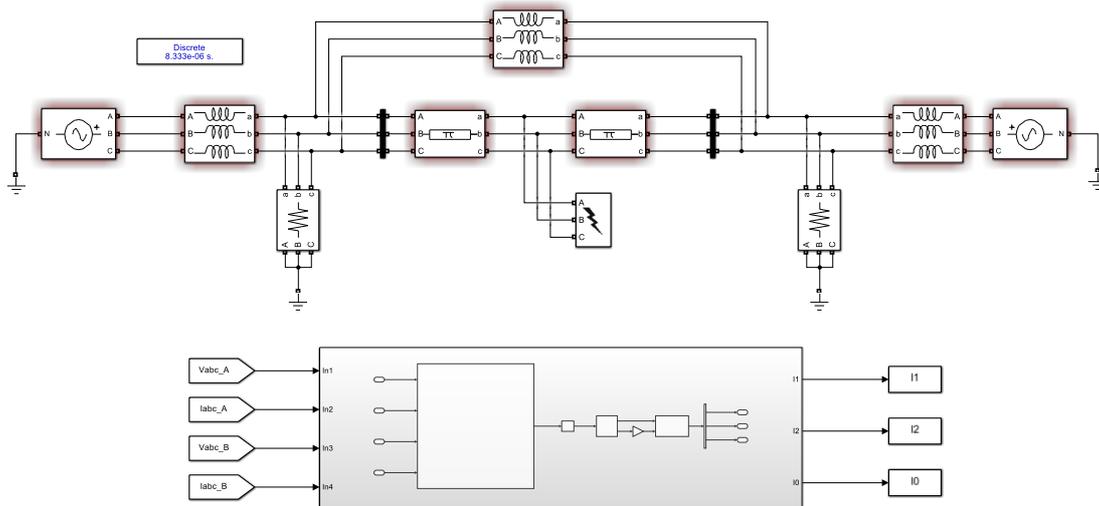


Ilustración 21 - Modelo de línea

- **Fuentes de tensión trifásica.** El modelo dispone de dos fuentes de tensión trifásica, ambas de tensión nominal impuesta UN, variable. Además, y con intención de realizar el barrido de datos de la forma más real posible, se ha creado una segunda variable, delta, que es el ángulo de fase de la fuente de tensión trifásica de la red. Ésta variable irá tomando valores en función de la tensión nominal asignada en cada línea.
- **Impedancias trifásicas.** Estos tres bloques corresponden a cada una de las equivalencias de impedancias que simplifican la red eléctrica mallada.
- **Parámetros de línea en modelo en Pi.** Los dos bloques de parámetros de línea en modelo en Pi constituyen la equivalencia correspondiente a la línea que está siendo analizada; esto es, cada línea tendrá una serie de parámetros característicos que la especificarán y, por ende, la diferenciarán del resto de líneas a analizar.

Así pues, las variables en estos dos bloques serán las siguientes: longitud, resistencia, capacitancia e inductancia, estas tres últimas en valores por unidad de distancia.

- **Medidores V-I trifásicos.** De acuerdo con el funcionamiento de la protección diferencial, se tomarán medidas de tensión e intensidad a ambos lados del modelo con la finalidad de comparar los valores del medidor local, el de la izquierda, y el remoto, el de la derecha, para averiguar si se ha generado alguna falta. En caso de ser así, a través del selector creado se determinará qué tipo de falta se estará dando y cuáles son las fases que están siendo afectadas.
- **Generador de faltas.** Este bloque es el elemento capaz de generar en el sistema cualquiera de las once faltas para que el selector programado pueda identificarlas junto con las fases que estén siendo afectadas.
- **Resistencias trifásicas.** Estos bloques son de gran utilidad ya que, cuando se generan las faltas en el sistema, son capaces de evitar el ruido que se genera en las líneas. Gracias a ellas podremos detectar de una forma más precisa los valores de las faltas.

6.4.2 Parámetros de línea

De acuerdo con las variables mencionadas en el apartado anterior, y de cara a realizar un barrido de datos lo más minucioso posible, se ha echado mano de treinta líneas reales del norte del Estado. Es por ello que los parámetros de línea irán variando dependiendo de la línea con la que se esté trabajando. Se adjunta en el apartado de anexos el listado correspondiente a las treinta líneas que se han manejado, así como los parámetros correspondientes a cada una de ellas.

6.4.3 Selector de faltas

En este apartado se va a exponer paso a paso cómo se ha creado el selector de faltas. En primer lugar, y de acuerdo con el funcionamiento de la protección diferencial, se van a comparar las intensidades local y remota.

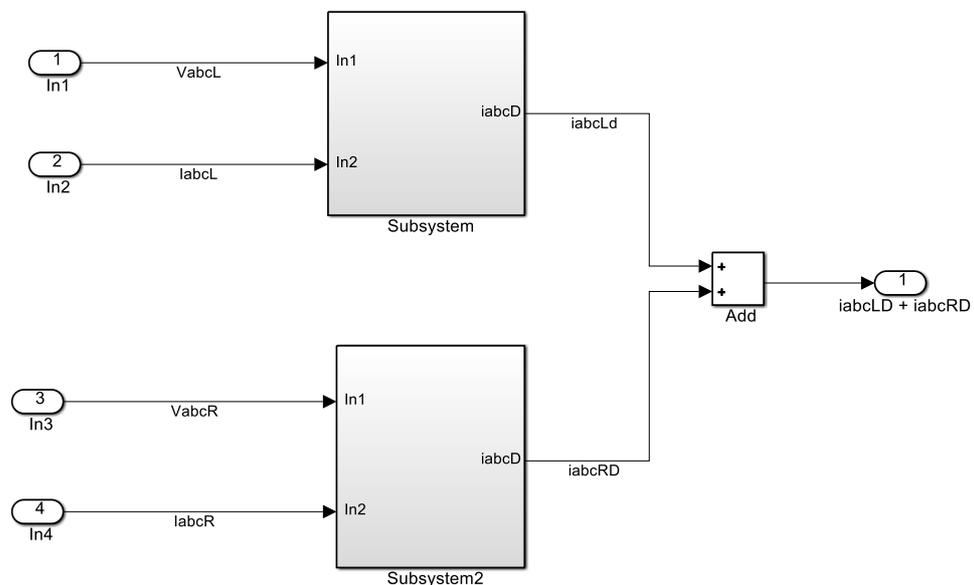


Ilustración 22 - Suma de intensidades local y remota

En la ilustración 22 se puede ver cómo, con la entrada de las tensiones e intensidades halladas en los medidores V-I trifásicos instalados en el sistema, se halla la suma de las intensidades local y remota. Esta suma se corresponde a la intensidad que se dispararía en el punto de la falta, por lo que, en régimen de no falta, la suma de ambas intensidades sería, única y exclusivamente, la correspondiente a la rama de vacío.

No obstante, esas intensidades que se suman no son directamente las intensidades que aparecen en el medidor, ya que hay parte de las intensidades que se queda en el seno del circuito. Así pues, dentro de cada subsistema; es decir, dentro de los subsistemas local y remoto, se tendrá que tener en cuenta esa cantidad de corriente que circula por otro camino.

Para ilustrarlo, en las siguientes imágenes se muestra la forma de hallar el cálculo de las intensidades diferenciales, tanto local como remota. En primera instancia calcularemos la intensidad total generada por la caída de tensión en los condensadores.

Teniendo en cuenta la relación entre tensión e intensidad sobre los condensadores, y recordando las relaciones de secuencia, tenemos que:

$$V_a = V_{a \text{ Condensador1}} + V_{a \text{ Condensador2}} + V_{\text{Condensador0}} \quad (6)$$

$$V_b = V_{b \text{ Condensador1}} + V_{b \text{ Condensador2}} + V_{\text{Condensador0}} \quad (7)$$

$$V_c = V_{c \text{ Condensador1}} + V_{c \text{ Condensador2}} + V_{\text{Condensador0}} \quad (8)$$

Que relaciona los dos primeros sumandos con el valor del condensador 1 (C1) de los parámetros de línea en modelo en Pi, y el tercero con el parámetro C0. Si la relación entre la tensión y la intensidad es la siguiente:

$$i_c = C \cdot \frac{dv}{dt} \quad (38)$$

Tenemos que la relación final entre tensión e intensidad, en función de V_a y V_{c0} , es la siguiente:

$$i_c = \frac{C_1}{2} \cdot \frac{d(v_a - v_{c0})}{dt} + \frac{C_0}{2} \cdot \frac{d(v_{c0})}{dt} \quad (39)$$

Y definido V_{c0} como:

$$V_{c0} = \frac{1}{3} \cdot (V_a + V_b + V_c) \quad (39)$$

Realizamos la secuencia de bucles correspondientes en el programa:

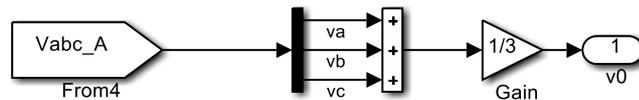


Ilustración 23 - Caída de tensión homopolar por el condensador

Y, para obtener la intensidad que fluye por los condensadores de cada fase, realizaremos las siguientes directrices:

1. Diferencia de valores entre V_i y V_0 .
2. Derivadas, discretas, de la diferencia hallada y de V_0 .
3. Producto entre las derivadas halladas y el $\frac{C_i}{2}$ correspondiente.
4. Suma de ambos productos.

