

MASTER EN INGENIERÍA EN INDUSTRIAL  
**TRABAJO FIN DE MASTER**

***MODELADO Y SIMULACIÓN DE UNA  
SUBESTACIÓN Y SU SISTEMA DE  
PROTECCIÓN Y COMPROBACIÓN DE  
AJUSTES  
PARA CONEXIÓN DE  
PARQUES EÓLICOS A LA RED***

**Alumno:** López Arnaiz, Alfredo

**Director:** Uriondo Arrúe, Felipe

**Codirectora:** López Roperro, Iraide

**Departamento:** Ingeniería Eléctrica

**Curso:** 2021-2022

**Fecha:** 25/02/2022

# Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo simular y probar los ajustes de un sistema de protección para la conexión de una granja eólica a la red. Esto supone la simulación de la línea de alta tensión, las barras y los transformadores con sus respectivas protecciones.

This master's thesis aim to simulate the system and test relay settings for a protection scheme for a substation that connect a Wind farm tho the grid. This includes the Transformers, the switchyard and their protections.

Lan honek parke eoliko bat sarera konektatzeko babes-sistema baten ezarpenak simulatu eta probatu nahi ditu. Honek goi tentsioko linearen simulazioa suposatzen du, barrak eta transformadoreak dagozkien babesekin.

# Palabras Clave

Protección, Red eléctrica, Relé, Transformador, Aparamenta, Subestación. Matlab, Simulink, Ajustes, Simulación, Coordinación, Selectividad.

Protection, Electrical Grid, Relay, Transformer, Switchyard, Substation, Matlab, Simulink, Settings, Simulation, Coordination, Selectivity.

Babesa, Sare elektrikoa, Errelea, Transformadorea, Konmutagailuak, Azpiestazioa. Matlab, Simulink, Doikuntzak, Simulazioa, Koordinazioa, Selektibitatea.

1	Índice	
1.1	Lista de figuras:	5
1.2	Lista de Tablas	8
2	Memoria	9
2.1	Introducción	9
2.2	Contexto	10
2.3	Objetivos y alcance del proyecto	11
2.4	Beneficios	12
2.5	Descripción de la solución adoptada	13
2.5.1	Descripción de la instalación	13
2.5.2	Modelo del sistema	14
2.5.3	Transformadores de potencia	15
2.5.4	Procesamiento Señales	21
2.5.5	Problemas relacionados con la medida de la corriente de falta	32
2.5.6	Computación del fasor	41
2.5.7	Selector de fase	46
2.5.8	Desarrollo teórico selector de fase	46
2.5.9	Protección de distancia	54
2.5.10	Diferencial	82
2.5.11	50/51-Sobrecorriente	94
3	Metodología	101
3.1	Tareas fases y equipos	101
3.1.1	Comprobación de ajustes y situación de las faltas	101
3.2	Descripción y análisis de resultados	101
3.3	Conclusiones	107
4	Anexo 1: Lista de funciones de Protección	109
5	Anexo 2: Método de las redes de secuencia	110
6	Anexo 3: Código	117
6.1	Sript de inicialización	117
6.2	Unidad de distancia	118
6.3	Unidad direccional	123
6.4	Unidad diferencial	125
6.5	Unidad direccional de neutro	126

6.6	Unidad de sobrecorriente temporizada .....	126
7	Bibliografía .....	127

## 1.1 Lista de figuras

Figura 1. Línea AT .....	13
Figura 2. Subestación.....	13
Figura 3. Modelo sistema de potencia .....	14
Figura 4. Modelo Feeder .....	14
Figura 5. Ajustes fuente de corriente .....	14
Figura 6. Modelo Transformadores.....	15
Figura 7. Ajustes modelo (Conexiones) .....	16
Figura 8. Modelo línea AT.....	17
Figura 9. Parámetros de línea.....	18
Figura 10. Parámetros de falta .....	18
Figura 11. parámetros de red .....	18
Figura 12. Curva de saturación de un transformador de medida .....	19
Figura 13. modelo fase del CT .....	19
Figura 14. Posición de los CTs.....	20
Figura 15. Diagrama funcional relé UR de General Electric .....	21
Figura 16. Ajustes paso de simulación .....	21
Figura 17. Bloque simulación de conversión Analógico/Digital .....	22
Figura 18. Sección equivalente en el relé real.....	22
Figura 19. Ajustes bloque filtro .....	23
Figura 20. Herramienta de diseño de filtros matlab .....	23
Figura 21. Circuito RL.....	33
Figura 22. Filtro MIMIC Analógico .....	34
Figura 23. Efecto del filtro FIR en onde con componente DC .....	36
Figura 24. Compensación del desfase en el modelo .....	37
Figura 25. Bloque Análisis de Fourier .....	44
Figura 26. Código Transformada discreta de Fourier .....	44
Figura 27. Test bloque Fourier con una señal sinusoidal discreta .....	45
Figura 28. Bloque propio de Fourier comparado con un bloque de Matlab .....	45
Figura 29. Superposición de varias funciones sinusoidales para simular onda con contenido armónico .....	46
Figura 30. Valores de Amplitud y Desfase da las 3 ondas utilizadas en el test.....	46
Figura 31. Relación entre $\alpha$ y las distintas faltas con Neutro .....	47
Figura 32. Falta BCN.....	47
Figura 33. Falta AN.....	48
Figura 34. Relación entre $\alpha$ y las distintas faltas sin neutro .....	49
Figura 35. Bloque selector de fase .....	50
Figura 36. Diagrama Lógico Selector de fase.....	52
Figura 37. Módulos de las corrientes con falta a 10km .....	52
Figura 38. Módulos de las corrientes con falta a 1km .....	53
Figura 39. Redes de secuencia para falta monofásica .....	55
Figura 40. Falta monofásica de resistencia no nula doblemente alimentada .....	57

Figura 41. Redes de secuencia falta bifásica sin derivación a tierra .....	59
Figura 42. Redes de secuencia falta trifásica.....	60
Figura 43. Bloque Matlab Función distancia .....	62
Figura 44. Efectos de la saturación en el cálculo de la distancia .....	64
Figura 45. Representacion zonas weak INFEED SOBRE LA LÍNEA .....	64
Figura 46. Circuito lógico weak infeed para falta dentro de línea .....	65
Figura 47. Lógica weak infeed en caso de falta fuera de línea.....	65
Figura 48. Zonas de protección sobre la línea .....	66
Figura 49. Característica cuadrilateral.....	69
Figura 50 Diagrama fasorial unidad direccional .....	70
Figura 51. Redes de secuencia falta monofásica unidad direccional .....	70
Figura 52. Diagrama fasorial unidad direccional faltas bifásicas .....	71
Figura 53. Redes de secuencia faltas bifásicas .....	71
Figura 54. DIAGRAMA FASORIAL UNIDAD DIRECCIONAL FALTAS A TIERRA .....	71
Figura 55. REDES DE SECUENCIA FALTAS TRIFÁSICAS .....	72
Figura 56. Conexiones para referir ángulos de secuencia a las distintas fases.....	73
Figura 57. Conexión bloques de memoria tensión Prefalta .....	73
Figura 58. Bloque función unidad direccional .....	74
Figura 59. Módulos corrientes-Detector de falta – Dirección-falta AN detrás .....	76
Figura 60. Módulos corrientes-Detector falta-Dirección-Falta BC delante.....	76
Figura 61. Bloque lógica de disparo de la protección de distancia .....	77
Figura 62. Lógica temporizador .....	77
Figura 63. Actuación del temporizador .....	78
Figura 64. Conjunto de bloques para la función de distancia .....	79
Figura 65. Unidades Auxiliares de dirección y saturación.....	79
Figura 66. Bloque bloqueo de 5º Armónico con paso limitado .....	80
Figura 67. Principio diferencial .....	82
Figura 68. Bloque función diferencial de línea .....	84
Figura 69. Disparo diferencial para falta monofásica.....	85
Figura 70. Función mejorada de diferencial de línea .....	86
Figura 71. Actuación del bloqueo de 5º Armónico .....	86
Figura 72. Bloque Matlab función restricción de 5º Armónico.....	87
Figura 73. Circuito energización de transformador .....	89
Figura 74. Curvas de flujo y tensión en transitorio .....	89
Figura 75. Comportamiento del flujo y la tensión en estado estacionario.....	90
Figura 76. Caso 1: corriente de Inrush.....	91
Figura 77. Caso 2: falta interna dentro de la zona diferencial del trafo .....	91
Figura 78. Bloque lógica bloqueo por 2º Armónico .....	92
Figura 79. Curva de 2º Armónico en arranque y falta.....	93
Figura 80. Diferencial y bloqueos de inrush y saturación ante apagado del trafo .....	93
Figura 81. Esquema de protección de sobrecorriente (Fase y neutro).....	94
Figura 82. Bloque sobrecorriente más temporizador (función 51).....	95
Figura 83. Actuación de la unidad de sobrecorriente temporizada.....	96

Figura 84. Unidad de sobrecorriente temporizada direccional .....	96
Figura 85. Diagrama fasorial unidad direccional de neutro .....	97
Figura 86. Unidad sobrecorriente direccional de neutro .....	98
Figura 87. Diagrama de protecciones de sobrecorriente.....	99
Figura 88. Localización faltas en pruebas.....	101
Figura 89. Modelo para prueba de coordinación de ajustes .....	101
Figura 90. Falta fase A en la línea .....	102
Figura 91. Falta fases A y B a neutro .....	103
Figura 92. Falta trifásica en la línea .....	104
Figura 93. Falta Monofásica en Barras de Alta .....	104
Figura 94. Protecciones de Línea en falta monofásica en barras.....	105
Figura 95. Protecciones de barras de alta ante falta bifásica .....	106
Figura 96. Sentido de giro de los fasores de fase .....	110
Figura 97. Fasores de fase directa, inversa y homopolar .....	111
Figura 98. Sistema trifásico desequilibrado expresado como suma de redes de secuencia .....	112
Figura 99. Esquema falta monofásica.....	113
Figura 100. Esquema falta bifásica .....	114
Figura 101. Esquema falta trifásica .....	114
Figura 102. Esquema redes de secuencia falta trifásica.....	116

## 1.2 Lista de Tablas

Tabla 1. Características CTs del sistema .....	20
Tabla 2. Tipos de Faltas .....	46
Tabla 3. Rango ángulos selector de falta con desviación a tierra .....	47
Tabla 4. Rango Angulos para selector de falta sin desviación a tierra .....	49
Tabla 5. Ajustes unidad de distancia .....	69
Tabla 6. Rango ángulo unidad direccional de fases .....	74



## 2 Memoria

### 2.1 Introducción

Las protecciones eléctricas forman una parte fundamental del sistema eléctrico, son vitales para garantizar la seguridad de servicio de las instalaciones y de las personas. Por eso este trabajo se ha centrado en la simulación y la comprobación de ajustes de la subestación y la línea que conectan un parque eólico a la red.

Primero se modelará el sistema de potencia (línea, transformadores, equivalente de la red y Incomers de las granjas eólicas). Después se modelarán los instrumentos (transformadores de corriente y transformadores de tensión) y el sistema de procesamiento de señal que permite pasar de señales analógicas a señales digitales procesables por un relé numérico (convertor A/D y filtros). Por último, se implementarán las lógicas de protecciones, bloqueos y permisivos que forman la base del sistema de protección empleando esas señales.

Con ese modelo prácticamente completo de las protecciones se comprobarán los ajustes y se verá la respuesta ante distintas faltas en distintos puntos del sistema.

## 2.2 Contexto

Durante los últimos años se ha visto en nuestro país florecer una gran industria de energías renovables. La introducción de granjas eólicas, parques solares y plantas termosolares en la red eléctrica ha supuesto un gran cambio en la forma de entender la generación eléctrica. Uno de los aspectos en los que estas nuevas tecnologías se diferencian es en el tamaño y número de las instalaciones.

Históricamente el sistema eléctrico se ha considerado como formado por unas pocas grandes centrales unidas por redes telescópicas más o menos malladas a los consumidores conectados a la red. Estas centrales emplean grandes generadores síncronos conectados a la red de transporte del país mediante su correspondiente subestación elevadora. Esta tecnología tiene la particularidad de que para proteger estos centros de generación las protecciones cuentan con una gran corriente de cortocircuito lo que ayuda a detectar la falta. Sin embargo, en las centrales de energías renovables, la potencia de la estación es baja (comparable con un consumidor conectado a media tensión), suelen estar conectadas a la red de distribución y además los generadores se conectan a la red a través de sistemas de electrónica de potencia.

Los convertidores de potencia permiten ajustar la frecuencia y la tensión del generador ya que la fuente de energía mecánica (a diferencia de las centrales tradicionales) no se puede regular. Por lo tanto, en presencia de falta, el parque eólico que estudiaremos trabaja desconectado de la red. Toda la potencia de cortocircuito vendrá de la red eléctrica.

En cuanto a la filosofía de protección, mientras que las grandes centrales tradicionales son instalaciones tremendamente caras y de una importancia estratégica (la continuidad de servicio es vital) las renovables son mucho más baratas y prescindibles. En una unidad una central de ciclo combinado, es común tener 2 relés redundantes para el generador, otros 2 para el transformador de alta y una subestación de doble barra con sistema diferencial con un relé para cada fase y otro de coordinación con un relé de bahía que hace las veces de PLC de control para la posición. Todo esto conectado a 2 líneas de alta tensión. Tanta redundancia y automatización permite integrar sistemas ATS (*automatic transfer system*) que mantienen el servicio para falta en barras o transformador.

Para las centrales renovables, el coste de una instalación tan segura es mucho mayor que el coste de pérdida de servicio, por lo que lo normal es usar sistemas menos seguros (desde el punto de vista del servicio claro). Por ejemplo, en el sistema estudiado, los molinos están conectados en serie con un interruptor automático en cada molino (si cae uno, perdemos todos aguas abajo). A las semibarras de MT llegan 3 líneas por semibarra, una falta en una semibarra supone perder media central y, aunque tenemos transformadores redundantes (para poder dejar fuera de servicio una unidad por mantenimiento y seguir dando servicio) solo tenemos una barra de alta y una línea.

### 2.3 Objetivos y alcance del proyecto

Como se ha explicado en la introducción, el objetivo de este trabajo es simular tanto el sistema de potencia como la lógica de protección para comprobar como responde a las distintas faltas. Aunque en principio se va a aplicar a una central en concreto, el desarrollo del trabajo va a implicar la creación de una librería que contiene las distintas unidades para generar las señales de protección, bloqueos y permisos.

Una vez el sistema y el esquema de protección estén modelizados se provocarán una serie de faltas en el sistema. Se empezará por falta en la línea y se irá bajando por el sistema.

Una vez conseguido esto, sería interesante contar con algún algoritmo para conseguir automatizar la ejecución de estos ensayos. Por ejemplo, a través de un script en el que estén definidos los ajustes y automáticamente ejecute el modelo y vaya moviendo el bloque de falta y las fases en falta por el sistema. Después cargaría los datos del *workspace* a un archivo fácilmente portable (un Excel, por ejemplo) en el que se reflejen los resultados.

Aunque se han modelizado todas las protecciones, no se han simulado los distintos relés por separado si no todas las protecciones a la vez. Una forma de entenderlo sería imaginar que se ha simulado un solo relé al que llegasen todos los datos de los instrumentos de medida y en él se ejecutasen todas las lógicas. Esta filosofía de simulación es más simple y permite tener todas las señales a disposición. Sin embargo, no incluye el proceso de comunicación relé a relé.

Podemos resumir estos objetivos en los siguientes puntos:

1. Simular el sistema de potencia correspondiente a la conexión de una granja eólica a la red incluyendo:
  - a. Línea
  - b. Transformadores
  - c. Esquema de conexión
  - d. Instrumentos de medida
  - e. Equivalente de la red en el punto de conexión
2. Simular el sistema de protección:
  - a. Sistema de filtrado y obtención de valores del relé
  - b. Lógicas de protección
  - c. Crear una librería de funciones de protección que se pueda utilizar en futuros proyectos
3. Comprobar los ajustes dados mediante la simulación de distintas faltas.

## 2.4 Beneficios

Existen varias alternativas para simular los ajustes y el sistema de protección antes de llegar a las pruebas campo. Generalmente, una vez se han probado por software para validar la solución. Como es bien sabido, cualquier error en un proyecto sale más caro cuanto más tarde se detecta, así que desarrollar un buen sistema de simulación de instalaciones puede evitar descubrir fallos en la lógica de protección más adelante en el proyecto.

El sistema de simulación propuesto se basa en Matlab y Simulink. Se trata de un programa de simulación de propósito general. Esto presenta la ventaja de permitir desarrollar modelos propios y poder adaptarse a distintas funcionalidades que vayan apareciendo en los relés y libertad para implementar simulaciones de lógicas que luego se implementarán en el control de bahía (interbloqueos para maniobras, sistemas de transferencia automáticos o por operador...).

Otra funcionalidad de Matlab es que se pueden exportar los bloques en C++ para ser integrados en los sistemas de control para esquemas sofisticados de protección de área sin tener que “traducir” o rehacer los algoritmos a mano. Con lo que se evitan errores al implementarlos en un sistema real.

La desventaja principal es que al ser un sistema de propósito general no existen librerías específicas (al menos en la librería oficial del programa) para protecciones. Aunque sí que hay unas librerías para sistemas de potencia (con su correspondiente precio extra). Esto añade una desventaja extra al requerir más tiempo para modelar las protecciones. Por eso, este proceso ayuda a entender mejor cual es la lógica interna y la teoría detrás de cada función por lo que desde un punto de vista académico resulta muy interesante.

## 2.5 Descripción de la solución adoptada

### 2.5.1 Descripción de la instalación

La instalación consiste en una subestación elevadora más una línea de alta tensión que la conecta con la red. La protección primaria de este elemento será la diferencial de línea. Como respaldo tendremos protección de distancia y de sobrecorriente (instantánea y temporizada). Existirá además una unidad direccional para estas protecciones de respaldo, lo que asegurará que no disparemos para faltas fuera de la línea salvo que sea necesario.

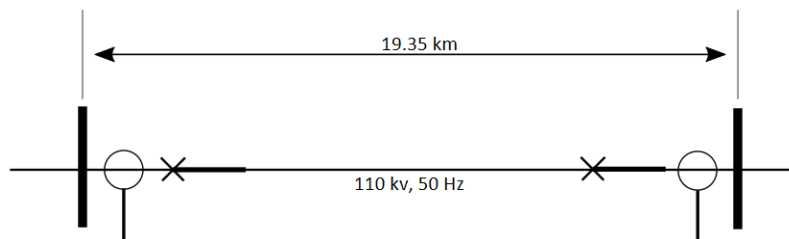


FIGURA 1. LÍNEA AT

La subestación en sí estará compuesta por una barra de alta a 110kV y una barra partida de media tensión a 33kV. A la barra de media se unen las 6 acometidas de los parques eólicos. Las acometidas están protegidas por protecciones de sobrecorriente instantánea y temporizada. Uniendo las 2 barras tenemos 2 transformadores redundantes con cambiador de tomas de 63MVA. Tienen configuración de estrella-estrella con un devanado en triangulo intermedio para permitir el paso de corriente homopolar. Las estrellas de AT están puestas a tierra mediante una resistencia compartida.

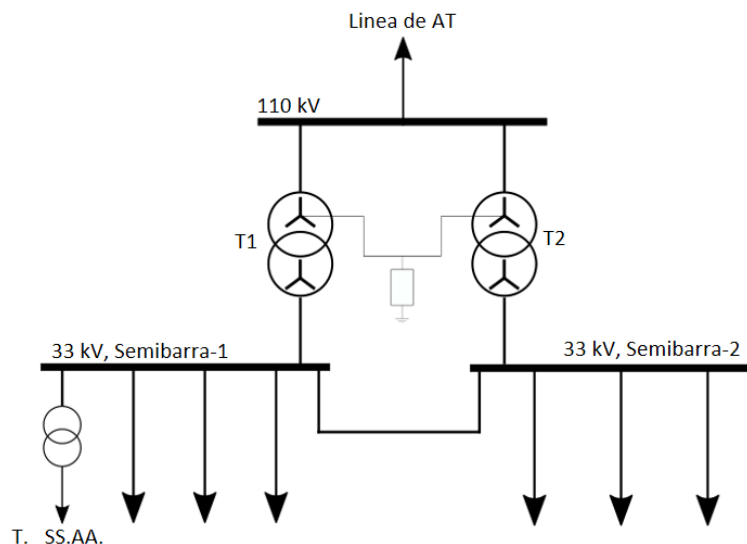


FIGURA 2. SUBESTACIÓN

Los transformadores están protegidos por una unidad diferencial más protecciones de sobreintensidad instantánea y temporizada como respaldo.

## 2.5.2 Modelo del sistema

## 2.5.2.1 Descripción general

El modelo del sistema que se ha creado empleando Matlab es el siguiente:

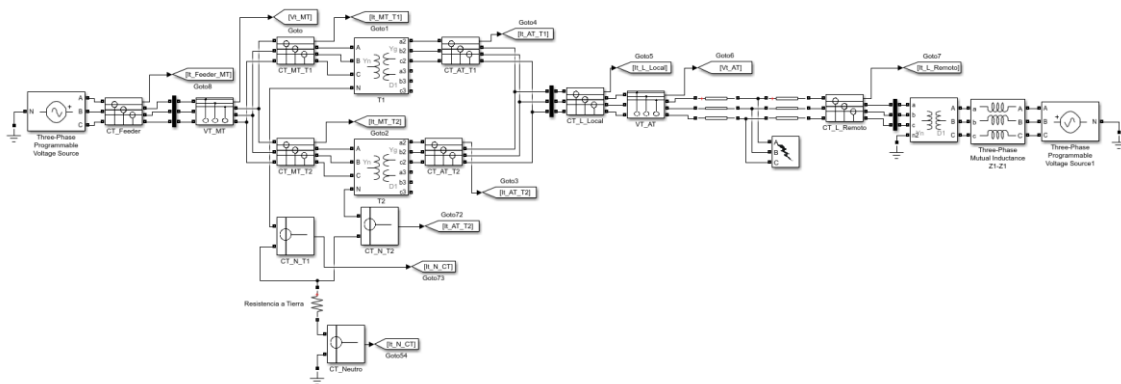


FIGURA 3. MODELO SISTEMA DE POTENCIA

Aunque en la práctica las protecciones se dividirán en distintos relés para cada posición, en este caso tendremos la lógica de todas las protecciones ejecutándose en el modelo de Matlab junto con el sistema. Tampoco se simularán los interruptores.

## 2.5.2.2 Incomers granjas eólicas

Primero tenemos el feeder que representa una de las conexiones típicas de las granjas eólicas, a efectos de simulación se pondrá una sola, suficiente para estudiar la coordinación de las protecciones.

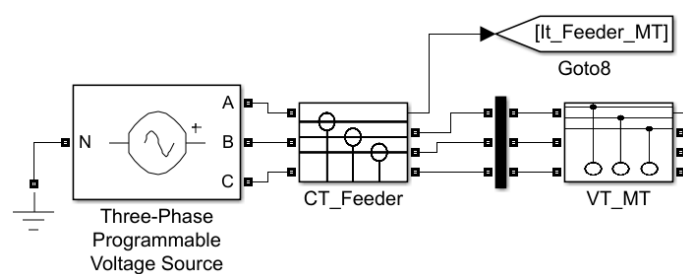


FIGURA 4. MODELO FEEDER

Está compuesto por los siguientes elementos:

-Fuente de tensión: ideal a tensión nominal de 33kV. En el modelo final se han colocado interruptores que desconectan esta fuente de tensión. En la realidad, las granjas eólicas no aportan energía a la falta por lo que solo se ponen aquí para conseguir las condiciones prefalta. Los interruptores se abren en el instante en el que se produce la falta.

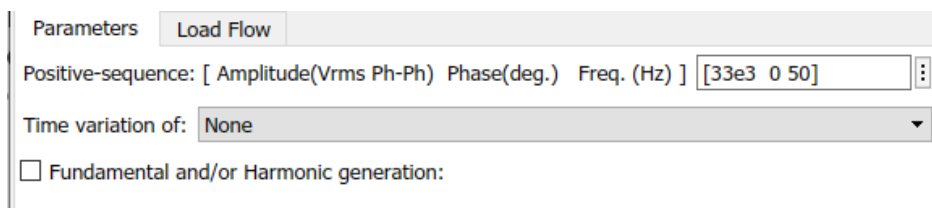


FIGURA 5. AJUSTES FUENTE DE CORRIENTE

-CT Feeder: relación de transformación de 400 a 1, tipo 10P10, de 5VA. El modelo detallado de los CTs se explicará en el punto 10.

### 2.5.3 Transformadores de potencia

A continuación, tenemos la subestación con los dos transformadores redundantes:

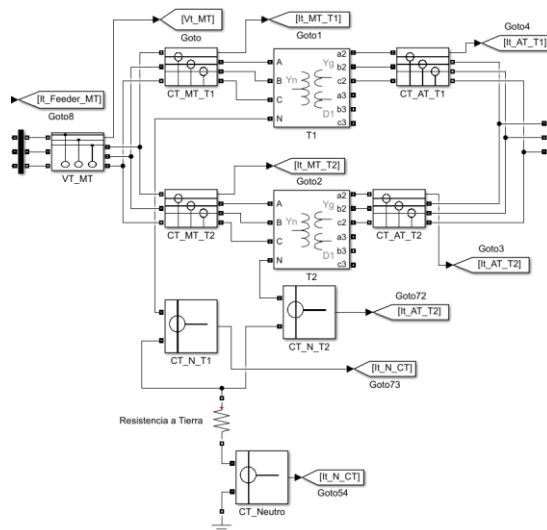


FIGURA 6. MODELO TRANSFORMADORES

Está compuesto por los siguientes elementos:

- CTs de Media de media tensión: 1200A de corriente nominal, relación de transformación de 1200 a 1, 10VA de potencia nominal y clase 10P10.
- VTs de medida de media tensión: 33/r3 a 0.1/r3, 33kV de tensión nominal, 10VA clase 3P.
- Transformadores de potencia: 2 transformadores gemelos elevadores de 33kV a 110kV, 63MVA de potencia, tipo estrella-estrella con triángulo intermedio para permitir el paso de corriente homopolar durante la falta.

Los datos de la placa son:

- Impedancia de corto: 13.98%
- Perdidas en carga: 231.4 kW
- Perdidas sin carga: 99.774%
- S: 63000VA

En el bloque de Matlab se configuran las conexiones:

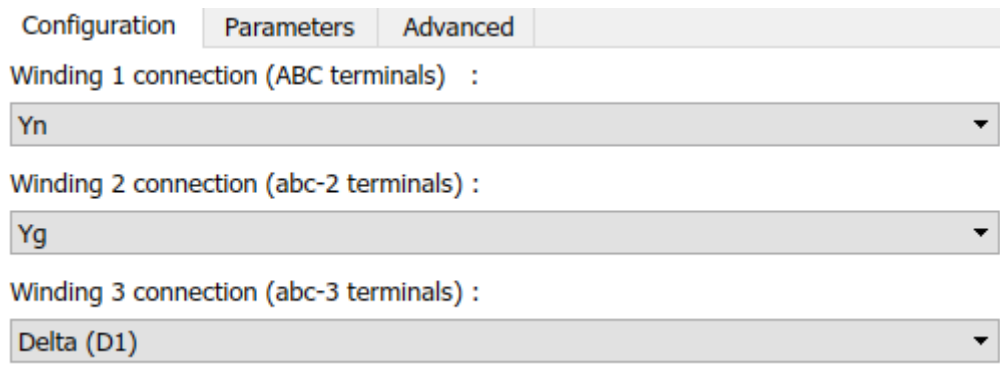
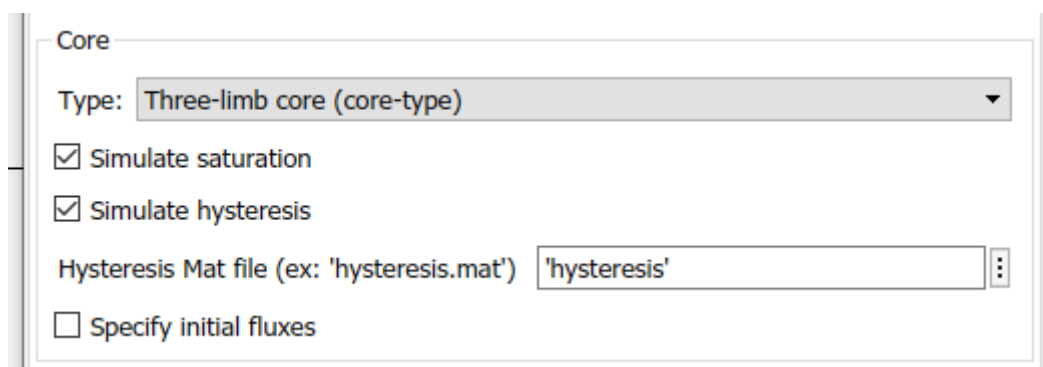


FIGURA 7. AJUSTES MODELO (CONEXIONES)

También se simula la histéresis y se define como un transformador de un único núcleo:



Este transformador de potencia emplea una configuración Yy con un bobinado terciario auxiliar en triángulo. Este bobinado auxiliar se utiliza debido a que [1]:

- Estabiliza el punto neutro del transformador de los armónicos a frecuencia nominal. Aunque las tensiones fase-fase no varíen, si el neutro no está a tierra, las tensiones fase-tierra pueden aumentar drásticamente por desplazamiento del neutro respecto de tierra.
- Minimiza la amplitud del 3º armónico de tensión.
- Disminuye el efecto de las sobretensiones en las comunicaciones por cobre por puesta a tensión del neutro (que suele ser el camino de vuelta de las comunicaciones).
- Disminuye el magnetismo remanente en el núcleo (menores corrientes de Inrush)
- Disminuye la impedancia de secuencia cero (permite mayores corrientes de falta y menores sobretensiones).
- Evita que el circuito de secuencia cero se cierre por el camino de las capacitancias entre los bobinados y la carcasa del transformador.

#### 2.5.3.1 Línea de Alta tensión

A continuación, se modeliza la línea:



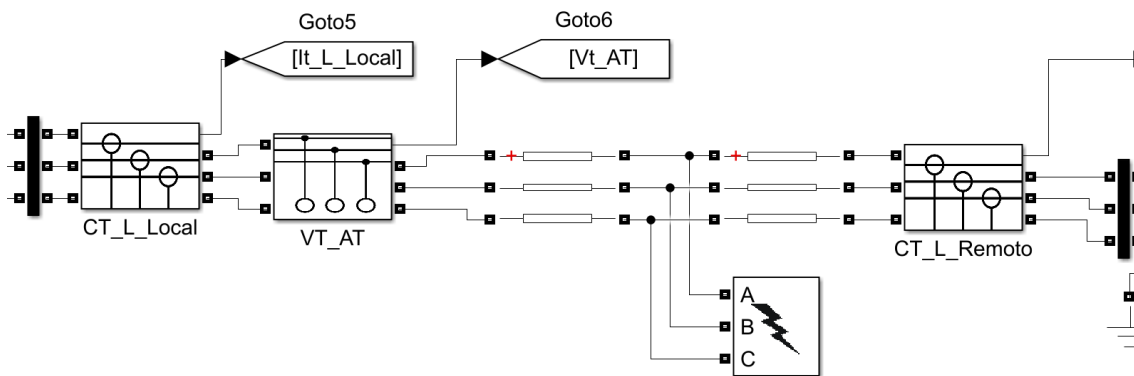


FIGURA 8. MODELO LÍNEA AT

Está compuesta por los siguientes elementos:

- **CTs de medida:** a ambos extremos de la línea. Corriente nominal de 600A, relación de transformación de 600/1, 30VA de potencia y clase 5P30.
- **VT de tensión:** se usará el mismo transformador de medida que en el lado de AT de la subestación. Relación de transformación de 1100/1, 30 VA de potencia y clase 3P.
- **Modelo de línea:** de la línea se sabe que mide 19.3km, los datos de las impedancias son:
  - $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = 2.02 + 7.74j$  Ohm, por unidad de distancia:  $\underline{Zl}_1 = \underline{Zl}_2 = 0.1035 + 0.3969j$  Ohm/km
  - $\underline{Z}_0 = 4.51 + 23.65j$  Ohm, por unidad de distancia:  $\underline{Zl}_0 = 0.2313 + 1.213j$  Ohm/km

Sin embargo, este valor no es suficiente para definir el modelo de línea, ya que necesitaríamos la componente capacitiva y inductiva de la línea. Aun así, por simplicidad y como la línea es muy corta, podemos suponer que solo tiene parte inductiva y resistiva.

El modelo de Matlab pide la inductancia en Faradios:

$$\underline{Z}_{Bobina} = j\omega L = j \cdot 2\pi f \cdot L \xrightarrow{\text{despejamos } L} L = \frac{\underline{Z}_{Bobina}}{2\pi f}$$

Sustituimos para la impedancia de secuencia directa y homopolar para sacar el valor del inductor:

$$L_1 = L_2 = \frac{0.3969}{2\pi \cdot 50} = 1.2634 \cdot 10^{-3} \frac{F}{km}$$

$$L_0 = \frac{1.213}{2\pi \cdot 50} = 3.8611 \cdot 10^{-3} \frac{F}{km}$$

Como aproximación a la capacitancia, se va a dejar los valores por defecto del bloque de Matlab.

Por último, para simular la falta en cualquier punto intermedio, modelizamos la línea como dos bloques de línea con una falta entre los bornes que los unen:

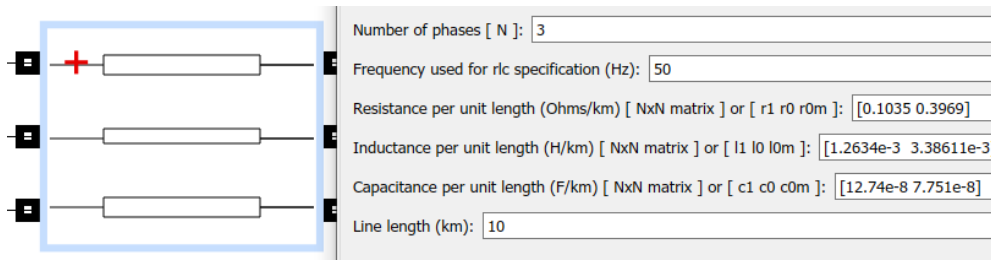


FIGURA 9. PARÁMETROS DE LÍNEA

En este caso particular, el bloque de este lado se ha ajustado para modelar los primeros 10km de la línea y el siguiente a 9.5 para modelar la longitud restante. En cuanto al bloque de falta, permite definir las fases en falta, el momento en el que se produce y la impedancia de falta:

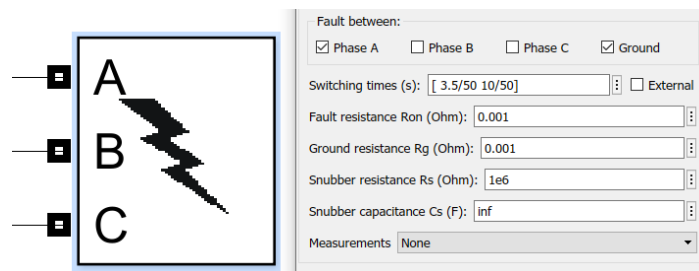


FIGURA 10. PARÁMETROS DE FALTA

El mismo se irá conectando a distintas partes del circuito (feeder, entrada y salida de transformadores, barras de alta y media...) para simular las distintas faltas del sistema.

Por último, están los bloques que simulan la respuesta de la red eléctrica a la que se conecta la línea:

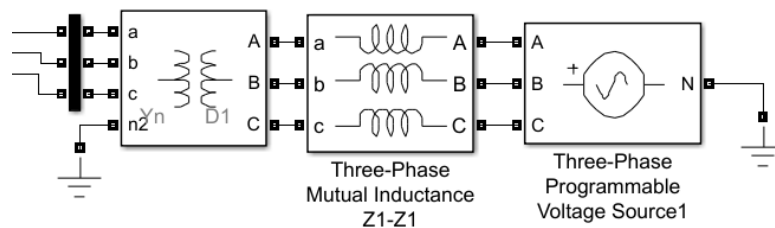


FIGURA 11. PARÁMETROS DE RED

### 2.5.3.2 Transformadores de medida

#### 2.5.3.2.1 Transformadores de corriente

Es importante modelar correctamente este elemento. Durante una falta se alcanzan corrientes muy superiores a la nominal. Esto provoca que los transformadores de corriente no den una corriente proporcional a la que circula por el sistema. Esto es debido a que al llegar al codo de saturación por un aumento de la corriente (y por lo tanto del flujo) en el primario. Como se observa en la figura 12, una vez llegamos a este

punto a cada pequeño aumento de la corriente en el primario le corresponde un gran aumento de la corriente de magnetización.

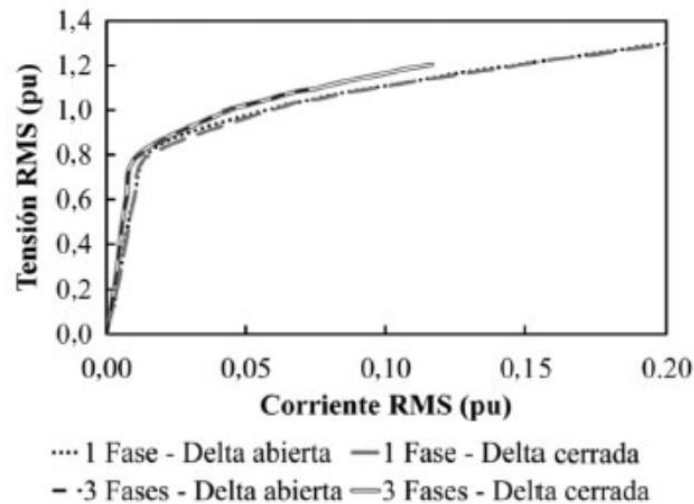
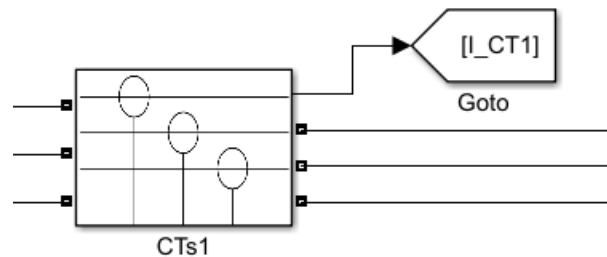


FIGURA 12. CURVA DE SATURACIÓN DE UN TRANSFORMADOR DE MEDIDA

Se empleará el elemento *CT\_Sat* para simular el transformador de corriente:



Estará formado por 3 transformadores monofásicos saturables con relaciones de transformación que se adapten al rango de los convertidores A/D del relé, esto es:  $\pm 2^{0.5} \cdot 46$  A. Del plano vemos que el ratio es 600/1A:

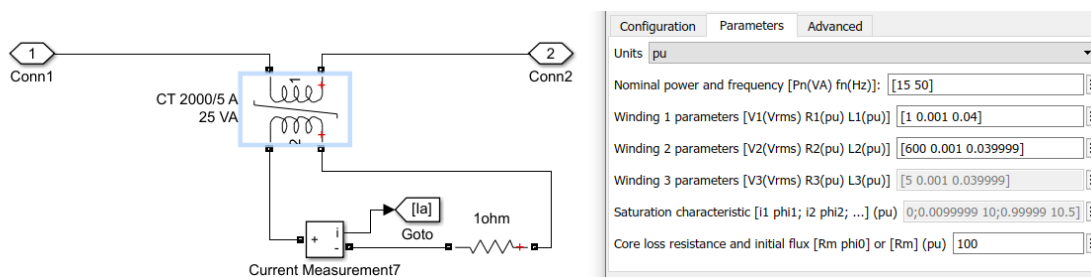


FIGURA 13. MODELO FASE DEL CT

En nuestro modelo tendremos los siguientes transformadores de corriente, en la figura está indicado el número del transformador correspondiente en la tabla 1.