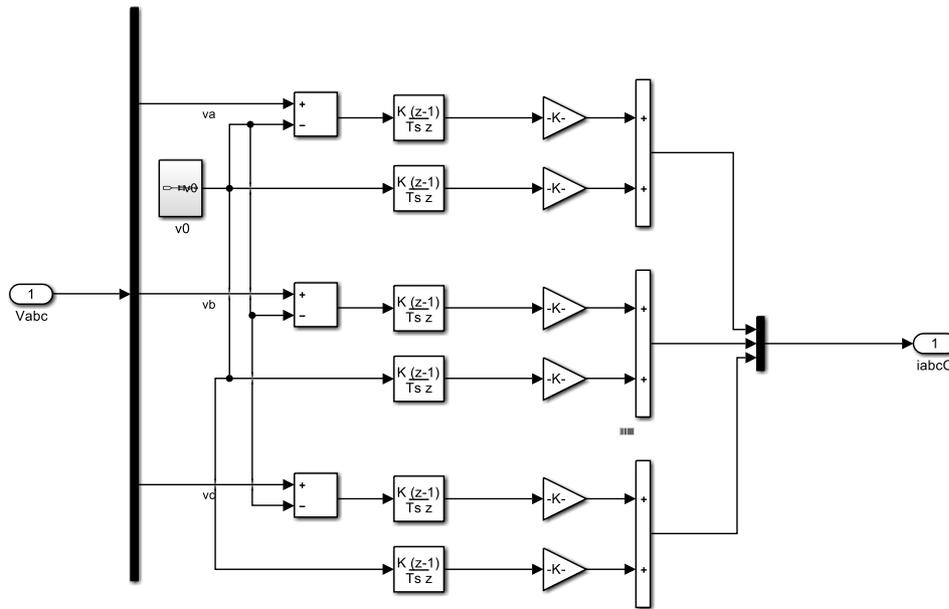


Ilustración 24 - Intensidad derivada en los condensadores

El último paso para la obtención de la intensidad diferencial es el resultado de la intensidad total que pasa por el medidor menos la intensidad que se deriva en los condensadores. Así pues, la secuencia de bloques correspondiente sería la siguiente:

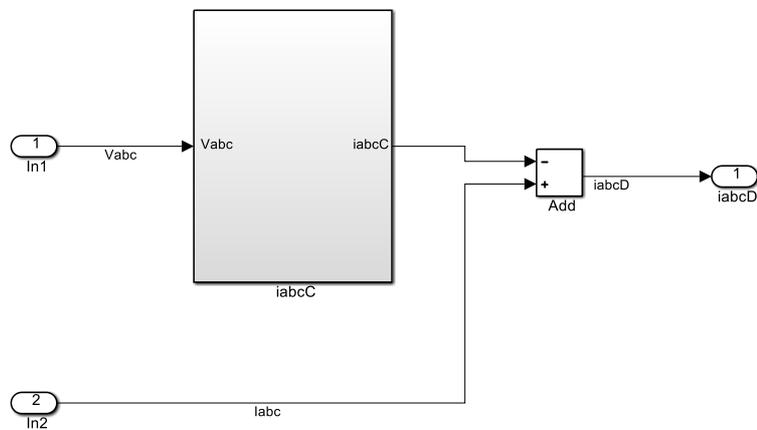


Ilustración 25 - Intensidad resultante en la línea

Hallada la intensidad diferencial que capta cada relevador, se procede a realizar el siguiente paso en busca del selector de faltas a través de las componentes de secuencia. Para ello, realizaremos el cambio de las intensidades de fase a secuencias a través de la ecuación (9) extrapolada a intensidades:

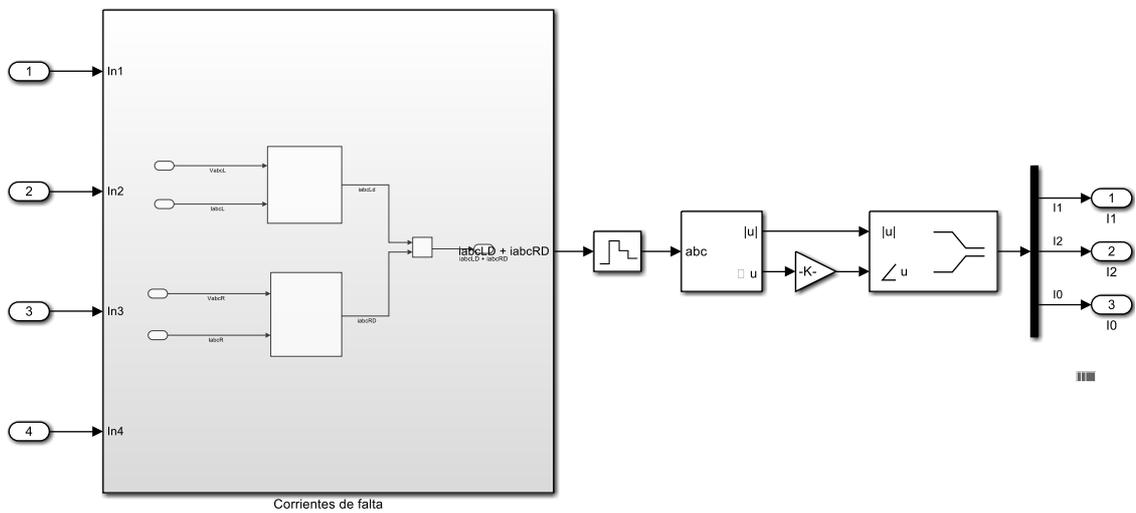


Ilustración 26 - Conversión de intensidades de fase a secuencias

Por último, teniendo como variables de entrada estas intensidades halladas y como restricciones las condiciones expuestas en el apartado 6.3.4 del presente documento, se procederá a generar una función que dará como resultado un valor, del uno al once, con una falta concreta asignada. Así pues, se adjuntan tanto el listado de asignación de valores como la función programada para que el modelo seleccione el valor correspondiente a cada falta:

```
function tipofalta = fcn(I1,I2,I0)

eps=0.05;
a=1*exp(2*pi/3*1j);
Ia1=I1;
Ia2=I2;
Ia0=I0;
Ib1=a^2*I1;
Ib2=a*I2;
Ib0=I0;
Ic1=a*I1;
Ic2=a^2*I2;
Ic0=I0;

if abs(Ia1-Ia2)<eps*abs(Ia1) && abs(Ia1-Ia0)<eps*abs(Ia1)
tipofalta=1;
elseif abs(Ib1-Ib2)<eps*abs(Ia1) && abs(Ib1-Ib0)<eps*abs(Ia1)
tipofalta=2;
elseif abs(Ic1-Ic2)<eps*abs(Ia1) && abs(Ic1-Ic0)<eps*abs(Ia1)
tipofalta=3;
elseif abs(Ia1+Ia2+Ia0)<eps*abs(Ia1) && abs(Ia0)>eps*abs(Ia1)
tipofalta=4;
elseif abs(Ib1+Ib2+Ib0)<eps*abs(Ia1) && abs(Ia0)>eps*abs(Ia1)
tipofalta=5;
elseif abs(Ic1+Ic2+Ic0)<eps*abs(Ia1) && abs(Ia0)>eps*abs(Ia1)
tipofalta=6;
elseif abs(Ia1+Ia2)<eps*abs(Ia1)
tipofalta=7;
elseif abs(Ib1+Ib2)<eps*abs(Ia1)
tipofalta=8;
elseif abs(Ic1+Ic2)<eps*abs(Ia1)
tipofalta=9;
elseif abs(Ia2)<eps*abs(Ia1) && abs(Ia0)<eps*abs(Ia1) && abs(Ia1)>25
tipofalta=10;
else
tipofalta=11;

end
end
```

Donde la asignación de valores en relación al programa realizado sería la siguiente:

Tipo de falta	Valor asignado
Monofásica AG	1
Monofásica BG	2
Monofásica CG	3
Bifásica a tierra BCG	4
Bifásica a tierra CAG	5
Bifásica a tierra ABG	6
Bifásica BC	7
Bifásica CA	8
Bifásica AB	9
Trifásica	10
Indeterminada/Nula	11

Tabla 3 - Tipo de falta según el valor asignado

6.5. TOMA DE DATOS Y RESULTADOS

Realizado el modelo de la línea y programado el selector de falta, se va a proceder a realizar la toma de datos para comprobar que se verifica la hipótesis realizada sobre el aumento de la sensibilidad en la protección diferencial en línea 87L.

6.5.1 Variables de entrada

Para verificar la hipótesis de partida, se ha realizado un programa que, dependiendo de los valores que vayan adoptando cada una de las variables de entrada, dará el valor correspondiente al tipo de falta generada, acorde a la Tabla 3 del presente documento. El programa generado está disponible en el Anexo II del presente documento. Las variables de entrada que se han utilizado son las siguientes:

1. Los parámetros correspondientes a todas y cada una de las 30 líneas. Accesibles en el Anexo II del presente documento.
2. El punto de actuación de la falta. A lo largo de la longitud de cada línea, nueve puntos distintos de actuación; esto es, desde $0.1 \cdot \text{Longitud}_{\text{línea } i}$ hasta $0.9 \cdot \text{Longitud}_{\text{línea } i}$ con un paso de 0.1.
3. El valor de la resistencia de falta a tierra. Se usarán cinco valores de resistencia distintos para cada una de las líneas y para cada uno de los puntos de actuación de las faltas. La resistencia de falta a tierra tomará los valores, en Ohm de: $R_{fg} = [0.1, 1, 10, 100, 1000]$.
4. Las fases afectadas. El programa impondrá las fases que serán afectadas para, posteriormente, comparar que los valores obtenidos corresponden a las mismas. Para ello, se usará el comando `set_param` de *Matlab*, que, dependiendo de la asignación dada ('on' u 'off') para cada una de las fases, impondrá en el bloque de falta trifásica las fases que serán afectadas. Así pues, y como ejemplo, para poder imponer una falta bifásica a tierra con las fases B y C afectadas se impondrá la siguiente sentencia:
`set_param('Localizador/Falta','FaultA','off','FaultB','on','FaultC','on','GroundFault','on').`

Antes de comenzar la simulación, y debido al carácter discreto de la misma, se tiene que determinar el valor concreto de recogida de datos. En este caso, como se ha impuesto que para cada ciclo de simulación se generen 24 muestras, la muestra seleccionada será la 120, la correspondiente al quinto ciclo. Cada simulación durará 5.1 ciclos.

6.5.2 Datos obtenidos

El sistema generó 1350 resultados para cada una de las 11 faltas, lo que da un total de 14850 resultados a analizar. Tanto para las faltas monofásicas como para las faltas bifásicas y las trifásicas, el sistema dio en todos los casos el valor correspondiente a la falta impuesta. Sin embargo, para los tres casos de faltas bifásicas a tierra con el valor de resistencia de falta a tierra de 100 Ohm, el sistema iba generando unos valores aparentemente aleatorios entre los valores correspondientes a cada una de las faltas bifásicas, con y sin tierra, y valores de falta bifásica sin tierra para la resistencia de falta a tierra de 1000 Ohm.