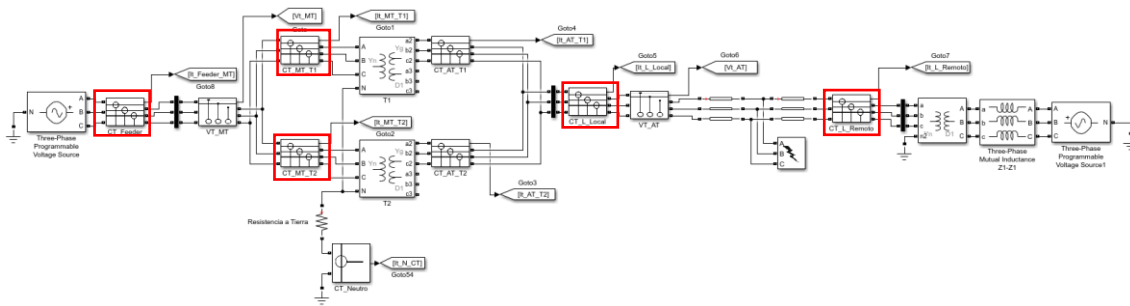


FIGURA 14. POSICIÓN DE LOS CTs

Nombre	I.nom.	R/T	Potencia Nominal	Clase
CT_Feeder	300A	300/1	10VA	10P10
CT_MT_T1	1200A	1200/1	10VA	10P10
CT_MT_T2	1200A	1200/1	10VA	10P10
CT_AT_T1	400A	400/1	10VA	5P30
CT_AT_T2	400A	400/1	10VA	5P30
CT_N_T1	300A	300/1	10VA	5P10
CT_N_T2	300A	300/1	10VA	5P10
CT_N	50A	50/1	10VA	5P20
CT_L_Local	600A	600/1	30VA	5P30
CT_L_Remoto	600A	600/1	30VA	5P30

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS CTS DEL SISTEMA

## 2.5.4 Procesamiento Señales

En la figura 15 se muestra el esquema funcional de un relé UR de General Electric (de los usados para protección de transformador en la subestación) [2]. Se simulará el módulo DSP (*Digital Signal Processor*), primer bloque en la figura. Este módulo consta de las entradas analógicas, el filtro paso bajo analógico, los conversores analógico-digitales, el filtro FIR y el algoritmo de estimación de fasor usando la transformada discreta de Fourier. El objetivo será transformar la onda de los CTs y VTs en fasores que es lo que emplean las lógicas de protección.

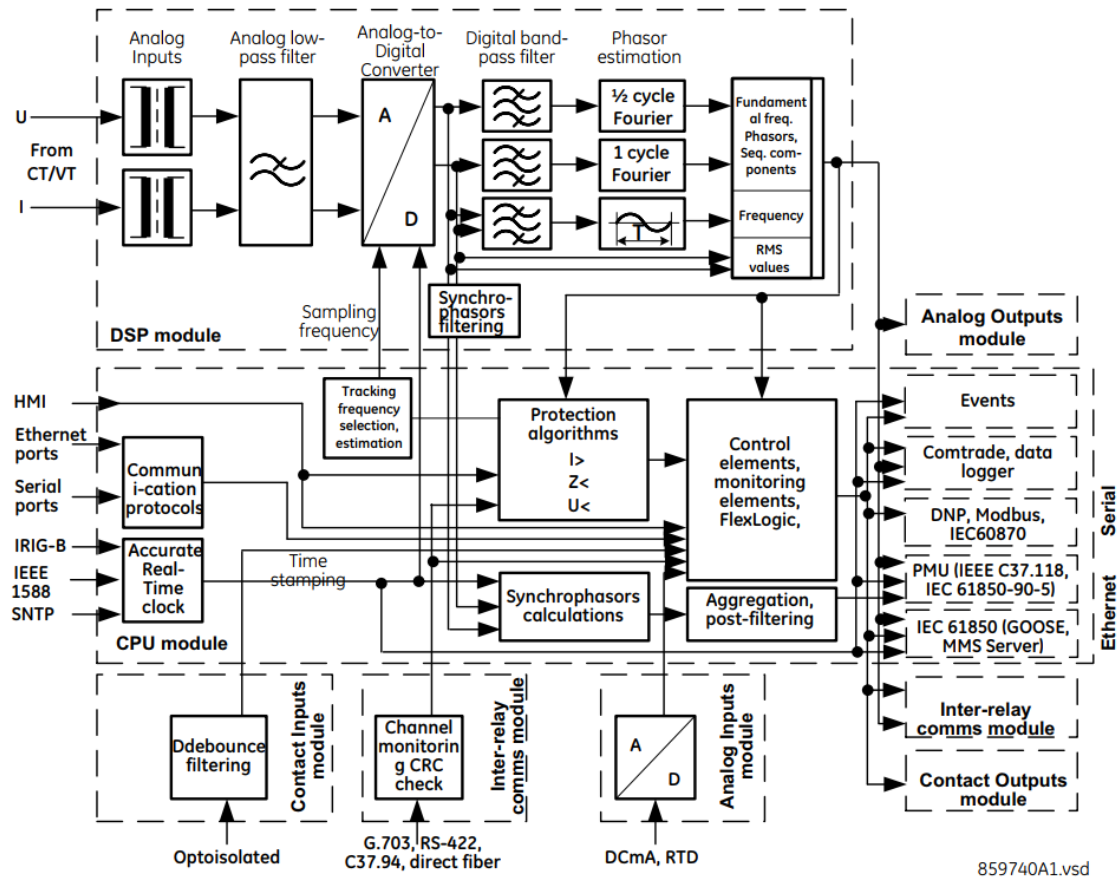


FIGURA 15. DIAGRAMA FUNCIONAL RELÉ UR DE GENERAL ELECTRIC

## 2.5.4.1 Paso de simulación

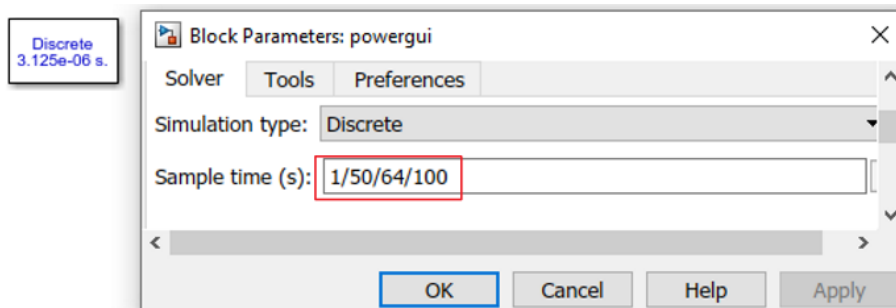


FIGURA 16. AJUSTES PASO DE SIMULACIÓN

Para simular, emplearemos un paso de  $1/(50 \cdot 64 \cdot 100)$ . Esto es, por cada ciclo de la onda (1/50s) el relé toma 64 muestras una cada  $1/(50 \cdot 64)$ s y entre cada muestra del relé, el sistema hará 100 pasos intermedios, uno cada  $1/(50 \cdot 64 \cdot 100)$ .

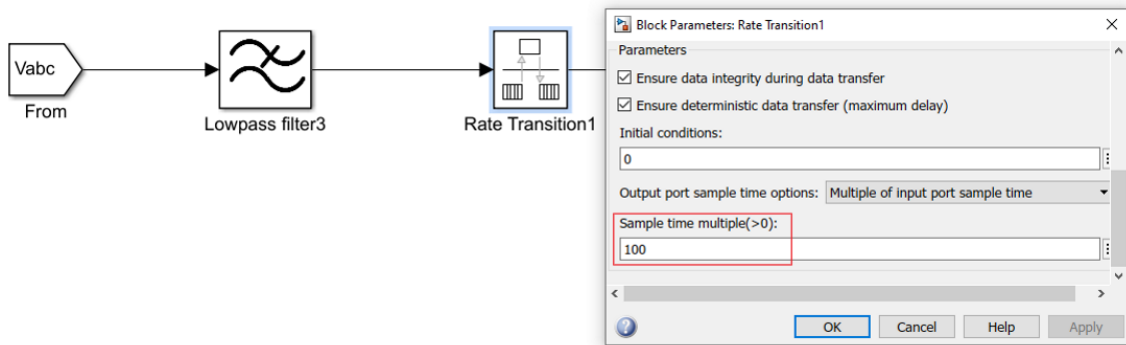


FIGURA 17. BLOQUE SIMULACIÓN DE CONVERSIÓN ANALÓGICO/DIGITAL

Para modelizar el conversor analógico digital y el tiempo de ejecución del relé se empleará el bloque *rate transmission*. El parámetro *sample time* se ajusta para que tenga un paso 100 veces superior al paso de ejecución del modelo, esto es que se ejecute 64 veces por ciclo como el relé. El filtro paso bajo (que se detallará más adelante) se ha colocado antes del bloque conversor A/D ya en el relé se emplea un filtro analógico.

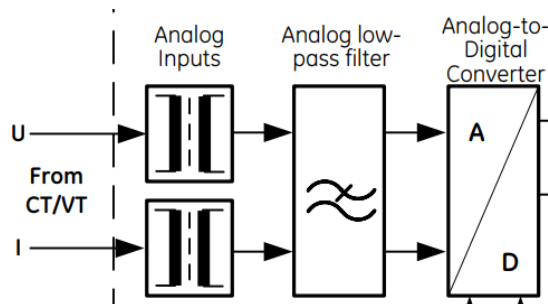


FIGURA 18. SECCIÓN EQUIVALENTE EN EL RELÉ REAL

#### 2.5.4.2 Filtro paso bajo

El primer paso es eliminar el ruido de alta frecuencia, para ello se emplea un filtro paso bajo discreto de primer orden. Se ha ajustado para que filtre las frecuencias superiores a 100Hz. De esta forma desaparece el ruido de alta frecuencia mientras se da margen para que la frecuencia principal y el segundo armónico no se vean atenuados (son los que más interesan como veremos más adelante).

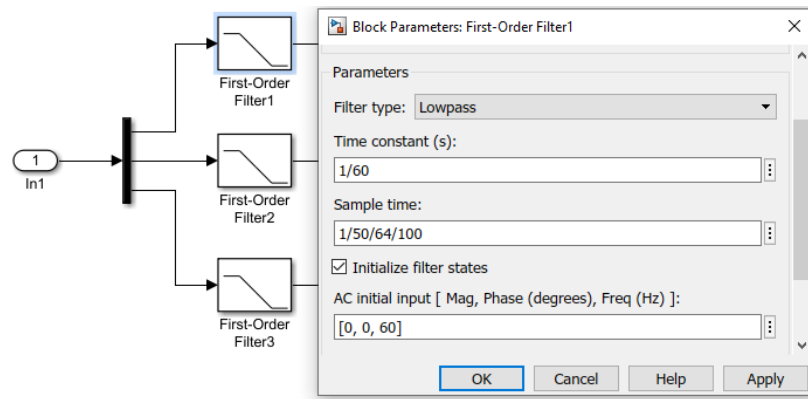


FIGURA 19. AJUSTES BLOQUE FILTRO

Aunque en la realidad sería analógico (continuo) el sistema al completo se simulará como discreto para que sea más rápido. Para su ajuste se ha empleado la herramienta *Filter designer* de Simulink.

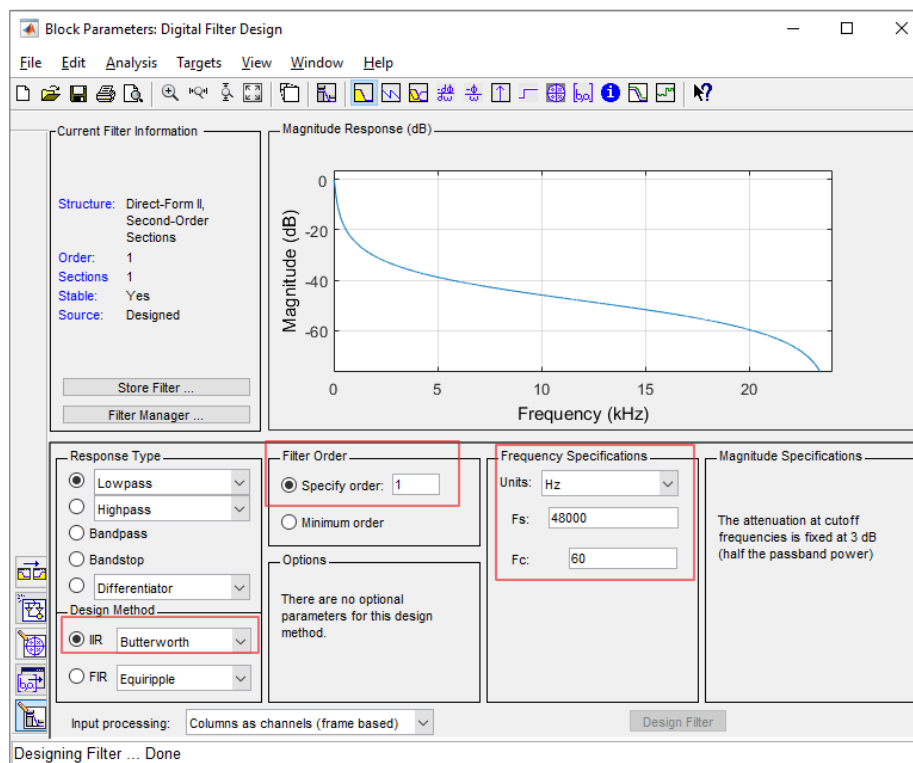


FIGURA 20. HERRAMIENTA DE DISEÑO DE FILTROS MATLAB

Fs: frecuencia de muestreo (sample) en este caso sería 1/50/64/100

Fc: frecuencia de corte, frecuencia a partir de la cual se empieza a atenuar los armónicos.

#### 2.5.4.3 Estimación del Fasor

##### 2.5.4.3.1 Teorema de muestreo

Consideramos una señal sinusoidal continua en el dominio del tiempo [3]:

$$x(t) = \text{sen}(2\pi f_0 t)$$

De la que se tomarán muestras a razón de  $f_s$  (*sample frequency*) muestras por segundo ( $T_s = \frac{1}{f_s}$ ) empezando en  $t=0$ . Entonces tenemos que:

$$x(t_i) = \text{sen}(2\pi f_0 i T_s)$$

Al tratarse de una onda periódica, no es posible distinguir 2 muestras con un desfase relativo de  $2\pi m$  (siendo  $m$  un entero). En efecto:

$$x(n) = \text{sen}(2\pi f_0 n T_s) = \text{sen}(2\pi f_0 n T_s + 2\pi n) = \text{sen}\left(2\pi \frac{f_0 + m}{n T_s}\right)$$

Si  $m$  es múltiplo de  $n$  tal que  $m=k*n$  con  $k$  entero y sustituimos  $T_s$  por  $1/f_s$  entonces:

$$x(n) = \text{sen}(2\pi(f_0 + k + f_s)n T_s)$$

Por lo tanto, cuando muestreamos a un ratio de  $f_s$  muestras por segundo, no podremos distinguir si la onda muestreada es la real o una onda con una frecuencia natural de  $(f_0 + f_s * k)$  Hz. Este efecto se conoce como **solapamiento**. Ocurre cuando no podemos distinguir entre los valores muestreados a  $f_0$  Hz y una onda sinusoidal de  $f_0 + k*f_s$  Hz.

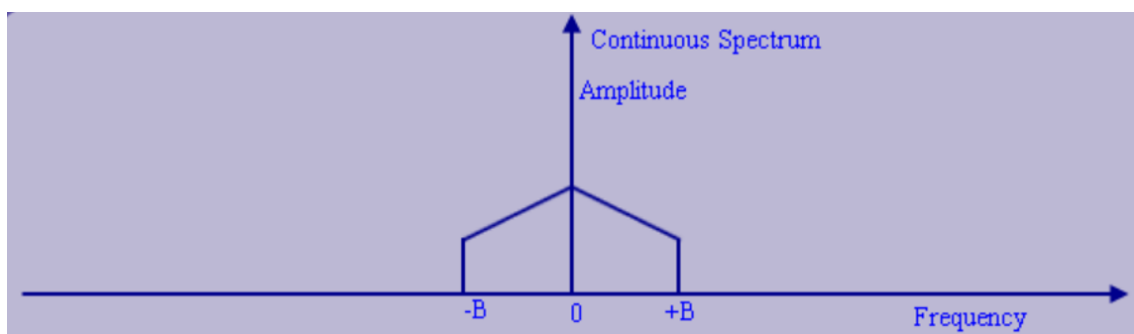


FIGURA 21. ESPECTRO DE LA SEÑAL CONTINUA ORIGINAL



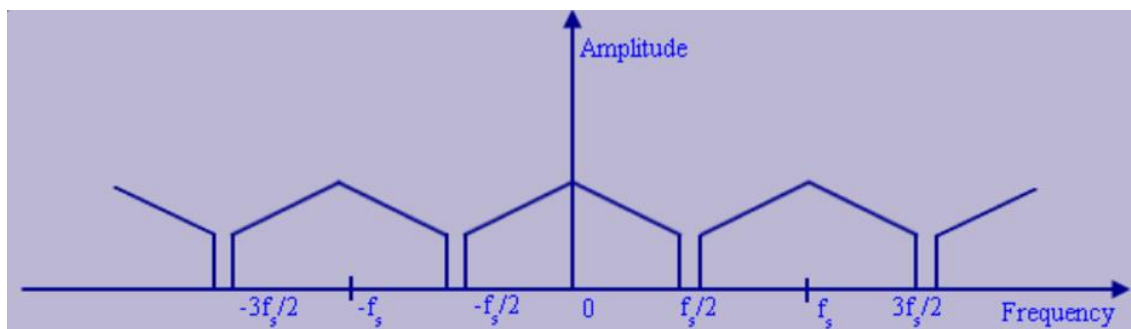


FIGURA 22. ESPECTROS DE LA SEÑAL ORIGINAL Y DE LAS RÉPLICAS

Así, necesitamos una forma de distinguir entre la señal original con un contenido frecuencial situado entre  $f_0 - B$  y  $f_0 + B$  respecto de las réplicas desplazadas  $k \cdot f_s$  de la original. Una solución es que tengamos una idea de la frecuencia a la que oscila esa onda. Para que esto funcione, las réplicas tienen que estar situadas lejos de la original. Esto se consigue haciendo que  $f_s$  sea superior al espectro frecuencial de la onda original (frecuencia de los armónicos mayor y menor frecuencia). Como regla general se emplea una frecuencia de muestreo tal que  $f_s > 2B$ . Si se eligiese una frecuencia de muestreo inferior tendríamos superposición de armónicos entre la onda original y la réplica entorno a  $f_s/2$ . Al espacio entre  $-B$  y  $B$  se denomina **ancho de banda** de la frecuencia.

Como conclusión, podemos definir el **teorema del muestreo** como:

- Una señal de ancho de banda limitado y de energía finita que no tiene un componente a una  $f$  mayor que  $B$  hercios queda completamente descrita al especificar a partir de valores muestreados a una frecuencia  $f_s$  tal que  $f_s > 1/2B$ .
- La misma señal puede ser reconstruida a partir de esas muestras.

En la práctica, incluso una señal con contenido armónico limitado va a contener ruido. El ruido es una componente de alta frecuencia que creará una réplica a baja frecuencia distorsionando la señal reconstruida. En la práctica, es necesario incorporar un **filtro anti-solapamiento** (un filtro paso-bajo) que filtre el ruido.

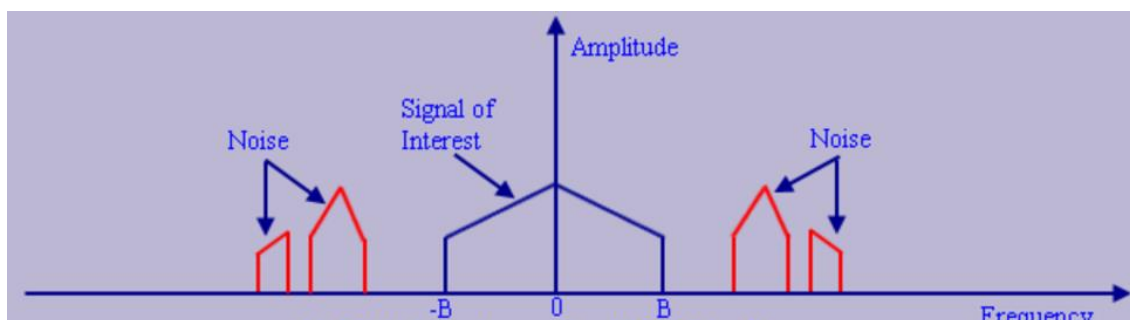


FIGURA 23. ESPECTROS DE LA SEÑAL ORIGINAL MÁS EL RUIDO

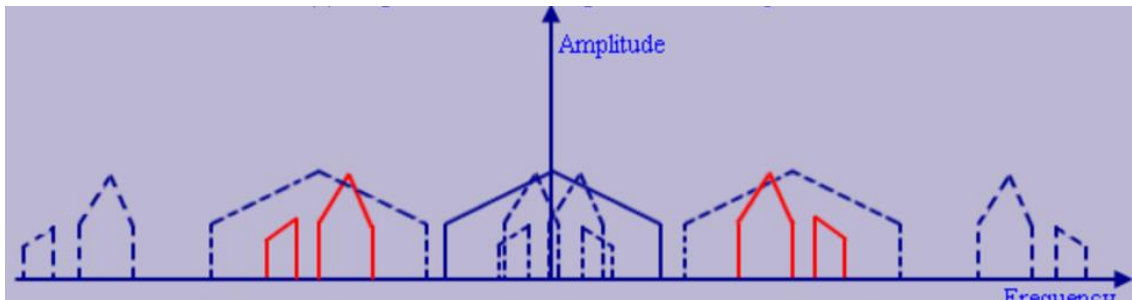


FIGURA 24. ESPECTRO DISCRETO CON REPLICAS TANTO DE LA SEÑAL COMO DEL RUIDO

#### 2.5.4.3.2 Sistema de ecuaciones

El problema aquí es estimar los fasores de tensión y corriente. Los valores instantáneos serán las siguientes formas de onda:

$$v(t) = V_m \text{sen}(\omega t + \varphi_i)$$

$$i(t) = I_m \text{sen}(\omega t + \theta_i)$$

El objetivo es estimar los valores  $(I_m, \theta_i)$  y  $(V_m, \varphi_i)$ . Para ello, tomaremos una serie de muestras de la señal a intervalos de  $\Delta t$ , esto es, en los instantes  $t_1, t_2 \dots t_i$ . Siendo  $t_i = \Delta t \cdot i = i \cdot \omega_0 \cdot \Delta t$ . Asumiremos que  $t_1 = 0$ s.

$$v(t_1) = v_1 = V_m \text{sen}(\omega t_1 + \varphi_{v_i})$$

$$v(t_2) = v_2 = V_m \text{sen}(\omega t_2 + \varphi_{v_i})$$

.

.

.

$$v(t_i) = v_i = V_m \text{sen}(\omega t_i + \varphi_{v_i})$$

Aplicando propiedades trigonométricas podemos extraer el desfase del seno:

$$V_i = V_m [\text{sen}(\Delta t_i) \cos(\varphi_i) + \text{sen}(\varphi_i) \cos(\Delta t_i)]$$

En principio, ya que nuestras únicas incógnitas son dos, el valor eficaz y el desfase, si las medidas fuesen perfectas y la onda ideal, solo necesitaríamos 2 muestras para plantear dos ecuaciones. El sistema de ecuaciones en forma matricial, sería el siguiente:

$$\begin{pmatrix} v1 \\ v2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{sen}(\beta_1) & \text{cos}(\beta_1) \\ \text{sen}(\beta_2) & \text{cos}(\beta_1) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Vm \cdot \text{cos}(\varphi_v) \\ Vm \cdot \text{sen}(\varphi_v) \end{pmatrix}$$

Primero se despejan  $Vm \cdot \text{sen}(\varphi_v)$  y  $Vm \cdot \text{cos}(\varphi_v)$ :

$$\begin{pmatrix} Vm \cdot \text{cos}(\varphi_v) \\ Vm \cdot \text{sen}(\varphi_v) \end{pmatrix} = \frac{1}{\text{sen}(\beta_1 - \beta_2)} \begin{pmatrix} \text{cos}(\beta_2) - \text{cos}(\beta_1) \\ \text{sen}(\beta_2) - \text{sen}(\beta_1) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v1 \\ v2 \end{pmatrix}$$

Y de estos dos términos se despeja fácilmente el valor de  $Vm$  y de  $\varphi_v$ :

$$Vm = \sqrt{Vm^2 \text{cos}^2 \phi_v + Vm^2 \text{sen}^2 \phi_v}$$

$$\text{and } \phi_v = \tan^{-1} \left( \frac{Vm \text{sen} \phi_v}{Vm \text{cos} \phi_v} \right)$$

Esta ecuación se puede generalizar para la k-ésima muestra:

$$Vm^k \text{cos} \phi_v^k = \frac{v_{k-1} \text{cos} \theta_k - v_k \text{cos} \theta_{k-1}}{\text{sen}(\Delta \theta)}$$

$$Vm^k \text{sen} \phi_v^k = \frac{v_k \text{sen} \theta_{k-1} - v_{k-1} \text{sen} \theta_k}{\text{sen}(\Delta \theta)}$$

Introducimos ahora el concepto de **ventana de estimación**, que se define como la ventana de tiempo que contiene a grupo de muestras activo que se está empleando para estimar el fasor, que en este caso sería de 2.

#### 2.5.4.3.3 Mínimos cuadrados

Se empleará una ventana de 3 muestras para ilustrar el efecto del número de muestras en la estimación del fasor teniendo en cuenta, ahora, el efecto del error en la medida. Partiendo de la forma expandida de la función sinusoidal:

$$v_k = V_m [\text{sen}(\theta_k) \cos(\varphi_v) + \cos(\theta_k) \text{sen}(\varphi_v)] + e_k$$

Ordenamos las 3 muestras en una matriz:

$$\begin{pmatrix} v_k \\ v_{k-1} \\ v_{k-2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{sen}(\theta_k) & \cos(\theta_k) \\ \text{sen}(\theta_{k-1}) & \cos(\theta_{k-1}) \\ \text{sen}(\theta_{k-2}) & \cos(\theta_{k-2}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_m \cos(\varphi_v) \\ V_m \text{sen}(\varphi_v) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_k \\ e_{k-1} \\ e_{k-2} \end{pmatrix}$$

Como se puede observar, tenemos un sistema con 3 ecuaciones y 2 incógnitas. Cada ecuación no es combinación lineal de las otras ya que en todas ellas existe un error e propio de cada medida. Para estimar el valor de  $V_m$  y  $\varphi_v$  emplearemos el método de los mínimos cuadrados. Expresamos el sistema de forma compacta:

$$\vec{b} = [A] \cdot \vec{x} + \vec{e}$$

Siendo:

$$\vec{b} = \begin{pmatrix} v_k \\ v_{k-1} \\ v_{k-2} \end{pmatrix}, [A] = \begin{pmatrix} \text{sen}(\theta_k) & \cos(\theta_k) \\ \text{sen}(\theta_{k-1}) & \cos(\theta_{k-1}) \\ \text{sen}(\theta_{k-2}) & \cos(\theta_{k-2}) \end{pmatrix}, \vec{x} = \begin{pmatrix} V_m \cos(\varphi_v) \\ V_m \text{sen}(\varphi_v) \end{pmatrix} \text{ y } \vec{e} = \begin{pmatrix} e_k \\ e_{k-1} \\ e_{k-2} \end{pmatrix}$$

Este método permite encontrar un vector  $\vec{x}$  tal que  $[A] \cdot \vec{x}$  es lo más cercano posible al vector  $\vec{b}$ . Definimos el vector  $\vec{r}$ , o vector residual, como:

$$\vec{r} = \vec{b} - [A] \cdot \vec{x}$$

La longitud euclídea del vector  $\vec{r}$  dará una idea de cuan próximo  $\vec{b}$  es de  $[A] \cdot \vec{x}$ . Para ello, se minimizará la expresión:

$$|\vec{r}| = \sqrt{r_1^2 + \dots + r_m^2}$$

Siendo  $m$  el número de muestras y debiéndose de cumplir que  $m$  sea superior al número de elementos de  $\vec{x}$  ( $n$ ). Se define entonces el problema de mínimos cuadrados como un problema de optimización. Sea una función  $\Phi(\vec{x})$  definida como la suma de los

cuadrados de las diferencias  $r_i$ . Eliminamos la raíz para simplificar los cálculos, el resultado es el mismo.

$$\Phi(\vec{x}) = \min \left\{ \frac{1}{2} \vec{r}^T \vec{r} \right\} = \min \left\{ \frac{r_1^2 + \dots + r_m^2}{2} \right\} = \min \left\{ \frac{(\vec{b} - [A] \cdot \vec{x})^T (\vec{b} - [A] \cdot \vec{x})}{2} \right\}$$

Para calcular el mínimo, igualaremos a cero las derivadas parciales de la función  $\Phi(\vec{x})$  respecto de cada una de las incógnitas del vector  $\vec{x}$ .

$$\frac{\partial \Phi(\vec{x})}{\partial x_1} = 0 \dots \frac{\partial \Phi(\vec{x})}{\partial x_n} = 0$$

De esta forma, nuestro sistema de  $n$  incógnitas y  $m$  ecuaciones se transforma en uno de  $n$  ecuaciones y  $n$  incógnitas que ya se puede resolver. El siguiente paso es aplicar esta teoría al problema de estimación de fasores. Cada una de las muestras que toma el relé nos da la siguiente información en forma de ecuación:

$$v_i = \text{sen}(\theta_i) V_m \cos(\varphi_v) + \cos(\theta_i) V_m \text{sen}(\varphi_v) + e_i$$

De la cual conocemos  $v_i$  que es el valor medido, pero también  $\text{sen}(\theta_i)$  y  $\cos(\theta_i)$  ya que el ángulo se puede conocer sabiendo el momento en el que se ha realizado la muestra (*timestamp*):

$$\theta_i = i \cdot \Delta t \cdot 2\pi \cdot f_s$$

Mientras que las incógnitas serán  $V_m \cos(\varphi_v)$  y  $V_m \text{sen}(\varphi_v)$  por simplificar el cálculo y mantener el sistema lineal. Una vez conocidos, el cálculo de  $V_m$  y  $\varphi_v$  resulta trivial. Sustituyendo en el sistema tenemos que  $\Phi(\vec{x})$  para esta aplicación se define como:

$$\Phi(\vec{x}) = \vec{b} - [A] \cdot \vec{x} = \begin{pmatrix} v_1 \\ \dots \\ v_k \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \text{sen}(\theta_1) & \cos(\theta_1) \\ \dots & \dots \\ \text{sen}(\theta_k) & \cos(\theta_k) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_m \cos(\varphi_v) \\ V_m \text{sen}(\varphi_v) \end{pmatrix}$$

Después de aplicar las derivadas, el resultado será el siguiente sistema matricial de dos ecuaciones y dos incógnitas que incorpora las  $k$  medidas tomadas por el relé:

$$\begin{pmatrix} \sum_{j=k-2}^k \text{sen}(\theta_j)^2 & \sum_{j=k-2}^{k-1} \cos(\theta_j) \text{sen}(\theta_j) \\ \sum_{j=k-2}^{k-1} \cos(\theta_j) \text{sen}(\theta_j) & \sum_{j=k-2}^k \cos(\theta_j)^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_m \cos(\varphi_v) \\ V_m \text{sen}(\varphi_v) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=k-2}^k \text{sen}(\theta_j) v_i \\ \sum_{i=k-2}^k \cos(\theta_j) v_i \end{pmatrix}$$

#### 2.5.4.3.4 Algoritmos de Fourier de ciclo completo

Vamos a describir ahora la ventana de medida en función del tiempo en vez del número de muestras. Consideramos ahora que la ventana de medida tiene una longitud igual al ciclo de la onda  $T$ . Consideramos también que en ese ciclo tomamos un número  $k$  de muestras. Desarrollando los sumatorios de la matriz anterior:

$$\sum_{j=k-2}^{k-1} \cos(\theta_j) \text{sen}(\theta_j) = \sum_{j=k-2}^{k-1} \frac{\text{sen}(2\theta_j)}{2} = \sum_{j=k-2}^{k-1} \frac{\text{sen}(2\omega_0 j \Delta t)}{2} =$$

Debido a la elección particular de la ventana temporal se cumple que:

$$k\omega_0 \Delta t = 2\pi \xrightarrow{\text{Sust.}} \sum_{j=k-2}^{k-1} \text{sen}(2\omega_0 j \Delta t) = \sum_{j=k-2}^{k-1} \frac{4\pi}{k} j$$

Por otro lado, dado que para la integral equivalente se cumple que:

$$\int_0^{2\pi/\omega_0} \text{sen}(2\omega_0 t) dt = 0$$

Lo mismo pasará con el sumatorio. También se puede demostrar que los otros dos sumatorios son iguales a las integrales numéricas:

$$\int_0^{2\pi/\omega_0} \text{sen}(2\omega_0 t)^2 dt = 0$$

$$\int_0^{2\pi/\omega_0} \text{cos}(2\omega_0 t)^2 dt = 0$$

Por lo tanto, son distintos de cero y iguales a:

$$\sum_{j=0}^{K-1} \text{sen}(\theta_j)^2 = \sum_{j=0}^{K-1} \text{cos}(\theta_j)^2 = \frac{K}{2}$$

Queda así demostrado que para ventanas de muestreo con un tiempo igual al ciclo de la onda el sistema de ecuaciones se simplifica de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} \frac{k}{2} & 0 \\ 0 & \frac{k}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_m \text{cos}(\varphi_v) \\ V_m \text{sen}(\varphi_v) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=k-2}^{k-1} \text{sen}(\theta_j)v_i \\ \sum_{i=k-2}^{k-1} \text{cos}(\theta_j)v_i \end{pmatrix}$$

Convirtiéndose en un sistema diagonal y por lo tanto de resolución directa:

$$V_m \text{cos}(\varphi_v) = \frac{2}{k} \sum_{i=k-2}^k \text{sen}(\theta_j)v_j = V_s$$

$$V_m \text{sen}(\varphi_v) = \frac{2}{k} \sum_{i=k-2}^k \text{cos}(\theta_j)v_j = V_c$$

Estas ecuaciones, a su vez, se pueden generalizar para la L-ésima ventana de muestreo:

$$V_c^L = \frac{2}{k} \sum_{j=L-k+1}^L \text{sen}(\theta_j) v_j$$

$$V_s^L = \frac{2}{k} \sum_{j=L-k+1}^L \text{cos}(\theta_j) v_j$$

Como se verá más adelante, estas ecuaciones son iguales a la transformada discreta de Fourier.

#### 2.5.5 Problemas relacionados con la medida de la corriente de falta

Para ilustrar estos problemas se va a analizar la evolución de la corriente en una fase durante una falta para una ventana de estimación de tres muestras. Para las ventanas  $w_1$  y  $w_4$  vemos que están usando muestras prefalta y postfalta respectivamente. Por lo tanto, las estimaciones del fasor serán más próximas a la realidad que con las ventanas  $w_2$  y  $w_3$ . Estas dos están usando parte de las muestras en prefalta y parte en postfalta, en consecuencia, darán un resultado erróneo.

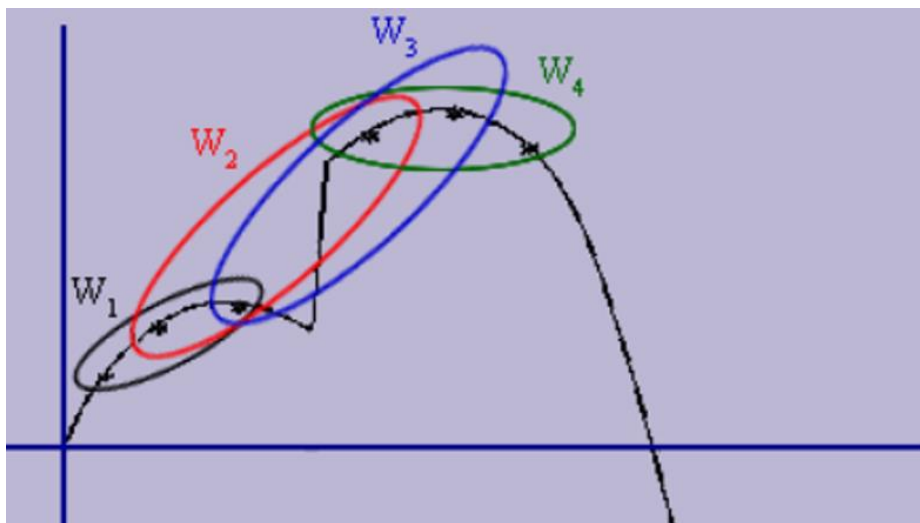


FIGURA 25- MOVIMIENTO DE LA VENTANA DE MUESTRAS DURANTE UNA FALTA

La conclusión es que el desfase en la medida ante un cambio brusco de la amplitud será igual a la longitud de la ventana de medida. En nuestro caso, al utilizar una ventana de 1 ciclo, tendremos que esperar un ciclo para obtener una medida correcta. Otro efecto importante es la influencia de la componente de continua en la medida que distorsionará completamente la estimación del fasor ya que todo el desarrollo hasta ahora se basa en la suposición de que estamos midiendo una onda sinusoidal a frecuencia nominal con un error aleatorio.



## 2.5.5.1.1 Filtro MIMIC

Durante el transitorio después de cerrar el circuito (o durante una falta, que no es más que el cierre del circuito por un nuevo camino) tendremos una corriente transitoria. Esta corriente está formada por una componente sinusoidal y una componente directa amortiguada. Para ilustrarlo consideramos el siguiente circuito RL:

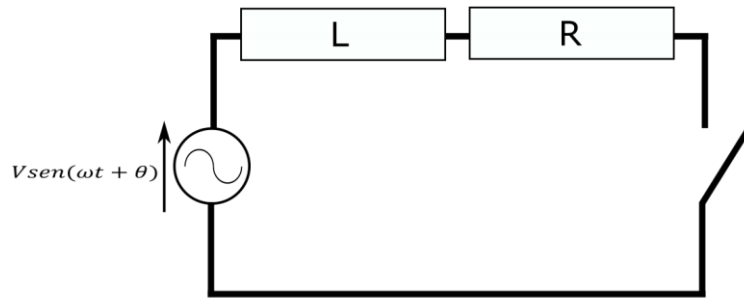


FIGURA 26. CIRCUITO RL

Al cerrar el interruptor circulará por el circuito una corriente  $i(t)$  determinada por la siguiente ecuación:

$$i(t) = I_m \left[ \overset{\text{Sinusoidal}}{\sin(\omega t + \theta - \theta_z)} - \overset{\text{Directa}}{\sin(\theta - \theta_z) e^{-\frac{t}{\tau}}} \right]$$

En la que encontramos los siguientes parámetros:

$$\text{Constante de tiempo: } \tau = \frac{L}{R}$$

$$\text{Angulo de la impedancia del circuito: } \theta_z = \tan^{-1} \left( \frac{X}{R} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{\omega L}{R} \right)$$

Instante en el que se produce el cierre (en unidades angulares):  $\theta_z$

Para realizar el análisis fasorial nos interesa tener la componente sinusoidal pura por lo que vamos a estudiar la forma de eliminar la componente directa. Mientras que el ángulo de la impedancia depende del circuito (aunque la carga varia, será más o menos constante al estar las líneas compensadas), el desfase de la tensión depende del momento en el que ocurra la falta (totalmente aleatorio). Por lo tanto, necesitamos un filtro adaptativo que elimine esa componente independientemente de su valor.

Filtro MIMIC analógico:

Centrándonos en esa componente directa que queremos eliminar, consideramos este otro circuito alimentado únicamente por una fuente de corriente cuyo valor es dicha componente:

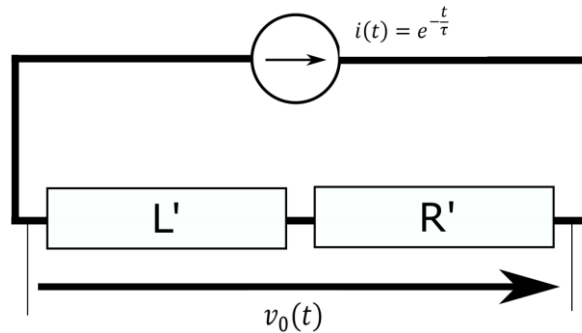


Figura 27. Filtro MIMIC Analógico

La entrada de este filtro es la corriente de falta mientras que la salida es la tensión  $V_0$ . Aplicando la transformada de Laplace vemos que la salida del sistema para la componente directa es un impulso. Aplicando superposición, si excitamos este sistema con  $i(t)$ , la respuesta es la suma de un impulso más otra onda sinusoidal. Aquí, la clave está en que hemos ajustado  $R'/L'$  del filtro para que coincida con a cte.  $R/L$  del sistema y podamos hacer esa simplificación.

$$v_0(t) = R' \cdot i(t) + X' \cdot \frac{d i(t)}{dt} \xrightarrow{\text{Laplace}} V_0(s) = (sX' + R')I(s)$$

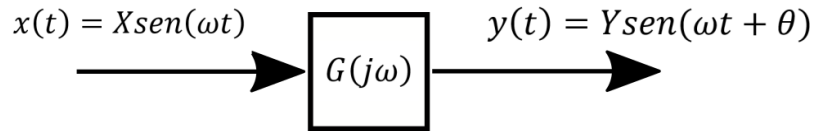
$$i(t) = e^{-\frac{t}{\tau}} \xrightarrow{\text{Laplace}} I(s) = \frac{1}{s + \frac{1}{\tau}}$$

Sustituyendo:

$$V_0(s) = \frac{sX' + R'}{s + \frac{1}{\tau}} \xrightarrow{\tau = \frac{R'}{L'}} V_0(s) = L' \cdot \frac{s + \frac{1}{\tau}}{s + \frac{1}{\tau}} \xrightarrow{\text{Inversa de Laplace}} v_0(t) = L' u(t)$$

Por lo tanto, la salida del filtro será una función impulso multiplicada por la inductancia de nuestro circuito. En la práctica esto se traduce en un pico en la señal filtrada cada vez que tenemos una componente DC.

Por otro lado, queremos que la salida elimine la componente DC, pero imite el comportamiento de la onda original (esto es, que  $v_0(t)$  sea igual a la componente sinusoidal de  $i(t)$ ). Trabajando ahora en el dominio de la frecuencia, si excitamos un sistema con una onda sinusoidal, la salida es una nueva señal  $y(t)$ :



Siendo  $G(j\omega)$  la función de transferencia del filtro:

$$G(j\omega) = \frac{V_0(j\omega)}{I(j\omega)} = k \left( j\omega + \frac{1}{\tau} \right)$$

Con:  $k = R'$  y  $\tau = \frac{R'}{L'}$ . Que aporta a la onda sinusoidal:

- Una ganancia:

$$|G(j\omega)| = \left| \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \right| = \left| k \left( j\omega + \frac{1}{\tau} \right) \right|$$

Sustituyendo y operando podemos calcular el valor de  $k$  para que la ganancia sea 1:

$$k^2 = \frac{1}{\left( (1 + \tau) - \tau \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right)^2 \right)^2 + \left( \tau \text{sen}\left(\frac{2\pi}{N}\right)^2 \right)^2}$$

Nótese que  $w$  aquí es  $2\pi f$ , pero  $f$  es la frecuencia del sistema de potencia, si no el número de muestras por ciclo del relé, por eso tenemos la constante  $N$  (número de muestras por ciclo) dividiendo. Para ajustar el filtro tenemos los valores  $R'$  y  $L'$ .  $R'$  la fijamos para obtener la ganancia 1 mientras que  $L'$  la ajustamos para que  $\tau$  coincida con el sistema.

- También aporta un desfase:

$$\theta = \text{Ang}(G(j\omega)) = \text{Ang}\left(\frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}\right) = \text{Ang}(Y(j\omega)) - \text{Ang}(X(j\omega))$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\text{imag}(G(j\omega))}{\text{real}(G(j\omega))}\right)$$

Sustituyendo y dando valores tenemos que:

$$\theta_{FIR} = \tan^{-1} \left( \frac{\tau \operatorname{sen} \left( \frac{2\pi}{N} \right)}{(1 + \tau) - \tau \cos \left( \frac{2\pi}{N} \right)} \right)$$

Como ya no tenemos variables libres para compensar este desfase extra lo que se hace es compensarlo restando ese desfase al ángulo en el modelo. El desfase será constante así que es más fácil compensarlo [4].

#### Simulación en Simulink:

El filtro consiste en sumar la corriente multiplicada por la resistencia del sistema y la derivada de la corriente por la inductancia del sistema. Al trabajar con sistemas discretos, calculamos la derivada numéricamente:

$$\dot{x}_t = \frac{x_t - x_{t-1}}{\Delta t}$$

De esta forma, la ecuación del filtro para una muestra  $p$  queda como:

$$i(p) = k[(1 + \tau)i(p) - \tau \cdot i(p - 1)]$$

En este caso,  $\Delta t$  será igual a  $\frac{1}{50 \cdot 64}$  s, ya que nuestro relé tiene una frecuencia de muestreo de 64 muestras por ciclo en un sistema a 50Hz.

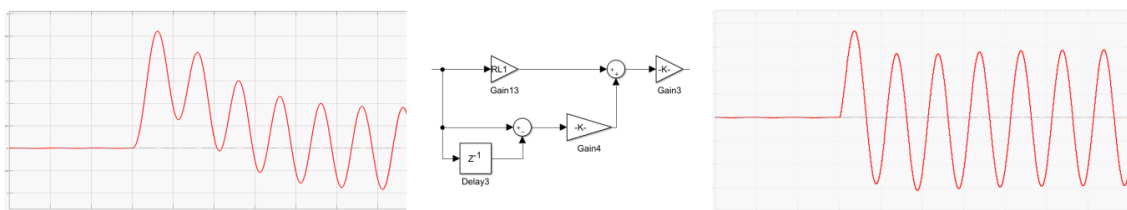


Figura 28. Efecto del filtro FIR en onde con componente DC

La ganancia 4 será impedancia partido de  $\Delta t$ , mientras que la ganancia 3 será el valor  $k$  para ajustar la ganancia del filtro a la unidad. Por otro lado, para compensar el desfase introducido por el filtro mimic, se compensa más adelante restándosele al ángulo del fasor calculado mediante FFT:

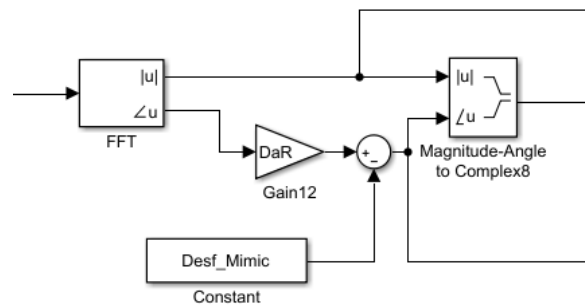


FIGURA 29. COMPENSACIÓN DEL DESFASE EN EL MODELO

Para mejorar la adaptabilidad del sistema todas las variables se definirán en un script desde el que se llamará a Simulink. De esta forma no hay que ir recorriendo el modelo para ir cambiando estos parámetros.

```

%Longitud Linea:
L=10;

%Prm de linea:
RL1=0.01273*L;
LL1=0.9337e-3*L;

XL1=LL1*2*pi*50;
ZL1=RL1+XL1*1j;

%Parametros MIMIC
Tau=LL1/RL1;
N=64; %Muestras por ciclo rele
K=(1/((1+Tau)-Tau*cos((2*pi)/N))^2+(Tau*sin((2*pi)/N))^2)^0.5;
Desf_Mimic=atan((Tau*sin((2*pi)/N))/(1+Tau-Tau*cos((2*pi)/N))); %en rad
K_Mimic=K*(1+Tau);

%Filtro Mimic corrientes:
K3=1/((RL1^2+XL1^2)^0.5);

```

#### Continuidad de la cte.:

Ciertamente este filtro solo funcionará correctamente mientras la constante  $\tau$  del filtro y del sistema sean la misma. En el caso de la línea eléctrica, al producirse una falta la línea se acortará. Sin embargo, la constante será la misma  $\tau$  ya que el cociente entre R y L, al ser ambos directamente proporcionales a la longitud, no varían. Por lo tanto, la cte. del sistema (de la componente DC) siempre será el cociente entre L por unidad de distancia y R por unidad de distancia.

#### Para la tensión:

Aunque el filtro analógico no funciona para una onda de tensión, el filtro digital equivalente implementado aquí no distingue entre el origen de la onda. Mientras la

componente DC de la tensión tenga la misma constante de tiempo  $\tau$  que el filtro, este la despejará sin problemas.

#### 2.5.5.1.2 Transformada de Fourier y mínimos cuadrados

#### 2.5.5.1.3 Transformada discreta de Fourier

Consideramos una señal  $g(t)$  de periodo  $T$  que se muestrea cada  $t_s$  segundos. De forma que  $T=N \cdot t_s$  donde  $N$  es un número real. La transformada de Fourier será:

$$G(f) = \int_0^T g(t) e^{-j2\pi f t} dt$$

Si ahora evaluamos la integral por la regla trapezoidal de integración (para pasar al plano discreto) obtenemos las siguientes funciones:

$$G(f) = t_s \sum_{n=0}^{N-1} g(n t_s) e^{-j2\pi f n t_s}$$

La correspondiente inversa que se empleará para reconstruir la señal será:

$$g(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(f) e^{j2\pi f t} df$$

Como tenemos  $N$  puntos (reales) y  $G(f)$  es un número complejo con dos grados de libertad, lo lógico es suponer que podremos calcular por lo menos  $N/2$  transformadas  $G(f)$  de la muestra original. Estas transformadas son los armónicos de la onda real a distintas frecuencias. Cada armónico es, como hemos visto con el método de mínimos cuadrados, una función sinusoidal a una determinada frecuencia que minimiza el vector diferencia. Y el número de armónicos que podremos obtener es  $N/2$ . Otra forma de verlo es que, a mayor armónico, mayor frecuencia suponemos que tiene la onda y por lo tanto tenemos menos puntos por ciclo hasta el mínimo para calcularlo que son dos puntos por ciclo. Una consecuencia de esto es que cuanto mayor sea el armónico mayor error estaremos cometiendo en su estimación. En la práctica, solo nos interesarán el primer y el 5º armónico, y tomamos 64 muestras por ciclo, por lo que estaremos relativamente lejos de ese mínimo.

Hacemos:

$$f_o = \frac{1}{T} = \frac{1}{N \cdot t_s} = \frac{f_s}{N} \quad f = m \cdot f_o = \frac{m}{N \cdot t_s} = \frac{m \cdot f_s}{N}$$

Importante aquí definir términos:  $f_o$  es la frecuencia de la onda real mientras que  $f$  es la frecuencia de la transformada (la frecuencia del fasor resultante) y  $m$  es el múltiplo que la frecuencia natural. Cuando  $m=1$ , obtenemos el primer armónico, con  $m=2$  el segundo y así sucesivamente. Sustituyendo en la transformada:

$$G\left(\frac{mf_s}{N}\right) = t_s \sum_{n=0}^{N-1} g(n t_s) e^{-j2\pi \frac{m}{N t_s} n t_s}$$

Así, nuestra elección de  $f$  es tal que el termino exponencial es independiente de  $t_s$ :

$$G\left(\frac{mf_s}{N}\right) = t_s \sum_{n=0}^{N-1} g(n t_s) e^{-j2\pi \frac{mn}{N}}$$

El siguiente paso es demostrar que existe una transformada inversa. Si demostramos su existencia, implicaría que no existe pérdida de información al pasar del dominio discreto (muestras) al de frecuencia (fasor). Primero pasamos la transformada inversa a su forma discreta a partir de la integral:

$$x(n) = \frac{1}{k} \sum_{m=0}^{N-1} X(m) e^{-j \frac{2\pi mn}{N}}$$

Sustituimos la expresión de la transformada en la inversa:

$$x(n) = \frac{1}{k} \sum_{m=0}^{N-1} \left[ \sum_{k=0}^{N-1} n(k) e^{-j2\pi \frac{mk}{N}} \right] e^{-j \frac{2\pi mn}{N}}$$

Nuestro objetivo será operar hasta conseguir que nos quede  $x(n)$  en el lado derecho. Desarrollamos el sumatorio y queda las siguientes ecuaciones:

$$RHS = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} x_0 + x_1 + \dots + x_{N-1} & \leftarrow m = 0 \\ + x_0 e^{\frac{j2\pi n}{N}} + x_1 e^{-\frac{j2\pi}{N}} e^{\frac{j2\pi n}{N}} + \dots + x_{N-1} e^{-\frac{j2\pi(N-1)}{N}} e^{\frac{j2\pi n}{N}} & \leftarrow m = 1 \\ \dots & \dots \\ + x_0 e^{\frac{j2\pi(N-1)n}{N}} + x_1 e^{-\frac{j2\pi(N-1)}{N}} e^{\frac{j2\pi(N-1)n}{N}} + \dots + x_{N-1} e^{-\frac{j2\pi(N-1)^2}{N}} e^{\frac{j2\pi(N-1)n}{N}} & \leftarrow m = N-1 \end{bmatrix}$$

Reagrupando los términos y factorizando por  $x_0, x_1, \dots$  tenemos:

$$RHS = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} x_0 (1 + e^{\frac{j2\pi n}{N}} + \dots + e^{\frac{j2\pi(N-1)n}{N}}) + x_1 (1 + e^{-\frac{j2\pi}{N}} e^{\frac{j2\pi n}{N}} + \dots + e^{\frac{j2\pi(N-1)(n-1)}{N}}) \\ \dots \\ + x_{N-1} (1 + e^{\frac{j2\pi(n-N-1)}{N}} + \dots + e^{\frac{j2\pi(N-1)(n-N-1)}{N}}) \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \sum_{m=0}^{N-1} e^{\frac{j2\pi m}{N}(n-k)}$$

Lo que hemos hecho no es más que intercambiar el orden de los sumatorios para poder evaluar ahora el sumatorio interior. Se puede demostrar que:

$$\sum_{m=0}^{N-1} e^{\frac{j2\pi}{N}(n-k)m} = \begin{cases} N & \text{if } k = n; \\ 0 & \text{if } k \neq n; \end{cases}$$

Y sustituyendo nos queda que:

$$x(n) = \frac{N}{K}$$

Queda así demostrado que existe la transformada inversa si escogemos  $k=N$ . En general podemos definir la fórmula como:

$$\text{Transformada: } X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{\frac{-j2\pi mn}{N}}$$

$$\text{Transformada inversa: } x(n) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} X(m) e^{\frac{j2\pi mn}{N}}$$

En todo caso, DFT y IDFT se pueden definir de muchas formas en función del valor que se quiera dar al factor  $k$ . la forma más común en protecciones será:



$$\text{Transformada: } X(m) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{j2\pi mn}{N}}$$

$$\text{Transformada inversa: } x(n) = \frac{1}{2} \sum_{m=0}^{N-1} X(m) e^{\frac{j2\pi mn}{N}}$$

### 2.5.6 Computación del fasor

Vamos a ver finalmente la aplicación de la DFT para la estimación de una senoide. Consideramos la siguiente señal:

$$x(t) = \sqrt{2}X \text{sen}(w_0 t + \varphi) \xrightarrow{\text{fasor}} \bar{X} = X e^{-j\varphi} = X(\cos(\varphi) + j \cdot \text{sen}(\varphi))$$

La señal  $x(t)$  se muestrea  $N$  veces por ciclo de forma que:

$$T_0 = N \cdot t_s \xrightarrow{\text{sust en } x(t)} \sqrt{2}X \text{sen}\left(\frac{2\pi}{N}k + \varphi\right) \quad f_s = N \cdot f_0 \frac{f_s}{N}$$

Además, como  $f_s = N \cdot f_0$  en el dominio de la frecuencia, las componentes están separadas por  $\frac{f_s}{N}$ . Por lo tanto, la elección de  $m=1$  se corresponde con extraer la frecuencia fundamental:

$$X_1 = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{-\frac{j2\pi mn}{N}} = \frac{2}{N} \left[ \sum_{k=0}^{N-1} x_k \cos\left(\frac{2\pi}{N}k\right) \right] - j \frac{2}{N} \left[ \sum_{k=0}^{N-1} x_k \text{sen}\left(\frac{2\pi}{N}k\right) \right] = X_c - jX_s$$

Llamaremos a la parte real de la ecuación  $X_c$  y a la parte imaginaria  $X_s$ . El fasor de la onda será entonces:

$$\bar{X} = \frac{1}{\sqrt{2}} j X_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} (X_c + j X_s)$$

La transformada actúa de este modo como un filtro que permite filtrar la componente deseada de la serie de muestras. Conviene recordar ahora que, en aplicaciones de protección en estado estacionario, trabajamos con ventanas móviles, de forma que cada ventana tiene las  $N$  muestras más recientes. Llamaremos  $X_c^w$  y  $X_s^w$  a las componentes de la DFT correspondientes a la  $w$ -ésima ventana.

$$X_c^w = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_{(k+w)} \cos\left(\frac{2\pi}{N}k\right) \xrightarrow{\text{sust. } x_{(k+w)}} X_c^w = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \sqrt{2}X \text{sen}(w_0 t + \varphi) \cos\left(\frac{2\pi}{N}k\right)$$

Operando y aplicando propiedades trigonométricas:

$$X_c^w = \frac{\sqrt{2}X}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \text{sen}\left(\frac{4\pi}{N}k + \frac{2\pi}{N}w + \varphi\right) + \text{sen}\left(\frac{2\pi}{N}w + \varphi\right)$$

$$X_c^w = \frac{\sqrt{2}X}{N} (0 + N \text{sen}\left(\frac{2\pi}{N}w + \varphi\right)) = \sqrt{2}X \text{sen}\left(\frac{2\pi}{N}w + \varphi\right)$$

Del mismo modo, para la componente imaginaria:

$$X_c^w = \sqrt{2}X \cos\left(\frac{2\pi}{N}w + \varphi\right)$$

Sustituyendo ahora estos componentes para calcular el fasor de la onda tenemos que:

$$\bar{X} = \frac{1}{\sqrt{2}}jX_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(X_c + jX_s) = X \left( \cos\left(\frac{2\pi}{N}w + \varphi\right) - j \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi}{N}w + \varphi\right) \right) = X e^{j\varphi} e^{j\frac{2\pi}{N}w}$$

Como se ve en la ecuación, la DFT va a introducir un desfase artificial de  $\frac{2\pi}{N}w$  en el fasor. Para compensarlo, se modifican los límites de integración de la DFT. El límite inferior será  $k = w$  y el límite superior será  $k + w - 1$ . Sustituyendo en la DFT:

$$X(m) = \frac{2}{N} \sum_{k=w}^{k+w-1} x_n e^{-\frac{j2\pi mn}{N}}$$

$$X(m) = X_c - jX_s = \frac{2}{N} \left[ \sum_{k=w}^{k+w-1} x_n \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - j \sum_{k=w}^{k+w-1} x_n \text{sen}\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right]$$

El último paso es hacer la DFT recursiva. Partimos de una serie de muestras y estudiamos la  $w$ -ésima ventana (esto es, la  $w$ -ésima estimación) y la  $w+1$ -ésima ventana.

$$\left( \begin{array}{l} x_w \quad \rightarrow \quad x_w \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{N}wm\right) \\ x_{w+1} \quad \rightarrow \quad x_{w+1} \cdot \cos\left(\frac{2\pi(w+1)}{N}m\right) \\ \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ x_{w+N-1} \quad \rightarrow \quad x_{w+N-1} \cdot \cos\left(\frac{2\pi(N+w-1)}{N}m\right) \\ x_{w+N} \quad \rightarrow \quad x_{w+N} \cdot \cos\left(\frac{2\pi(N+w)}{N}m\right) \end{array} \right)$$

$$X_c^w(m) = x_w \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{N}wm\right) + x_{w+1} \cdot \cos\left(\frac{2\pi(w+1)}{N}m\right) \dots + x_{w+N-1} \cdot \cos\left(\frac{2\pi(N+w-1)}{N}m\right)$$

$$X_c^{w+1}(m) = x_{w+1} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{N}wm\right) + x_{w+2} \cdot \cos\left(\frac{2\pi(w+1)}{N}m\right) \dots + x_{w+N-1} \cdot \cos\left(\frac{2\pi(N+w-1)}{N}m\right) + x_{w+N} \cdot \cos\left(\frac{2\pi(N+w)}{N}m\right)$$

Si ahora restamos las dos ecuaciones, vemos que se anulan todos los términos menos el primero de la  $w$  y el último de la  $w+1$ .

$$X_c^{w+1}(m) - X_c^w(m) = x_{w+N} \cdot \cos\left(\frac{2\pi(N+w)}{N}m\right) - x_w \cdot \cos\left(\frac{2\pi w}{N}m\right)$$

Y como estamos considerando Fourier de ciclo completo:

$$X_c^{w+1}(m) = X_c^w(m) + (x_{w+N} - x_w) \cdot \cos\left(\frac{2\pi w}{N}m\right)$$

Con lo que el sumatorio del punto anterior se reduce a una resta, una suma, una función trigonométrica y una multiplicación. Se realiza un desarrollo similar para la componente compleja:

$$X_s^{w+1}(m) = X_s^w(m) + (x_{w+N} - x_w) \cdot \sin\left(\frac{2\pi w}{N}m\right)$$

#### 2.5.6.1.1 Implementación en Matlab

Para su implementación en Simulink se empleará la función Fourier en código de Matlab. La entrada será, por un lado, las 2 muestras necesarias para la estimación del fasor en cada ciclo ( $x_{w+N}$  y  $x_w$ ). Para obtener  $x_{w+N}$  se usará un retardo de 64 pasos. Además de estas muestras, a la función se le pasa la estimación de los componentes  $X_s^w$  y  $X_c^w$  anteriores (delays 2 y 3) y un contador que es el que se empleará para calcular el ángulo  $\frac{2\pi w}{N}m$ . También se emplea la entrada Arm como un parámetro de entrada a la función que permitirá seleccionar el armónico que nos interesa (como se verá más adelante en protecciones se suele emplear también el 5º y el 2º armónicos). La salida será el valor eficaz y el desfase del fasor.

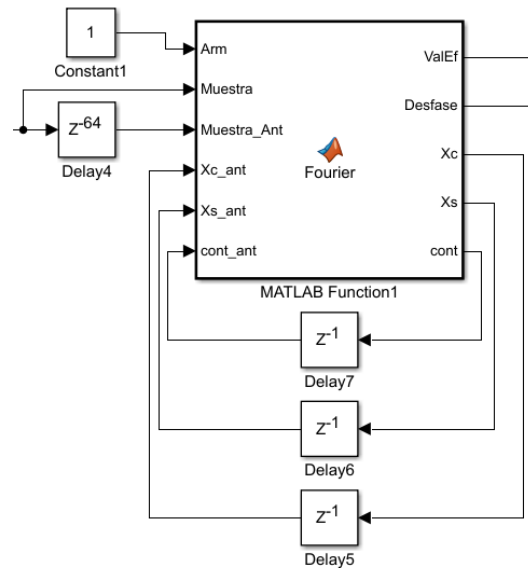


FIGURA 30. BLOQUE ANÁLISIS DE FOURIER

Dentro de la función encontramos el siguiente código, que no es otra cosa que las ecuaciones que acabamos de obtener. Como curiosidad, se ha añadido un *if* para resetear el contador una vez por periodo:

```
function [ValEf,Desfase,Xc,Xs,cont] = Fourier(Arm,Muestra,Muestra_Ant, Xc_ant,Xs_ant,cont_ant)
%Doc Función:
%.....

cont=cont_ant+1;

if cont==64
    cont=1;
end

ang=(2*pi*cont*Arm-6)/64;

Xc=Xc_ant+(2/64)*((Muestra-Muestra_Ant)*cos(ang));

Xs=Xs_ant+(2/64)*((Muestra-Muestra_Ant)*sin(ang));

ValEf=(1/(2^0.5))*((Xc^2+Xs^2)^0.5);

Desfase=atan(Xc/Xs);

end
```

FIGURA 31. CÓDIGO TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER

Para comprobar que la función devuelve el valor eficaz y el desfase correcto se alimenta primero con un generador discreto de ondas sinusoidales. Al igual que en el modelo de la subestación la onda oscila a 50Hz, y se le ha dado un desfase de 15º y un valor eficaz de 500.

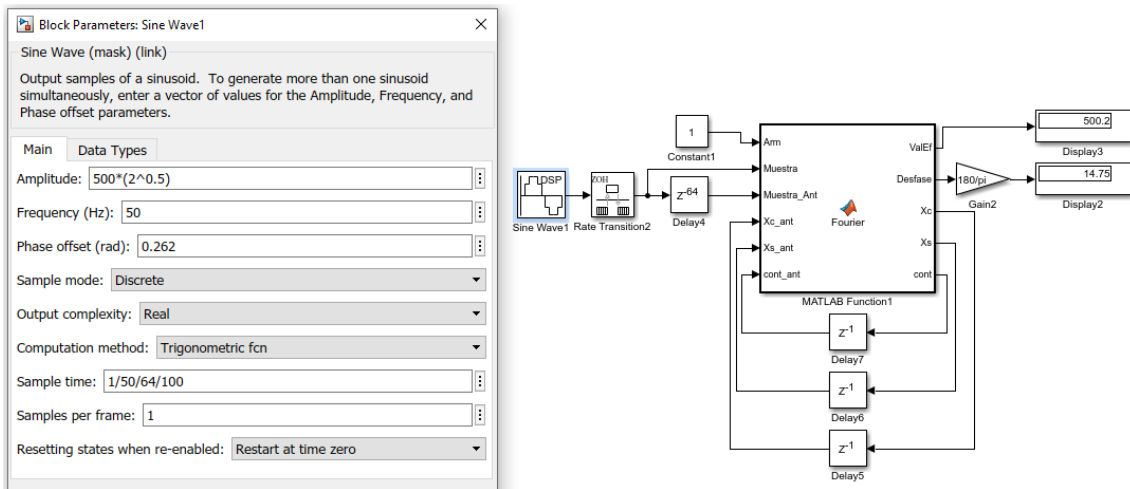


FIGURA 32. TEST BLOQUE FOURIER CON UNA SEÑAL SINUSOIDAL DISCRETA

En comparación con el bloque Fourier de la biblioteca de Matlab:

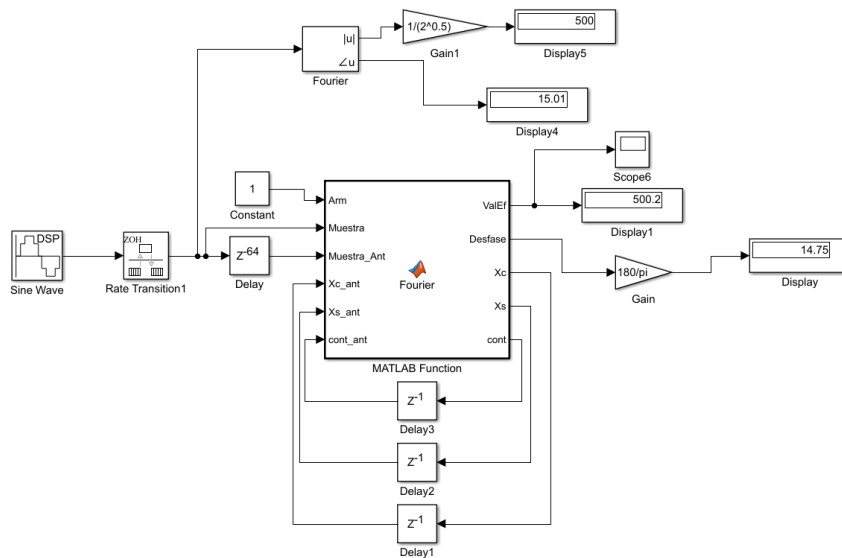
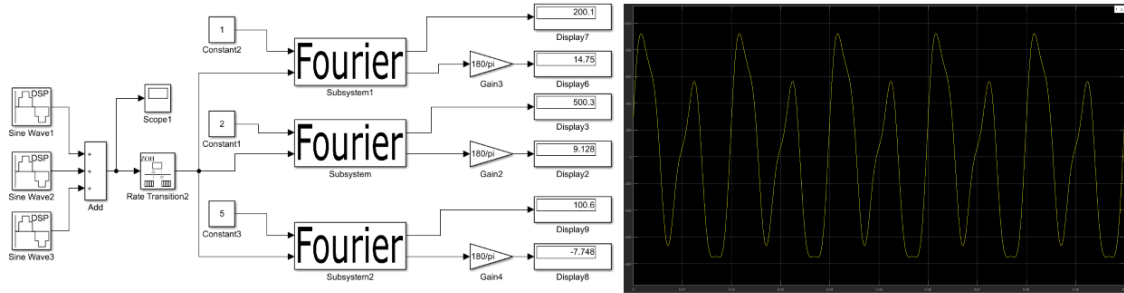


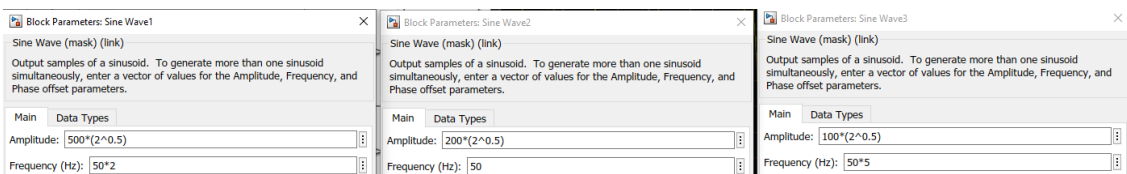
FIGURA 33. BLOQUE PROPIO DE FOURIER COMPARADO CON UN BLOQUE DE MATLAB

El último paso por probar es el filtrado y la obtención de los distintos armónicos que componen la onda. En este caso, vamos a crearlos a partir de la suma de tres ondas sinusoidales, una a frecuencia nominal y otra a dos veces la frecuencia nominal y la última a cinco veces la frecuencia nominal, todas con un desfase aleatorio. La onda obtenida se pasará por 3 funciones de Fourier, cada una ajustada con el parámetro *Arm* para que mida uno de los 3 armónicos de la onda:



**FIGURA 34. SUPERPOSICIÓN DE VARIAS FUNCIONES SINUSOIDALES PARA SIMULAR ONDA CON CONTENIDO ARMÓNICO**

Como se puede ver en los *displays*, cada una de las funciones de Fourier devuelve el fasor correspondiente con un mínimo de error (un 0.06% de media).



**FIGURA 35. VALORES DE AMPLITUD Y DESFASE DA LAS 3 ONDAS UTILIZADAS EN EL TEST**

2.5.7 Selector de fase

2.5.8 Desarrollo teórico selector de fase

Si escogemos una ecuación que no se corresponde con la falta error inaceptable en la medida de la distancia. Es importante tener un buen selector de nos indique que bucle debemos considerar.

Tipos de faltas (10):

Faltas a tierra	Faltas Bifásicas	Faltas bifásicas a tierra	Falta trifásica
IaN	Iab	IabN	Iabc
IbN	Ibc	IbcN	
IcN	Ica	IcaN	

**TABLA 2. TIPOS DE FALTAS**

1-Existe  $I_0$  en la falta?

La  $I_0$  se calcula directamente:

$$I_0 = I_a + I_b + I_c$$

Si existe  $I_0$  **hay desviación a tierra**. Para discriminar la falta correcta de las 6 posibles con tierra se comparan  $I_0$  con  $I_2$  (siempre que tengamos la una tendremos la otra). Estudiaremos el ángulo  $\alpha$ :  $\alpha = \text{Ang}(I_0) - \text{Ang}(I_2)$

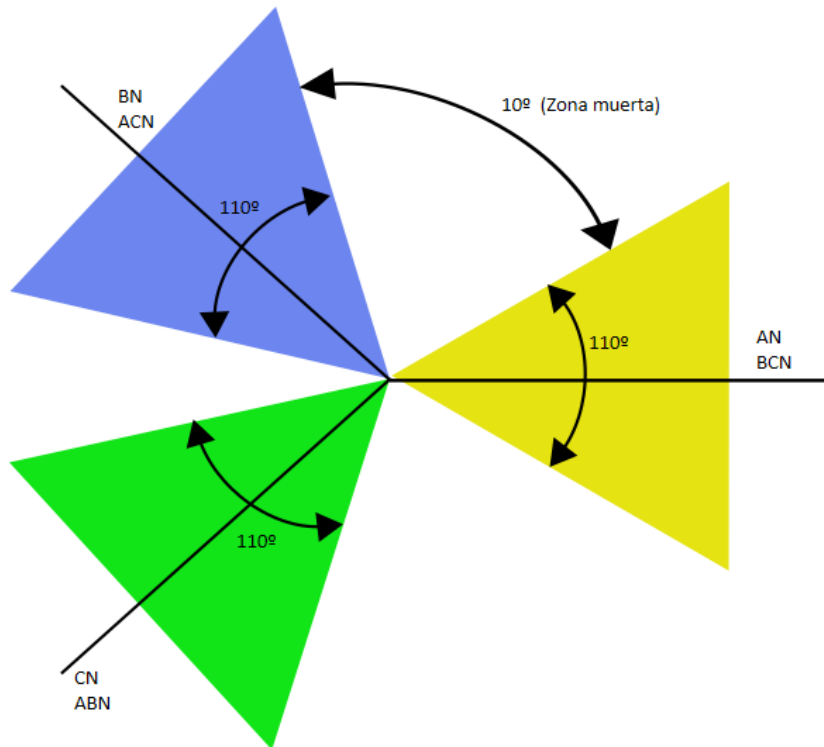


FIGURA 36. RELACIÓN ENTRE  $\alpha$  Y LAS DISTINTAS FALTAS CON NEUTRO

Entre los ángulos dejaremos una **zona muerta**. Si  $\alpha$  pertenece a dicha zona no podremos diferenciar en qué fase es. Esto se traduce en que  $\alpha$  pertenecerá a los siguientes rangos para cada falta:

AN, BCN		BN, ACN		CN, ABN	
<	>	<	>	<	>
$-55^\circ$	$55^\circ$	$65^\circ$	$175^\circ$	$185^\circ$	$295^\circ$
5.323 rad	0.96 rad	1.134 rad	3.05 rad	3.23 rad	5.149 rad
$\alpha = \text{Ang}(I_0) - \text{Ang}(I_2)$					

TABLA 3. RANGO ÁNGULOS SELECTOR DE FALTA CON DESVIACIÓN A TIERRA

Ejemplo para BCN:

Como es una bifásica a tierra se agrega un sistema desequilibrado con componente homopolar.

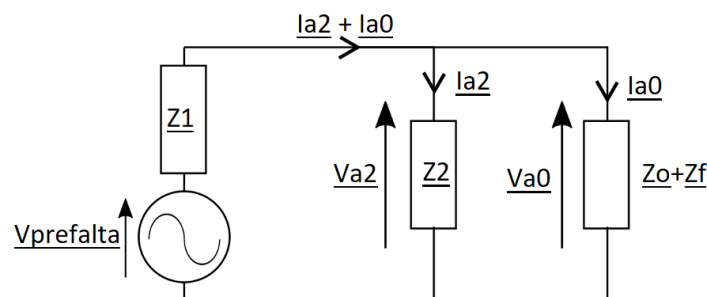


FIGURA 37. FALTA BCN

$$Z_0 = Z_2 \quad I_{a_0} = I_{a_2} \quad \text{Ang}(I_{a_0}) - \text{Ang}(I_{a_2}) \approx 0$$

Como en la línea:  $Z_0 \approx Z_2$  tenemos que  $I_{a_0} \approx I_{a_2}$  y por lo tanto  $Ang(I_{a_0}) - Ang(I_{a_2}) \approx 0$ . En el caso ideal de que este supuesto se cumpliera a la perfección alfa valdría 0. Sin embargo,  $Z_0$  y  $Z_2$  no son exactamente iguales y además el valor de  $Z_f$  que depende de esa falta en concreto (aleatorio). A más  $R_f$  más error cometeremos en la aproximación y más lejos estará del valor de alfa para esa falta y  $Z_f=0$ .

Después, con alfa dentro de un rango, se estudiará que fases tienen sobrecorriente para diferenciar entre la monofásica o la bifásica a tierra.

## 2-No existe $I_0$ en la falta?

$$\alpha = Ang(I_2) - Ang(I_1)$$

Esto implica que no hay desviación a tierra. Se estudiará el ángulo  $\alpha = Ang(I_2) - Ang(\Delta I_1)$ . Siendo  $\Delta I_1 = I_{1_{falta}} - I_{1_{prefalta}}$ . El problema está en que mientras que no existía  $I_2$  antes de la falta sí que teníamos  $I_1$ . Sin embargo, el circuito en el que nos basamos considera que no existía estado prefalta (las dos secuencias parten de "cero"). Por eso aplicamos esta corrección para cometer menos error.

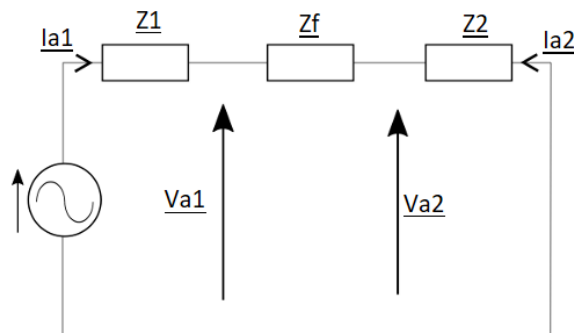


FIGURA 38. FALTA AN

Como:  $I_{a_1} = -I_{a_2}$  el ángulo será:  $\alpha = Ang(I_2) - Ang(\Delta I_1)$  y estará comprendido entre 0 y 120°. Además, al ser las líneas eléctricas suelen tener impedancias inductivas:

$$Z_1 + Z_2 + Z_f = Z_{total}, \quad Ang(Z_{total}) = \beta$$

Tendremos que  $\beta > 0$  ya que  $Z_1 = j\omega L$  y por lo tanto,  $Ang(Z_1) < 90^\circ$  (ya que tiene componente resistiva):

$$\underline{I_{a_1}} = \frac{V_{falta}}{\underline{Z_{total}}} = I_{a_1} \angle -\beta$$



Para  $\underline{Ia_2}$  tendremos el mismo módulo y dirección, pero sentido inverso ya que se mide en sentido contrario a  $\underline{Ia_1}$ .

$$\underline{Ia_2} = -\frac{V_{falta}}{Z_{total}} = Ia_1 \angle \beta$$

Por lo tanto, el ángulo será:

$$\alpha = \beta - (-\beta) = 2\beta$$

En líneas eléctricas, generalmente,  $\beta \in (0,60)$  por lo que podemos suponer que  $\alpha \in (0,120)$ . El mismo desarrollo se puede hacer para el resto de las faltas.