Se adjuntan, a modo de ejemplo ilustrativo, algunos valores obtenidos para ese tipo de faltas impuestas:

BCG									
Línea 1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.1	4	4	4	4	4	4	4	4	4
1	4	4	4	4	4	4	4	4	4
10	4	4	4	4	4	4	4	4	4
100	7	7	7	7	7	7	7	7	7
1000	7	7	7	7	7	7	7	7	7

Tabla 4 - Ejemplo de resultados obtenidos BCG

CAG									
Línea 5	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.1	5	5	5	5	5	5	5	5	5
1	5	5	5	5	5	5	5	5	5
10	5	5	5	5	5	5	5	5	5
100	8	8	8	5	5	5	5	5	5
1000	8	8	8	8	8	8	8	8	8

Tabla 5 - Ejemplo de resultados obtenidos CAG

ABG									
Línea 25	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.1	6	6	6	6	6	6	6	6	6
1	6	6	6	6	6	6	6	6	6
10	6	6	6	6	6	6	6	6	6
100	9	9	6	6	6	6	6	9	9
1000	9	9	9	9	9	9	9	9	9

Tabla 6 - Ejemplo de resultados obtenidos ABG

¿A qué se deben estos fallos?, ¿Son verdaderamente aleatorios?

Teniendo en cuenta que todas las simulaciones daban resultados erróneos para valores de 1000 Ohm, se inició un estudio para averiguar si los valores de las resistencias para las cuales el selector cambiaba el valor seguían un patrón determinado o no.

Falta Bifásica Tierra -> Falta Bifásica									
Línea/dist	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
1	73	74	76	77	78	78	79	80	80
2	26	32	37	40	43	46	47	48	48
3	35	48	58	65	69	69	66	60	52
4	113	114	112	109	105	100	92	84	74
5	78	88	97	105	112	118	123	127	129
6	116	123	127	130	131	129	126	121	114
7	113	117	119	120	119	117	113	109	102
8	91	116	135	147	152	152	150	126	103
9	110	110	111	111	110	109	107	104	101
10	97	99	100	100	99	97	95	91	87
11	114	124	130	133	131	125	116	102	85
12	69	69	68	67	66	65	63	62	61
13	49	51	52	53	54	54	55	54	54
14	49	51	52	53	54	54	55	54	54
15	118	127	134	139	141	140	136	130	121
16	103	108	112	113	113	110	106	100	92
17	52	54	55	55	55	53	50	47	42
18	80	100	115	124	128	126	119	106	88
19	127	129	131	133	134	136	137	138	139
20	53	53	53	53	53	53	53	53	53
21	80	88	95	102	109	115	121	126	131
22	63	68	72	74	75	74	72	69	64
23	64	68	72	76	80	83	86	88	90
24	93	95	95	94	92	87	82	75	66
25	90	97	102	106	107	106	103	97	90
26	39	48	54	58	60	58	54	48	39
27	86	100	113	123	130	136	139	140	139
28	90	90	90	88	86	83	80	76	71
29	86	110	128	137	139	134	121	100	73
30	94	111	123	129	131	127	118	104	84

Tabla 7 - Listado de valores de Resistencias a las que se produce el cambio de faltas bifásicas a faltas bifásicas a tierra

Como se puede observar en la Tabla 7, y como cabría esperar, todas aquellas resistencias cuyo valor de inflexión es superior a los 100 Ohm dan como resultado valores de 4, 5 y 6 en la simulación de la resistencia de falta a tierra de 100 Ohm.

Teniendo en cuenta lo expuesto en el desarrollo teórico se puede afirmar que:

- La única diferencia que hay entre las faltas bifásicas a tierra y las faltas bifásicas es que en las del segundo tipo no existe componente homopolar.
- En los datos hallados se ha comprobado que para valores de resistencias de cambio a bifásica a tierra menores de 100 Ohm la componente homopolar es inferior al valor referenciado en la función *Tipofalta*; esto es, el módulo de la componente homopolar es menor que 0.05 veces el módulo de la componente directa.
- En los valores cuya resistencia de inflexión es superior a 100 Ohm, la componente homopolar es superior al valor referenciado en la función *Tipofalta*.
- Para los casos de valor de resistencia de falta menor de 100 Ohm, esto conlleva a que el selector considere que se está trabajando en régimen de falta bifásica aun estando trabajando en régimen de falta bifásica a tierra.
- Esta alteración de la secuencia teórica en la toma de datos no refleja ningún error en el modelo ya que, al tener unas componentes de intensidad de secuencia homopolar menores al 5% de las de secuencia directa, el sistema actúa como si no hubiera paso de corriente por la resistencia de tierra.

Por tanto, y teniendo en cuenta todo lo expuesto anteriormente, se considera que tanto la toma de datos como el modelo realizado son correctos ya que, como se ha comentado, la fluctuación de valores no es debida a un mal diseño del mismo, sino a un factor de error para adecuar el selector. De todas formas, y de cara a una posible implantación del selector en las líneas, tanto para las faltas bifásicas como para las faltas bifásicas a tierra el selector de la línea dispararía en las tres fases, por lo que no generaría ningún agravio.

7. PRESUPUESTO

En este apartado se puntualizarán todos y cada uno de los costes generados en la realización del proyecto. Dado que es un informe técnico, el presupuesto del proyecto se basa solamente en el coste invertido para llevar a cabo dicho estudio. Además, se adjunta una tabla a modo de resumen de los mismos.

7.1. COSTE DE PERSONAL

El coste de personal invertido en este proyecto ha sido única y exclusivamente el del autor. Éste ha invertido un total de 170h. Por tanto, el coste de personal es el siguiente:

$$170h \cdot 25 \frac{\text{€}}{h} = 4250\text{€}$$

7.2. AMORTIZACIONES

En cuanto a lo que a las amortizaciones se refiere, se ha hecho uso de tres elementos: un ordenador personal, una licencia *SimPowerSystems* de tipo estudiante y una licencia *Microsoft Word*.

- El ordenador tuvo un coste de 1150 €, con una vida estimada de 10 años. Para la realización de este proyecto, el ordenador ha tenido un uso de 170 h. Por tanto, el coste generado por el ordenador es el siguiente:

$$170 h \cdot \frac{1150 \text{ €}}{17000 h} = 11,5 \text{ €}$$

- La licencia *SimPowerSystems* de tipo estudiante tiene un valor de 412€, con una duración estimada de 1700 h. El autor ha usado la licencia durante 25 h. Así pues, el coste de la licencia será:

$$25 h \cdot \frac{412 \text{ €}}{1700 h} = 6,06 \text{ €}$$

- La licencia *Microsoft Word* tiene un valor de 69 € con una duración estimada de 1700 h. El autor ha usado la licencia durante 145 h. Así pues, el coste de la licencia será:

$$145 h \cdot \frac{69 \text{ €}}{1700 h} = 5,89 \text{ €}$$

En total, el gasto realizado para cubrir las amortizaciones es de:

$$11,5 \text{ €} + 6,06 \text{ €} + 5,89 \text{ €} = 23,45 \text{ €}$$

7.3. OTROS GASTOS

En relación al resto de gastos usados en la realización de este informe, cabe destacar el realizado en la matrícula directa de este Trabajo de Fin de Grado, cuyo coste es de 115,14 €.

7.4. COSTES INDIRECTOS

Para poder hacer uso del ordenador y de las licencias, se ha realizado un gasto correspondiente al consumo de electricidad. El coste del kWh medio estaba a 0,12 € con una potencia consumida del ordenador de 0,27 kW. Así pues, si se han invertido 170h, se habrán generado unos costes indirectos por el valor de:

$$170 h \cdot 0,27 \text{ kW} \cdot 0,12 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 5,51 \text{ €}$$

7.5. PRESUPUESTO TOTAL

Se adjunta, por tanto, la tabla que resume todos los costes generados para la realización del Trabajo de Fin de Grado en su totalidad.

PRESUPUESTO	
CONCEPTO	COSTE
Coste de Personal	4250,00 €
Amortizaciones	23,45 €
Otros gastos	115,14 €
SUBTOTAL 1	4388,59 €
Costes indirectos	5,51 €
TOTAL	4.394,10 €

Tabla 8 - Resumen del Presupuesto

Tal y como se ilustra en la tabla 8, el presupuesto total asciende a 4.410,98€. En relación a lo comentado en el principio del apartado, dado que es un informe técnico, el presupuesto es acorde al mismo. Cabe destacar que el mayor gasto se ha realizado en lo relativo al coste de personal; esto es, debido al trabajo invertido por el autor para la realización del estudio.

8. CONCLUSIONES

Tras la conclusión del estudio ejecutado entorno a la sensibilidad del selector de fases para la protección diferencial en líneas, 87 L, se pueden afirmar las siguientes conclusiones:

Se ha creado un selector de faltas para la protección diferencial en líneas que detecta las faltas de cortocircuito que están interfiriendo en el sistema para que dispare las protecciones de las fases que están siendo afectadas.

Con los resultados obtenidos en el modelo de línea realizado, queda garantizada la viabilidad teórica del selector. Dado que los datos recogidos en las faltas bifásicas a tierra reflejaban un error del selector, se estudió el problema con el fin de hallar la raíz del mismo. Tras dicho estudio, se observó que el fallo era debido a un factor de error impuesto por el autor para poder acotar el funcionamiento del selector, por lo que se concluyó que el modelo realizado era correcto.

Teniendo en cuenta las bases técnicas analizadas en este documento, con una correcta adecuación técnica se podría implementar en el mercado de la distribución y del transporte de la energía eléctrica.

Debido a que el estudio del trabajo se basaba en una mejora de las protecciones, se constata que esta mejora en la sensibilidad genera una mejora en la seguridad, en la calidad y en la eficiencia energética, logrando así los objetivos del presente proyecto. Asimismo, la implantación de esta mejora en el sistema eléctrico de potencia supondría la consecución de los beneficios mencionados anteriormente.

Por último, y con respecto a los objetivos personales mencionados con anterioridad, se puede afirmar que éstos han sido satisfactorios y muy productivos. El autor no sólo ha profundizado más allá de lo estudiado en materia de protecciones diferenciales, sino que ha realizado satisfactoriamente el estudio en materia de redes de secuencia y ha mejorado notablemente su destreza en la herramienta informática de SimPowerSystems.