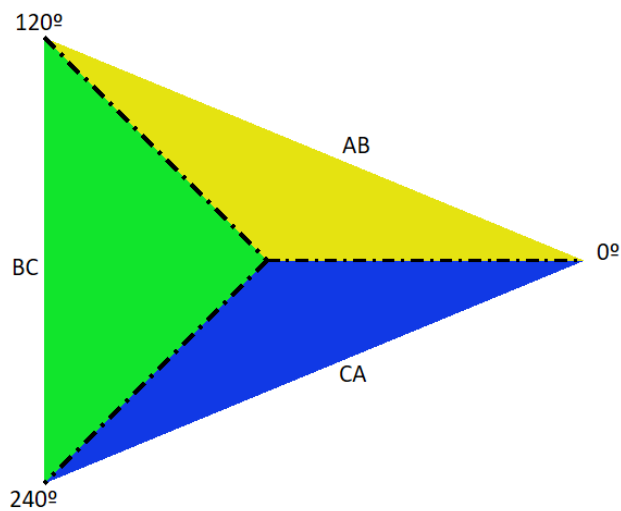


FIGURA 39. RELACIÓN ENTRE  $\alpha$  Y LAS DISTINTAS FALTAS SIN NEUTRO

Esto se traducen en que  $\alpha$  pertenecerá a los siguientes rangos para cada falta:

AB		BC		CA	
<	>	<	>	<	>
0°	120°	120°	240°	240°	0°
0	2.094 rad	2.094 rad	4.189 rad	4.189 rad	0 rad
$\alpha = \text{Ang}(I_2) - \text{Ang}(I_1)$					

TABLA 4. RANGO ÁNGULOS SELECTOR DE FALTA SIN DESVIACIÓN A TIERRA

#### 2.5.8.1 Implementación en Matlab

Los inputs de la función serán los módulos de las corrientes de fase y los ángulos y módulos de las corrientes de secuencia. Además, se añade como parámetro la corriente  $I_n$  (que será la nominal).

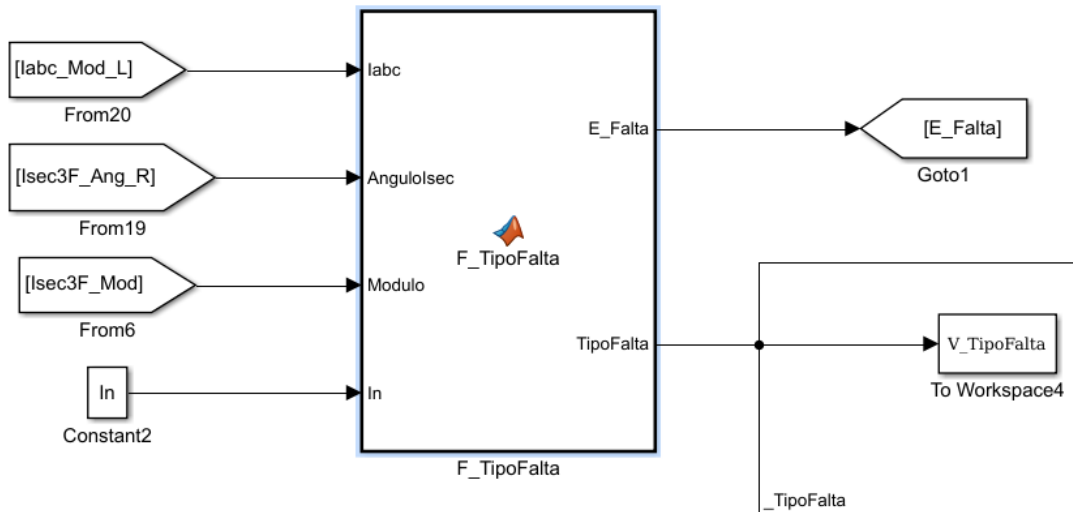


FIGURA 40. BLOQUE SELECTOR DE FASE

Como ya se ha explicado antes, los datos del modelo se pasan a una función de Matlab programada con texto, todos los distintos casos que se han explicado estarán codificados con sentencias *if* que comparan los ángulos y módulos según sea el caso. El primer paso será referir los ángulos a radianes, para eso, se comprueba si son positivos o negativos, de ser positivos, se aplica directamente el factor de conversión, de ser negativos, se calcula el complementario positivo y, entonces, se aplica el factor de conversión.

Las condiciones de existencia de falta en el primer *if*:

```
if Iabc(1)>1.5*In || Iabc(2)>1.5*In || Iabc(3)>1.5*In
%Existe Falta?
    E_Falta=1
```

Se comprueba que si la falta es trifásica (esto es, corriente superior a 1.5 veces la nominal):

```
if Iabc(1)>1.5*In && Iabc(2)>1.5*In && Iabc(3)>1.5*In
%Trifásica?
    TipoFalta=[zeros(1,9) 1]
```

Se comprueba si hay desviación a tierra (esto es, corriente lo superior a 0.1 veces la nominal):

```
if ModuloIsec(3)>0.1*ModuloIsec(1)%Con desviación a
tierra
```

Si es así, se comprueba a que rango pertenece alfa, en función del cual estaremos ante una falta u otra. A continuación, comprobamos si la monofásica correspondiente

a ese rango tiene sobrecorriente o no. De no ser así, será falta bifásica. Como ejemplo, se incluye aquí el código para AN/BCN:

```
Alfa= AnguloIsec(3)- AnguloIsec(2);

if Alfa<0.96 || Alfa>5.323 %AN,BCN
    if Iabc(1)>1.5*In %AN
        TipoFalta=[1 zeros(1,9)];
    else %BCN
        TipoFalta=[0 0 0 1 zeros(1,6)]
    end
end
```

Se define el TipoFalta de la siguiente manera:

```
% TipoFalta=[an bn,cn,cbn,acn,ban,bc,ac,ab,abc]
```

En el caso de no haber desviación a tierra, se calculará alfa con la segunda fórmula y se comparará con los rangos de las distintas faltas bifásicas. A modo de ejemplo se incluye aquí el código para la falta AB:

```
if Alfa>0 && Alfa<2.094 %AB
    TipoFalta=[zeros(1,6) 0 0 1 0]
end
```

Para comprender mejor la lógica del algoritmo, esta se encuentra resumida en el siguiente diagrama:

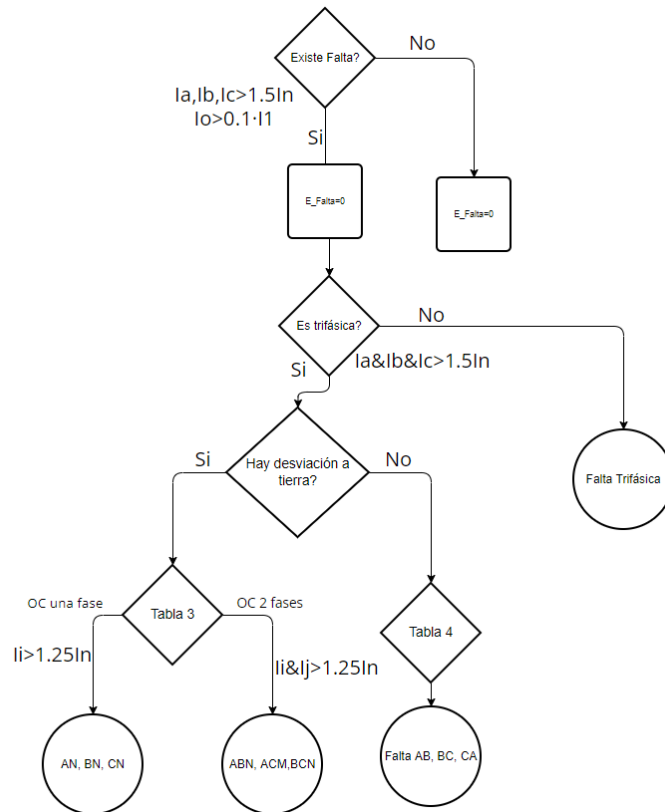


FIGURA 41. DIAGRAMA LÓGICO SELECTOR DE FASE

El código completo se puede encontrar en el anexo 2.

#### 2.5.8.2 Test selector de fase

Usamos el modelo de una línea para probar si la lógica que hemos demostrado teóricamente e implementado en Matlab es capaz de detectar cuando el sistema está en falta y las fases afectadas. Después de simular una falta en la fase A en la mitad de una línea de 20km, el resultado es el esperado:

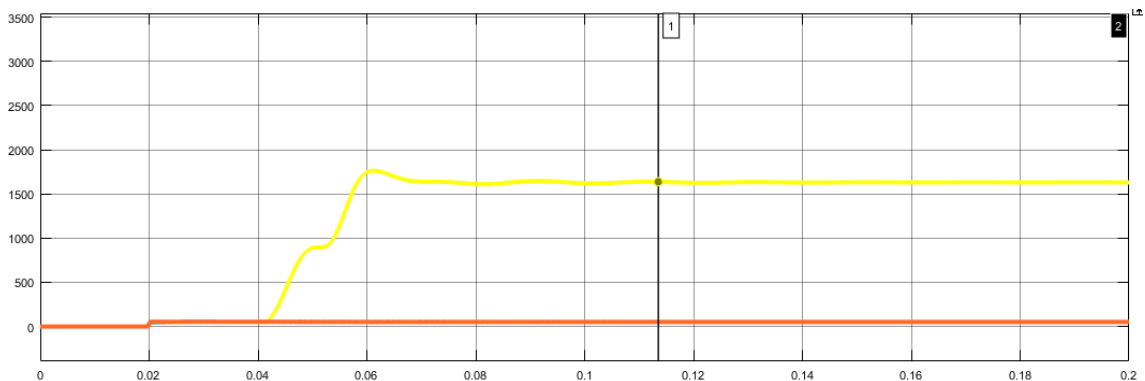
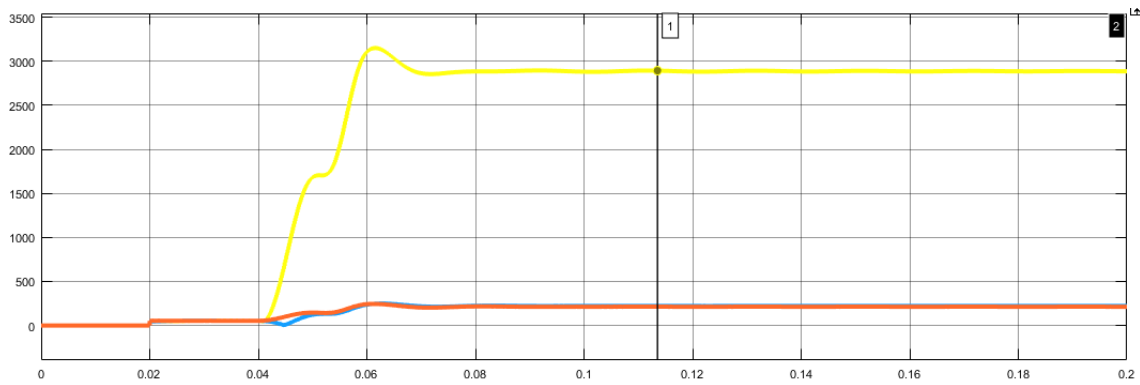


FIGURA 42. MÓDULOS DE LAS CORRIENTES CON FALTA A 10KM

Sin embargo, al situar la falta muy cerca del relé (a 1 km) la corriente es tan alta en la fase afectada que tenemos sobrecorriente en las fases sanas. Como el límite para considerar sobrecorriente estaba en  $1.5 I_n$ , el selector lo interpreta como falta trifásica. Esto será un problema en la función de distancia ya que empleará una ecuación que no es correcta.



**FIGURA 43. MÓDULOS DE LAS CORRIENTES CON FALTA A 1KM**

Para solucionarlo, se va a modificar el rango para considerar sobrecorriente como un 0.5 de la fase máxima una vez se haya superado el umbral de  $1.5I_n$ . El código suplementario es el siguiente:

```
%Rangos sobre tension
Kmin=1.5;
Imax=0;
%Calculo rango de Ioc en función de la corriente máxima
Imax=max(Iabc);
if 0.75*Imax>Kmin*In
    Ioc=0.5*Imax;
else
    Ioc=Kmin*In;
end
```

Este código genera un valor  $I_{oc}$  (*overcurrent*) que es el que se emplea para determinar que fases están en sobretensión. Sustituye al factor  $K_{oc}$  usado previamente. Por ejemplo, el código para detectar la falta y la falta trifásica:

```
if Iabc(1)>Ioc || Iabc(2)>Ioc || Iabc(3)>Ioc %Existe Falta?
    E_Falta=1;

    if Iabc(1)>Ioc && Iabc(2)>Ioc && Iabc(3)>Ioc %Trifásica?
        TipoFalta=[zeros(1,9) 1];
```

En el código final, también se ha usado la función *Norm()* para normalizar los ángulos antes de realizar las operaciones. Su uso se explica más adelante. Por ejemplo, el ángulo  $\alpha$  se calcula ahora como:

```
Alfa=Norm(Norm(AnguloIsec(3))-Norm(AnguloIsec(2)));
```

Gracias a esto, también pueda identificar correctamente faltas situadas aguas arriba del relé (muy importante para implementar la protección de zona 3).

El código completo se puede encontrar en el anexo 2.

## 2.5.9 Protección de distancia

Esta protección permite detectar a que distancia de un punto determinado se ha producido una falta. En función de esa distancia, se pueden aplicar unos retardos u otros al disparo. Actualmente se emplea como protección de respaldo, siendo la primaria la diferencial. En la figura 44 se puede observar el diagrama X-R de la función. Mientras que la impedancia de falta caiga dentro del área limitada por el polígono estaremos dentro de la zona cubierta por la distancia y, por lo tanto, dispararemos. Si se sale fuera, quiere decir que la falta esta demasiado lejos y por lo tanto le corresponde a otra protección despejarla. De esta forma controlamos la selectividad de la protección.

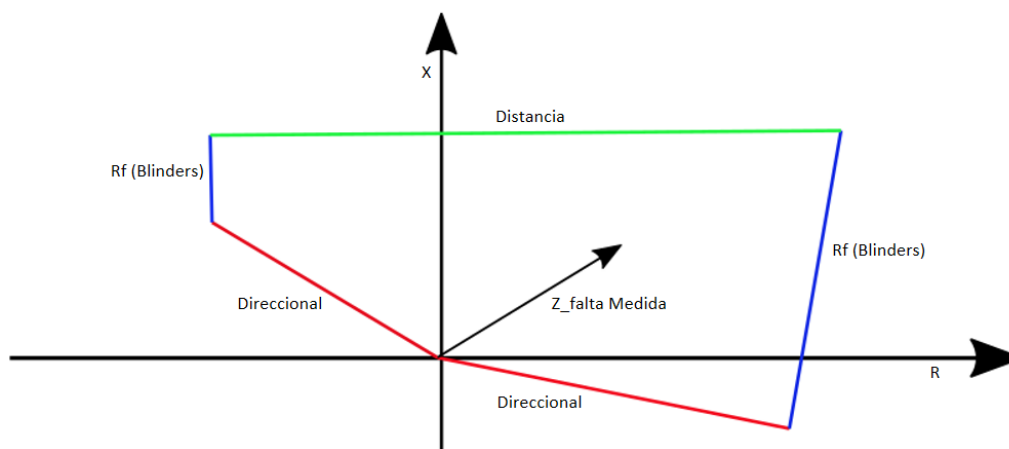


FIGURA 44. DIAGRAMA X-R GENÉRICO PARA FUNCIÓN DE DISTANCIA

En este punto explicaremos como se calcula esa impedancia para cada falta, un proceso más complejo que una simple división de corriente por intensidad [5]. Además, se explicará cómo se definen las líneas que limitan el alcance de la protección, dibujadas en distintos colores en la figura 44.

### 2.5.9.1 Impedancia de falta y ajustes

#### 2.5.9.1.1 Ecuaciones de distancia

**Falta Monofásica:** partimos de la red de secuencia de la fase A. En el estudio se despreciará la resistencia de falta. El objetivo será calcular la distancia a la que ha ocurrido la falta, esto es el parámetro  $\rho$ .

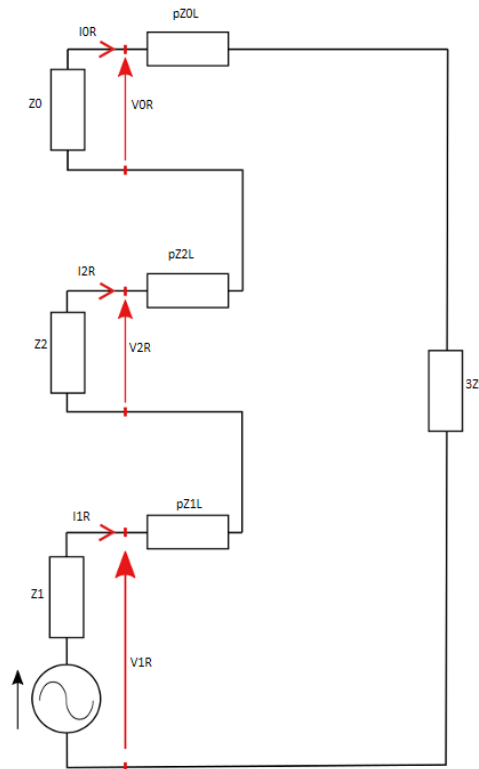


FIGURA 45. REDES DE SECUENCIA PARA FALTA MONOFÁSICA

Nótese en el esquema que tenemos por un lado las tensiones de las redes de secuencia mirando a la red ( $\underline{V}_{1R}$ ,  $\underline{V}_{2R}$  y  $\underline{V}_{0R}$ ) y las corrientes de línea de las redes de secuencia ( $\underline{I}_{1L}$ ,  $\underline{I}_{2L}$  y  $\underline{I}_{0L}$ ). Estos valores son las medidas que toma el relé. Por otro lado, tenemos las impedancias por unidad de longitud de la línea ( $\underline{Z}_{1L}$ ,  $\underline{Z}_{2L}$  y  $\underline{Z}_{0L}$ ) que multiplicadas por la longitud ( $\rho$ , en este caso en p.u.) dan la impedancia del lado de la línea hasta la falta. El objetivo será despejar esa  $\rho$  para determinar la posición de la falta. Del esquema tenemos que:

$$0 = \underline{V}_{1R} - \underline{I}_{1L}\rho\underline{Z}_{1L} + \underline{V}_{2R} - \underline{I}_{2L}\rho\underline{Z}_{2L} + \underline{V}_{0R} - \underline{I}_{0L}\rho\underline{Z}_{0L}$$

$$\underline{V}_{1R} + \underline{V}_{2R} + \underline{V}_{0R} = \underline{I}_{1L}\rho\underline{Z}_{1L} + \underline{I}_{2L}\rho\underline{Z}_{2L} + \underline{I}_{0L}\rho\underline{Z}_{0L}$$

Por otro lado, aplicando componentes simétricas, tenemos que:

$$\begin{pmatrix} \underline{V}_{aR} \\ \underline{V}_{bR} \\ \underline{V}_{cR} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{V}_{0R} \\ \underline{V}_{1R} \\ \underline{V}_{2R} \end{pmatrix}$$

Así, la tensión de fase vista por la red será:

$$\underline{V}_{aR} = \underline{V}_{1R} + \underline{V}_{2R} + \underline{V}_{0R}$$

Igualando con la primera ecuación tenemos que:

$$\underline{V}_{aR} = \underline{I}_{1L}\rho\underline{Z}_{1L} + \underline{I}_{2L}\rho\underline{Z}_{2L} + \underline{I}_{0L}\rho\underline{Z}_{0L}$$

$$\underline{V}_{aR} = \rho \left[ \underline{I}_{1L} \underline{Z}_{1L} + \underline{I}_{2L} \underline{Z}_{2L} + \underline{I}_{0L} \underline{Z}_{0L} \right]$$

Como  $\underline{Z}_{1L} = \underline{Z}_{2L}$

$$\underline{V}_{aR} = \rho \left[ (\underline{I}_{1L} + \underline{I}_{2L}) \underline{Z}_{1L} + \underline{I}_{0L} \underline{Z}_{0L} \right]$$

Por otro lado, de las redes de secuencia para corrientes tenemos que:

$$\begin{pmatrix} \underline{I}_{aR} \\ \underline{I}_{bR} \\ \underline{I}_{cR} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{I}_{0R} \\ \underline{I}_{1R} \\ \underline{I}_{2R} \end{pmatrix}$$

$$\underline{I}_{aR} = \underline{I}_{1L} + \underline{I}_{2L} + \underline{I}_{0L}$$

Además, si sumamos y restamos  $\underline{I}_{0L}$  el valor entra paréntesis permanecerá invariable:

$$(\underline{I}_{1L} + \underline{I}_{2L}) = (\underline{I}_{1L} + \underline{I}_{2L}) + \underline{I}_{0L} - \underline{I}_{0L} = \underline{I}_{aR} - \underline{I}_{0L}$$

Llevando este resultado a la ecuación de  $\underline{V}_{aR}$  tenemos:

$$\underline{V}_{aR} = \rho \left[ (\underline{I}_{aR} - \underline{I}_{0L}) \underline{Z}_{1L} + \underline{I}_{0L} \underline{Z}_{0L} \right]$$

Además, la corriente de secuencia homopolar es:

$$\underline{I}_N = 3\underline{I}_{0L} = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c$$

Recordamos aquí que ya que la red está en serie con el circuito de la falta:  $\underline{I}_i = \underline{I}_{aR} = \underline{I}_{aL}$ .

Llevando el valor de  $\underline{I}_N$  a la ec de  $\underline{V}_{aR}$ : y multiplicando por :

$$\underline{V}_{aR} = \rho \frac{\underline{Z}_{1L}}{\underline{Z}_{1L}} \left[ \left( \underline{I}_{aR} - \frac{\underline{I}_N}{3} \right) \underline{Z}_{1L} + \frac{\underline{I}_N}{3} \underline{Z}_{0L} \right]$$

Reordenando:

$$\underline{V}_{aR} = \rho \left[ \underline{I}_{aR} + \frac{\underline{Z}_{0L} - \underline{Z}_{1L}}{3\underline{Z}_{1L}} \underline{I}_N \right]$$

Al factor de  $\underline{I}_N$  lo denominamos:  $K_N$ . Este es un factor constante función de los parámetros de la línea.

$$K_N = \frac{\underline{Z}_{0L} - \underline{Z}_{1L}}{3\underline{Z}_{1L}}$$



Despejando de la ecuación tenemos:

$$\rho = \frac{V_{aR}}{Z_{1L}(\underline{I}_{aR} + K_N \underline{I}_N)}$$

Haciendo el mismo desarrollo para las otras fases tenemos el valor de la distancia para falta monofásica en cada una de las fases:

$$\rho_a = \frac{V_{aR}}{Z_{1L}(\underline{I}_{aR} + K_N \underline{I}_N)}$$

$$\rho_b = \frac{V_{bR}}{Z_{1L}(\underline{I}_{bR} + K_N \underline{I}_N)}$$

$$\rho_c = \frac{V_{cR}}{Z_{1L}(\underline{I}_{cR} + K_N \underline{I}_N)}$$

Notese que en cada caso la corriente y la tensión es la de fase. De esta forma no es necesario referir las corrientes a las redes de secuencia para cada fase.

Falta monofásica con resistencia de falta no nula: si ahora consideramos la resistencia de falta como no nula, tendremos el problema de que, si es una falta doblemente alimentada, la caída de tensión en la resistencia de falta vendrá definida por la suma de las corrientes desde ambos lados de la falta. Tenemos la dificultad aquí de que no sabemos ni la corriente desde el otro lado ni la resistencia de falta a tierra.

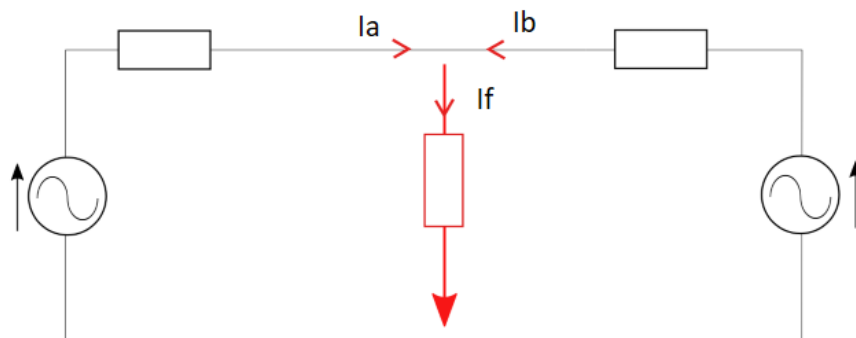


FIGURA 46. FALTA MONOFÁSICA DE RESISTENCIA NO NULA DOBLEMENTE ALIMENTADA

Así, las caídas de tensión en las fases serán:

$$V_{aR} = Z_{1L}(\underline{I}_{aR} + K_N \underline{I}_N) \rho_a + \underline{I}_F R_f$$

$$V_{bR} = Z_{1L}(\underline{I}_{bR} + K_N \underline{I}_N) \rho_b + \underline{I}_F R_f$$

$$V_{cR} = Z_{1L}(\underline{I}_{cR} + K_N \underline{I}_N) \rho_c + \underline{I}_F R_f$$

Multiplicamos ahora a ambos lados por el conjugado de la corriente de falta  $\underline{I}_F^*$ :

$$\underline{V}_{aR} \underline{I}_F^* = \underline{Z}_{1L} (\underline{I}_{aR} + K_N \underline{I}_N) \rho_a \underline{I}_F^* + \underline{I}_F R_f \underline{I}_F^*$$

$$\underline{V}_{aR} \underline{I}_F^* = \underline{Z}_{1L} (\underline{I}_{aR} + K_N \underline{I}_N) \rho_a \underline{I}_F^* + R_f \underline{I}_F^2$$

Notese que, al ser una ec de numeros complejos, no tenemos una si no 2 ecuaciones lineales, debiendo ser iguales las componentes imaginarias por un lado y las reales por otro. En el plano imaginario:

$$\text{Im}(\underline{V}_{aR} \underline{I}_F^*) = \text{Im}(\underline{Z}_{1L} (\underline{I}_{aR} + K_N \underline{I}_N) \rho_a \underline{I}_F^*) = \rho_a \text{Im}(\underline{Z}_{1L} (\underline{I}_{aR} + K_N \underline{I}_N) \underline{I}_F^*)$$

$$\rho_a = \frac{\text{Im}(\underline{V}_{aR} \underline{I}_F^*)}{\text{Im}(\underline{Z}_{1L} (\underline{I}_{aR} + K_N \underline{I}_N) \underline{I}_F^*)}$$

Asi, gracias a la multiplicacion por el conjugado hemos conseguido sacar  $R_f$  (desconocida) de la ecuacion ya que  $R_f \underline{I}_F^2$  pertenece al plano real. Ahora, seguimos teniendo dentro de la ecuacion, pero nos valdría con conocer el ángulo (ya que el modulo  $\underline{I}_F$  esta multiplicando arriba y abajo de la ecuacion). La mejor aproximación es considerar que el ángulo de es el de alguna de las magnitudes conocidas, tenemos 3 opciones:

- Intensidad de fase
- Intensidad de secuencia homopolar
- Intensidad de secuencia inversa

Actualmente se emplean estas 2 ultimas ya que no se ven afectadas por el estado prefalta. Sustituyendo en la ecuación y para las 3 fases:

$$\rho_a = \frac{\text{Im}(\underline{V}_{aR} \underline{I}_{0R}^* |_a)}{\text{Im}(\underline{Z}_{1L} (\underline{I}_{aR} + K_N \underline{I}_N) \underline{I}_{0R}^* |_a)}$$

$$\rho_b = \frac{\text{Im}(\underline{V}_{bR} \underline{I}_{0R}^* |_b)}{\text{Im}(\underline{Z}_{1L} (\underline{I}_{bR} + K_N \underline{I}_N) \underline{I}_{0R}^* |_b)}$$

$$\rho_c = \frac{\text{Im}(\underline{V}_{cR} \underline{I}_{0R}^* |_c)}{\text{Im}(\underline{Z}_{1L} (\underline{I}_{cR} + K_N \underline{I}_N) \underline{I}_{0R}^* |_c)}$$

Notese que en cada caso estamos empleando la secuencia homopolar referida a la fase correspondiente. Pero la ser igual a la suma de las corrientes de fase, realmente no importa a que fase este referido.

Falta bifásica sin derivación a tierra: al igual que en el casi anterior partimos del esquema de las redes de secuencia.

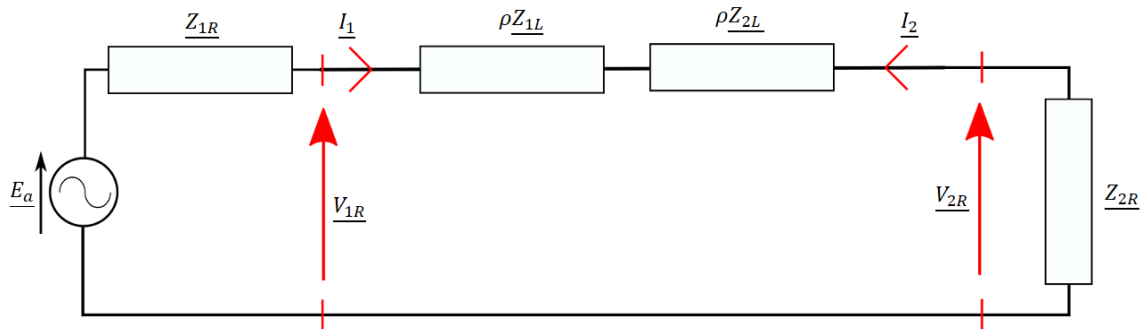


FIGURA 47. REDES DE SECUENCIA FALTA BIFÁSICA SIN DERIVACIÓN A TIERRA

Del circuito tenemos que:

$$0 = \underline{V}_{1R} - \underline{I}_1 \rho \underline{Z}_{1L} - \underline{V}_{2R} + \underline{I}_2 \rho \underline{Z}_{2L}$$

$$\underline{V}_{1R} - \underline{V}_{2R} = \underline{I}_1 \rho \underline{Z}_{1L} - \underline{I}_2 \rho \underline{Z}_{2L}$$

Como se cumple que  $\underline{I}_1 = -\underline{I}_2$  y  $\underline{Z}_{1L} = \underline{Z}_{2L}$ :

$$\underline{V}_{1R} - \underline{V}_{2R} = 2\underline{I}_1 \rho \underline{Z}_{1L}$$

Por otro lado:

$$\underline{V}_{bcR} = \underline{V}_{bR} - \underline{V}_{cR} = (a^2 \underline{V}_{1R} + a \underline{V}_{2R} + \underline{V}_{0R}) + (a \underline{V}_{1R} + a^2 \underline{V}_{2R} + \underline{V}_{0R}) = (a^2 - a)(\underline{V}_{1R} - \underline{V}_{2R})$$

Sustituyendo en la ecuación anterior:

$$\underline{V}_{bcR} = (a^2 - a)2\underline{I}_1 \rho \underline{Z}_{1L}$$

Por otro lado, podemos realizar el mismo ejercicio con las corrientes:

$$\underline{I}_{bcR} = \underline{I}_{bR} - \underline{I}_{cR} = (a^2 \underline{I}_{1R} + a \underline{I}_{2R} + \underline{I}_{0R}) - (a \underline{I}_{1R} + a^2 \underline{I}_{2R} + \underline{I}_{0R}) = (a^2 - a)2\underline{I}_{1R}$$

Y sustituyendo en la ecuación de la distancia:

$$\frac{\underline{V}_{bcR}}{\underline{I}_{bcR}} = \frac{2(a^2 - a)\rho \underline{Z}_{1L} \underline{I}_1}{2(a^2 - a)\underline{I}_1} = \rho \underline{Z}_{1L}$$

Despejando la longitud tenemos una expresión para calcular la distancia en faltas bifásicas. Una vez más, solo entran en juego tensiones y corrientes de fase, no hay que referir las redes de secuencia a la fase correspondiente.

$$\rho_{bc} = \frac{1}{\underline{Z}_{1L}} \frac{\underline{V}_{bcR}}{\underline{I}_{bcR}}$$

$$\rho_{ab} = \frac{1}{\underline{Z}_{1L}} \frac{\underline{V}_{abR}}{\underline{I}_{abR}}$$

$$\rho_{ca} = \frac{1}{\underline{Z}_{1L}} \frac{\underline{V}_{caR}}{\underline{I}_{caR}}$$

Falta trifásica: volvemos a partir del esquema de las redes de secuencia.

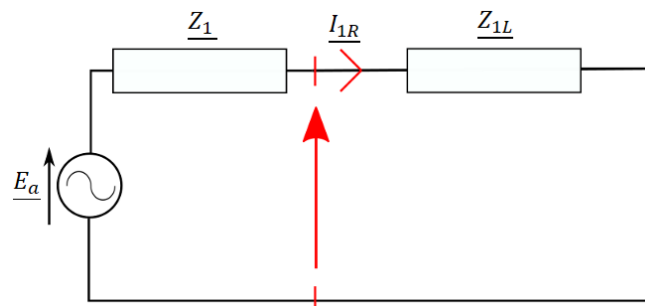


FIGURA 48. REDES DE SECUENCIA FALTA TRIFÁSICA

Del esquema tenemos que:

$$\underline{V}_{1R} = \underline{I}_{1R} \rho \underline{Z}_{1L}$$

Por otro lado, tenemos que:

$$\underline{V}_{bcR} = \underline{V}_{bR} - \underline{V}_{cR} = (a^2 \underline{V}_{1R} + a \underline{V}_{2R} + \underline{V}_{0R}) + (a \underline{V}_{1R} + a^2 \underline{V}_{2R} + \underline{V}_{0R})$$

$$\underline{I}_{bcR} = \underline{I}_{bR} - \underline{I}_{cR} = (a^2 \underline{I}_{1R} + a \underline{I}_{2R} + \underline{I}_{0R}) - (a \underline{I}_{1R} + a^2 \underline{I}_{2R} + \underline{I}_{0R})$$

Pero en este caso, solo tenemos secuencia directa, esto es:

$$\underline{I}_{2R} = \underline{I}_{0R} = 0$$

$$\underline{V_{0R}} = \underline{V_{1R}} = 0$$

Por lo que queda:

$$\underline{V_{bcR}} = a^2 \underline{V_{1R}} - a \underline{V_{1R}}$$

$$\underline{I_{bcR}} = a^2 \underline{I_{1R}} - a \underline{I_{1R}}$$

Sustituyendo en la ecuación del circuito:

$$\rho \underline{Z_{1L}} = \frac{\underline{V_{bcR}}}{\underline{I_{bcR}}}$$

Y despejando tenemos la distancia de la falta trifásica:

$$\rho_{abc} = \frac{\underline{V_{bcR}}}{\underline{I_{bcR}}} = \frac{\underline{V_{abR}}}{\underline{I_{abR}}} = \frac{\underline{V_{caR}}}{\underline{I_{caR}}}$$

**Faltas bifásicas a tierra y faltas monofásicas con resistencia no nula:** No se puede calcular exactamente la distancia a la que se producen esas faltas ya que la resistencia de falta será siempre una incógnita. Por eso, se supondrá que todas las faltas monofásicas y bifásicas son de resistencia no nula. Un problema de esta asunción es que, ya que lo que empleamos para disparar la función es el módulo de la impedancia de falta, faltas infinitamente lejanas (R alta y X baja) podrían disparar la función, por eso añadimos los Blinders (se describirán más adelante).

#### 2.5.9.1.2 Cálculo de impedancia de falta

El cálculo de la relación V-I se implementará en Simulink mediante la función EcDistancia. Los argumentos de la función serán las tensiones, las corrientes simples y las corrientes de secuencia en formato complejo, además del vector TipodeFalta. Recordamos que es un array de 9 elementos generado por el módulo F\_TipoFalta descrito anteriormente. La función en si será un bloque de Simulink con una función en pseudocódigo Matlab en su interior. Así le pasamos los argumentos generados por el modelo. El resultado (distancia a la que está la falta) se parará después a la unidad de lógica de disparo, aunque también se envía al Workspace para almacenarla:

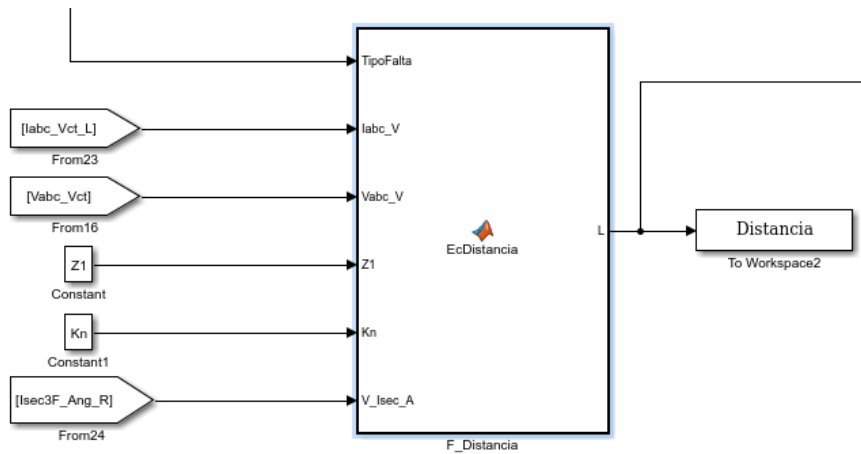


FIGURA 49. BLOQUE MATLAB FUNCIÓN DISTANCIA

El siguiente paso será la codificación de las ecuaciones. En general, primero se comprobará que la posición correspondiente a cada falta está a 1, si es así ejecuta la ecuación correspondiente y asigna a L (la distancia y resultado de la función) el valor correspondiente. En el desarrollo teórico se ha calculado la distancia  $\rho_i$  como un cociente de números complejos. Para dar un valor de distancia fácil de entender se dará su módulo. También se dará el valor en formato complejo. El valor de distancia se empleará para los ajustes de distancia en el módulo de lógica de disparo mientras que el valor complejo se empleará en el bloque de Blinders que bloquearán el disparo ante faltas infinitamente lejanas.

$$\rho_a = \frac{V_{aR}}{Z_{1L}(I_{aR} + K_N I_N)} \longrightarrow$$

```

%AN
if TipoFalta(1)==1
    p=Vabc_V(1)/(Z1*(Iabc_V(1)+Kn*Isec_A(1)));
    L=abs(p);
end
%BN
if TipoFalta(2)==1
    p=Vabc_V(2)/(Z1*(Iabc_V(2)+Kn*Isec_A(1)));
    L=abs(p);
end
%CN
if TipoFalta(3)==1
    p=Vabc_V(3)/(Z1*(Iabc_V(3)+Kn*Isec_A(1)));
    L=abs(p);
end

```

Para calcular las faltas bifásicas, hay que calcular primero tensiones y corrientes fase-fase:

```

%Corrientes compuestas
Iab=Iabc_V(1)-Iabc_V(2);
Ibc=Iabc_V(2)-Iabc_V(3);
Ica=Iabc_V(3)-Iabc_V(1);

%Tensiones compuestas
Vab=Vabc_V(1)-Vabc_V(2);
Vbc=Vabc_V(2)-Vabc_V(3);
Vca=Vabc_V(3)-Vabc_V(1);

```

Y ahora sí, aplicamos las ecuaciones correspondientes:

$$\rho_{bc} = \frac{1}{Z_{1L}} \frac{V_{bcR}}{I_{bcR}} \rightarrow \begin{array}{l} \%AB \\ \text{if TipoFalta(7)==1} \\ \quad p=Vab/(Z1*Iab); \\ \quad L=abs(p); \\ \text{end} \end{array}$$

$$\rho_{ab} = \frac{1}{Z_{1L}} \frac{V_{abR}}{I_{abR}} \rightarrow \begin{array}{l} \%BC \\ \text{if TipoFalta(8)==1} \\ \quad p=Vbc/(Z1*Ibc); \\ \quad L=abs(p); \\ \text{end} \end{array}$$

$$\rho_{ca} = \frac{1}{Z_{1L}} \frac{V_{caR}}{I_{caR}} \rightarrow \begin{array}{l} \%CA \\ \text{if TipoFalta(9)==1} \\ \quad p=Vca/(Z1*Ica); \\ \quad L=abs(p); \\ \text{end} \end{array}$$

Y por último la falta trifásica:

$$\rho_{abc} = \frac{V_{bcR}}{I_{bcR}} \rightarrow \begin{array}{l} \%ABC \\ \text{if TipoFalta(10)==1} \\ \quad p=Vbc/Ibc; \\ \quad L=abs(p); \\ \text{end} \end{array}$$

Una ventaja de este sistema es que solo que calcula la distancia para la falta que de verdad está ocurriendo por lo que no se pierde tiempo de ejecución por el camino.