9. BIBLIOGRAFÍA

9.1. LIBROS

- [1] Blackburn, J.L. (1997). *Protective Relaying Principles and Applications*. Washington, USA: Marcel Dekker, INC.

9.2. TRANSPARENCIAS

- [2] Uriondo, F. *Faltas en sistemas eléctricos*. UPV/EHU. Bilbao. Disponible en los anexos del CD.
- [3] Uriondo, F. *Protecciones*. UPV/EHU. Bilbao. Disponible en los anexos del CD.

9.3. PUBLICACIONES

- [4] Bin, S., Xinzhou, D., & Yuanzhang, S. (2003). Impact of evolving fault on fault phase selector based on differential superimposed phase currents. *2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting*. IEEE, Toronto, Canada. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1270945>
- [5] Noori, M.R., & Shahrtash, S.M. (2013). Combined Fault Detector and Faulted Phase Selector for Transmission Lines Based on Adaptive Cumulative Sum Method. *IEEE Transactions on Power Deliver*, 28 (3), pp. 1779-1787. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6521426>

- [6] Noori, M.R., & Shahrtash, S.M. (2012). A novel faulted phase selector for double circuit transmission lines by employing adaptive cumulative sum-based method. *11th International Conference on Environment and Electrical Engineering. IEEE, Venice, Italy*. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6221404>
- [7] Shi, S., & Dong, X. (2007). Implementation and test of fault line selector using zero module current travelling waves. *42nd International Universities Power Engineering Conference. IEEE, Brighton, UK*. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4468954>
- [8] Li, W., Bi, T., & Yang, Q. (2010). Study on sequence component based fault phase selector during power swings. *5th International Conference on Critical Infrastructure. IEEE, Beijing, China*. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5617576>
- [9] Price, E., & Einarsson, T. (2008). The Performance of Faulted Phase Selectors Used in Transmission Line Distance Applications. *61st Annual Conference for Protective Relay Engineers. IEEE, College Station, TX, USA*. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4515074>
- [10] Zheng, T., Zhang, J., & Wu, Q. (2018). Adaptability of phase selectors based on phase-to-phase superimposed currents when confronting cross-voltage faults in mixed-voltage quadruple-circuit line system. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 12 (13), pp. 3242-3247. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8412687>
- [11] Jones, M.S., Thomas, D.W.P., & Christopoulos, C. (1997). A nonpilot phase selector based on superimposed components for protection of double circuit lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 12 (4), pp. 1439-1444. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/634158>

- [12] Li, W., Bi, T., Xu, Z., & Yang, Q. (2011). A phase selector for transmission line protective relaying using the multi-parameter comparison criterion. *2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*. IEEE, Beijing, China. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6180515>
- [13] Gao, Y., Lin, X., Liu, P., & Bo, Z. (2007). A Generalized Morphological Transform Based Faulty Feeder Selector Suitable for the Non-Effectively Grounded Power Systems. *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*. IEEE, Tampa, FL, USA. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4275538>
- [14] Lin, X., Zhao, M., Alumann, K., & Liu, P. (2005). Novel design of a fast phase selector using correlation analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20 (2), pp. 1283-1290. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1413391>
- [15] Yu, J., Jiao, Y., & Wang, Z. (2012). New Principle of Fault Phase Selection Based on Wavelet Filter and Its Derived Filter. *2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. IEEE, Shanghai, China. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6307646>
- [16] Kale, V.S., Bhide, S.R., & Bedekar, P.P. (2009). Faulted phase selection on double circuit transmission line using wavelet transform and neural network. *2009 International Conference on Power Systems*. IEEE, Kharagpur, India. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5442736>
- [17] Duan, J., Zhang, B., & Ha, H. (2002). A novel approach to faulted-phase selection using current traveling waves and wavelet analysis. *Proceedings. International Conference on Power System Technology*. IEEE, Kunming, China. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1047581>

- [18] Zhijun, L. (2007). Application of grey relational analysis to fault type identification on power transmission line. *2007 IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services*. IEEE, Nanjing, China. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4443259>
- [19] Chen, Z.H., Huang, S.F., & Yang, Q.X. (2004). Research on the new phase selector based on impedance measurement. *2004 International Conference on Power System Technology. PowerCon 2004*. IEEE, Singapore. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1459994>
- [20] Chen, C., Liu, C., & Jiang, J. (2002). Three-terminal transmission line protection using synchronized voltage and current phasor measurements. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*. IEEE, Yokohama, Japan. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1177715>
- [21] Zou, L., Liu, P., & Zhao, Q. (2005). Mathematical morphology based phase selection scheme in digital relaying. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 152 (2), pp. 157-163. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1421132>

9.4. MANUALES DE FUNCIONAMIENTO

- [22] INGETEAM TECHNOLOGY. *Protección Diferencial en Línea*. Edición: UME_INGEPAC_LD_esp Rev.: E (10/17). Disponible en los anexos del CD. pp. 38-67.

10. ANEXO I

10.1. PROGRAMA DE RECOGIDA DE DATOS

```
clc
clear

idif_simulada(150,9,3,11)=0;
Numero_Linea(150,1)= 0;
Longitud(150,1)=0;
Resistencia_de_Falta(150,1)=0;
Nombre_Linea(150,1)={'Nombre'};
Rg=[0.1, 1, 10, 100, 1000];
Rff=0.1;
numfalta(150,9,1,11)=0;
Localizador

set_param('Localizador/Falta','FaultA','off','FaultB','off','FaultC','off','GroundFault','off'); %0
for linea=1:30
    for R=1:5
        Rfg=Rg(R);
        for dist=0.1:0.1:0.9
            run('localizador_Linea_Real_Con_Calculo_de_Distancia.m');
            I1_120=I1(120);
            I2_120=I2(120);
            I0_120=I0(120);
            idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),1,1)=I1(120);
            idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),2,1)=I2(120);
            idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),3,1)=I0(120);
            run('Tipofalta2')
            numfalta(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),1,1)=tipf;
        end
        Nombre_Linea(30*(linea-1)+R,1)={'Nombre'};
        Numero_Linea(30*(linea-1)+R,1)=linea;
        Longitud(30*(linea-1)+R,1)=Long;
        Resistencia_de_Falta(30*(linea-1)+R,1)=Rff;
    end
end
end
```

```

set_param('Localizador/Falta','FaultA','on','FaultB','off','FaultC','off','GroundFault','on'); %AG
for linea=1:30
  for R=1:5
    Rfg=Rg(R);
    for dist=0.1:0.1:0.9
      run('localizador_Linea_Real_Con_Calculo_de_Distancia.m');
      I1_120=I1(120);
      I2_120=I2(120);
      IO_120=IO(120);
      idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),1,2)=I1(120);
      idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),2,2)=I2(120);
      idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),3,2)=IO(120);
      run('Tipofalta2')
      numfalta(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),1,2)=tipf;
    end
    Nombre_Linea(30*(linea-1)+R,1)={'Nombre'};
    Numero_Linea(30*(linea-1)+R,1)=linea;
    Longitud(30*(linea-1)+R,1)=Long;
    Resistencia_de_Falta(30*(linea-1)+R,1)=Rff;
  end
end
end
  
```

```

set_param('Localizador/Falta','FaultA','off','FaultB','on','FaultC','off','GroundFault','on'); %BG
for linea=1:30
  for R=1:5
    Rfg=Rg(R);
    for dist=0.1:0.1:0.9
      run('localizador_Linea_Real_Con_Calculo_de_Distancia.m');
      I1_120=I1(120);
      I2_120=I2(120);
      IO_120=IO(120);
      idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),1,3)=I1(120);
      idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),2,3)=I2(120);
      idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),3,3)=IO(120);
      run('Tipofalta2')
      numfalta(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),1,3)=tipf;
    end
    Nombre_Linea(30*(linea-1)+R,1)={'Nombre'};
    Numero_Linea(30*(linea-1)+R,1)=linea;
    Longitud(30*(linea-1)+R,1)=Long;
    Resistencia_de_Falta(30*(linea-1)+R,1)=Rff;
  end
end
end
  
```

end

```

set_param('Localizador/Falta','FaultA','off','FaultB','off','FaultC','on','GroundFault','on'); %CG
for linea=1:30
  for R=1:5
    Rfg=Rg(R);
    for dist=0.1:0.1:0.9
      run('localizador_Linea_Real_Con_Calculo_de_Distancia.m');
      I1_120=I1(120);
      I2_120=I2(120);
      IO_120=IO(120);
      idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),1,4)=I1(120);
      idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),2,4)=I2(120);
      idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),3,4)=IO(120);
      run('Tipofalta2')
      numfalta(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),1,4)=tipf;
    end
    Nombre_Linea(30*(linea-1)+R,1)={'Nombre'};
    Numero_Linea(30*(linea-1)+R,1)=linea;
    Longitud(30*(linea-1)+R,1)=Long;
    Resistencia_de_Falta(30*(linea-1)+R,1)=Rff;
  end
end
end

```

```

set_param('Localizador/Falta','FaultA','off','FaultB','on','FaultC','on','GroundFault','on'); %BCG
for linea=1:30
  for R=1:5
    Rfg=Rg(R);
    for dist=0.1:0.1:0.9
      run('localizador_Linea_Real_Con_Calculo_de_Distancia.m');
      I1_120=I1(120);
      I2_120=I2(120);
      IO_120=IO(120);
      idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),1,5)=I1(120);
      idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),2,5)=I2(120);
      idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),3,5)=IO(120);
      run('Tipofalta2')
      numfalta(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),1,5)=tipf;
    end
    Nombre_Linea(30*(linea-1)+R,1)={'Nombre'};
    Numero_Linea(30*(linea-1)+R,1)=linea;
  end
end

```

```

    Longitud(30*(linea-1)+R,1)=Long;
    Resistencia_de_Falta(30*(linea-1)+R,1)=Rff;
  end
end