#### 2.5.9.1.3 Test cálculo de distancia

Al realizar las pruebas, se ha comprobado que el cálculo de la distancia se ve afectado por la saturación de los transformadores. En el gráfico siguiente se pueden ver los resultados de una falta entre 0.4 y 0.5s. El problema radica en que mientras que los transformadores de corriente se saturan los de tensión no ya que estamos a tensiones cercanas a la nominal. Para solucionarlo, se ha empleado el bloqueo de 5º Armónico. Su funcionamiento se explicará más adelante en el apartado de la protección diferencia. En resumen, detecta cuando los CTs están en un transitorio y manda una señal binaria que se emplea para bloquear las funciones de protección. Se implementa usando el bloque Trip\_Logic, que es donde se centralizarán los disparos de las diferentes funciones para decidir cuándo se da la orden de apertura al interruptor.

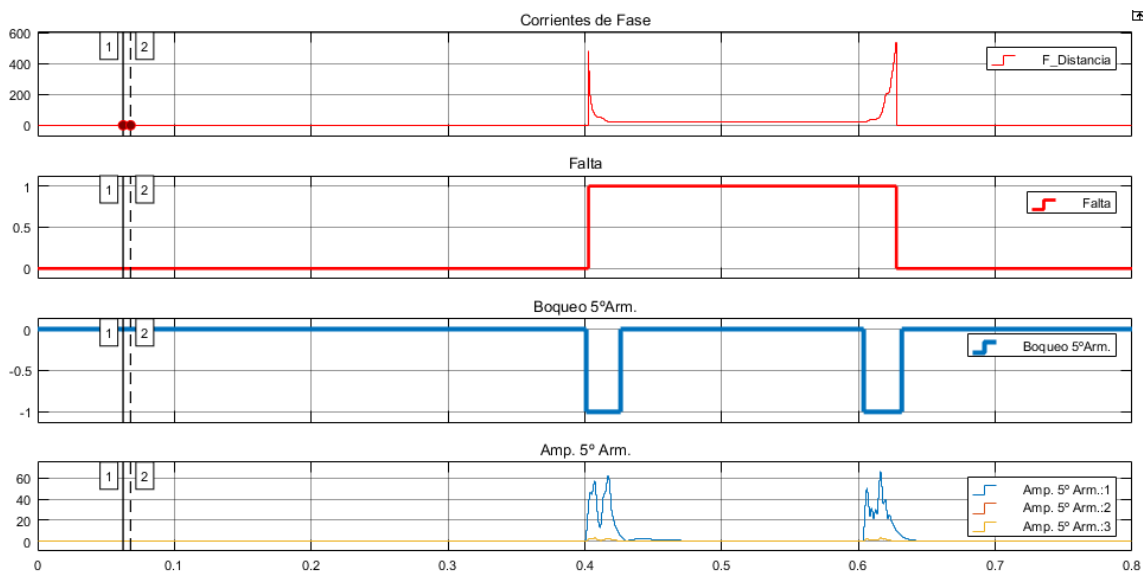


FIGURA 50. EFECTOS DE LA SATURACIÓN EN EL CÁLCULO DE LA DISTANCIA

#### 2.5.9.1.4 Weak infeed (Alimentación débil)

Este sistema se emplea para poder despejar rápidamente las faltas situadas en las cercanías de la barra del extremo de la línea próximo a la subestación. Consiste en la coordinación de los dos extremos mediante comunicaciones. El extremo débil es el lado de la granja eólica en de nuestra subestación ya que las faltas se alimentarán desde el lado de la red (el extremo remoto).

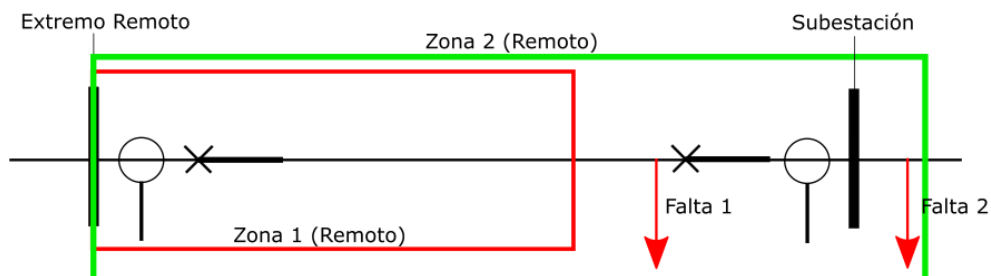


FIGURA 51. REPRESENTACIÓN ZONAS WEAK INFEEED SOBRE LA LÍNEA

Para la falta 1 (dentro de la línea) tendremos que disparar inmediatamente, pero para falta 2 debemos retrasar el disparo para dar tiempo a que las protecciones aguas abajo despejen la falta y la línea pueda seguir dando servicio.



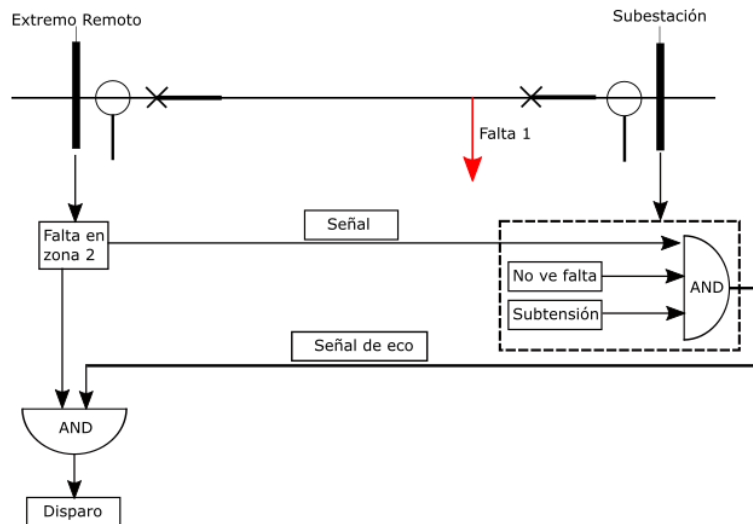


FIGURA 52. CIRCUITO LÓGICO WEAK INFEEED PARA FALTA DENTRO DE LÍNEA

Al ser zona 2 tendremos un retraso de 0.15s (20 ciclos) para disparar. Pero, con este sistema, al detectar condiciones de disparo manda una señal al relé local. Al no estar alimentada la falta desde ese lado no veremos sobrecorriente, pero si subtensión en alguna fase. Por lo tanto, devolvemos una señal de eco al primer relé para que dispare sin esperar al retardo porque tenemos la falta dentro de la línea.

Sin embargo, cuando la falta la tenemos aguas abajo de la acometida de la línea, el extremo remoto verá la falta en zona 2 y mandará la señal al relé local esperando recibir la señal de eco para disparar.

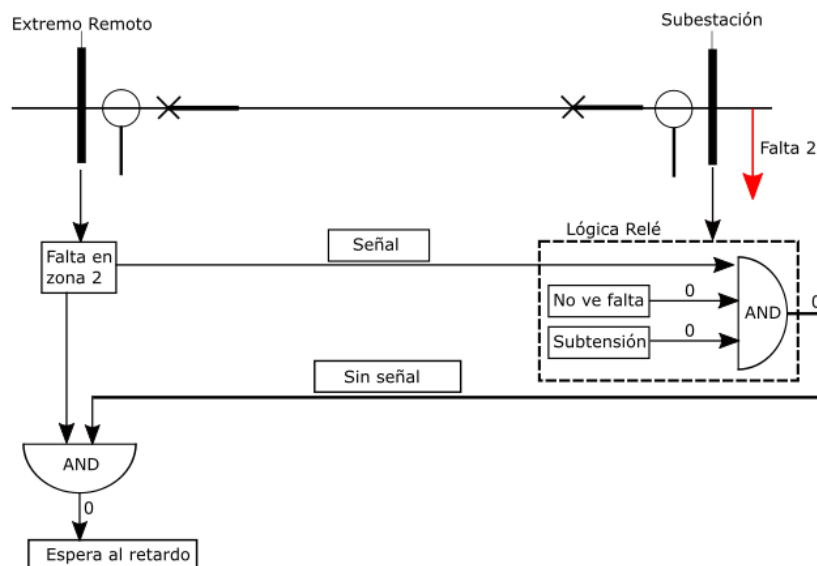


FIGURA 53. LÓGICA WEAK INFEEED EN CASO DE FALTA FUERA DE LÍNEA

### Implementación en Matlab:

A la hora de implementar la lógica en Matlab se tiene en cuenta el desfase en la señal de eco del relé local. Por un lado, está la componente debida a la fibra óptica. Si

consideramos una fibra monomodo de  $50\mu\text{m}$  y una longitud de onda de  $1550\text{nm}$  (el estandar en estos casos) tendremos un desfase de  $0.0981\text{ms}$  para los  $20\text{km}$  de longitud de la línea [6]. Para nuestro paso de simulación de  $1.389\text{ns}$  eso son 70 pasos de simulación. Como comparación, a  $50\text{Hz}$  el periodo de la corriente es de  $0.02\text{s}$ , por lo tanto estamos introduciendo un desfase aproximadamente 200 veces inferior.

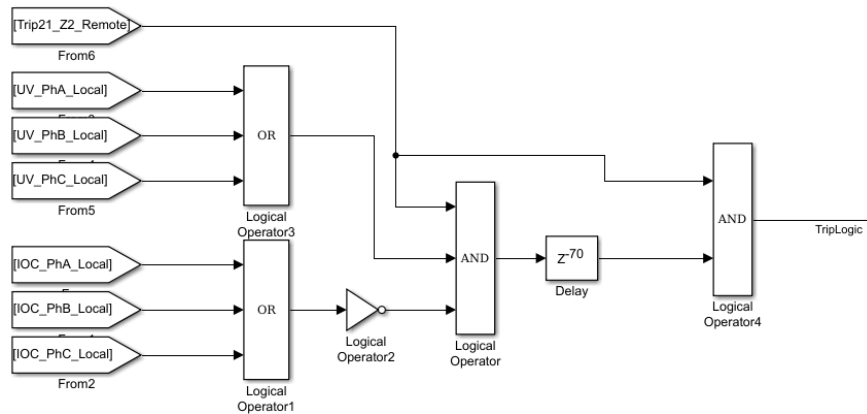


FIGURA 54. LÓGICA WEAK INFEED EN SIMULINK

La salida de esta lógica se manda a la lógica de disparo del interruptor de la línea.

#### 2.5.9.1.5 Ajuste de la protección

##### 2.5.9.1.5.1 Ajustes de impedancia

El desarrollo teórico del punto anterior se ha planteado como el proceso para calcular la distancia a la que se produce la falta a partir de las variables medidas por el relé. Sin embargo, también puede interpretarse como un factor que multiplicado por la impedancia de línea da como resultado la impedancia de falta:

$$\rho Z_{\lambda L} = Z_{Falta}$$

Y es que en la realidad el factor nunca será un coeficiente escalar si no un número complejo, porque la impedancia de falta siempre va a ser un valor desconocido y aleatorio. Queda ahora decidir cuándo se disparará. Dividimos la línea en tres zonas de protección y ajustaremos la impedancia a la que disparemos en función de la longitud de cada zona.

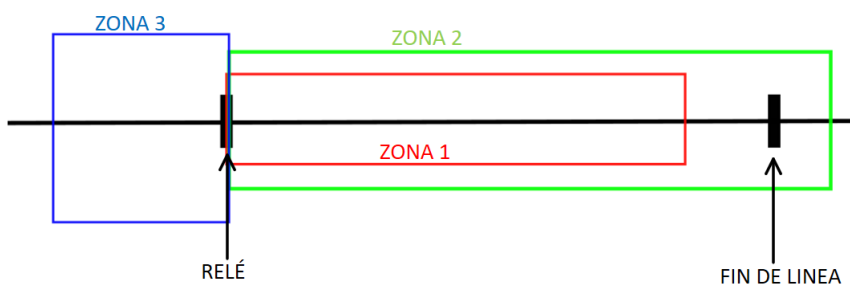


FIGURA 55. ZONAS DE PROTECCIÓN SOBRE LA LÍNEA

Zona 1: ajustada para cubrir el 85% de la línea y disparar instantáneamente.

$$Zf_{ZONA1} = 0.85 \underline{z_L} = 0.85 \cdot 8 = 6.8\Omega$$

$$t_{z_1} = 0s$$

Zona 2: ajustada para cubrir toda la línea más un 20% de la línea siguiente. Por razones de selectividad, queremos disparar solo cuando tengamos una falta en esta línea. Por otro lado, no podemos saber exactamente dónde está la falta por la incertidumbre de la resistencia de falta. Así, asumimos que cuando la distancia sea del 85% de la línea, se puede asegurar que la falta está en nuestra línea con la suficiente certidumbre para disparar. Si está a más de un 120% podemos suponer que está en la siguiente. Pero si esta entre estos 2 valores, no se puede asegurar si está en la línea protegida por la protección o en la siguiente. La solución es temporizar para dar tiempo a la protección de la siguiente línea a disparar. De esta forma, además, actúa como respaldo de la protección remota.

$$Zf_{ZONA2} = 1.2 \underline{z_L} = 1.2 \cdot 8 = 15\Omega$$

$$t_{z_2} = 0.4s$$

Zona 3: se ha ajustado esta zona para que mira aguas debajo de la línea, como respaldo de la protección remota en esa dirección. Nótese que en este caso el retraso al disparo será muy elevado (siete ciclos). Esto es debido a que, tal como está configurada la subestación, tenemos 3 líneas desde los parques eólicos que se conectan a la red por esta línea. Dispararla implica dejar los parques fuera de servicio, por eso damos suficiente margen a los elementos de protección aguas arriba para que despejen la falta, desconectando uno de los parques o uno de los transformadores redundantes, pero manteniendo parte del sistema en servicio.

$$Zf_{ZONA3 (reverse)} = 0.15 \underline{z_L} = 0.15 \cdot 8 = 1.2\Omega$$

$$t_{z_2} = 0.15s$$

#### 2.5.9.1.5.2 *Blinders*

Del inglés, “orejeras”. Su misión es evitar que dispare ante faltas infinitamente lejanas. En generación tradicional, las faltas suelen ser doblemente alimentadas (AT y MAT). Por lo tanto,  $\underline{I_f} = \underline{I_a} + \underline{I_b}$ .

$$\frac{V}{\underline{I_a}} = p\underline{Zl} + \frac{\underline{I_a} + \underline{I_b}}{\underline{I_a}} Rf = p\underline{Zl} + \left(1 + \frac{\underline{I_b}}{\underline{I_a}}\right) Rf \text{ con } \frac{\underline{I_a}}{\underline{I_b}} \cong 0$$

*al ser  $p \ll (1 - p)$  por ser B el extremo remoto*

$$\text{Con lo que: } \frac{V}{\underline{I_a}} \cong p \underline{Zl} + Rf$$

El problema es que Rf no se puede saber exactamente, por eso suponemos:

$$\frac{V}{I_a} \cong p \underline{Zl}$$

Esta falta de precisión hace que el elemento Blinder sea el menos importante ya que lo que se hace es una estimación (no muy buena) de  $R_f$ . El objetivo no es conocerla, lo que sería imposible, si no dar un valor que evite que se dispare ante faltas infinitamente lejanas.

### Ajuste de $R_f$

Tendremos un valor para cada zona de protección. La resistencia se calcula como:

$$R_{Fi} = (2.3 - 0.0045 \cdot L) \cdot |Z_i|$$

Siendo  $R_{Fi}$  la resistencia de falta máxima para la zona correspondiente,  $L$  la longitud de la línea y  $Z_i$  la impedancia protegida para dicha zona. Esto es, la impedancia total de la línea multiplicada por 0.85 para la zona 1 y por 1.2 para la zona 2.

$$R_{F1} = (2.3 - 0.0045 \cdot 19.35) \cdot 6.8\Omega = 15\Omega$$

$$R_{F2} = (2.3 - 0.0045 \cdot 19.35) \cdot 9.6\Omega = 21\Omega$$

$$R_{F3} = R_{F1} = 15\Omega$$

#### 2.5.9.1.5.3 Característica cuadrilateral:

En el siguiente gráfico se representa la característica de disparo de nuestra función de distancia. Para las zonas 1 y 2, el límite inferior estará marcado por la unidad direccional. Con el relé mirando hacia la línea que protege, consideraremos que una falta está delante si el ángulo de la impedancia de falta está entre  $120^\circ$  y  $-30^\circ$ . Para la zona 3 (que mira atrás), la direccional marcará el límite superior de la impedancia.

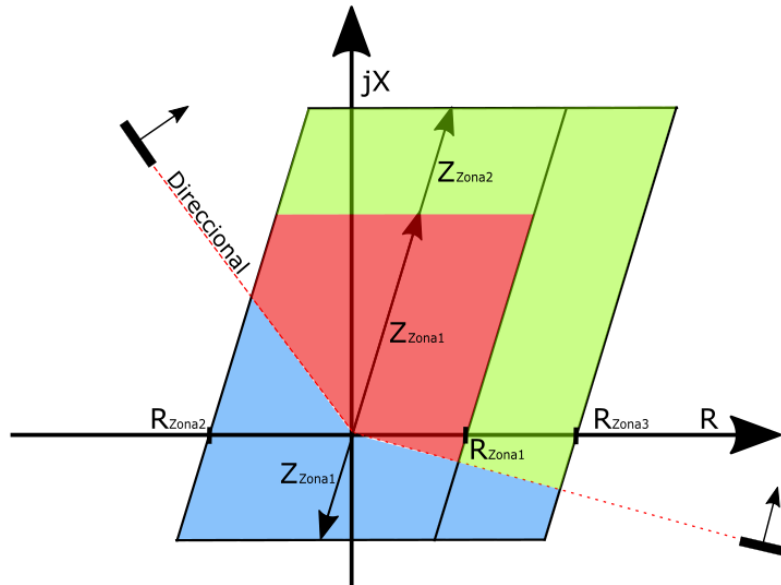


FIGURA 56. CARACTERÍSTICA CUADRILATERAL

Luego está el límite superior, consideraremos que una falta está dentro de una zona cuando su componente imaginaria (capacitancia o inductancia) es inferior a la parte imaginaria de la impedancia de la zona correspondiente. Faltan ahora los límites laterales, que estarán marcados por el alcance resistivo (los Blinders). Colocamos la resistencia calculada para cada zona en el eje R y se traza una línea vertical que pasa por R y es paralela a la impedancia de la línea. De esta forma, a medida que la componente reactiva de la falta aumenta se va ganando alcance resistivo.

En resumen, disparará o no y aplicará un determinado retardo en función de en qué zona se sitúe el vector de impedancia de falta dentro del plano ( $jX-R$ ). Los ajustes de esta protección se resumen en la siguiente tabla:

	$Z_{Falta}$	$R_{F1}$	$t_{z_1}$	Dirección
Zona 1	$6.8 \angle 75^\circ \Omega$	$15 \Omega$	0 s	1
Zona 2	$15 \angle 75^\circ \Omega$	$21 \Omega$	0.4 s	1
Zona 3	$1.2 \angle 75^\circ \Omega$	$15 \Omega$	0.15s	0

TABLA 5. AJUSTES UNIDAD DE DISTANCIA

Estos ajustes se codifican en el script inicial en forma de variables globales que luego son usadas por la lógica de disparo de la unidad direccional (en concreto por la función *selector de zonas*):

```
%Ajuste Zonas de proteccion:
% Ajst_i=[Modulo Impedancia de zona, tiempo de retardo, alcance
resistivo]
Ajst_1_L=[6.57 0 15];
Ajst_2_L=[14.5 0.4 21];
Ajst_3_L=[1.16 0.15 15];
```

El único parámetro que no se ha incluido es el ángulo de la impedancia de zona, pero porque es constante y depende de la línea.

## 2.5.9.2 Unidad direccional

## 2.5.9.2.1 Base teórica unidad direccional

La unidad direccional se emplea como interbloqueo de otras protecciones para que solo actúen dentro de su zona de protección y no para faltas aguas arriba. Es necesaria cuando la falta es doblemente alimentada. En nuestro caso este tipo de faltas se pueden dar en barras de los transformadores cuando los 2 funcionan. No debería ocurrir en la línea o en los feeders ya que en principio los parques eólicos no aportan corriente de falta, sin embargo, como es una función ya implementada en los relés se suele dejar. Por esto tanto los feeders como ambos lados de la línea tienen unidades direccionales en el plano de protecciones.

**Falta monofásica:** si la falta es hacia delante. Comparamos la tensión prefalta memorizada con la corriente de secuencia negativa. Se elige esta corriente ya que no existirá influencia de la corriente prefalta en su desfase.

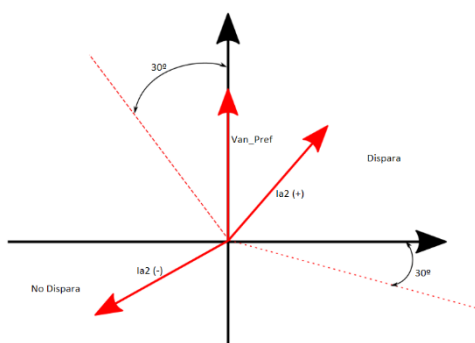


FIGURA 57 DIAGRAMA FASORIAL UNIDAD DIRECCIONAL

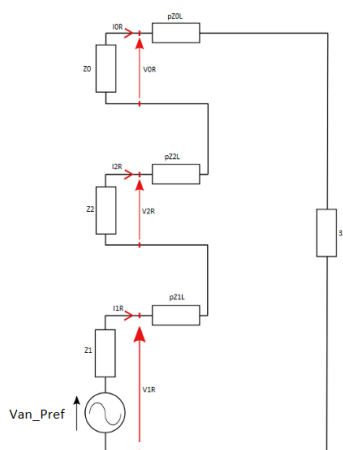


FIGURA 58. REDES DE SECUENCIA FALTA MONOFÁSICA UNIDAD DIRECCIONAL

Como se puede observar en el esquema, si la falta está delante la corriente estará aproximadamente en fase con la tensión. Sin embargo, siempre existirá un desfase debido a la impedancia de línea, por eso ponemos el límite en  $-30^\circ$  y  $+120^\circ$ .

**Falta Bifásica y Bifásica a tierra:** si la falta es hacia delante  $I_{a2}$  (ver figura 59) estará en el 3er cuadrante ya que el sentido "positivo" de  $I_{a2}$  es en contra de  $V_{pref}$ .

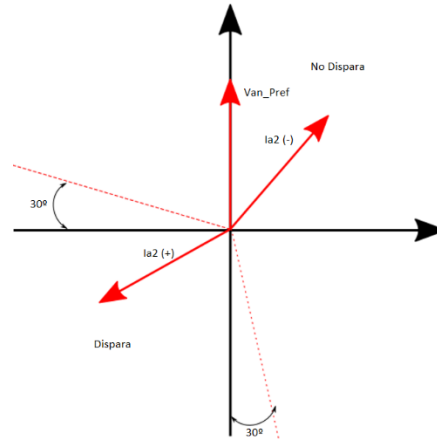


FIGURA 59. DIAGRAMA FASORIAL UNIDAD DIRECCIONAL FALTAS BIFÁSICAS

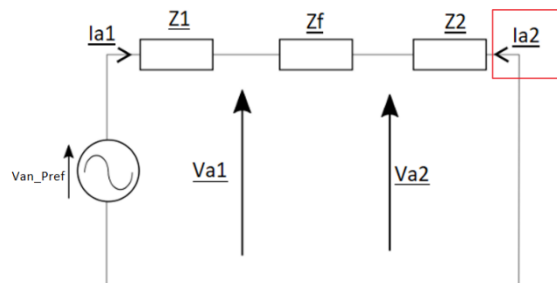


FIGURA 60. REDES DE SECUENCIA FALTAS BIFÁSICAS

**Falta Trifásica:** tendremos que usar la  $I_{a1}$  ya que no existe  $I_{a2}$  (por ser sistema equilibrado).

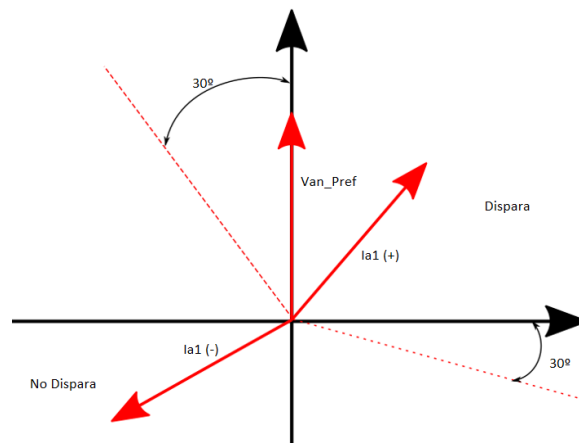


FIGURA 61. DIAGRAMA FASORIAL UNIDAD DE DISTANCIA PARA FALTAS A TIERRA

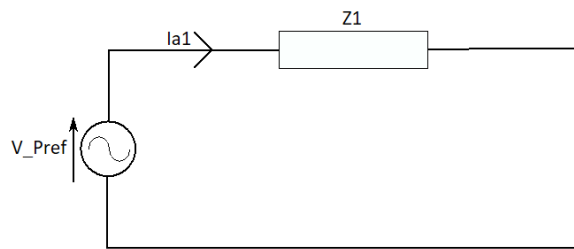


Figura 62. Redes de secuencia faltas trifásicas

**Corrientes de secuencia de distintas fases:**

Siempre que calculamos las redes de secuencia obtenemos las corrientes y tensiones de secuencia referidas a una fase. El bloque por defecto nos dará las fases referidas a la fase a. Para aplicar los diagramas vistos previamente para todas las faltas posibles, necesitamos comparar cada ángulo de tensión  $V_i$  con su correspondiente corriente de secuencia, esto es, referir las redes de secuencia a cada una de las fases.

Partiendo del cálculo de las redes de secuencia referidas a la fase A;

$$\begin{pmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix}$$

Para referirlas a la fase B ponemos la referencia en B (que será el sistema prima). Lo mismo con la fase C:

$$\begin{pmatrix} I_{a'} \\ I_{b'} \\ I_{c'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_b \\ I_c \\ I_a \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} I_{a''} \\ I_{b''} \\ I_{c''} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_c \\ I_a \\ I_b \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} I_{b0} \\ I_{b1} \\ I_{b2} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_b \\ I_c \\ I_a \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} I_{c0} \\ I_{c1} \\ I_{c2} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_c \\ I_a \\ I_b \end{pmatrix}$$

## 2.5.9.2.2 Implementación en Matlab

Una primera aprox. ha sido reordenar los fasores de las corrientes y después recalculan las redes de secuencia para cada una de ellas:



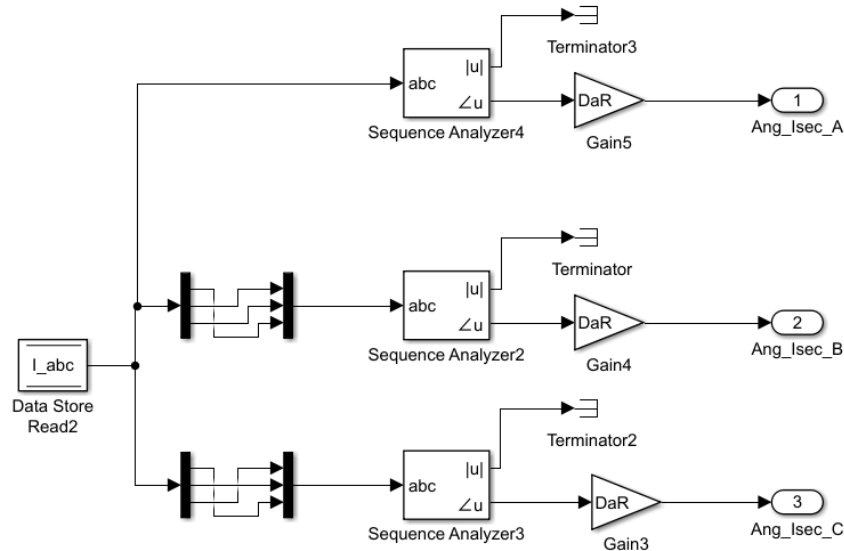


FIGURA 63. CONEXIONES PARA REFERIR ÁNGULOS DE SECUENCIA A LAS DISTINTAS FASES

Lo ideal sería encontrar una matriz de transformación para calcularlos sin necesidad de usar el bloque de analizador de secuencia que consume recursos de simulación.

#### Tensión prefalta:

Para guardar el valor de los ángulos de las tensiones prefalta se emplean los bloques memoria de Matlab. La memoria se va reseteando con el valor de la medida correspondiente a menos 10 ciclos mientras que el valor de la señal  $E\_Falta$  este a cero. Este retraso se pone para asegurar que el transitorio de la falta no afecte al valor del ángulo. Cuando la señal  $E\_Falta$  pasa a 1 se alimentará la entrada de la memoria con lo que estaremos efectivamente conservando ese valor mientras el selector de fase detecte falta.

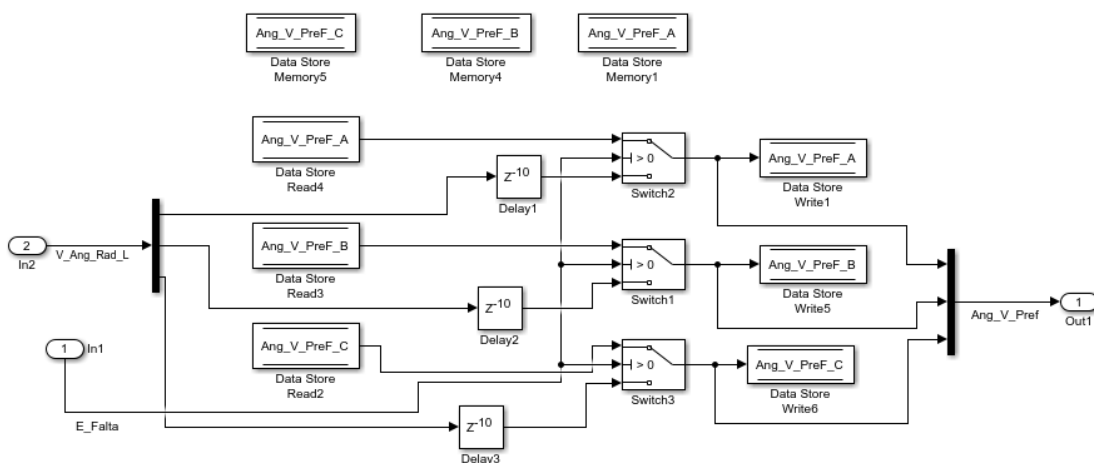


FIGURA 64. CONEXIÓN BLOQUES DE MEMORIA TENSIÓN PREFALTA

#### Comparador de ángulos:

Estas dos funciones le pasan los ángulos de prefalta y los ángulos de las corrientes de frecuencia a una misma función que será la unidad direccional propiamente dicha:

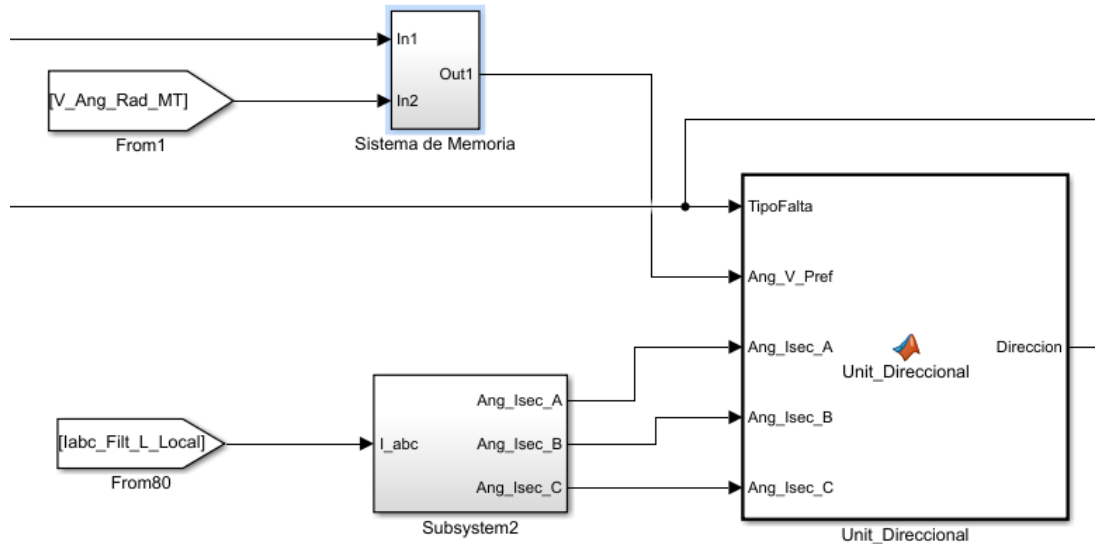


FIGURA 65. BLOQUE FUNCIÓN UNIDAD DIRECCIONAL

Además de estos valores se le pasa el vector tipo de falta y así se haga la comparación empleando los ángulos correctos. La salida es una variable booleana, de valor True si la falta está dentro o False si esta fuera del área protegida. En la siguiente tabla se describen la diferencia de ángulos y los rangos en los que debe de estar para estimar la dirección de la falta:

	$i_{Tipo\ Falta}$	Rango (grados)
AN	1	$\theta_{Van_{pref}} + 30^\circ > \theta_{Ia2} > \theta_{Van_{pref}} - 120^\circ$
BN	2	$\theta_{Vbn_{pref}} + 30^\circ > \theta_{Ib2} > \theta_{Vbn_{pref}} - 120^\circ$
CN	3	$\theta_{Vcn_{pref}} + 30^\circ > \theta_{Ic2} > \theta_{Vcn_{pref}} - 120^\circ$
CB/CBN	4,7	$\theta_{Van_{pref}} + 60^\circ < \theta_{Ia2} < \theta_{Van_{pref}} + 210^\circ$
CA/CAN	5,8	$\theta_{Vbn_{pref}} + 60^\circ < \theta_{Ib2} < \theta_{Vbn_{pref}} + 210^\circ$
AB/ABN	6,9	$\theta_{Vcn_{pref}} + 60^\circ < \theta_{Ic2} < \theta_{Vcn_{pref}} + 210^\circ$
ABC	10	$\theta_{Van_{pref}} + 30^\circ > \theta_{Ia1} > \theta_{Vcn_{pref}} - 120^\circ]$

TABLA 6. RANGO ÁNGULO UNIDAD DIRECCIONAL DE FASES

Para hacer la comparación, se toma como referencia el valor de la tensión. Se resta el ángulo de la tensión al ángulo de la corriente y luego se compara con 30 y 120 o con 60 y 210 dependiendo del caso. De esta forma la comparación siempre se realiza correctamente independientemente de la orientación de ambos vectores. A modo de ejemplo se incluye aquí el código para la dirección de la falta AN:

```
%AN
if TipoFalta(1)==1
```

```

    Alfa=Norm(Norm(Ang_Isec_A(2))-
Norm(Norm(Ang_V_Pref(1))))
    if Alfa<(pi/6) || Alfa>(4*pi)/3
        disp('%AN')
        Direccion=1
    else
        disp('%AN')
        Direccion=0
    end
end
end

```

Y el código para las faltas bifásicas:

```

%CBN/CB
if TipoFalta(4)==1 || TipoFalta(7)==1
    Alfa=Norm(Norm(Ang_Isec_A(2))-
Norm(Ang_V_Pref(1))))
    if Alfa>(pi/3) && Alfa<(7*pi)/6
        Direccion=1;
        disp('%CBN/CB')
    else
        disp('%CBN/CB')
        Direccion=0
    end
end
end

```

Para simplificar el código, se ha empleado la función local `Norm` para normalizar los ángulos:

```

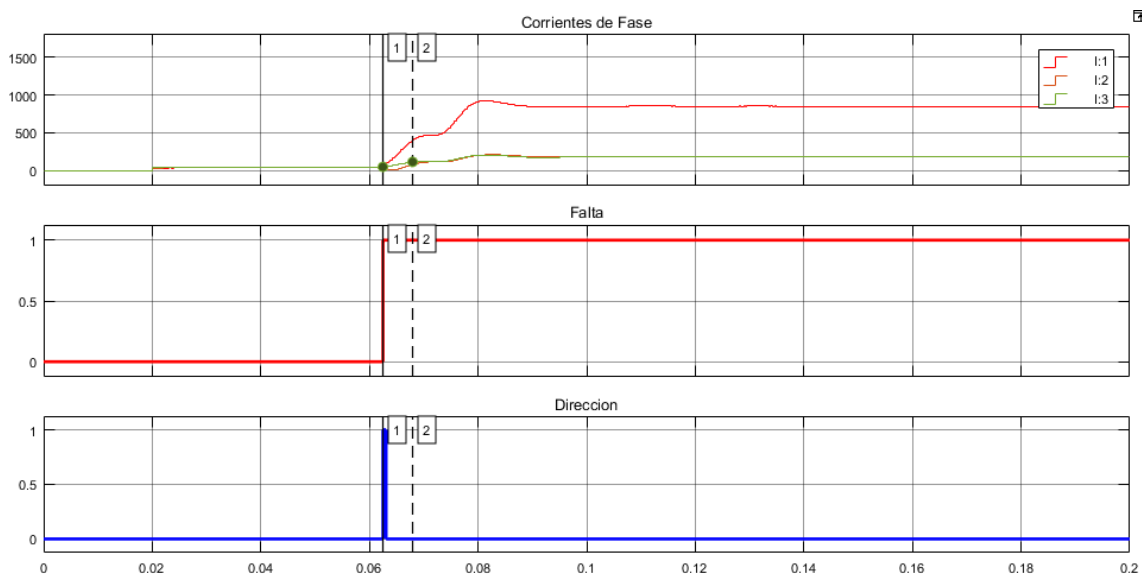
function Angulo_Norm=Norm(Angulo)
    if Angulo<0
        Angulo_Norm=2*pi+Angulo;
    else
        Angulo_Norm=Angulo;
    end
end
end

```

El código completo se puede encontrar en el anexo 2.

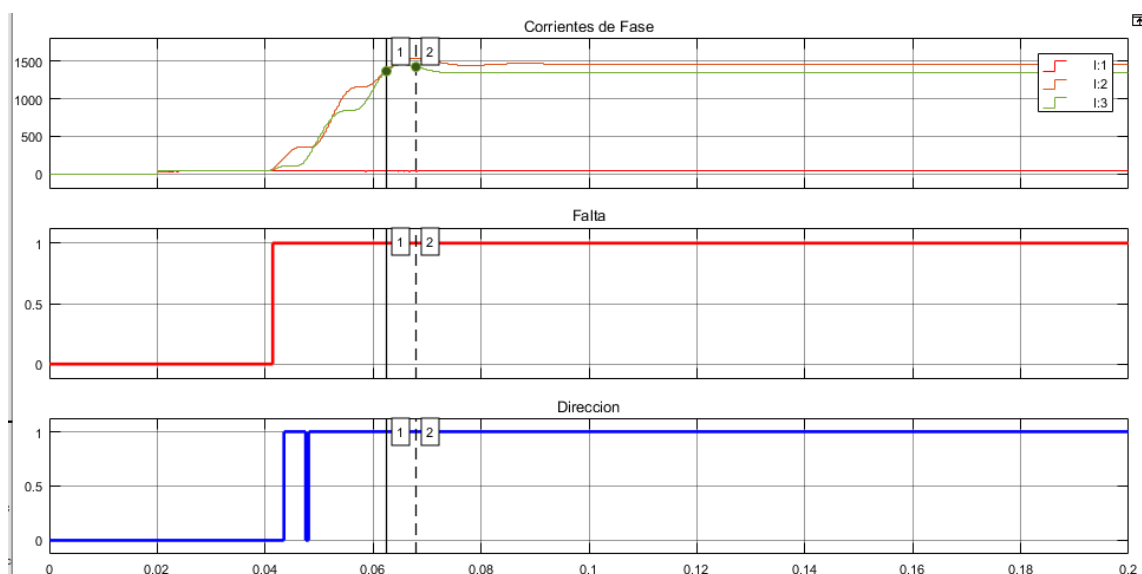
#### 2.5.9.2.3 Test unidad direccional

Usando el código de la línea test, se han hecho pruebas con distintas faltas delante y detrás del relé. Se ha observado que durante el transitorio la unidad direccional da resultados contradictorios. Esto se debe a que en ese periodo se cumplen momentáneamente condiciones de algún tipo de falta distinta.



**FIGURA 66. MÓDULOS CORRIENTES-DETECTOR DE FALTA – DIRECCIÓN-FALTA AN DETRÁS**

La solución ha sido incluir un retraso a la salida para evitar el transitorio. Cuando detecta una falta espera 0.005s (0.25 ciclos) antes de dar la dirección. De esta forma se evitan los resultados contradictorios. Es un tiempo dos órdenes de magnitud inferior al retardo de distancia (el cual se reducirá en este valor), así que no afecta a la velocidad de la protección.



**FIGURA 67. MÓDULOS CORRIENTES-DETECTOR FALTA-DIRECCIÓN-FALTA BC DELANTE**

### 2.5.9.3 Lógica de disparo de la unidad de distancia

#### 2.5.9.3.1 Implementación de la característica cuadrilateral

La entrada a esta función es la impedancia de falta que se calcula como producto vectorial del factor por la impedancia de falta. Los vectores y las resistencias, ambos calculados en el punto correspondiente, además de los tiempos de disparo. Todos estos ajustes se pueden resumir en la siguiente tabla:

	Modulo Impedancia ( )	Retraso (s)	Alcance Resistivo ( )
Zona 1	6.57	0	15
Zona 2	14.5	0.4	21
Zona 3	1.16	0.15	15

TABLA 7. AJUSTES PROTECCIÓN DE DISTANCIA

Además, tendremos los ajustes de las zonas definidos en el script y la señal de existencia de falta que viene de la unidad del selector.

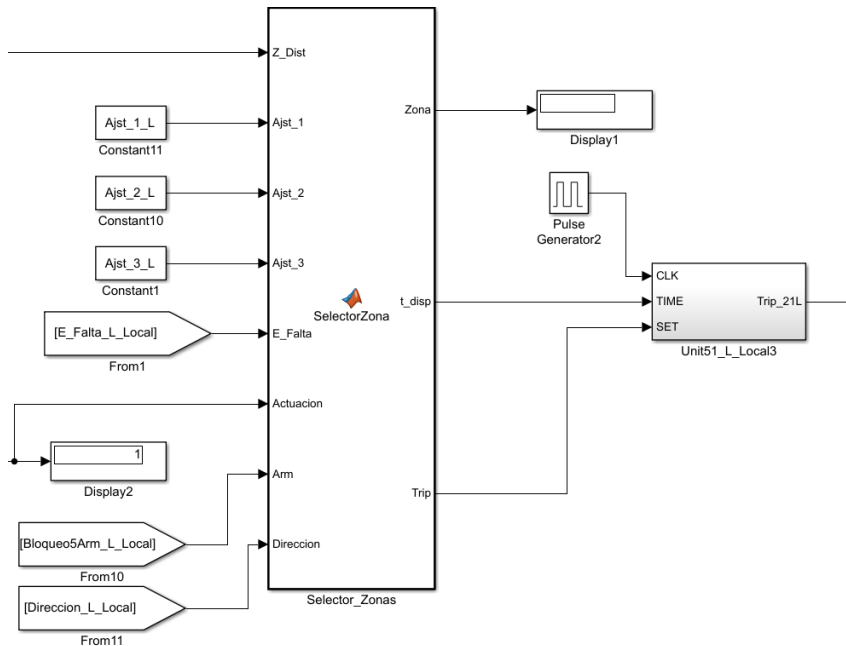


FIGURA 68. BLOQUE LÓGICA DE DISPARO DE LA PROTECCIÓN DE DISTANCIA

### 2.5.9.3.2 Temporizadores

Para simular las distintas zonas de protección y analizar más adelante la coordinación con las demás funciones hay que simular también el efecto de la temporización. Simulink no dispone de temporizadores como tales, por eso se ha creado el bloque de temporización:

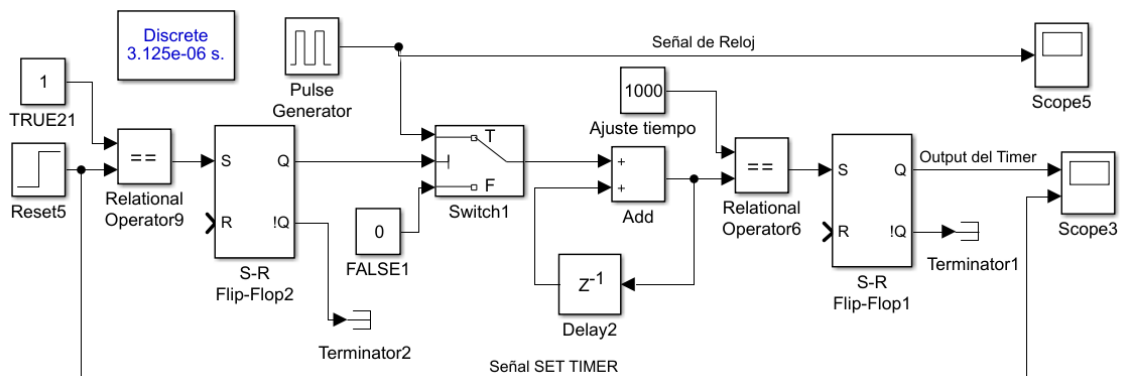
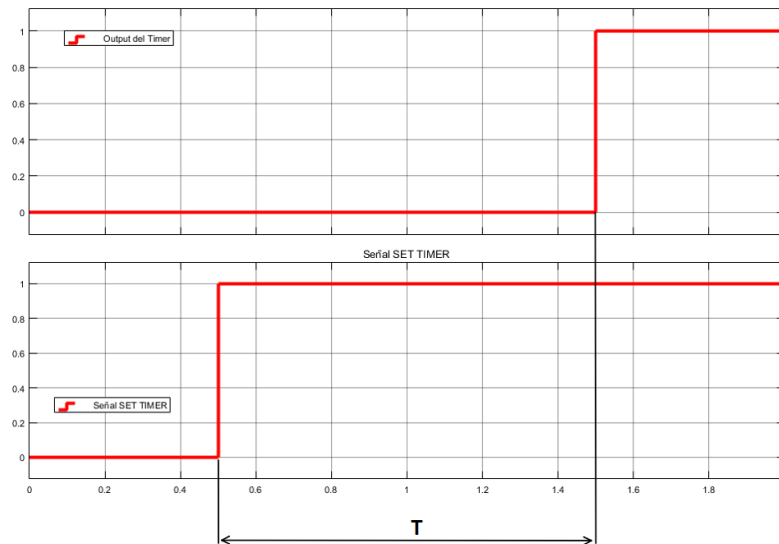


FIGURA 69. LÓGICA TEMPORIZADOR

En el ejemplo se ha mantenido el tiempo de simulación del modelo y se ha usado un generador de pulsos con un periodo de 0.001s (1ms) como señal de reloj, por lo que el ajuste del *Timer* ira en milisegundos. Los retardos de la protección son del orden de décimas de segundo por lo que la precisión es suficiente. Funciona de forma que cuando la señal de SET pasa a 1 el output del *Timer* se pondrá a 1 tantos ms después como tengamos la constante *Ajuste de tiempo* (T en la figura).



**FIGURA 70. ACTUACIÓN DEL TEMPORIZADOR**

Este bloque se ha añadido a la librería del proyecto para usarlo más adelante.

#### 2.5.9.4 Implementación de la Unidad de distancia en Matlab

La unidad direccional en Simulink se compone de las distintas unidades menores que se han comentado anteriormente. En primer lugar, está el selector de fase, cuya salida es un vector de dimensión diez (una por tipo de falta y la décima en caso de que no tengamos falta). Tendrá un uno en la posición correspondiente. Ese vector se pasa después a la unidad direccional por un lado y a la unidad de ecuación de distancia. Para reducir el tiempo de computación y realizar solo la ecuación necesaria, la unidad de ecuación emplea el vector de falta para operar solo la ecuación de cálculo de distancia correspondiente. El valor de la distancia, así como la dirección y de la resistencia de línea (Blinders) se envían a la función de lógica de protección que va a determinar si está dentro a fura del ajuste de la protección.

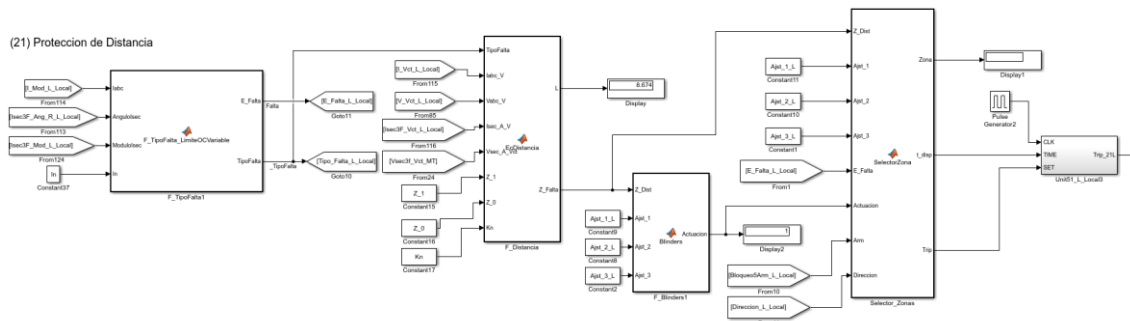


FIGURA 71. CONJUNTO DE BLOQUES PARA LA FUNCIÓN DE DISTANCIA

A estos bloques hay que sumarles los bloques de la restricción de 5º armónico y de la direccional cuyas salidas serán empleadas como bloqueos a la función de protección. Los bloqueos son señales que al estar a uno evitarán que se de una orden de disparo mientras que los permisivos son señales que tienen que estar a uno para que se mande la orden de disparo.

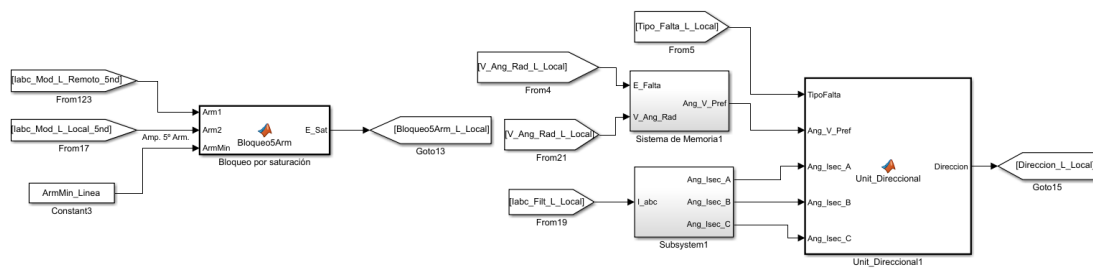


FIGURA 72. UNIDADES AUXILIARES DE DIRECCIÓN Y SATURACIÓN

Al realizar la simulación, se comprobó las simulaciones eran muy lentas. La razón es que se han usado funciones con código de Matlab en vez de Simulink. Estas funciones se ejecutan en cada paso de simulación, en vez de una vez cada cien paso como todos los bloques situados después del bloque de muestreo. Este es el bloque que hace las veces de convertor A/D. Permite tener un tiempo de simulación para el sistema de potencia y otro para las funciones de protección, como si de la CPU del relé se tratase. Al usar la simulación discreta se puede ajustar cada bloque para que opere a un paso determinado que debe de estar alineado con la señal de entrada. Para conseguir que ocurra eso con las funciones de Matlab se ha puesto un bloque *rate transmission*, como se puede apreciar en la figura siguiente. Es una medida provisional, ya que lo más eficiente sería programar los algoritmos usando bloques Simulink.

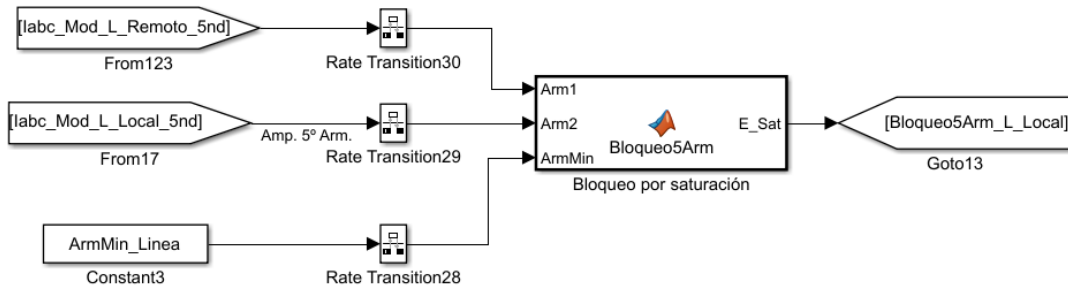
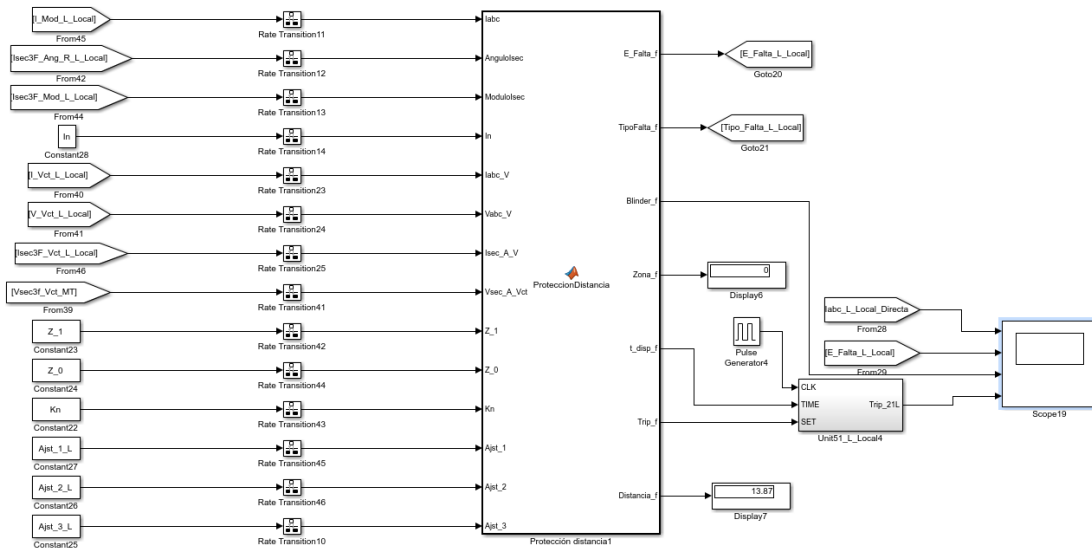


FIGURA 73. BLOQUE BLOQUEO DE 5º ARMÓNICO CON PASO LIMITADO

En el caso particular de la función de distancia, como tenemos señales que salen de una función para ser empleadas como argumentos en otras, se han integrado todas en un único bloque Matlab en el que todas sus entradas están muestreadas y cuyas salidas solo se emplearán para atacar bloques de Simulink. Así las señales de armónico y dirección que bloquearán el disparo se interconectarán con una lógica propia.



Dentro de este bloque de Matlab se han incluido todas las funciones desarrolladas previamente y la función principal lo que hace es llamarlas de forma sucesiva.

```
function[E_Falta_f,TipoFalta_f,Blinder_f,Zona_f,t_disp_f,Trip_f,
Distancia_f] = ProteccionDistancia(Iabc,AnguloIsec,
ModuloIsec,In,Iabc_V,Vabc_V,Isec_A_V,Vsec_A_Vct,Z_1,Z_0,Kn,Ajst_
1,Ajst_2,Ajst_3)
```

```
[E_Falta_f,TipoFalta_f]=F_TipoFalta_LimiteOCVariable(Iabc,Angulo
Isec, ModuloIsec, In);
```

```
[Distancia_f,Imp_Falta_f] = EcDistancia
(TipoFalta_f,Iabc_V,Vabc_V,Isec_A_V,Vsec_A_Vct,Z_1,Z_0,Kn);
```

```
Blinder_f = Blinders (Imp_Falta_f,Ajst_1,Ajst_2,Ajst_3);
```



```
[Zona_f,t_disp_f,Trip_f] = SelectorZona  
(Imp_Falta_f,Ajst_1,Ajst_2,Ajst_3,E_Falta_f,Blinder_f);  
  
end
```

el código completo se puede encontrar en el anexo 2.

## 2.5.10 Diferencial

El principio de la protección diferencial consiste en comparar la corriente de entrada y la de salida en un tramo del circuito, denominado lazo diferencial. Para ello se emplean 2 CT entre bornas del elemento a proteger. Al ser un sistema polifásico alimentado desde un solo extremo, esta protección detectará todas las faltas [7].

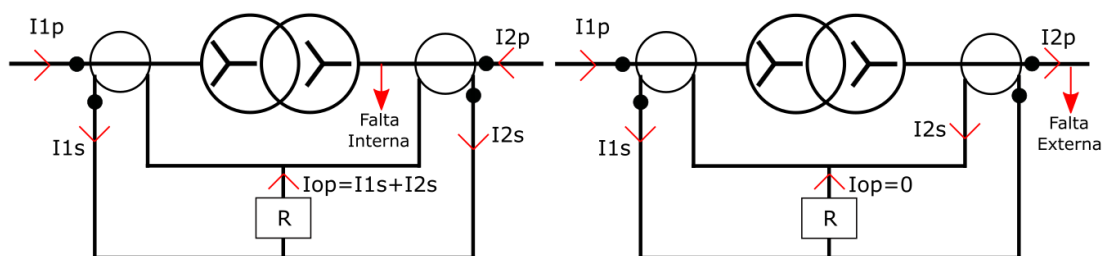


FIGURA 74. PRINCIPIO DIFERENCIAL

La corriente de operación  $I_{op}$ , también llamada diferencial, que será la que emplee el relé será:

$$I_{op} = I_{1s} + I_{2s}$$

Siendo  $I_{1s}$  y  $I_{2s}$  las corrientes en el secundario local y remota respectivamente. Consideramos 2 tipos de faltas, interna, ante la cual debe disparar la protección y externa, fuera del lazo de protección. Al estar los CTs en oposición, tenemos que, para situación nominal o falta externa:  $I_{op} = 0$ .

Mientras que para falta interna:

- En el caso de elemento doblemente alimentado:  $I_{op} = 2 I_{falta}$
- En el caso de tener una única alimentación:  $I_{op} = I_{falta}$

Sin embargo,  $I_{op}$  no será igual a cero en muchos casos de falta externa debido a:

- Diferencias en la relación de transformación de los CT: en líneas y busbars es despreciable ya que estamos trabajando al mismo nivel de tensión y los CTs a ambos lados serán del mismo ratio. Sin embargo, en transformadores, la relación de transformación de los CTs a ambos lados deberá ser distinta para dar una  $I_{secundario}$  comparable en base a  $2 I_{primario}$  distintas. Esto no se puede hacer directamente, ya que los CTs no están disponibles en un rango infinito de ratios. Como se verá más adelante será necesaria una operación de normalización de las  $I_{secundario}$ .
- Corriente de magnetización: el transformador consume una cierta cantidad de corriente para magnetizar el núcleo. Por lo tanto, durante el arranque

demandará una cierta cantidad de corriente, denominada corriente de magnetización (esto se conoce como *Inrush*, se verá más adelante).

- Saturación de los CTs: durante las faltas y los transitorios de sobre corriente (carga de líneas, *Inrush*...) uno de los CTs puede saturar antes que el otro. Este fenómeno es muy habitual ya que cada CT suele tener un magnetismo remanente distinto. En este caso estaríamos midiendo una corriente muy distinta (una  $I_{op}$  muy grande) sin que hubiera una falta interna.

Todos estos factores hacen que no se pueda aplicar directamente una *pick up* ( $I_{pu}$ ) a modo de protección de sobrecorriente para disparar la diferencial. Si lo hiciésemos, la  $I_{pu}$  sería tan alta que insensibilizaríamos la protección.

Percentage biased differential protection:

Una solución es cambiar la  $I_{pu}$  en función de la magnitud de la corriente. Para medir dicha magnitud introducimos la magnitud corriente de frenado,  $I_{res}$  (*restraint current*) empleada para frenar (reducir sensibilidad) del relé conforme aumenta el flujo de corriente. Se puede definir de varias formas, en nuestro caso la definimos como:

$$I_{res} = \frac{|I_{1s}| + |I_{2s}|}{2}$$

Se definirá el disparo como TRIP si  $I_{op} > I_{res} m_i$  siendo  $m_i$  una pendiente que irá aumentando a trozos conforme aumenta  $I_{res}$ .

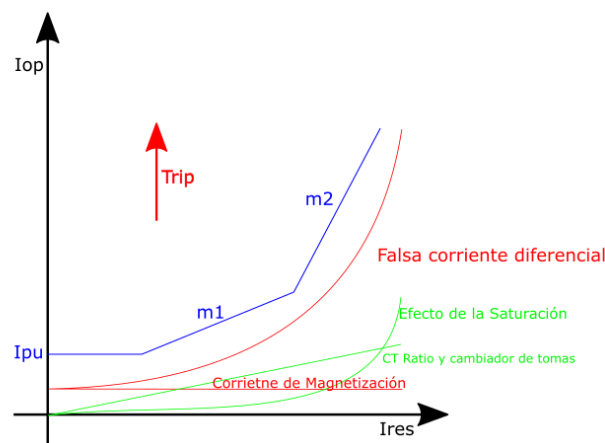


FIGURA 75. FALSA CORRIENTE DIFERENCIAL

Como se puede ver en la figura, hay que conseguir que la curva de disparo evite la curva de falsa corriente diferencial que aparece en faltas externas o transitorios. Como se ve en la gráfica, la introducción de las pendientes  $m_1$  y  $m_2$  permite que la

característica de disparo evite la componente de la corriente diferencial que se corresponde a los efectos explicados previamente. A mayor corriente de operación más corriente diferencial necesitaremos para considerar que la falta es interna.

Por otro lado, en paralelo al sistema básico de la diferencial, se dispondrá de las unidades de 5º y 2º armónico para detectar saturación de los CTs y Inrush en los transformadores de potencia. Estas unidades generan señales de bloqueo para la protección diferencial.

#### 2.5.10.1 Diferencial de Línea

##### 2.5.10.1.1 Ajuste de la diferencial de línea

Los ajustes de la protección diferencial de línea serán:

- Corriente diferencial mínima:
  - En bornas del primario:  $I_{dif_p} = 0.2 I_{n_{CT_p}} = 0.2 \cdot 600A = 120A$
  - En bornas del secundario:  $I_{dif_s} = 0.2 I_{n_{CT_s}} = 0.2 \cdot 1 A = 0.2A$
- Pendientes:
  - Pendiente k1: 30% (para asegurar estabilidad frente a pequeños errores en los CTs)
  - Pendiente k2: 150% (estabilidad ante una fuerte falta externa)
- Puntos de cambio de pendiente:
  - Punto IS1: 0.2 p.u.
  - Punto IS2: 2 p.u.

##### 2.5.10.1.2 Implementación en Matlab

Se va emplear un bloque Matlab para implementar la función diferencial. Las entradas del bloque serán los vectores de los fasores las corrientes medidas a ambos lados de la línea. Por simplicidad, todos los sensores de corriente se conectan de la misma manera en el modelo. De esta forma, para representar la conexión con polaridad opuesta de los CTs para el relé diferencial usamos simplemente una ganancia -1 para darle la vuelta. También tenemos como argumento las constantes de corriente restringida y las 2 pendientes, esto es, los ajustes de la protección propiamente dichos. Se definirán en el script inicial.

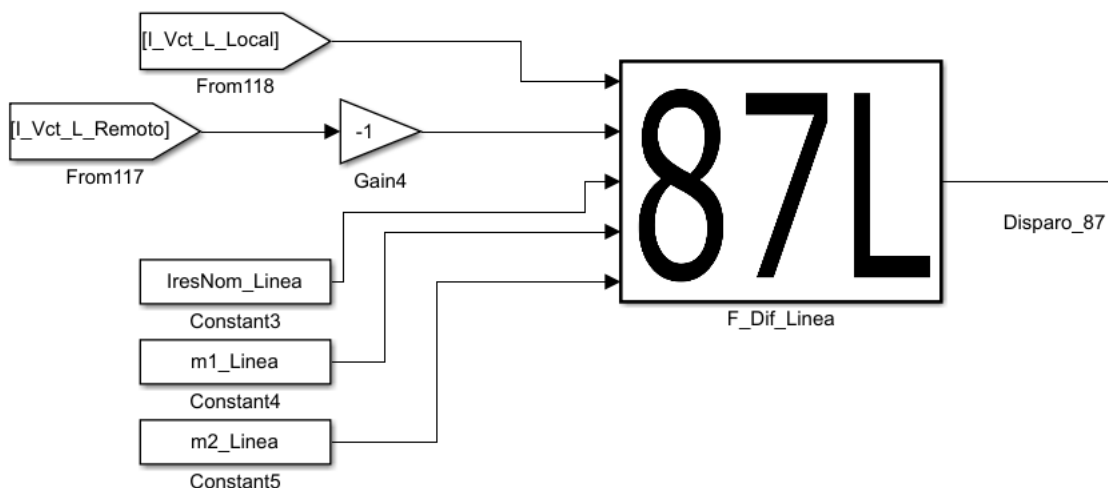


FIGURA 76. BLOQUE FUNCIÓN DIFERENCIAL DE LÍNEA

Dentro de la función tenemos un bucle *For* que va iterando por cada fase en cada paso de simulación. Por defecto se empieza con  $Trip=0$  y si se cumple alguna de las condiciones dadas por los ajustes de la protección se cambia a 1. El código del bucle *For* es el siguiente:

```
for i=1:3
    Ires=(abs(Iabc1(i))+abs(Iabc2(i)))/2;
    Iop=abs(Iabc1(i)+Iabc2(i));

    if Ires<0.2*IresNom && Iop>0.2*IresNom
        Trip=1;
    end

    if Ires>0.2*IresNom && Ires<1.5*IresNom && Iop>m1*Ires
        Trip=1;
    end

    if Ires>1.5*IresNom && Iop>m2*Ires
        Trip=1;
    end
end
```

#### 2.5.10.1.3 Test diferencial de línea

Al ejecutar la función se ha comprobado que en general responde bien a las faltas al ser una lógica bastante más sencilla que la protección de distancia de línea. Sin embargo, el efecto de la saturación puede causar que no se cumplan las condiciones de disparo para todos los ciclos mientras dura el transitorio. Por eso, como se aprecia en el gráfico, en los primeras centésimas de segundo después de producirse la falta se observa como la señal de disparo no es estable.

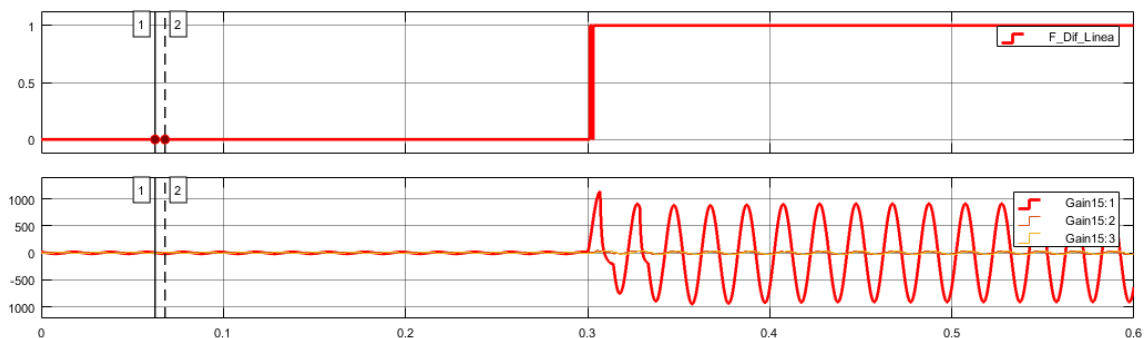


FIGURA 77. DISPARO DIFERENCIAL PARA FALTA MONOFÁSICA

Como se explicó en el test de la diferencial de línea, un problema de Simulink es que las funciones en Matlab código Matlab son mucho más lentas de ejecutarse que los bloques. Por eso, se ha optado por sacar el cálculo de  $I_{op}$  y  $I_{res}$  fuera de la función y realizarlo por bloques ya que son los cálculos más complejos. El código del bloque se limitaría a realizar la comparación.

(87L) Protección Diferencial de Línea

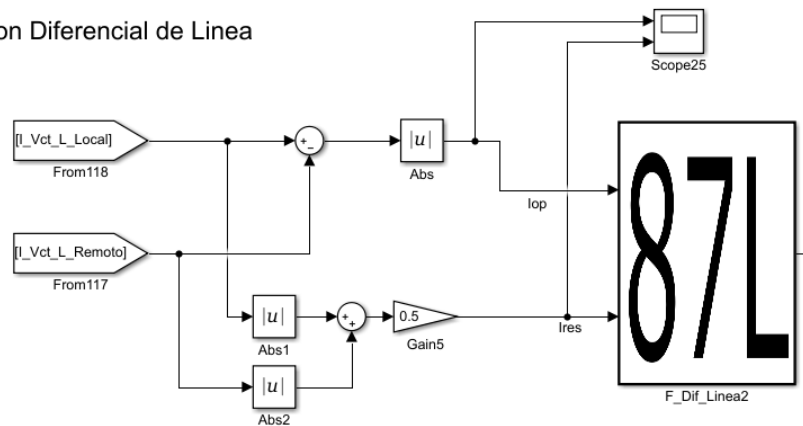


FIGURA 78. FUNCIÓN MEJORADA DE DIFERENCIAL DE LÍNEA

## 2.5.10.2 Saturación y 5º armónico

Cuando llegamos a la saturación del transformador, la corriente en el secundario cae abruptamente (fig.79). Esto es un problema en la protección diferencial ya que estamos comparando corrientes de 2 transformadores distintos. Si uno satura antes que el otro, por ejemplo, en una falta externa, la protección lo interpretará como diferencia de corriente entre ambos extremos. Para detectar este fenómeno se calcula el 5º armónico de la corriente medida. Como se puede ver, su valor será bastante alto mientras dure la saturación [8].

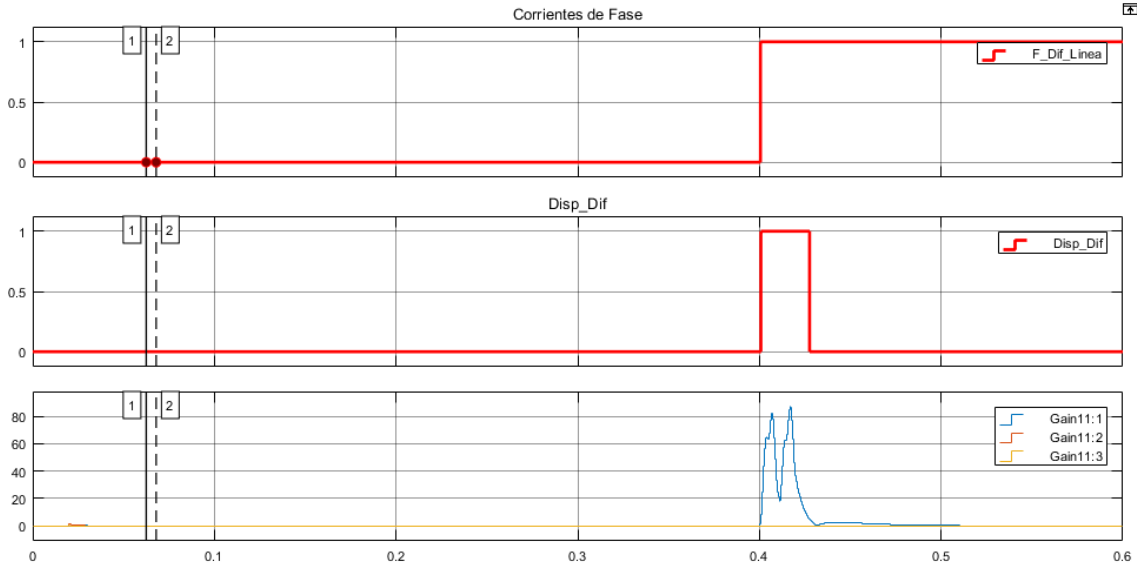


FIGURA 79. ACTUACIÓN DEL BLOQUEO DE 5º ARMÓNICO

Como se puede ver en el gráfico, tenemos en el cuadro superior representada la salida de la función diferencial explicada previamente, en el inferior el resultado del bloque de Fourier ajustado para extraer el 5º armónico. Al aparecer la falta en 0.4s tenemos un pico de 5º armónico. Esta señal servirá como bloqueo para el disparo de la diferencial.

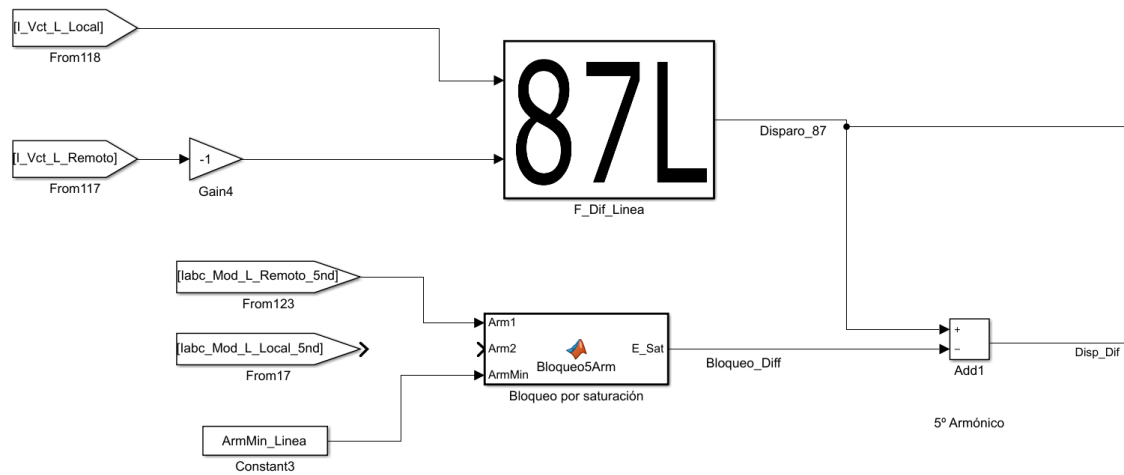


FIGURA 80. BLOQUE MATLAB FUNCIÓN RESTRICCIÓN DE 5º ARMÓNICO

La unidad que genera el bloqueo será una función de Matlab, el valor de entrada será el valor eficaz de a señal de 5º armónico. El código en el interior será el siguiente:

```
function E_Sat = Bloqueo5Arm(Arm1, Arm2, ArmMin)
    E_Sat=0;
    for i=1:3
        if Arm1(i)>ArmMin
            E_Sat=1;
        end
    end
    for i=1:3
        if Arm2(i)>ArmMin
            E_Sat=1;
        end
    end
end
```

El valor *ArmMin* dependerá del transformador de corriente que estemos utilizando, por lo tanto, tendremos un valor para cada tipo de CT. En el caso particular de la diferencial de línea los 2 CT a ambos lados son iguales. La función comprueba que ninguno de los CT está en el transitorio.

A la hora de implementarlo en Matlab, se ha comprobado que la lógica anterior, aunque sirve correctamente para detectar cuando un CT está en saturación, puede dar errores para el CT que está aguas abajo de la falta. En este, tendremos in 5º armónico alto pero una corriente de fase baja pero errática. Para tenerlo en cuenta, incluimos un and que compara la corriente por esa fase con la corriente nominal.

```
for i=1:3
    if Arm1(i)>ArmMin && Imod_L(i)>0.3*Inom_L
        Bloqueo_5Arm=1;
    end
end
for i=1:3
    if Arm2(i)>ArmMin && Imod_R(i)>0.3*Inom_L
        Bloqueo_5Arm=1;
    end
end
```

## 2.5.10.3 Diferencial de transformador

Los ajustes de la protección diferencial de transformador serán:

- Corriente diferencial mínima:
  - En bornas del primario:  $I_{dif\_p} = 0.2 I_{n_{CT_p}} = 0.2 \cdot 600A = 120A$
  - En bornas del secundario:  $I_{dif\_s} = 0.2 I_{n_{CT_s}} = 0.2 \cdot 1A = 0.2A$
- Pendientes:
  - Pendiente m1: 50% (para asegurar estabilidad frente a pequeños errores en los CTs)
  - Pendiente m2: 160% (estabilidad ante una fuerte falta externa)
- Puntos de cambio de pendiente:
  - Punto IS1: 0.2 p.u.
  - Punto IS2: 2 p.u.