```

```

set_param('Localizador/Falta','FaultA','on','FaultB','off','FaultC','on','GroundFault','on'); %CAG
for linea=1:30
  for R=1:5
    Rfg=Rg(R);
    for dist=0.1:0.1:0.9
      run('localizador_Linea_Real_Con_Calculo_de_Distancia.m');
      I1_120=I1(120);
      I2_120=I2(120);
      I0_120=I0(120);
      idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),1,6)=I1(120);
      idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),2,6)=I2(120);
      idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),3,6)=I0(120);
      run('Tipofalta2')
      numfalta(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),1,6)=tipf;
    end
    Nombre_Linea(30*(linea-1)+R,1)={'Nombre'};
    Numero_Linea(30*(linea-1)+R,1)=linea;
    Longitud(30*(linea-1)+R,1)=Long;
    Resistencia_de_Falta(30*(linea-1)+R,1)=Rff;
  end
end

```

```

set_param('Localizador/Falta','FaultA','on','FaultB','on','FaultC','off','GroundFault','on'); %ABG
for linea=1:30
  for R=1:5
    Rfg=Rg(R);
    for dist=0.1:0.1:0.9
      run('localizador_Linea_Real_Con_Calculo_de_Distancia.m');
      I1_120=I1(120)
      I2_120=I2(120)
      I0_120=I0(120)
      idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),1,7)=I1(120);
      idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),2,7)=I2(120);
      idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),3,7)=I0(120);
      run('Tipofalta2')
      numfalta(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),1,7)=tipf;
    end
  end
end

```

```

    end
    Nombre_Linea(30*(linea-1)+R,1)={'Nombre'};
    Numero_Linea(30*(linea-1)+R,1)=linea;
    Longitud(30*(linea-1)+R,1)=Long;
    Resistencia_de_Falta(30*(linea-1)+R,1)=Rff;
  end
end

set_param('Localizador/Falta','FaultA','off','FaultB','on','FaultC','on','GroundFault','off'); %BC
for linea=1:30
  for R=1:5
    Rfg=Rg(R);
    for dist=0.1:0.1:0.9
      run('localizador_Linea_Real_Con_Calculo_de_Distancia.m');
      I1_120=I1(120);
      I2_120=I2(120);
      I0_120=I0(120);
      idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),1,8)=I1(120);
      idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),2,8)=I2(120);
      idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),3,8)=I0(120);
      run('Tipofalta2')
      numfalta(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),1,8)=tipf;
    end
    Nombre_Linea(30*(linea-1)+R,1)={'Nombre'};
    Numero_Linea(30*(linea-1)+R,1)=linea;
    Longitud(30*(linea-1)+R,1)=Long;
    Resistencia_de_Falta(30*(linea-1)+R,1)=Rff;
  end
end

set_param('Localizador/Falta','FaultA','on','FaultB','off','FaultC','on','GroundFault','off'); %CA
for linea=1:30
  for R=1:5
    Rfg=Rg(R);
    for dist=0.1:0.1:0.9
      run('localizador_Linea_Real_Con_Calculo_de_Distancia.m');
      I1_120=I1(120);
      I2_120=I2(120);
      I0_120=I0(120);
      idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),1,9)=I1(120);
      idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),2,9)=I2(120);
    end
  end
end

```

```

    idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),3,9)=I0(120);
    run("Tipofalta2")
    numfalta(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),1,9)=tipf;
end
Nombre_Linea(30*(linea-1)+R,1)={'Nombre'};
Numero_Linea(30*(linea-1)+R,1)=linea;
Longitud(30*(linea-1)+R,1)=Long;
Resistencia_de_Falta(30*(linea-1)+R,1)=Rff;
end
end

set_param('Localizador/Falta','FaultA','on','FaultB','on','FaultC','off','GroundFault','off'); %AB
for linea=1:30
    for R=1:5
        Rfg=Rg(R);
        for dist=0.1:0.1:0.9
            run('localizador_Linea_Real_Con_Calculo_de_Distancia.m');
            I1_120=I1(120);
            I2_120=I2(120);
            I0_120=I0(120);
            idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),1,10)=I1(120);
            idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),2,10)=I2(120);
            idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),3,10)=I0(120);
            run("Tipofalta2")
            numfalta(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),1,10)=tipf;
        end
        Nombre_Linea(30*(linea-1)+R,1)={'Nombre'};
        Numero_Linea(30*(linea-1)+R,1)=linea;
        Longitud(30*(linea-1)+R,1)=Long;
        Resistencia_de_Falta(30*(linea-1)+R,1)=Rff;
    end
end

set_param('Localizador/Falta','FaultA','on','FaultB','on','FaultC','on','GroundFault','off'); %ABC
for linea=1:30
    for R=1:5
        Rfg=Rg(R);
        for dist=0.1:0.1:0.9
            run('localizador_Linea_Real_Con_Calculo_de_Distancia.m');
            I1_120=I1(120);
            I2_120=I2(120);

```

```
I0_120=I0(120);  
idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),1,11)=I1(120);  
idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),2,11)=I2(120);  
idif_simulada(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),3,11)=I0(120);  
run('Tipofalta2')  
numfalta(30*(linea-1)+R,int16(dist*10),1,11)=tipf;  
end  
Nombre_Linea(30*(linea-1)+R,1)={'Nombre'};  
Numero_Linea(30*(linea-1)+R,1)=linea;  
Longitud(30*(linea-1)+R,1)=Long;  
Resistencia_de_Falta(30*(linea-1)+R,1)=Rff;  
end  
end
```

10.2. LOCALIZADOR DE PARÁMETROS DE LÍNEA

11.2.2 Datos de las líneas

Se adjuntan todos los parámetros de las líneas seleccionadas. Antes de introducirlos en el modelo, se les asignará los valores correspondientes a las variables estipuladas en el mismo, a razón del programa adjunto en el 11.2.2 del presente Anexo.

Línea	Nombre	UN	Longitud	ZL1	ZL0	YL1	YL0	ZSA1	ZSA0	ZSB1	ZSB0	ZEQ1	ZEQ0
1	Aldea II - Villariño	380000	17.525	0.576+5.920*1i	5.280+18.08*1i	59.75e-6*1i	42.05e-6*1i	1.248+16.11*1i	2.338+23.47*1i	1.312+28.17*1i	1.264+18*1i	2.240+48.91*1i	30.49+177.6*1i
2	Aldeadavila - Bemposta	220000	20.6	2.032+12.33*1i	11+35.56*1i	76.42e-6*1i	54.11e-6*1i	0.309+3.678*1i	0.256+3.049*1i	0.329+15.12*1i	1.147+10.79*1i	26.05+47.37*1i	209.9+367.4*1i
3	Aldeadavila - Pocinho	220000	40.4	30.97+17.22*1i	19.25+55.79*1i	106.7e-6*1i	84.69e-6*1i	0.203+3.751*1i	0.246+3.020*1i	0.837+10.74*1i	1.210+9.176*1i	3.131+18.06*1i	77.34+146.9*1i
4	Benavente - Vilecha	138000	61.845	13.44+26.37*1i	22.38+84.95*1i	165.2e-6*1i	105.6e-6*1i	9.590+28.50*1i	3.282+29.11*1i	3.005+11.52*1i	7.319+32.30*1i	999999+999999*1i	999999+999999*1i
5	Conso - Valparaíso	220000	89.472	3.688+26.52*1i	19.93+93.68*1i	297.2e-6*1i	159.8e-6*1i	1.573+11.83*1i	2.826+14.59*1i	5.067+43.30*1i	8.891+77.99*1i	999999+999999*1i	999999+999999*1i
6	Gatica - Hernani	380000	78.110	2.448+25.55*1i	22.56+67.02*1i	229.8e-6*1i	215.5e-6*1i	2.464+28.46i	4.864+31.90*1i	2.480+26.44*1i	3.120+28.06*1i	2.736+26.40*1i	59.21+153.1*1i
7	Gatica - Itxaso	380000	61.07	1.920+19.84*1i	18.08+63.18*1i	218e-6*1i	143.9e-6*1i	3.024+35.64i	4.896+33.56*1i	1.952+20.88*1i	2.672+11.3*1i	2.272+22.32*1i	47.02+111.3*1i
8	Grijota - S.Sebastian	380000	264	6.24+66.70*1i	63.55+216.2*1i	754e-6*1i	501e-6*1i	0.912+11.98*1i	5.856+25.44*1i	1.104+16.75*1i	4.512+25.18*1i	5.12+40.96*1i	109.9+324.5*1i
9	Gueñes - Gatika	380000	38.795	1.208+12.64*1i	18.56+34.24*1i	138.1e-6*1i	96.98e-6*1i	3.184+34.40*1i	5.776+37*1i	1.936+22.68*1i	2.048+24.43*1i	2.048+39*1i	69.42+237.5*1i
10	Gueñes - Barcina	380000	55.595	1.76+16.08*1i	16.8+57.26*1i	201e-6*1i	133e-6*1i	2.864+30.7*1i	16.8+57.26*1i	1.424+17.72*1i	2.656+22.51*1i	3.376+32.75*1i	79.36+201.6*1i
11	Gueñes - Herrera	380000	78.110	4.32+44.3*1i	41.26+141*1i	492e-6*1i	331e-6*1i	2.496+29.44*1i	2.368+20.62*1i	0.976+12.49*1i	6.304+27.74*1i	3.952+33.16*1i	102+247.6*1i
12	Gueñes - Santurce	380000	13.692	0.32+4.48*1i	3.520+14.72*1i	46.36e-6*1i	29.74e-6*1i	2.496+29.44*1i	2.368+20.62*1i	0.976+12.49*1i	6.304+27.74*1i	1.472+82.38*1i	21.77+189.4*1i
13	Hernani - Arkale	220000	12.976	0.726+4.162*1i	3.339+14.95*1i	47.52e-6*1i	26.44e-6*1i	0.929+9.167*1i	0.735+10.33*1i	3.286+29.72*1i	2.724+25.96*1i	0.493+3.359*1i	3.078+13.57*1i
14	Hernani - Arkale II	220000	12.976	0.726+4.162*1i	3.339+14.95*1i	47.52e-6*1i	26.44e-6*1i	0.929+9.167*1i	0.735+10.33*1i	3.286+29.72*1i	2.724+25.96*1i	0.493+3.359*1i	3.078+13.57*1i
15	Hernani - CNTEGRI	380000	128.61	4+40.94*1i	40.3+143*1i	541.7e-6*1i	324e-6*1i	2.016+21.82*1i	3.2+23.13*1i	1.824+25.42*1i	16.94+71.31*1i	30.11+251.8*1i	338+1197*1i
16	Itxaso - Barcina	220000	100	2.72+25.12*1i	21.28+76.62*1i	356.1e-6*1i	227.44e-6*1i	2.688+27.23*1i	2.6+22.99*1i	1.392+18.35*1i	2.336+20.51*1i	2.816+29.13*1i	65.95+174.7*1i
17	Itxaso - Hernani	220000	37.806	2.323+12.14*1i	17.51+76.06*1i	138.4e-6*1i	52.66e-6*1i	1.432+20.01*1i	0.609+11.08*1i	0.745+7.1*1i	0.663+6.054*1i	1.147+7.777*1i	4.772+30.15*1i
18	La Lomba - Herrera	380000	189.29	6.24+54.06*1i	56.3+181.8*1i	751.3e-6*1i	542.6e-6*1i	0.544+10.88*1i	1.248+10.70*1i	1.216+15.95*1i	6.304+29.23*1i	2.768+22.84*1i	54.32+146.8*1i
19	Logroño - Sequero	220000	27.461	1.936+10.84*1i	6.146+36.15*1i	95.84e-6*1i	44.83e-6*1i	4.138+28.71*1i	7.526+49.75*1i	7.768+47.95*1i	13.2+100.9*1i	999999+999999*1i	999999+999999*1i