## 2.5.10.3.1 Conversión de corrientes

Mientras que en la línea tenemos 2 CTs con la misma relación de transformación (ya que la corriente nominal es la misma a ambos lados), en el transformador los CTs en alta y baja son distintos. Para obtener 2 corrientes comparables necesitaremos encontrar una constante que satisfaga la siguiente igualdad:

$$I_{med|CT1,Nom} = k \cdot I_{med|CT2,Nom}$$

De forma que ambas corrientes sean comparables. De la relación de transformación del transformador de potencia tenemos lo siguiente:

$$\frac{110kV}{33kV} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = RT_{T.Pot}$$

Y de los transformadores de medida tenemos que:

$$I_1 = RT_{CT1} \cdot I_{med|CT1} = 400 \cdot I_{med|CT1}$$

$$I_2 = RT_{CT2} \cdot I_{med|CT2} = 1200 \cdot I_{med|CT2}$$

Dividiendo la relación del CT del primario por la del secundario tenemos que:

$$\frac{RT_{CT1} \cdot I_{med|CT1}}{RT_{CT2} \cdot I_{med|CT2}} = \frac{I_2}{I_1} = RT_{T.Pot}$$

Reordenando despejamos la constante k:

$$I_{med|CT1} = \frac{RT_{CT2} \cdot RT_{T.Pot}}{RT_{CT1}} \cdot I_{med|CT2} = k \cdot \frac{RT_{CT2} \cdot RT_{T.Pot}}{RT_{CT1}}$$

Dando valores tenemos que:

$$I_{med|CT1} = \frac{1200 \cdot \frac{110}{33}}{400} \cdot I_{med|CT2}$$

En la práctica, esto se implementó con una ganancia a la salida de los bloques de medida de corriente correspondientes.



## 2.5.10.3.2 Inrush

Aunque la protección diferencial con curva basada en porcentaje es suficiente para errores en los CTs no lo es diferenciar una falta de una corriente de Inrush. Cuando este fenómeno se produce podemos tener corrientes de entre 10 y 20 veces la nominal. Tradicionalmente este fenómeno se ha detectado incluyendo en la lógica un bloqueo por valor del segundo armónico de la onda de corriente.

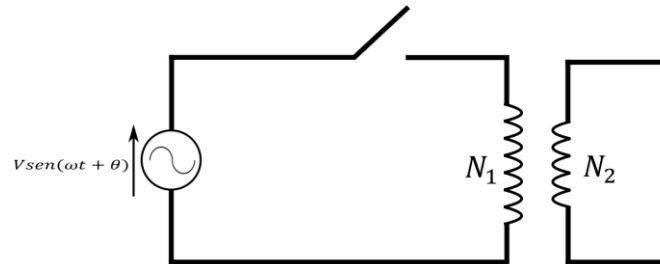


FIGURA 81. CIRCUITO ENERGIZACIÓN DE TRANSFORMADOR

Para ilustrar este fenómeno, vamos a considerar el circuito de la figura, en el que tenemos una fuente de tensión y un transformador en vacío. Primero estudiaremos la situación transitoria. En el instante se cierra el interruptor, aplicando Faraday al circuito tenemos que:

$$V_m \text{sen}(\omega t) = \frac{dN_1 \phi_m}{dt}$$

$$\int_0^t N_1 d\phi_m = \int_0^t d\Lambda_1 = \frac{V_m}{\omega} \int_0^t \text{sen}(\omega t) d(\omega t)$$

$$\Lambda_1(t) - \Lambda_1(0) = \frac{V_m}{\omega} (1 - \cos(\omega t))$$

Dividiendo por el número de espiras obtenemos el flujo en función del tiempo:

$$\phi(t) = \frac{V_m}{\omega N_1} (1 - \cos(\omega t)) + \phi(0)$$

Suponiendo que el flujo inicial fuese cero, tendríamos la siguiente curva:

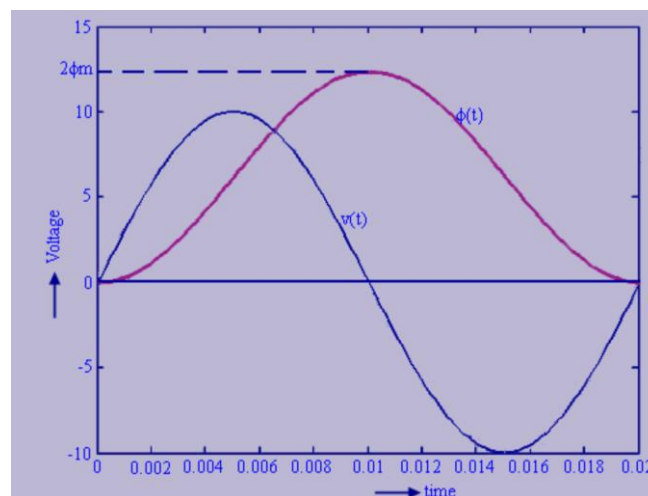


FIGURA 82. CURVAS DE FLUJO Y TENSIÓN EN TRANSITORIO

Como se observa, el valor máximo lo tenemos para el instante en que la tensión se hace cero. Sustituyendo en la ecuación podemos obtener este valor de flujo máximo:

$$\phi_{max} = \frac{2V_m}{N_1\omega}$$

Sin embargo, si ahora aplicamos el cálculo fasorial para calcular el valor del flujo en estado estacionario tenemos que:

$$\underline{V} = j\omega N_1 \underline{\phi} \rightarrow \underline{\phi} = \frac{\underline{V}}{j\omega N_1} \rightarrow \phi_{max} = \frac{V_{max}}{\omega N_1}$$

Y la función sinusoidal para el flujo en estado estacionario sería:

$$\phi(t) = \phi_m \text{sen}\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

Si ahora representamos esta función junto con la tensión obtenemos las siguientes curvas:

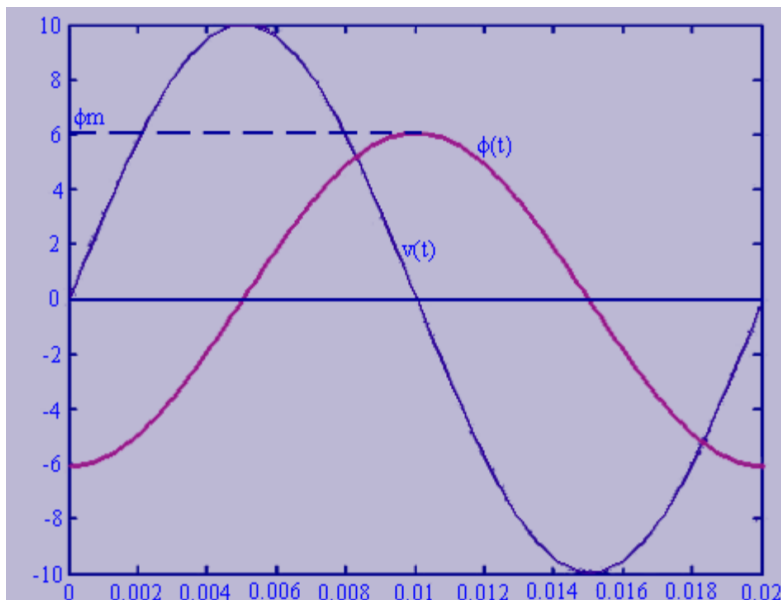


FIGURA 83. COMPORTAMIENTO DEL FLUJO Y LA TENSIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO

Sirvan estos sencillos cálculos para ilustrar el efecto del Inrush. Se puede ver como el flujo máximo en estado estacionario en la situación estudiada es el doble que en el caso estacionario y eso que hemos considerado que  $\phi(0) = 0$ . Este valor inicial depende del magnetismo remanente que a su vez depende de la última vez que se haya desconectado el transformador de la fuente de tensión. Por lo tanto, tendrá un valor aleatorio entre  $\phi_{nom}$  y  $-\phi_{nom}$ . Por último, recordar que los transformadores de potencia suelen trabajar muy cerca de la saturación por lo que llevando el flujo a cerca del doble de su valor estamos pasando de lejos el codo de saturación. Así, un aumento del flujo produce un aumento de la corriente de neutro mucho mayor.

Viendo los cálculos para el estado estacionario podría parecer que estos se alargarían indefinidamente. Esto es así porque en el desarrollo de la forma de onda del

flujo en el transitorio no se ha tenido en cuenta ni la saturación ni la resistencia del devanado. Estos dos factores harán que la onda se vaya amortiguando progresivamente de forma que se irá reduciendo hasta coincidir con el estado estacionario

En la práctica, este efecto se traduce en una corriente de magnetización muy elevada.

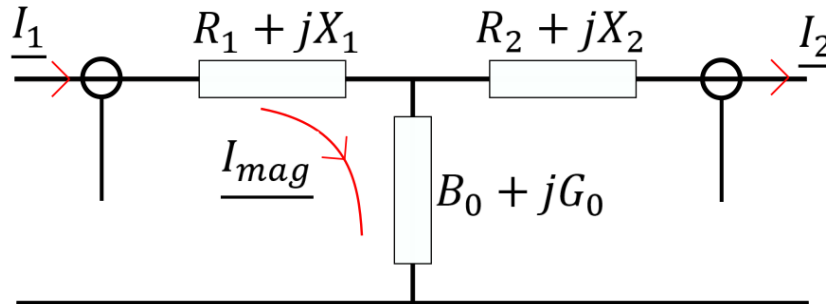


FIGURA 84. CASO 1: CORRIENTE DE INRUSH

En este primer caso, la resultante de las corrientes será:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 + \underline{I}_{mag} \rightarrow \underline{I}_1 \neq \underline{I}_2$$

Siendo la corriente de magnetización de una magnitud superior a las otras 2, pudiendo llegar a 10 o 20 veces la nominal. Desde el punto de vista de la protección es una situación muy similar a falta interna en bornes del transformador, por ejemplo.

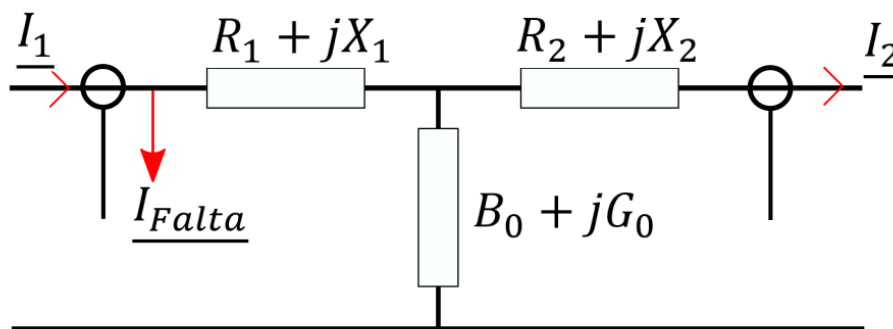


FIGURA 85. CASO 2: FALTA INTERNA DENTRO DE LA ZONA DIFERENCIAL DEL TRANSFORMADOR

En este caso, tendríamos que:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{Falta} + \underline{I}_2 \rightarrow \underline{I}_1 \neq \underline{I}_2$$

En ambos casos dispararíamos ya que por mucho que comparemos  $\underline{I}_{op}$  con  $\underline{I}_{res}$  multiplicado por un factor este tendría que ser demasiado alto y no dispararíamos en caso de falta real. La solución a este problema es encontrar una manera de diferenciar una sobrecorriente por falta interna y una sobrecorriente por Inrush. Se ha descubierto que el 2º armónico de la corriente aumenta debido al Inrush. **Referencia**

**Inrush** Por eso se va a desarrollar una función que genere una señal de bloqueo basada en este armónico.

### 2.5.10.3.3 Implementación en Matlab

Para implementarlo en Matlab, se empleará el mismo bloque que para el boqueo de 5º armónico empleado para detectar saturación en los CTs. En este caso, solo se empleará el armónico del lado de alta, ya que, a diferencia del 2º armónico en el que podía haber saturación en cualquiera de los CTs, aquí aparece en el transformador de potencia así que se verá desde cualquiera de los lados.

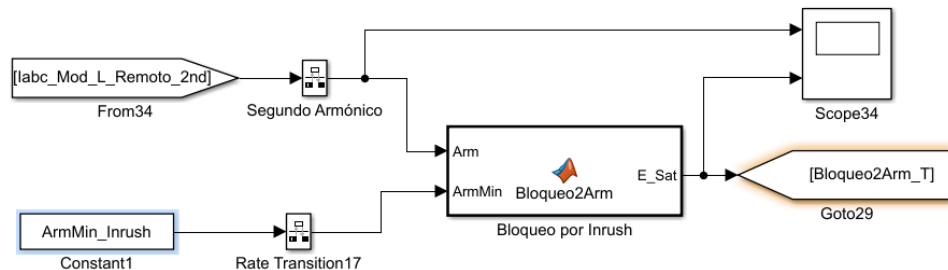


FIGURA 86. BLOQUE LÓGICA BLOQUEO POR 2º ARMÓNICO

Y el código se reduce a un bloque *for* que itera por las tres fases y si detecta que el módulo es superior a la constante *ArmMin\_Inrush* pone a uno la salida.

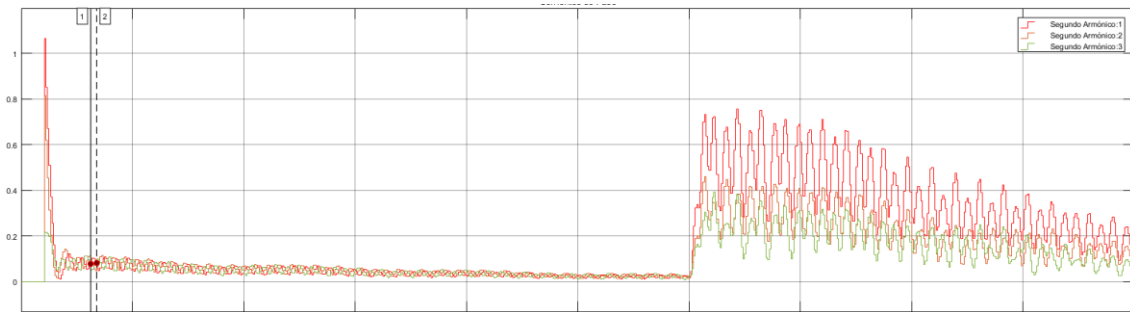
```
function E_Sat = Bloqueo2Arm (Arm, ArmMin)

E_Sat=0;

disp('-----')
disp('2º Armónico')

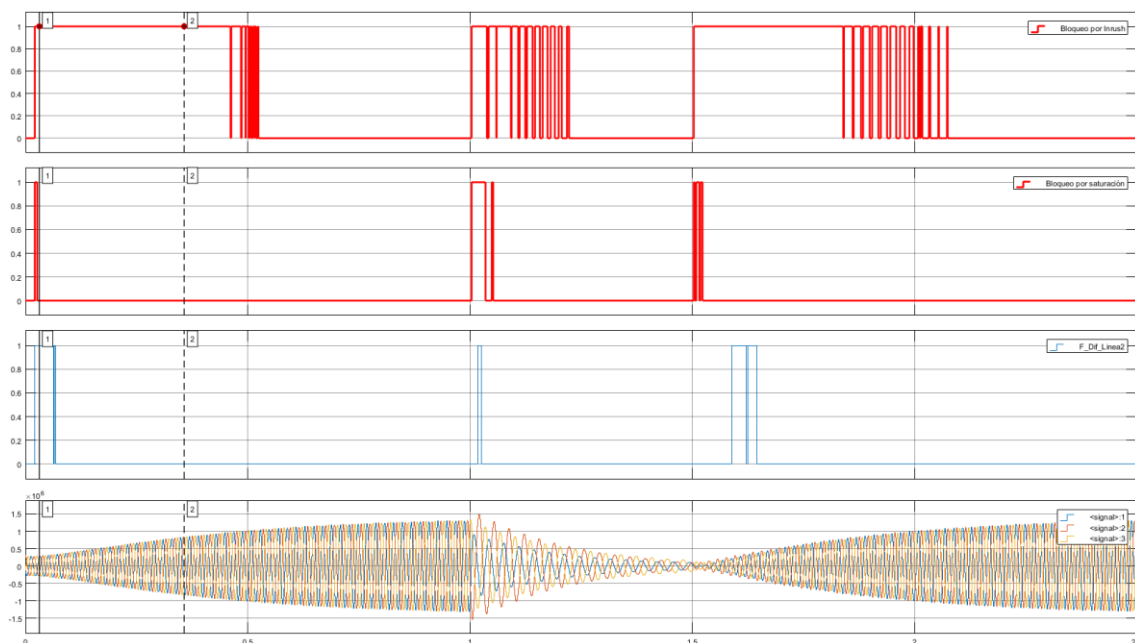
for i=1:3
    if Arm1(i)>ArmMin
        E_Sat=1;
    end
    disp(Arm(i))
    E_Sat=Arm(i);
end
disp('-----')
end
```

En el siguiente gráfico se puede observar el comportamiento del armónico para el arranque del transformador y para una falta en bornes del transformador. Obsérvese que en valor en el primer caso es mucho mayor ya que partimos de un transformador con el núcleo sin magnetizar y necesitaremos más corriente.



**FIGURA 87. CURVA DE 2º ARMÓNICO EN ARRANQUE Y FALTA**

Para ilustrar este fenómeno, se ha provocado una desconexión y una conexión del transformador en estado estacionario. Obsérvese como en ambos casos tenemos un disparo de la diferencial, pero al mismo tiempo saltan los bloqueos por saturación de los CTs y por Inrush. Estos bloqueos se aplicarán en la función de lógica de disparo que incluirá todas las protecciones (distancia, sobrecorriente, diferencial) y los bloqueos (Inrush, saturación y direccional) para tomar la decisión de disparar o no.



**FIGURA 88. DIFERENCIAL Y BLOQUEOS DE INRUSH Y SATURACIÓN ANTE APAGADO DEL TRANSFORMADOR**

### 2.5.11 50/51-Sobrecorriente

Para la amplitud de la corriente se empleará el cálculo numérico de la media cuadrática o valor eficaz (RMS, *root mean square*) de la onda. Este método es un cálculo numérico que reajusta el valor con cada nueva muestra, de modo que se suman los efectos de todos los armónicos presentes en la señal. La idea es que, al ser una protección de *backup*, conviene emplear un método de cálculo distinto al cálculo del fasor del armónico principal usando Fourier empleado en el resto de las protecciones.

El esquema de protección por sobrecorriente consiste en 3 unidades por fase más una unidad extra de neutro. Dicha unidad puede estar alimentada con la corriente medida en el neutro o por la corriente de desequilibrio de los 3 CTs de las fases.

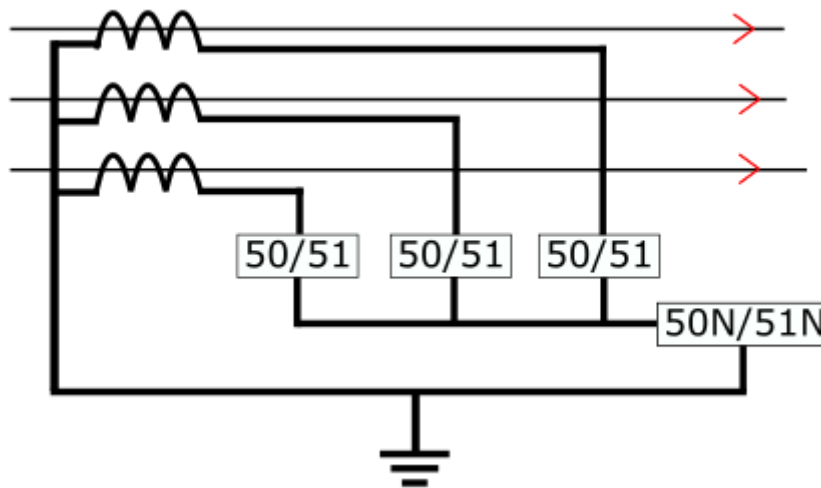


FIGURA 89. ESQUEMA DE PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE (FASE Y NEUTRO)

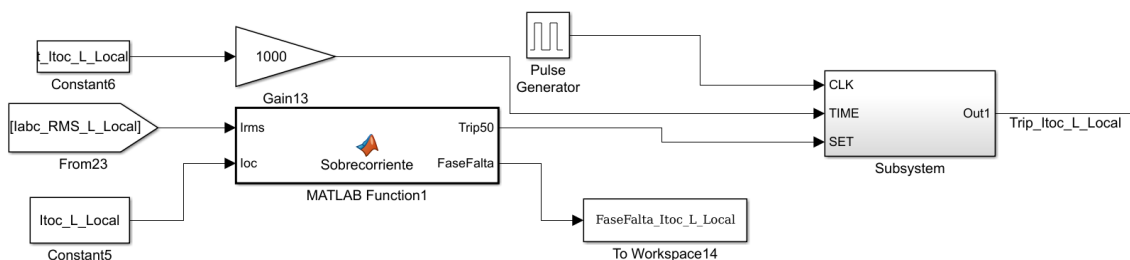
#### Tipos de protecciones de sobrecorriente:

- **Instantánea:** el relé dispara si la corriente supera el umbral  $I_{pu}$  (I pick-up).
- **Temporizada:** después de alcanzar un determinado valor  $I_{pu}$ , si este mantiene durante un tiempo determinado antes de disparar la protección. Este tiempo puede ser constante o depender del valor de la corriente (a mayor corriente menos tiempo). La razón corriente tiempo vendrá dada por una serie de curvas, las curvas IEEE.

#### 2.5.11.1 Implementación en Matlab

En un primer lugar se creará un bloque 50/51. La base de ambas será la misma, pero se empleará para la 51 un bloque temporizador. En este proyecto no se han usado las curvas IEEE, por lo que no será necesario implementarlas. Para el bloque en sí se seguirá el mismo principio que para la diferencial, solo que con una sola entrada de

corriente. Si una de las fases excede el valor de ajuste se dará disparo de sobrecorriente y se guardará la fase en falta en una matriz.



**FIGURA 90. BLOQUE SOBRECORRIENTE MÁS TEMPORIZADOR (FUNCIÓN 51)**

Más adelante, en la fig.95, se detallan los ajustes de las funciones de sobrecorriente. El generador de pulsos da un flanco de subida cada 0.01s, por eso se ha puesto en serie con el ajuste de retardo ( $t_{Itoc\_L\_Local}$  en la figura) una ganancia de 1000. De esta forma se puede poner el valor en segundos directamente en los ajustes. Aunque no tenemos sobrecorriente instantánea sí que tenemos unos valores de *pick-up* o advertencia para el SCADA que se simularán usando bloques de sobrecorriente instantánea. El código dentro del bloque de sobrecorriente es similar al de la diferencial, solo que en este caso también se crea un vector que indica que fases están en sobrecorriente:

```
for i=1:3
    if Irms(i) * (2^0.5) > Ioc
        FaseFalta(i) = 1
    end
end

if sum(FaseFalta) > 1
    Trip50 = 1;
end
```

El código completo se puede encontrar en el anexo correspondiente.

En la figura siguiente se puede ver como para una falta en la fase A tendremos una sobrecorriente que hará que salte la unidad 50, en este caso conectada a un temporizador que retrasará el disparo 0.1s (a modo de demostración).

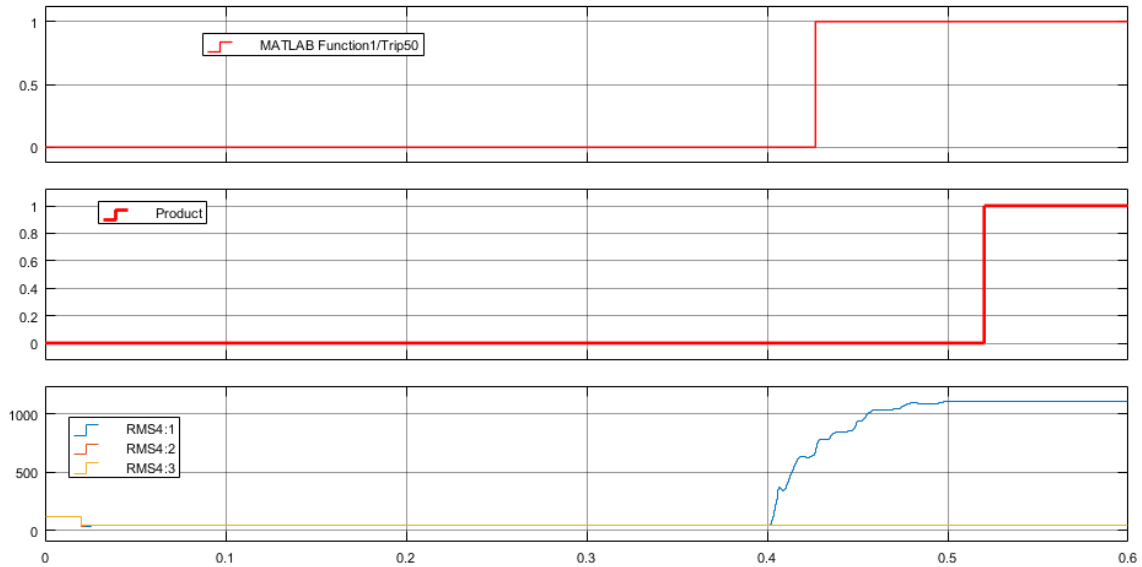


FIGURA 91. ACTUACIÓN DE LA UNIDAD DE SOBRECORRIENTE TEMPORIZADA

### 2.5.11.2 67: Protección de sobrecorriente direccional

Para garantizar la selectividad (disparar solo los interruptores necesarios para despejar la falta) al disparo de la unidad de sobrecorriente se le bloquea con una unidad direccional. Se empleará la unidad direccional cuyo funcionamiento se explicó en la sección de la unidad de distancia.

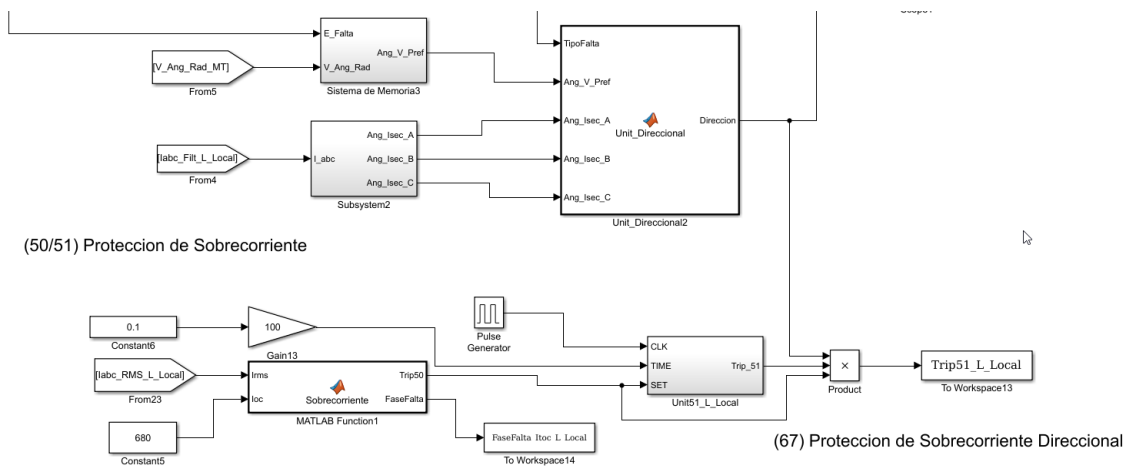


FIGURA 92. UNIDAD DE SOBRECORRIENTE TEMPORIZADA DIRECCIONAL

La implementación consiste simplemente en añadir a la condición de tiempo y sobrecorriente la condición de dirección.

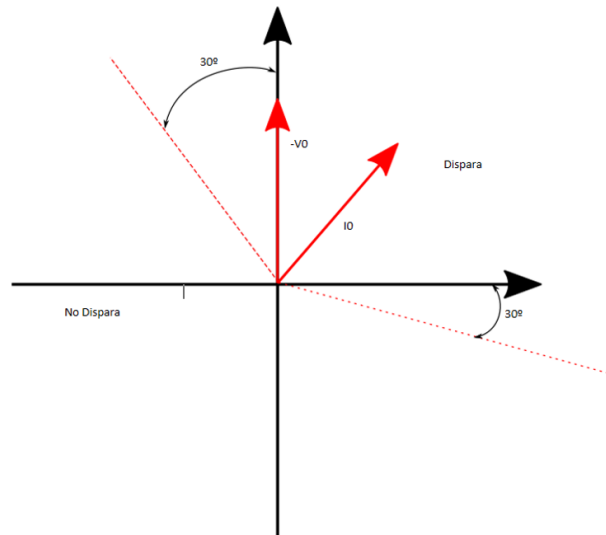
### 2.5.11.3 67N: Protección de sobrecorriente direccional de neutro

Para la línea y las conexiones de las granjas eólicas a la red se empleará la corriente homopolar, sin embargo, en el caso de los transformadores, tenemos CT de neutro por lo que se usará la corriente de neutro en lugar de la homopolar [9].

No se puede usar la unidad empleada previamente ya que se diseñó para un sistema trifásico. En el caso del neutro, la sobrecorriente direccional se calcula



comparando el ángulo de la corriente homopolar con la tensión homopolar multiplicada por -1. Para las protecciones situadas aguas abajo del transformador será la tensión medida por el VT de las barras de media mientras que para las protecciones aguas arriba será la tensión en barras del VT de media.

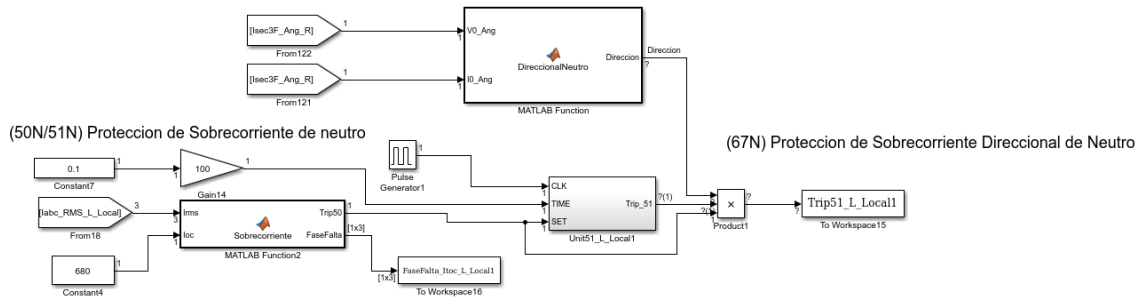


**FIGURA 93. DIAGRAMA FASORIAL UNIDAD DIRECCIONAL DE NEUTRO**

Por un lado, tenemos una función escrita con código Matlab cuyos argumentos serán los desfases de la tensión y la corriente homopolar. La salida será 0 si va en la dirección contraria y 1 si va en la dirección correcta. Se trabajará con el ángulo alfa que se calcula restando al desfase de la corriente el desfase de la tensión (ambas homopolares).

```
Alfa=Norm(Norm(V0_Ang(3))-Norm(Norm(I0_Ang(3)))) ;
if Alfa<(2*pi/3) || Alfa>(11*pi)/6
    Direccion=1
else
    Direccion=0
End
```

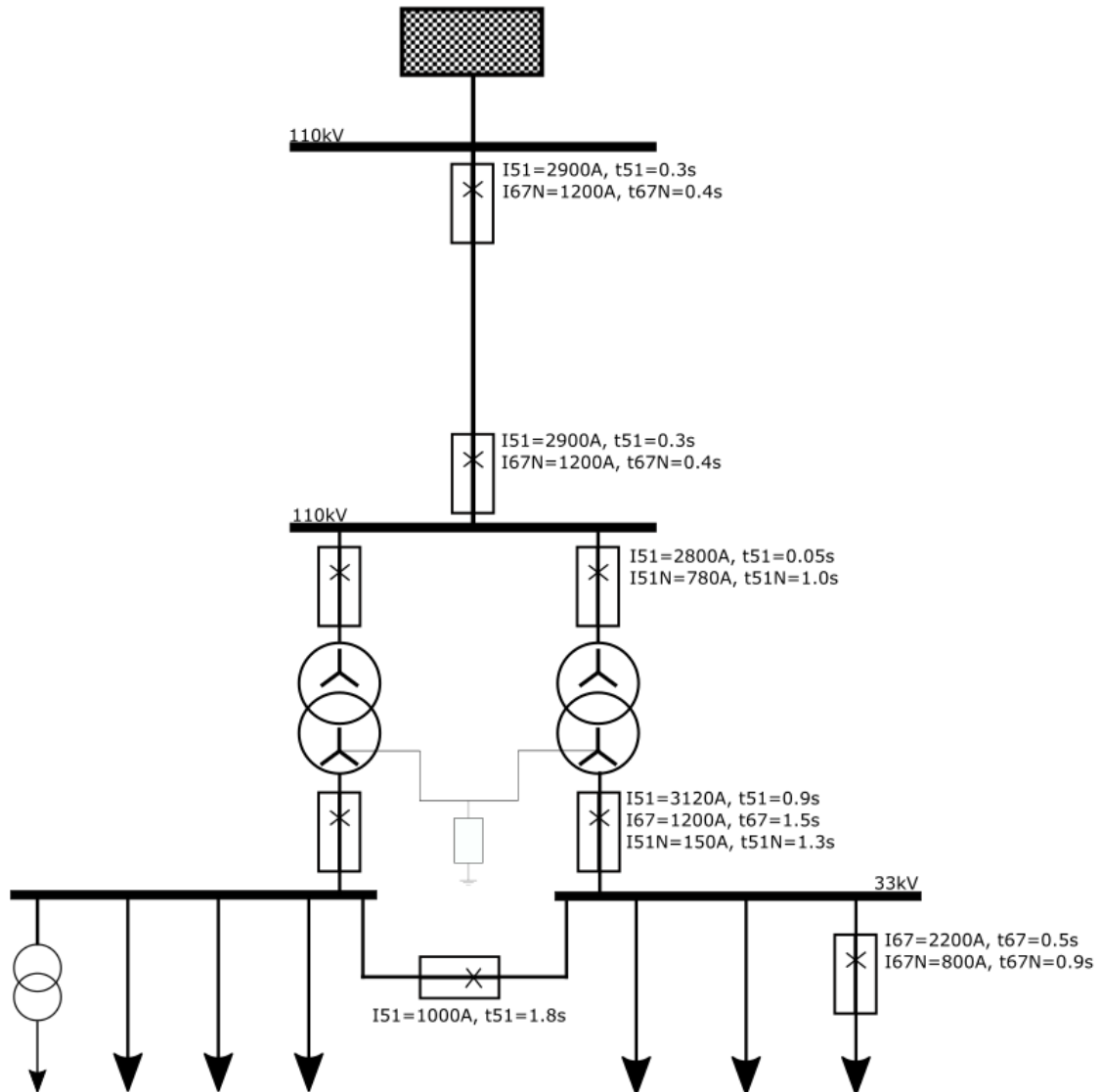
Por otro lado, se ha usado de nuevo el bloque de la sobrecorriente temporizada solo que alimentado con la corriente homopolar únicamente. La salida de este bloque será de 1 si se supera la corriente de disparo ajustada durante un tiempo determinado. Esa salida, después, se multiplica por la salida del bloque diferencial, dando como resultado el disparo de la sobrecorriente direccional de neutro.



**FIGURA 94. UNIDAD SOBRECORRIENTE DIRECCIONAL DE NEUTRO**

#### 2.5.11.4 Ajustes de las unidades de sobrecorriente

En la siguiente figura se pueden ver los distintos ajustes de las distintas unidades de sobrecorriente de los distintos interruptores del sistema. Como se puede ver en todos está presente el elemento direccional y el de tierra. Estos ajustes se codificarán en el script de iniciación en Matlab desde el que se llama el modelo en Simulink. Por último, los conos representan las direcciones a las que “apuntan” las unidades direccionales.



**FIGURA 95. DIAGRAMA DE PROTECCIONES DE SOBRECORRIENTE**

Nótese que en esta subestación no tenemos diferencial de barras, por lo que estas están protegidas por las protecciones de sobrecorriente. En la barra superior, en caso de falta en barras dispararía en interruptor local de la línea. Como solo tenemos una línea, no queda más remedio que dejar sin servicio a la instalación. Sin embargo, como tenemos media barra partida en MT, en caso de falta en una de las semibarras, dispararía el interruptor de media del transformador correspondiente y el interruptor central, el cual, en caso de estar cerrado, tendría que abrirse. Por eso no tenemos sobrecorriente direccional en el coupler.

Los ajustes se incluyen en el script de iniciación:

```
%Ajustes proteccion de sobrecorriente
%51-Ajustes sobrecorriente temporizada (Amperios, segundos)
Ajst_51_L_L=[1900 0.3];
Ajst_51_L_R=[1900 0.3];
Ajst_51_AT_T=[1700 0.05];
Ajst_51_MT_T=[3120 0.5];
%67N-Ajustes sobrecorriente temporizada direccional de neutro
(Amperios, segundos)
Ajst_67N_L_R=[1200 0.3];
Ajst_67N_L_L=[50 0.4];
Ajst_67N_F=[800 0.9];
%IN-Sobrecorriente en el CT de puesta a tierra del trafo
Ajst_51N_AT_T=[780 1];
Ajst_51N_MT_T=[150 1.3];
%67-Sobrecorriente direccional
Ajst_67_F=[2200 0.5];
```



### 3 Metodología

#### 3.1 Tareas fases y equipos

##### 3.1.1 Comprobación de ajustes y situación de las faltas

La última parte de este trabajo consiste en estudiar la coordinación de las distintas protecciones en caso de falta. En el esquema siguiente se representan la localización de las faltas que se van a simular y las protecciones. En todos los casos se simulará una falta monofásica, una bifásica sin tierra una bifásica con tierra y una trifásica.

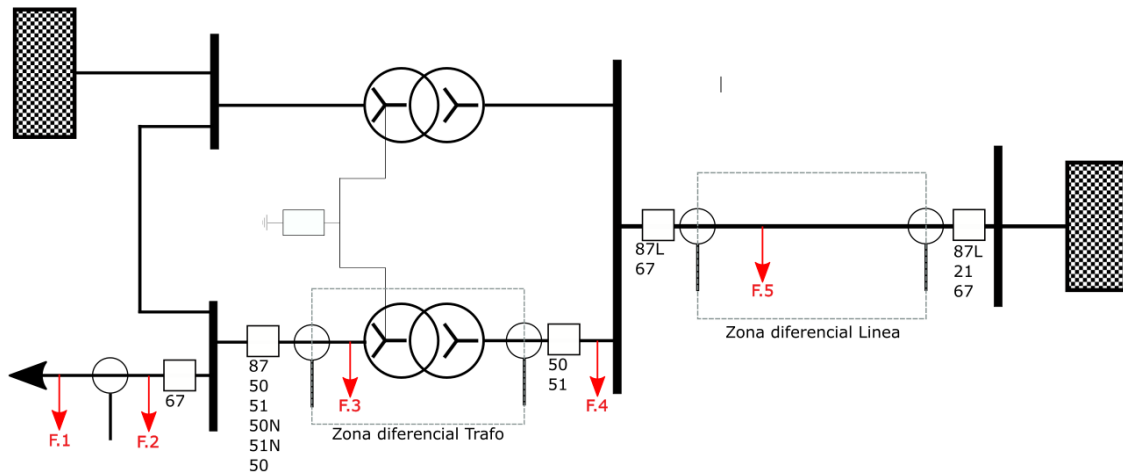


FIGURA 96. LOCALIZACIÓN FALTAS EN PRUEBAS

El modelo que se describió en el capítulo 1 ha sido simplificado para que la simulación se pueda llevar a cabo en un tiempo razonable. En la práctica sería necesario probar más faltas y más situaciones de falta (distinta configuración de barras, distinta carga de los transformadores, faltas simultáneas...). Sin embargo, para no exceder el alcance del trabajo solo se simularán las descritas en el esquema de la figura 18.