20	Lomba - Compostilla	380000	6.756	0.160+1.6*1i	1.44+7.2*1i	21.24e-6*1i	14.37e-6*1i	0.752+14.62*1i	1.136+12.96*1i	1.072+15.98*1i	3.312+22.01*1i	0.32+4.32*1i	3.536+17.02*1i
21	Miranda - Logroño	220000	45.709	3.339+18.67*1i	16.2+56.03*1i	130e-6*1i	91e-6*1i	1.505+12.62*1i	4.201+24.08*1i	9.955+62.44*1i	4.307+66.05*1i	9999999+9999999*1i	9999999+9999999*1i
22	Orcoyen - Tafalla	220000	37.059	2.226+11.17*1i	13.69+39.62*1i	137e-6*1i	89e-6*1i	2.095+11.17*1i	13.69+39.62*1i	7.221+49.76*1i	17.58+86.31*1i	0.171+0.579*1i	9999999+9999999*1i
23	Sanguesa - Cordovil	220000	38.656	3.072+12.38*1i	11.61+55.31*1i	137e-6*1i	89e-6*1i	2.095+11.17*1i	4.569+26.23*1i	9.263+36.99*1i	13.41+94.56*1i	9999999+9999999*1i	9999999+9999999*1i
24	Sanguesa - Lafortu	220000	73.877	7.889+25.21*1i	19.64+100*1i	287e-6*1i	143e-6*1i	5.183+23.97*1i	11.35+68.96*1i	1.668+10.47*1i	2.468+20.35*1i	116.9+326.2*1i	9999999+9999999*1i
25	Tafalla - Tudela	220000	52.426	3.146+16.59*1i	20.12+43.69*1i	194e-6*1i	135e-6*1i	3.905+21.50*1i	13.05+54.53*1i	4.539+30.14*1i	8.148+64*1i	0.206+0.725*1i	9999999+9999999*1i
26	Trives - Belesar	220000	43.300	3.484+20.17*1i	15.72+62.76*1i	132e-6*1i	103e-6*1i	0.542+5.933*1i	0.958+6.984*1i	1.224+13.47*1i	0.842+10.46*1i	0.043+0.170*1i	9999999+9999999*1i
27	Valparaiso - Tordesillas	220000	120.43	5.507+39.66*1i	29.95+140.4*1i	444e-6*1i	239e-6*1i	1.732+12.39*1i	4.714+21.6*1i	4.283+35*1i	8.058+61.68*1i	9999999+9999999*1i	9999999+9999999*1i
28	Velilla - Herrera	380000	49.654	1.6+16*1i	12.8+53.42*1i	178e-6*1i	107e-6*1i	1.472+27.6*1i	3.44+28.16*1i	1.136+13.47*1i	7.856+30.78*1i	12.32+92.12*1i	593.5+1248*1i
29	Villalbi - Villal I	220000	220.78	9.728+70.56*1i	65+239.5*1i	803e-6*1i	517e-6*1i	1.161+10.55*1i	2.565+16.11*1i	0.629+6.582*1i	1.306+8.421*1i	9.534+52.27*1i	430.2+776.6*1i
30	Villarin - Grijota	380000	195.3	5.92+52.64*1i	43.68+206.2*1i	834e-6*1i	448e-6*1i	1.44+20.16*1i	43.68+206.2*1i	0.96+12.32*1i	6.72+28*1i	3.52+29.92*1i	38.72+143.5*1i

Tabla 9 - Parámetros de línea

11.2.2 Programa de asignación de valores a las variables del modelo

```

RSA1=real(ZSA1);
LSA1=imag(ZSA1)/pi/100;
RSA0=real(ZSA0);
LSA0=imag(ZSA0)/pi/100;

RL1k=real(ZL1)/Long;
RL0k=real(ZL0)/Long;
LL1k=imag(ZL1)/100/pi/Long;
LL0k=imag(ZL0)/100/pi/Long;
CL1k=imag(YL1)/100/pi/Long;
CL0k=imag(YL0)/100/pi/Long;

RSB1=real(ZSB1);
LSB1=imag(ZSB1)/pi/100;
RSB0=real(ZSB0);
LSB0=imag(ZSB0)/pi/100;
REQ1=real(ZEQ1);
LEQ1=imag(ZEQ1)/pi/100;
REQ0=real(ZEQ0);
LEQ0=imag(ZSB0)/pi/100;

SIR_A=abs(ZSA1/ZL1);
SIR_B=abs(ZSB1/ZL1);
SIR_A0=abs(ZSA0/ZL0);
SIR_B0=abs(ZSB0/ZL0);

RL1=real(ZL1)/abs(ZL1);
XL1=imag(ZL1)/abs(ZL1);
M=1; N=24;

% CALCULO DE LA PREFALTA
XT=imag(ZSA1+ZL1+ZSB1);
if UN==220000
  P=200e6;
elseif UN==400000
  P=400e6;
else
  P=150e6;
end
delta=asin((P*XT)/UN^2)*180/pi;
sim Localizador
  
```

10.3. ESPECIFICACIONES DEL MODELO

11.3.1 Modelo de selector

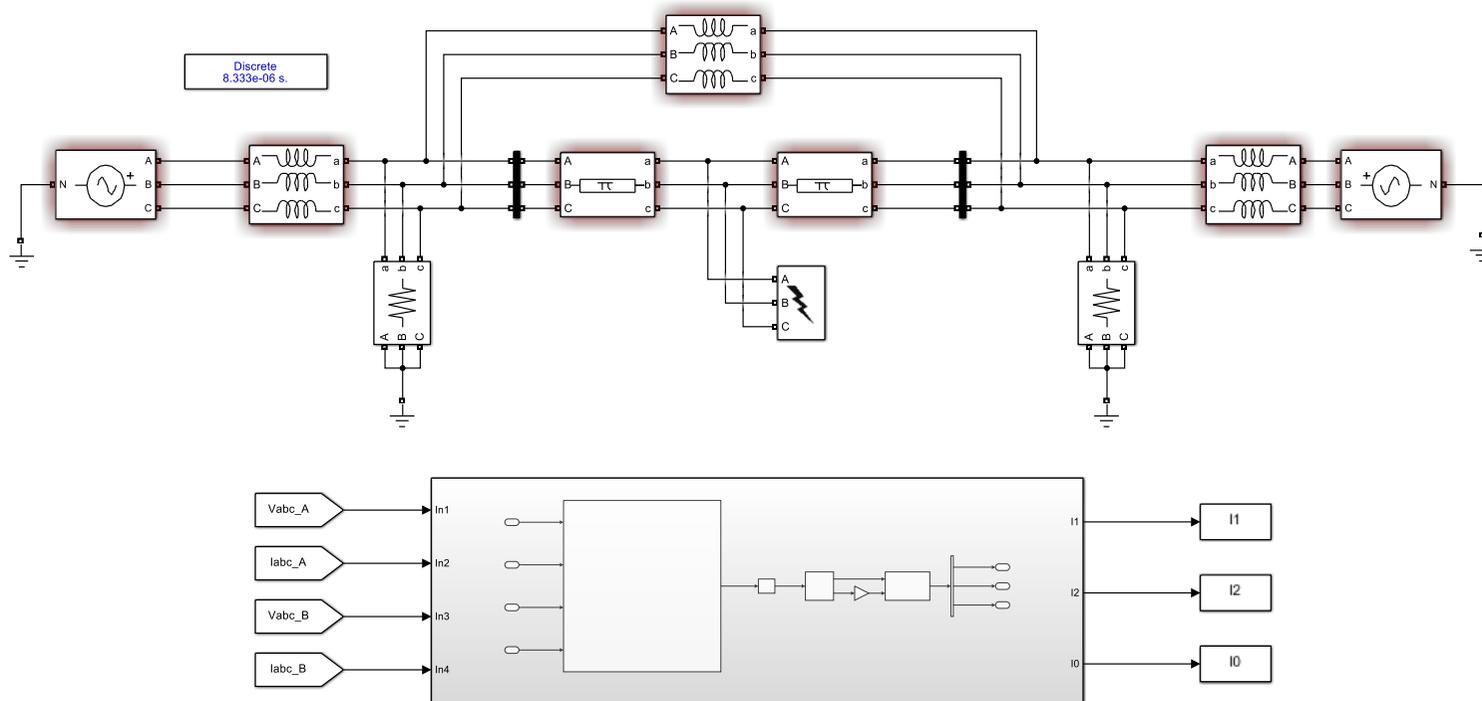


Ilustración 27 - Modelo de selector de falta

11.3.2 Variables del modelo

Se adjuntan las ilustraciones de todos los *block parameters* del programa, donde se especifican todas y cada una de las variables impuestas en el modelo.

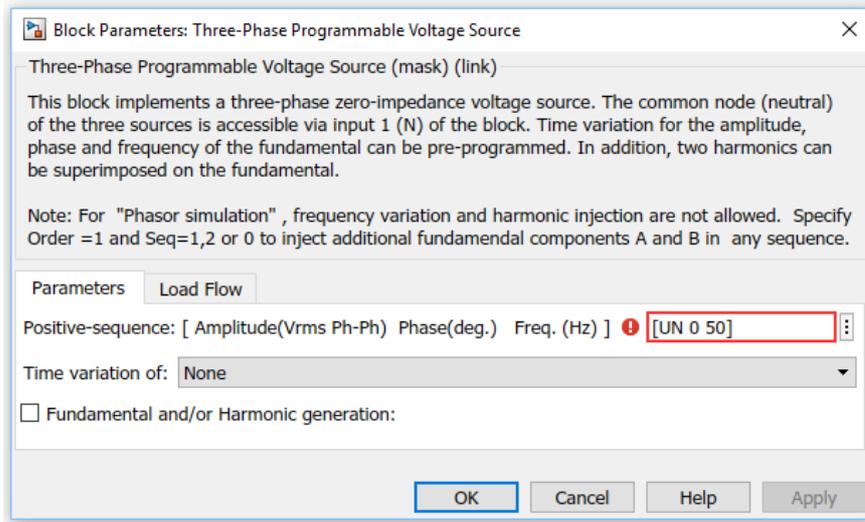


Ilustración 28 - BP Fuente de tensión local

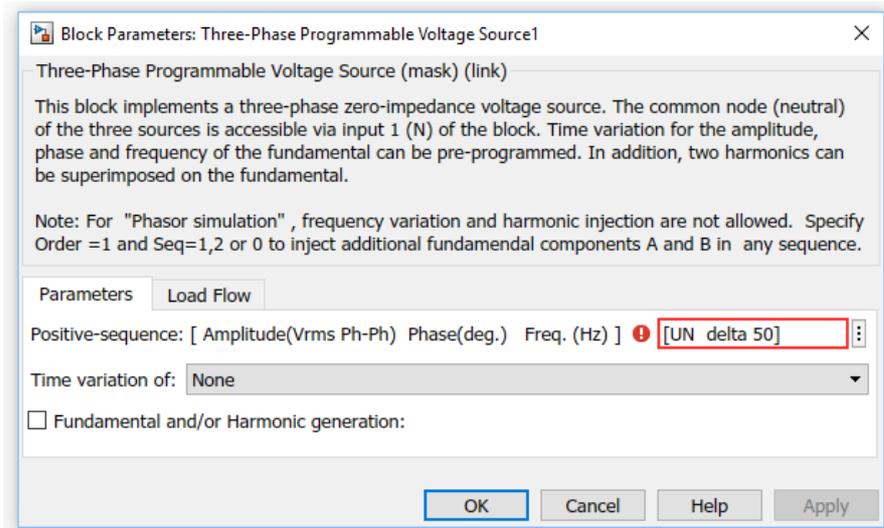


Ilustración 29 - BP Fuente de tensión remota

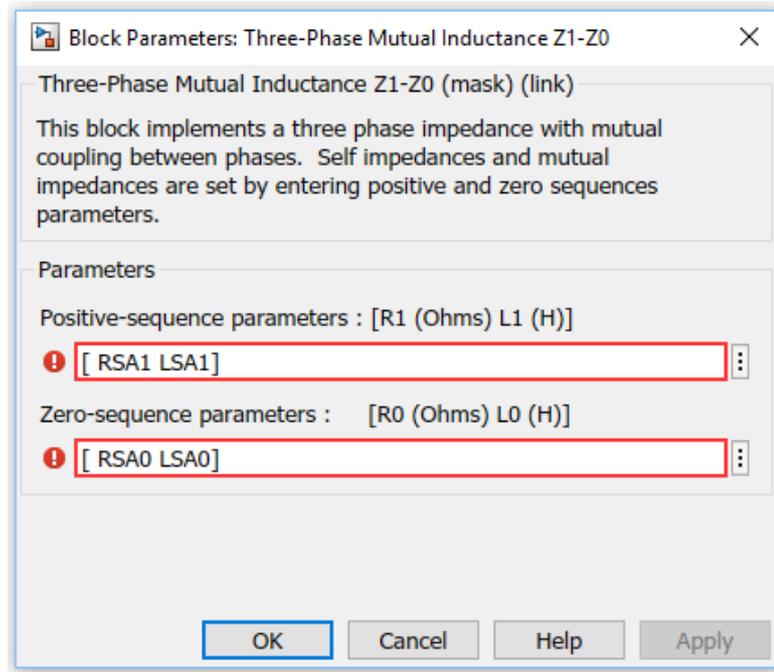


Ilustración 30 – BP Inductancias trifásicas locales

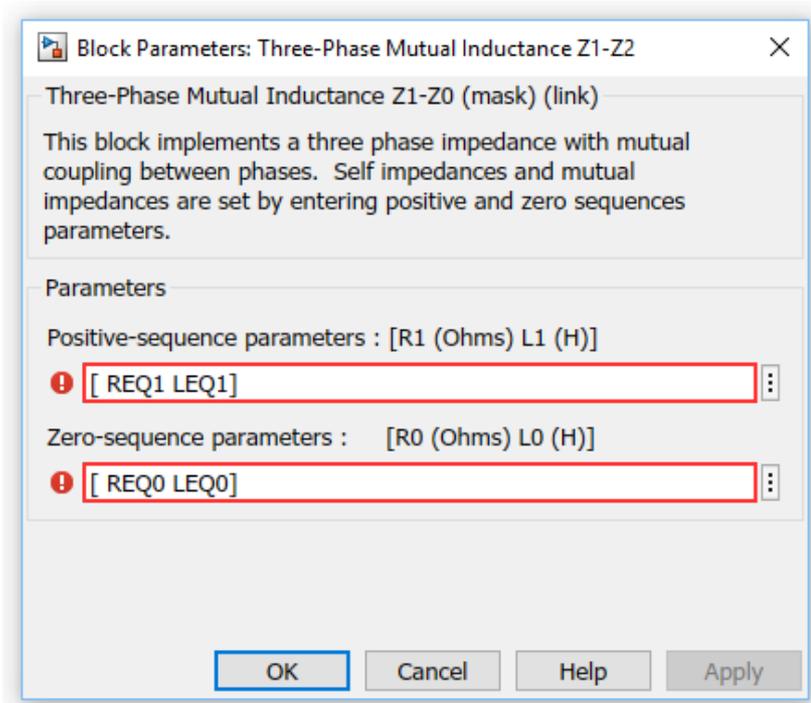


Ilustración 31 – BP Inductancias trifásicas del sistema equivalente

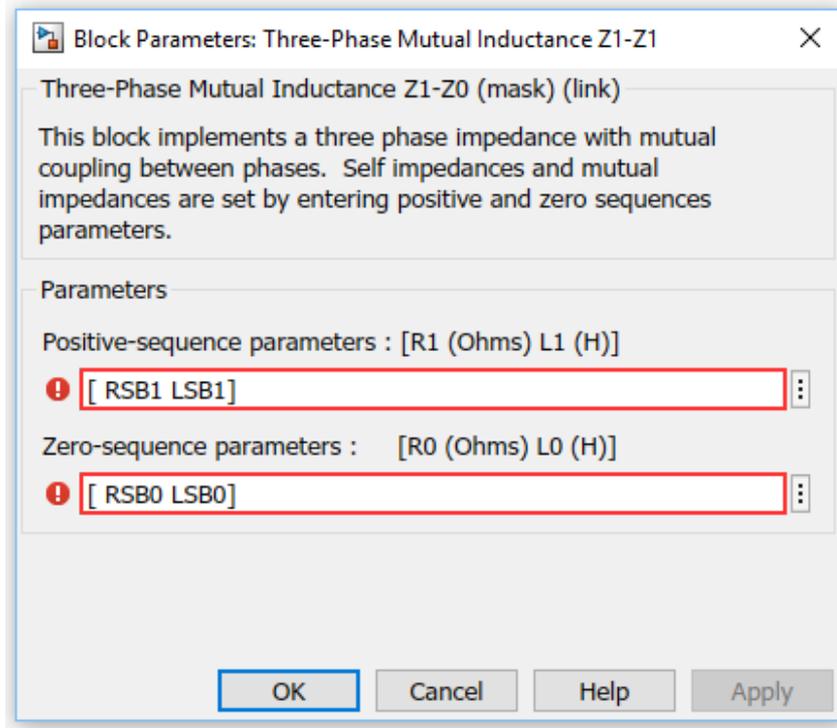


Ilustración 32 – BP Inductancias trifásicas remotas

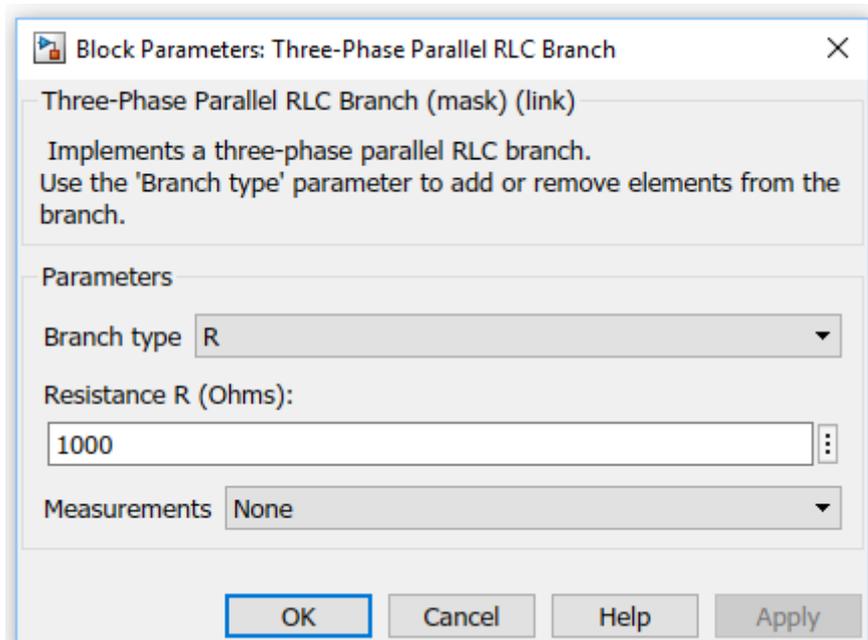


Ilustración 33 – BP Resistencias trifásicas para reducción de ruido

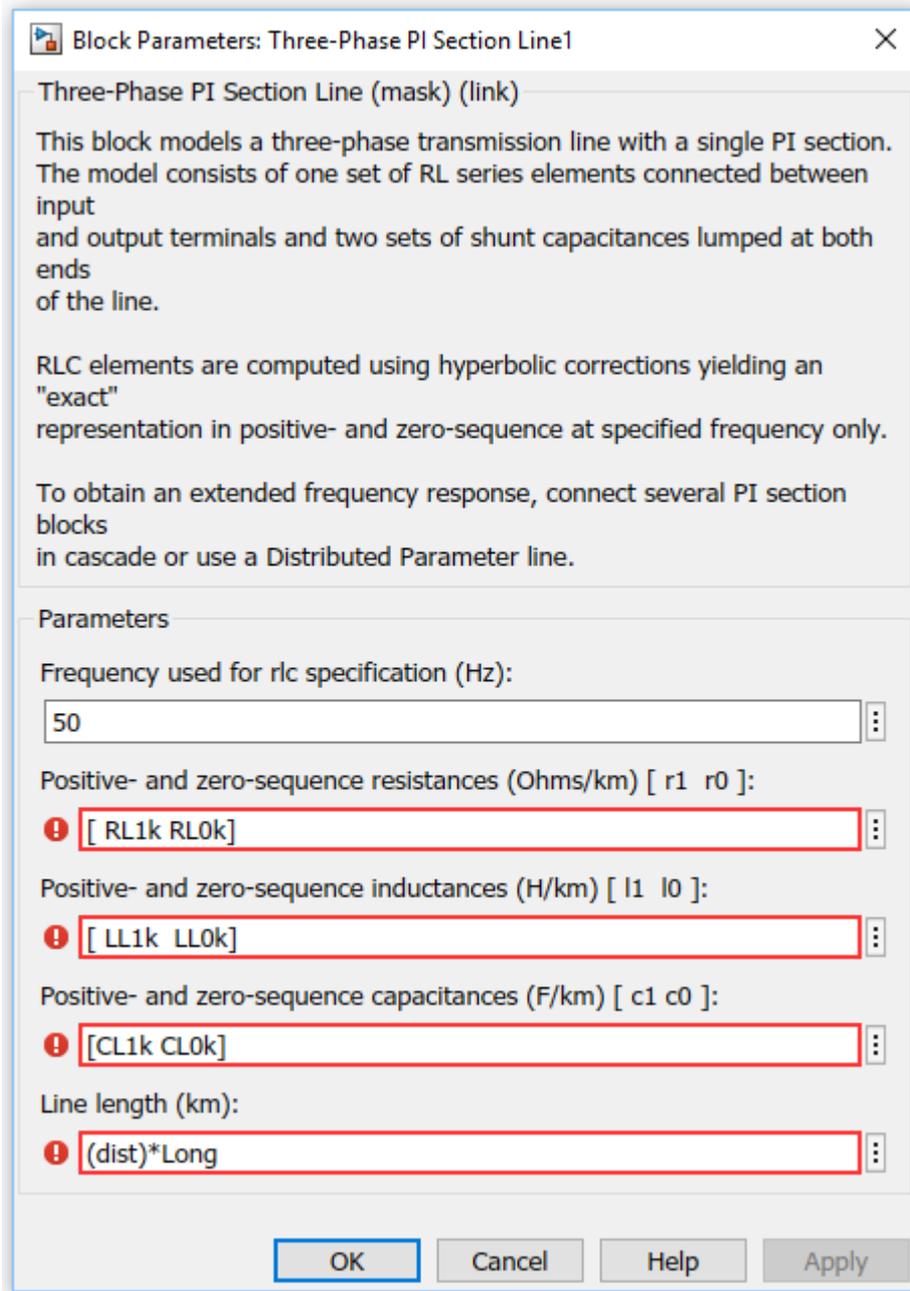


Ilustración 34 – BP Modelo en Pi local

La única diferencia que existe entre las variables del modelo en Pi local y el modelo en Pi remoto es *Line Length*. Como se observa en el local, $Line\ Length_L = dist * Long$, mientras que en el remoto, $Line\ Length_R = (1 - dist) * Long$.

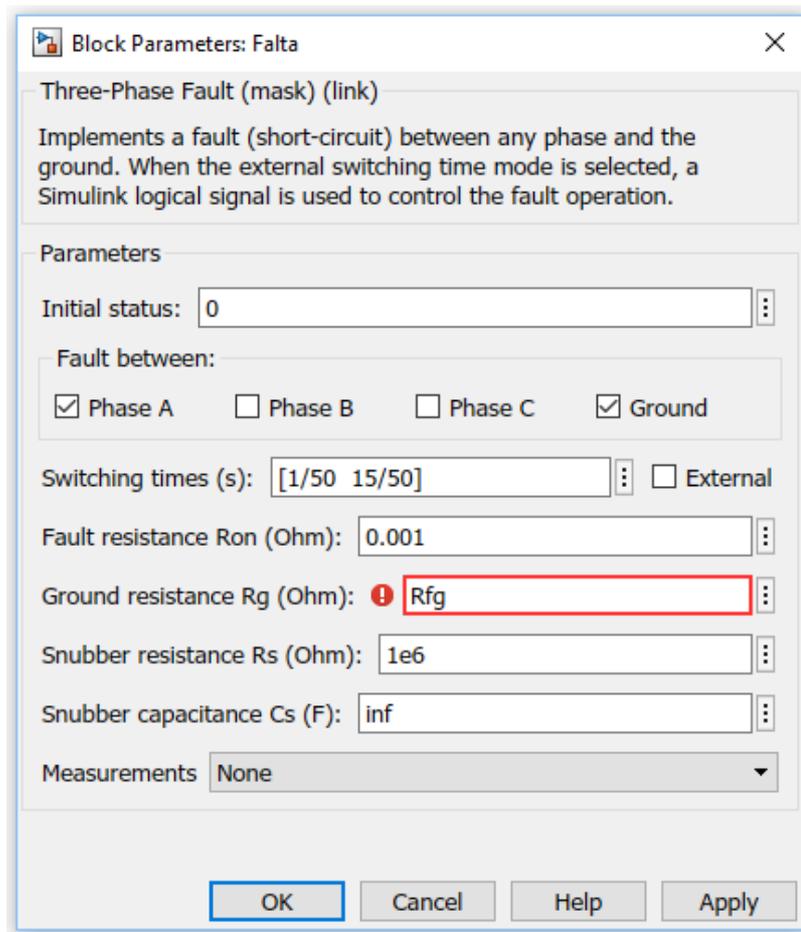


Ilustración 35 - BP Falta

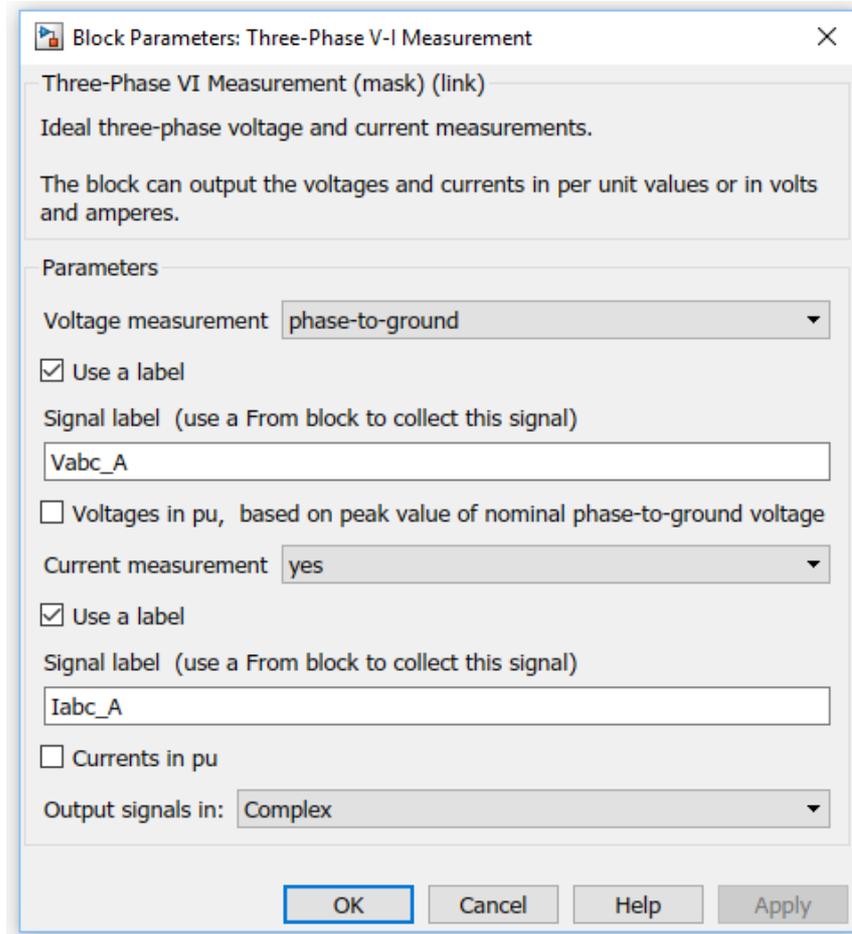


Ilustración 36 - BP Medidor V-I trifásico

De la misma manera, el Medidor V-I trifásico correspondiente a la captación de valores remotos revelará los valores de las tensiones remotas, V_{abc_B} , y las intensidades remotas, I_{abc_B} .

11. ANEXO II

11.1. Manual de Matlab y Simulink

MATLAB y Simulink (2019). *Documentación y aplicación de MATLAB y Simulink*. [En línea]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/help/>

11.2. Manual de Microsoft Office

Microsoft Office (2019). *Aprendizaje y ayuda de Microsoft Office*. [En línea]. Disponible en: <https://support.office.com/es-es>

11.3. Manual de Protección Diferencial en línea

INGETEAM TECHNOLOGY. *Protección Diferencial en Línea*. Edición: UME_INGEPAC_LD_esp Rev.: E (10/17).