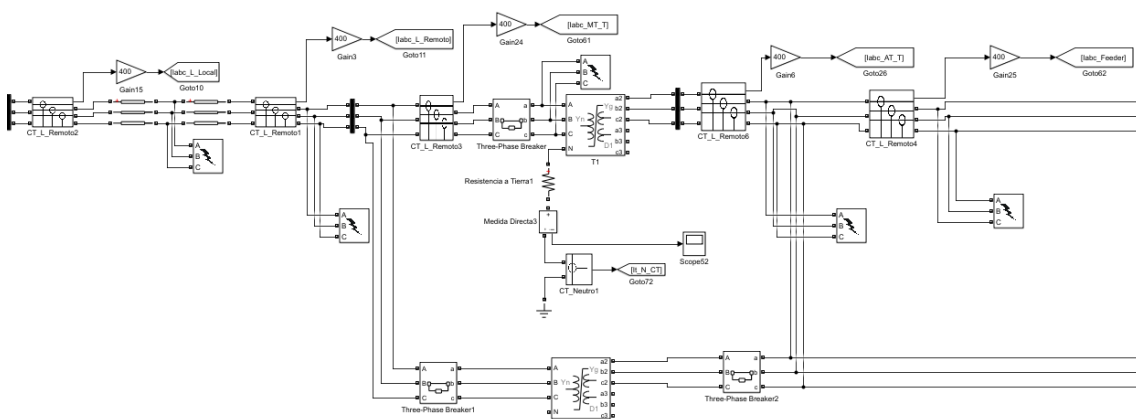


FIGURA 97. MODELO PARA PRUEBA DE COORDINACIÓN DE AJUSTES

#### 3.2 Descripción y análisis de resultados

##### 3.2.1.1 Falta 5: línea de Alta

Es este caso deberán saltar las protecciones de diferencial de línea, distancia, sobrecorriente temporizada y sobrecorriente direccional de neutro. Para simularlas

usamos el CT de cabecera de línea (que denominamos local) y la tensión medida en la cabecera de forma directa (sensor ideal).

### 3.2.1.1.1 Falta en fase A

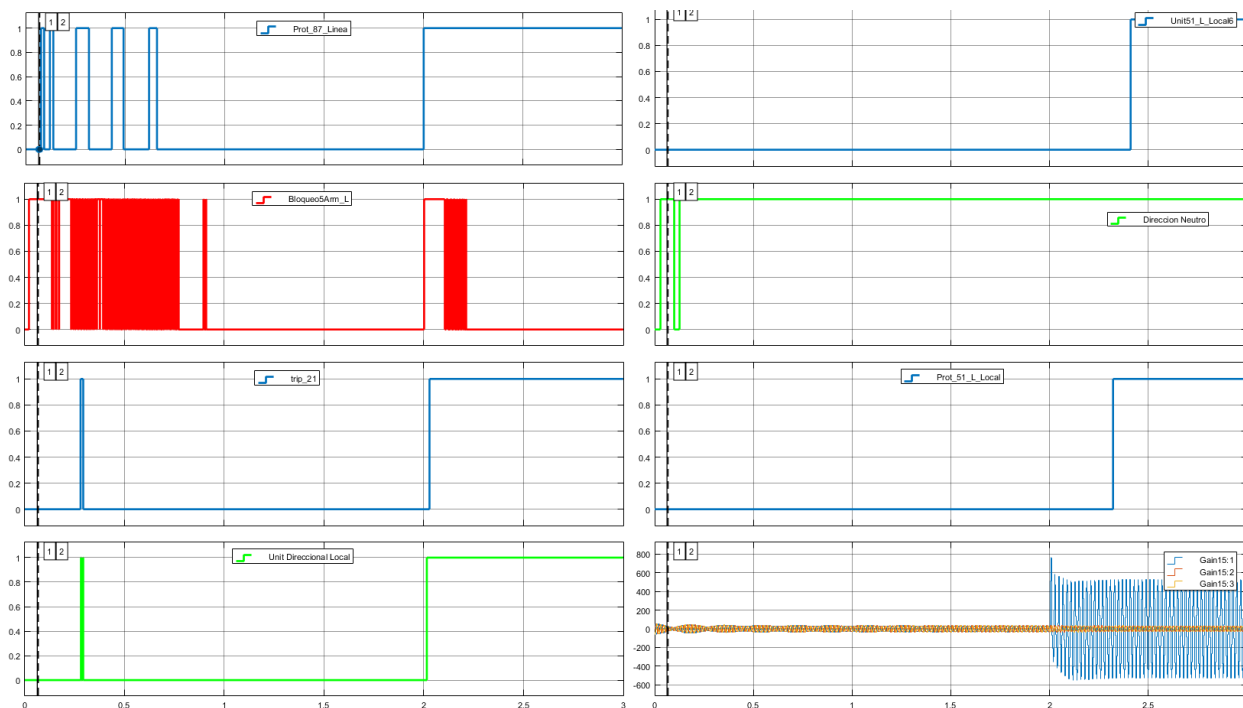


FIGURA 98. FALTA FASE A EN LA LÍNEA

En el gráfico se muestran en azul las protecciones, en verde los permisos (señales que tienen que estar a 1 para que se dé la orden de disparo) y en rojo los bloqueos (en este caso, solo el bloqueo por 5<sup>o</sup> armónico). En el instante 0 la línea se encuentra desenergizada y en el segundo 2 se produce una falta en la fase A. Obsérvese también la evolución de la corriente en la parte inferior derecha.

Al energizar la línea, la protección diferencial da varios falsos positivos, sin embargo, esta situación transitoria es detectada por la señal de bloqueo por saturación. Si que es cierto que el bloqueo es errático, por eso en un caso real sería interesante implementar algún tipo de filtro para dar estabilidad a la señal.

Cuando se produce la falta, durante 0.1s aprox. El detector de saturación bloquea el disparo. Las protecciones de distancia y diferencial entran instantáneamente. La falta se situaba a 12km de la línea (zona 1, sin retardo). No se ha simulado apertura de los interruptores, así que la falta continua, saltando las protecciones de sobrecorriente temporizada y sobrecorriente temporizada direccional de neutro, con sus respectivos retardos. La distancia calculada está muy cerca de la distancia real:

## 3.2.1.1.2 Falta fases A y B a neutro

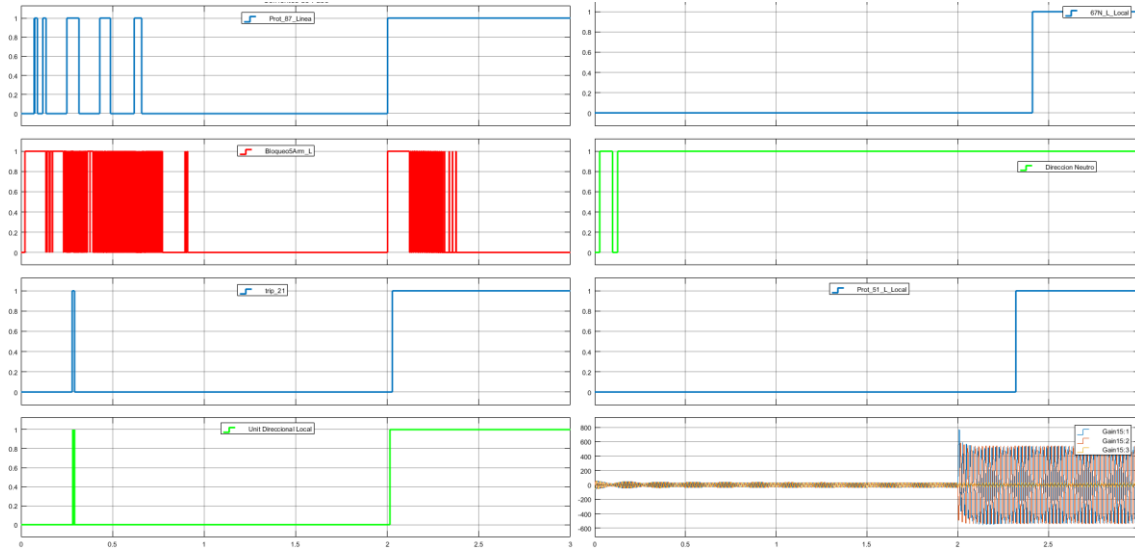


FIGURA 99.FALTA FASES A Y B A NEUTRO

Se ha mantenido esquema de colores y disposición. El resultado es similar al caso anterior. En ambos casos se observa que la diferencial es un poco más rápida que la unidad de distancia, pero ya que bloqueamos la unidad mientras hay saturación esto no interfiere en el resultado final. Por último, al haber 2 fases en falta, el 5º armónico tarda más en estabilizarse, hasta los 0.4 segundos, similar a los retardos de las unidades de sobrecorriente.

La distancia calculada por la unidad de distancia está muy cerca de la real, cometiendo un error de solo 200m:

```

-----
F_Tipo_Falta
ABN
-----
Ec_Distancia:
Distancia AB/ABN:
    11.8363
-----
Logica Disparo
Zona:
    1

```

## 3.2.1.1.3 Falta trifásica

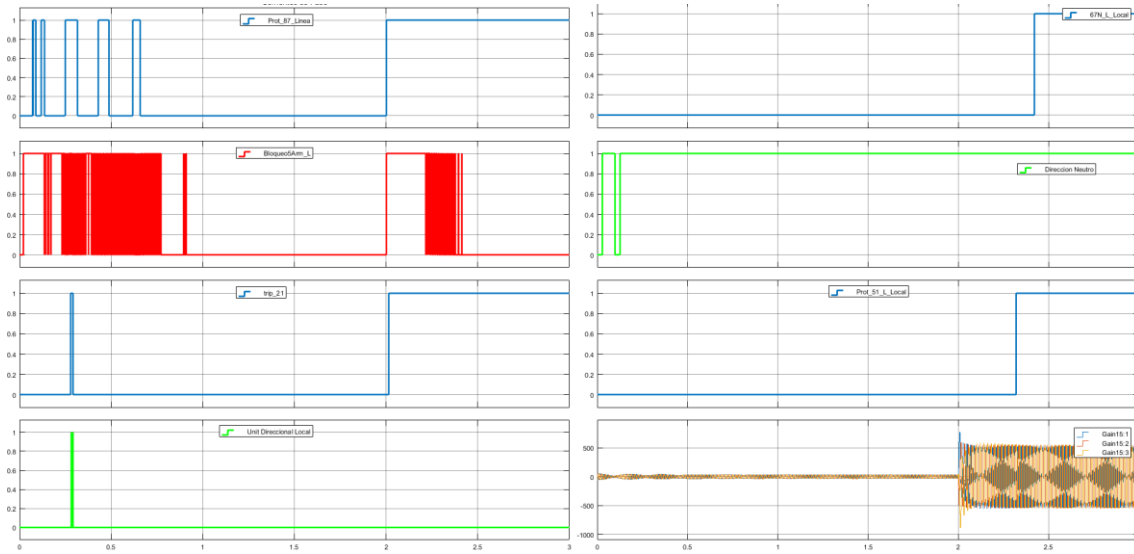


FIGURA 100. FALTA TRIFÁSICA EN LA LÍNEA

## 3.2.1.2 Falta en barras de alta

## 3.2.1.2.1 Falta monofásica

La falta en barras de alta será detectada por el CT del extremo de la línea que se conecta con la subestación. Se empleará el mismo juego de gráficos que en el caso anterior. Se comprobará que la unidad de distancia detecta la falta en zona 3. Además, se comprobará la coordinación de las protecciones de sobrecorriente de ambos lados de la línea.

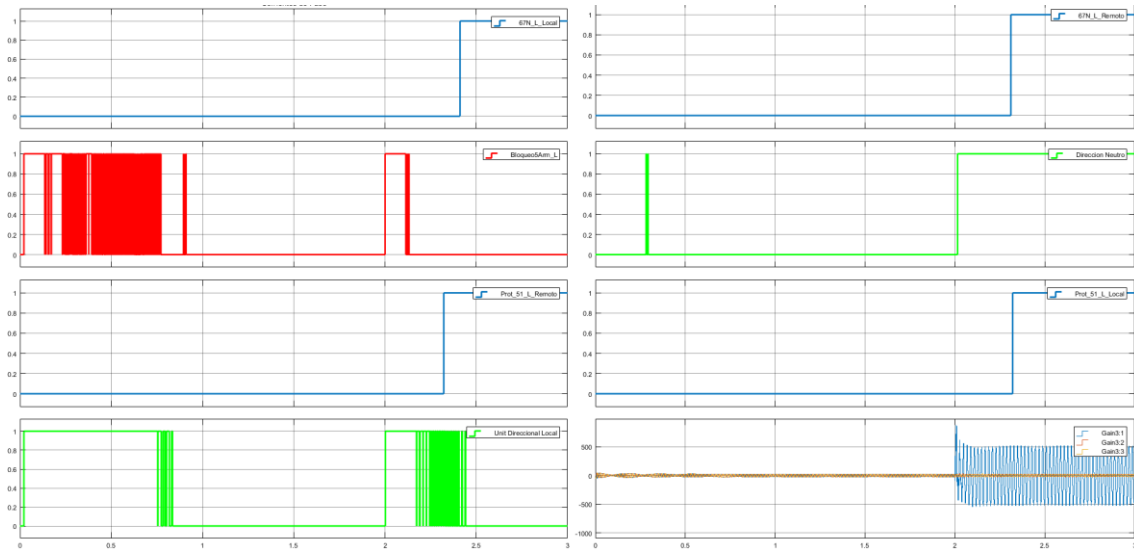


FIGURA 101. FALTA MONOFÁSICA EN BARRAS DE ALTA

Las protecciones de sobrecorriente instantánea disparan antes que las de neutros direccionales. El pico de corriente inicial es muy alto y esto es debido a que la componente continua no ha sido eliminada correctamente de la señal por el filtro mimic. Esto se debe a que la constante del sistema cambia al salir de la línea. También se aprecia en los gráficos como el retardo de la 67 local hace que dispare más tarde que la



protección en el lado remoto (más cercano a la falta). Por último, en la siguiente figura se muestran las protecciones de la línea.

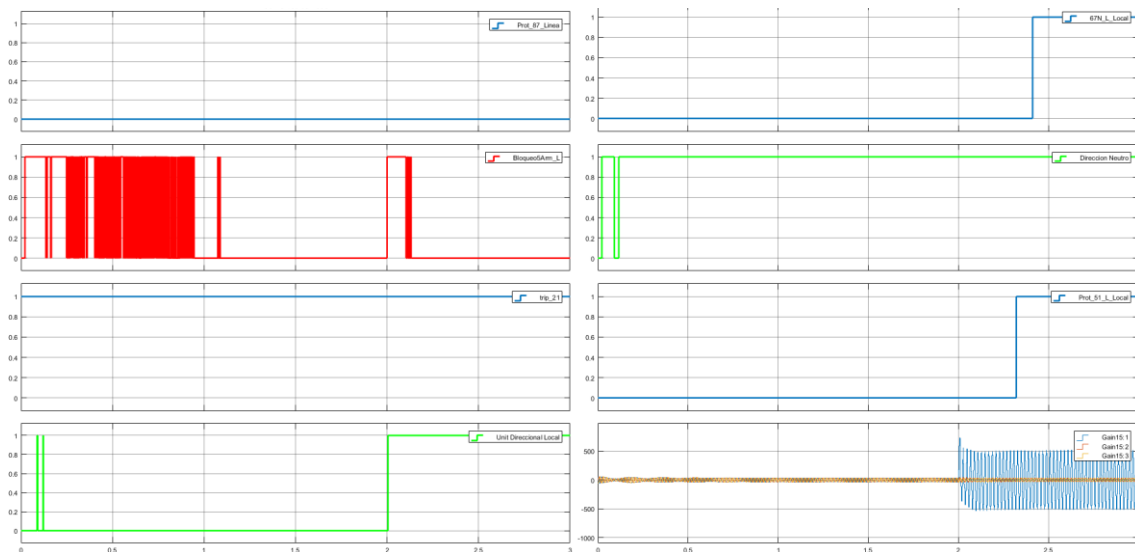


FIGURA 102. PROTECCIONES DE LÍNEA EN FALTA MONOFÁSICA EN BARRAS

La diferencial de línea dispara, pero el bloqueo por saturación y el de 5º armónico también se activan evitando el disparo por diferencial. La protección de distancia también ve la falta en zona 2 por lo que dispara con retraso (en este caso actuaría como protección de backup de las protecciones del extremo remoto).

Resultado del cálculo de distancia:

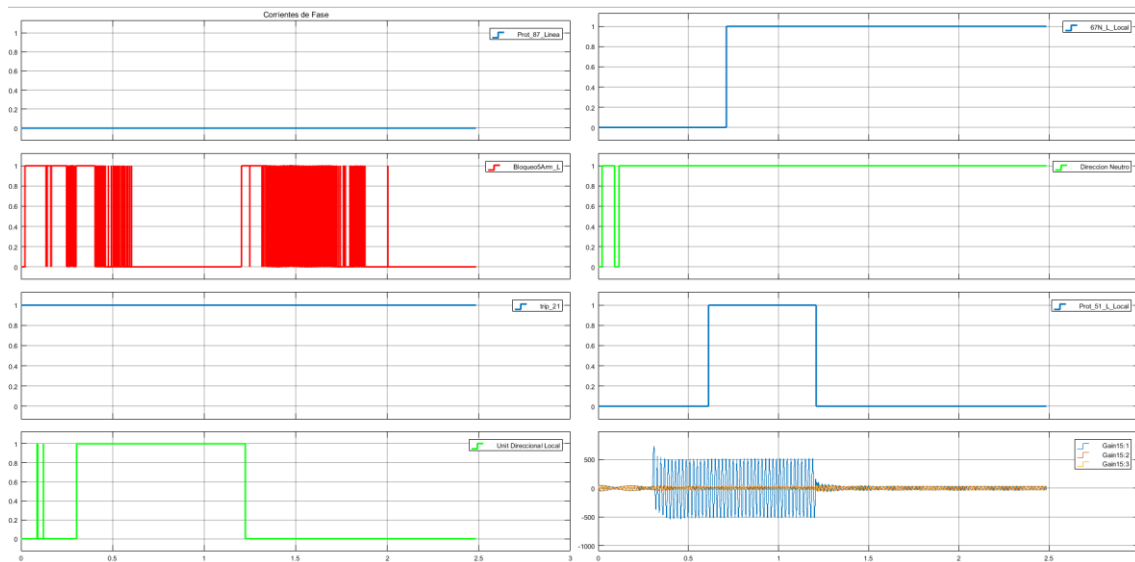
```

-----
Logica Disparo
Zona:
    2
-----
F_Tipo_Falta
AN
-----
Ec_Distancia:
Distancia AN:
    19.9406
    19.9402 + 0.1231i
-----

```

### 3.2.1.2.2 Falta bifásica

Se ha simulado una falta bifásica que aparece y desaparece pasado un tiempo, se ve como las funciones de protección de sobrecorriente pasan a cero después de desaparecida la falta. Tampoco tenemos disparo del diferencial, aunque en todo caso el bloqueo por saturación se ha activado



**FIGURA 103. PROTECCIONES DE BARRAS DE ALTA ANTE FALTA BIFÁSICA**

No se ha podido seguir simulando ya que al activar también los bloques correspondientes a las protecciones del transformador el tiempo necesario para realizar la simulación era demasiado largo. Por ejemplo, eran necesarios mas de 15 minutos para 3 segundos de tiempo de simulación

### 3.3 Conclusiones

Antes de pasar a las conclusiones propiamente dichas, convendría recordar primero los objetivos que se plantearon al principio del trabajo, para ir comentándolos después punto por punto.

1. Simular el sistema de potencia correspondiente a la conexión de una granja eólica a la red incluyendo:
  - a. Línea
  - b. Transformadores
  - c. Esquema de conexión
  - d. Instrumentos de medida
  - e. Equivalente de la red en el punto de conexión
2. Simular el sistema de protección:
  - a. Sistema de filtrado y obtención de valores del relé
  - b. Lógicas de protección
  - c. Crear una librería de funciones de protección que se pueda utilizar en futuros proyectos
3. Comprobar los ajustes dados mediante la simulación de distintas faltas.

Para el primer punto, los resultados han sido intermedios. Aunque se ha conseguido un sistema estable que reproduce bastante bien el comportamiento de un sistema eléctrico. Sin embargo, han faltado datos y pruebas para asegurar que ese sistema que se simula se comporta exactamente igual que el sistema real que se quiere modelizar. Por ejemplo, estableciendo una metodología de pruebas previas con corrientes de cortocircuito esperadas en distintos puntos del sistema o comportamiento y datos reales de los transformadores de potencia y de medida.

Para el segundo punto, que es en el que más tiempo se ha invertido, se han conseguido simular todas las protecciones, bloqueos y permisivos que se pretendían. También se ha conseguido modelar e sistema de obtención de fasores que emplea el relé real y han respondido bastante bien a las faltas (aunque aún hay casos en los que la lógica falla). Sin embargo, aunque la lógica es correcta, al haber realizado muchas lógicas empleando funciones de Matlab integradas en Simulink, la velocidad de la simulación es demasiado lenta. Tardando varios minutos en simular 3 segundos de funcionamiento del sistema. Sería conveniente reescribir la lógica empleando el código gráfico de Simulink que es mucho más rápido.

Por último, para la comprobación de ajustes, habría que convertir las funciones codificadas en lenguaje Matlab en lenguaje gráfico de Simulink para poder simular correctamente todo el sistema. Sin embargo, los resultados obtenidos para faltas en línea, barras y transformador son lo suficientemente prometedores como para que esto merezca la pena.



#### 4 Anexo 1: Lista de funciones de Protección

21	Protección de Distancia
50	Sobrecorriente instantánea
51	Sobrecorriente instantánea temporizada
67	Sobrecorriente direccional
87	Diferencial

## 5 Anexo 2: Método de las redes de secuencia

Es un método estándar para el cálculo de faltas y el que se ha empleado como base teórica para los algoritmos de las protecciones. En esencia, permite estudiar el sistema trifásico desequilibrado que aparece después de una falta como 3 sistemas equilibrados conectados entre sí mediante unas matrices de transformación que permiten pasar de uno a otro [10].

Se incluye aquí como anexo una explicación de este método ya que no es posible entender la descripción de la solución adoptada sin entender este método.

### 5.1.1.1 Redes de secuencia

Esta sección sirve como introducción a la teoría de faltas en el SEP. Una falta es todo fallo o forma de operación no deseada en el SEP. Existen dos causas:

- Cortocircuitos: conexión accidental a través de una impedancia muy baja de dos o más puntos con diferentes tensiones del SEP.
- Falta serie: ocasionados por desequilibrios de impedancias. Se deben por ejemplo a la apertura de una o dos fases.

La mayoría de faltas que se producen en el sistema eléctrico son cortocircuitos. Para analizar el comportamiento del sistema en falta se utiliza el “Método de las componentes simétricas”, que se expone a continuación:

Sea un sistema trifásico equilibrado de tensiones e intensidades con las tres fases con mismo módulo, pero desfasadas  $120^\circ$  entre sí:

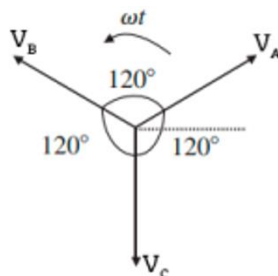


FIGURA 104. SENTIDO DE GIRO DE LOS FASORES DE FASE

Sabemos que las tensiones  $V_A$ ,  $V_B$  y  $V_C$  son:

$$V_A = \sqrt{2} V_{rms} e^{j\varphi}$$

$$V_B = \sqrt{2} V_{rms} e^{j\varphi - \frac{2\pi}{3}}$$

$$V_C = \sqrt{2} V_{rms} e^{j\varphi + \frac{2\pi}{3}}$$

Siendo  $\varphi$  el desfase respecto de la referencia de tiempo y  $V_{rms}$  el valor eficaz de la onda. Para formar las componentes simétricas se define un número complejo  $a$  con módulo unidad y argumento  $120^\circ$  en sentido antihorario. En relación al operador  $a$ , se definirá como:

$$a = e^{\frac{2\pi}{3}j}$$

Su cuadrado será:

$$a = e^{-\frac{2\pi}{3}j}$$

Y, además:

$$1 + a + a^2 = 0$$

Si ahora se ponen todas las tensiones en función de  $V_A$  y el operador  $a$  y tenemos que:

$$V_{ABC} = \begin{pmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_A \\ a^2 V_A \\ a V_A \end{pmatrix}$$

Del mismo modo, podemos poner las intensidades en función de  $I_A$  y a:

$$I_{ABC} = \begin{pmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_A \\ a^2 I_A \\ a I_A \end{pmatrix}$$

Durante la falta, nuestro sistema pasará a ser desequilibrado, y los sistemas desequilibrados son difíciles de calcular. Como solución se empleará el teorema de las componentes simétricas, que dice que todo sistema desequilibrado se puede expresar como suma de 3 sistemas equilibrados o 3 secuencias. Estas secuencias son la directa la inversa y la homopolar:

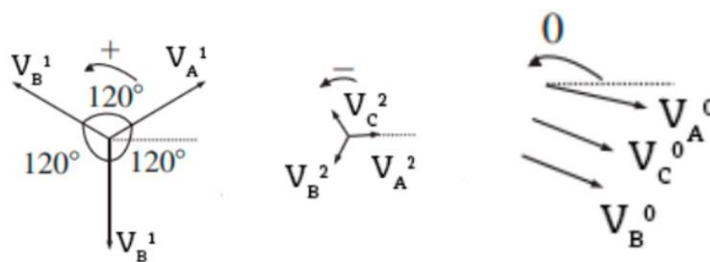
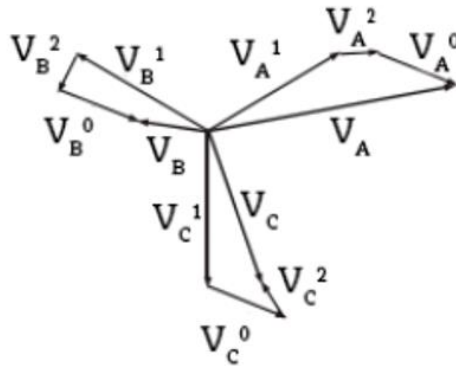


FIGURA 105. FASORES DE FASE DIRECTA, INVERSA Y HOMOPOLAR

La suma de estas tres secuencias dará como resultado el sistema desequilibrado de tensiones original:



**FIGURA 106.**SISTEMA TRIFÁSICO DESEQUILBRADO EXPRESADO COMO SUMA DE REDES DE SECUENCIA

Si ahora expresamos las tensiones en función de estas secuencias, siendo el subíndice 1 el correspondiente a la secuencia directa, el 2 a la inversa y el 0 a la homopolar obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$V_A = V_{A0} + V_{A1} + V_{A2}$$

$$V_B = V_{B0} + V_{B1} + V_{B2} = V_{A0} + a^2 V_{A1} + a V_{A2}$$

$$V_C = V_{C0} + V_{C1} + V_{C2} = V_{A0} + a V_{A1} + a^2 V_{A2}$$

Expresando las anteriores ecuaciones en forma matricial:

$$V_{ABC} = \begin{pmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = [A] \begin{pmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{pmatrix}$$

Por último, si ahora despejamos las componentes simétricas obtenemos la relación inversa:

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_A + V_B + V_C)$$

$$V_1 = \frac{1}{3}(V_A + aV_B + a^2V_C)$$

$$V_2 = \frac{1}{3}(V_A + a^2V_B + aV_C)$$

Igual que se han calculado las tensiones de las distintas secuencias para las tensiones se calculan para las intensidades:

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C)$$

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_A + aI_B + a^2I_C)$$



$$I_2 = \frac{1}{3}(I_A + a^2 I_B + a I_C)$$

Además, en un sistema trifásico conectado en estrella, la corriente neutra  $I_N$  es la suma de las corrientes de línea:

$$I_N = I_A + I_B + I_C = 3I_0$$

Conocer el valor de la intensidad de neutro será importante para modelizar las protecciones. Con esto ya tenemos los conocimientos necesarios para pasar al siguiente apartado, donde se explicarán los distintos tipos de faltas que se pueden dar en el sistema y las redes de secuencia asociadas.

#### 5.1.1.2 Cálculos de faltas

Ya se han explicado los conceptos fundamentales de las faltas. Ahora se puede pasar a explicar para qué tipos de faltas debe estar preparado el relé. Un sistema de tensiones e intensidades desequilibrado puede representarse por sus componentes simétricas: secuencia directa, secuencia inversa y secuencia homopolar. Para explicar los tipos de falta se representará cada secuencia de las componentes simétricas como un circuito de secuencia a los que podemos aplicar el monofásico equivalente.

Fundamentalmente existen tres tipos de falta:

**Monofásica:** Se produce cuando hay una conexión entre una fase y tierra.

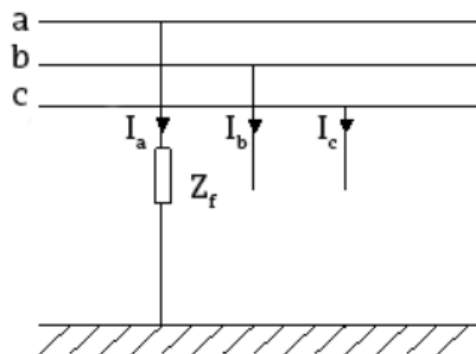


FIGURA 107. ESQUEMA FALTA MONOFÁSICA

**Bifásica:** Se produce cuando una conexión entre dos fases.

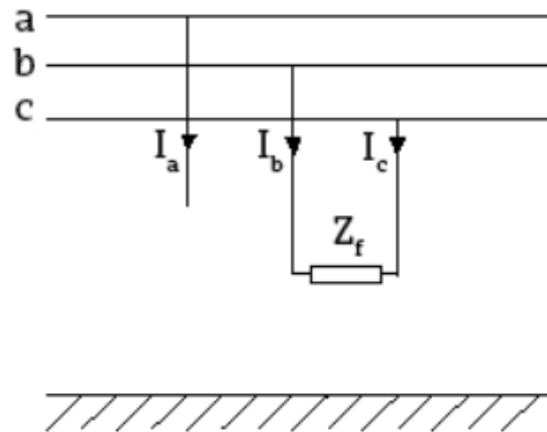


FIGURA 108. ESQUEMA FALTA BIFÁSICA

**Falta trifásica:** La falta trifásica a efectos prácticos no deja de ser un conjunto de dos faltas bifásicas. Se produce cuando hay conexión entre todas las fases.

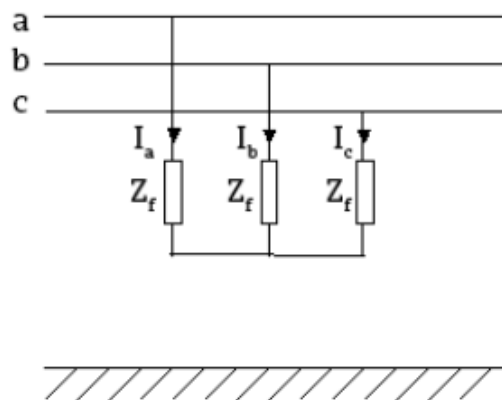


FIGURA 109. ESQUEMA FALTA TRIFÁSICA

Cada tipo de falta tiene un circuito de secuencia asociado. Por lo tanto, los cálculos dependerán del tipo de falta que se haya producido, ya que cada falta es efectivamente una reconfiguración del circuito eléctrico prefalta. Por eso, más adelante se detalla el funcionamiento de un selector de falta que permite detectar el tipo de falta y las fases afectadas. A continuación, se van a explicar cómo se conectan las redes de secuencia para cada tipo de falta.

#### 5.1.1.3 Redes de secuencia

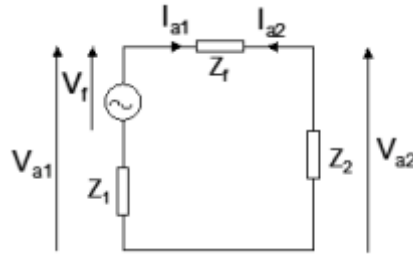
Falta bifásica

En la falta monofásica existe un contacto entre dos fases, tal y como se puede observar en la figura 12. En este tipo de faltas la resistencia de falta que aparece es:

$$R_{\text{FAULT}} = R_{\text{ARC}} \quad (7.23)$$

Al no ser una resistencia muy grande, cualquier falta en la zona acotada caerá dentro de la zona de operación de la característica Mho.

El circuito en componentes simétricas equivalente es el formado por el paralelo de la red de secuencia directa e inversa:

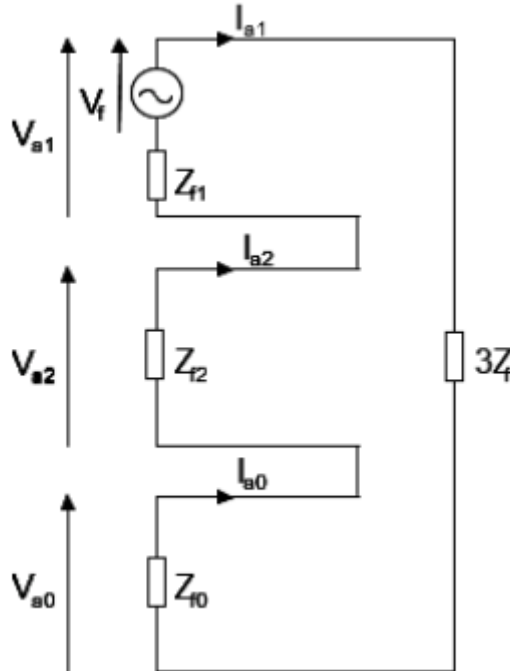


La falta monofásica ocurre por un contacto entre una fase y la tierra, como se representa en la figura 11. En este caso la resistencia de falta que aparece es mayor que en el caso de la bifásica, puesto que además de la resistencia debida al arco aparece otra resistencia debida a la tierra:

$$R_{FAULT} = R_{ARC} + R_{GROUNDING} \quad (7.24)$$

Es lógico pensar que si la componente resistiva es mayor, si se utiliza la característica Mho la impedancia puede caer fuera de la zona de operación cuando realmente existe una falta en la zona a cubrir. Es por esta razón por la que se utiliza en los casos de falta monofásica la característica cuadrangular.

Por otra parte, el equivalente Thévenin de una falta monofásica es:



Como se puede apreciar en este caso existen las tres redes, secuencia directa, inversa y homopolar, y se conectan en serie.

### 7.2.3. Falta trifásica

Como ya se ha dicho previamente, una falta trifásica, en esencia, no deja de

ser la suma de dos faltas bifásicas, como se puede ver en la figura 13. Por la misma razón que la Mho se ajustaba de manera idónea a la falta bifásica, resultará también adecuada para la falta trifásica. En este caso el sistema está equilibrado y el equivalente Thévenin está formado sólo por la red de secuencia directa:

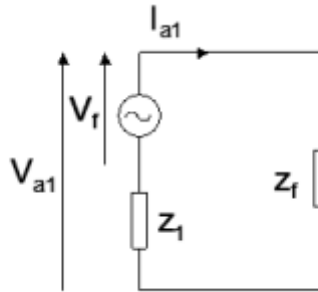


FIGURA 110. ESQUEMA REDES DE SECUENCIA FALTA TRIFÁSICA

## 6 Anexo 3: Código

### 6.1 Script de inicialización

```

%Grados a Rad:
DaR=3.1416/180;

%Longitud Linea:
L=19.35;

%[r1 r0]=[0.01273 0.3864]
%[l1 l0]=[0.9337e-3 4.1264e-3]
%[c1 c0]=[12.74e-9 7.751e-9]

%Prm de linea:
RL1=0.1035*L;
LL1=(1.2634e-3)*L;
CL1=12.74e-9;
XL1=0.1222;
ZL1=RL1+XL1*1j;

%Parametros MIMIC
Tau=RL1/LL1; %Esto seria tau^-1, poner bien en modelo
N=64; %Muestras por ciclo rele
K=(1/(((1+Tau)-Tau*cos((2*pi)/N))^2+(Tau*sin((2*pi)/N))^2))^0.5;
Desf_Mimic=atan((Tau*sin((2*pi)/N))/(1+Tau-Tau*cos((2*pi)/N))); %en
rad

%Prm por unidad de distancia (teórico)
% Z_1=(2.02+7.74*1i)/L;
% Z_0=(4.51+23.65*1i)/L;
Z_1=0.0998+0.1222j;
Z_0=0.3569+0.3556j;

%Corriente nominal
Inom_L=25;
In=25;

%Cte para ec Mnfsc a tierra
Kn=(Z_0-Z_1)/(3*Z_1);

%Filtro Mimic corrientes:
K3=1/((RL1^2+XL1^2)^0.5);

%Prm por unidad de distancia (teórico)
%Z_1=0.0998+0.1222j;

%Ajuste Zonas de proteccion:
% Ajst_i=[Modulo Impedancia de zona, tiempo de retardo, alcance
resistivo]
Ajst_1_L=[6.57 0 15];
Ajst_2_L=[14.5 0.4 21];
Ajst_3_L=[1.16 0.15 15];
%Ajuste Blinders:

```

```

Rf_Zona1=15;
Rf_Zona2=21;
Rf_Zona3=15;

%Ajustes proteccion de sobrecorriente
%51-Ajustes sobrecorriente temporizada (Amperios, segundos)
Ajst_51_L_L=[1900 0.3];
Ajst_51_L_R=[1900 0.3];
Ajst_51_AT_T=[1700 0.05];
Ajst_51_MT_T=[3120 0.5];
%67N-Ajustes sobrecorriente temporizada direccional de neutro
(Amperios, segundos)
Ajst_67N_L_R=[1200 0.3];
Ajst_67N_L_L=[50 0.4];
Ajst_67N_F=[800 0.9];
%IN-Sobrecorriente en el CT de puesta a tierra del trafo
Ajst_51N_AT_T=[780 1];
Ajst_51N_MT_T=[150 1.3];
%67-Sobrecorriente direccional
Ajst_67_F=[2200 0.5];

%Diferecnial
%Ajuste diferecnial del Transformador
m1_T=0.1;
m2_T=0.3;
IS2_T=5;

RT_MT_T=400;
RT_AT_T=1;

Kcomp=10/9;

ArmMin_Linea=0.5;

sim('LineaFinal_V08')

```

## 6.2 Unidad de distancia

```

function [E_Falta_f,TipoFalta_f,Zona_f,t_disp_f,Trip_f,Distancia_f] =
ProteccionDistancia(Iabc,AnguloIsec,
ModuloIsec,In,Iabc_V,Vabc_V,Isec_A_V,Vsec_A_Vct,Z_1,Z_0,Kn,Ajst_1,Ajst_2,Ajst_3)

```

```

[E_Falta_f,TipoFalta_f]=F_TipoFalta_LimiteOCVariable(Iabc,AnguloIsec,
ModuloIsec,In);

```

```

[Distancia_f,Imp_Falta_f] =
EcDistancia(TipoFalta_f,Iabc_V,Vabc_V,Isec_A_V,Vsec_A_Vct,Z_1,Z_0,Kn);

```

```

[Zona_f,t_disp_f,Trip_f] =
SelectorZona(Imp_Falta_f,Ajst_1,Ajst_2,Ajst_3,E_Falta_f);

```

```
end
```

```

function [E_Falta,TipoFalta] =
F_TipoFalta_LimiteOCVariable(Iabc,AnguloIsec, ModuloIsec,In)
%Iabc:Modulo corrientes de falta
%Componentes simeticas:
% AnguloIsec=[Ang_I1 Ang_I2 Ang_I0], en radianes
% Modulo=[Mod_I1 Mod_I2 Mod_I0]
%Modulo: modulos de las componentes de secuencia
%In: Corriente de neutro
%Tipo Falta: vector de tipo de falta
% TipoFalta=[an bn,cn,cbn,acn,ban,bc,ac,ab,abc)
%E_Falta: booleana

disp('-----')
disp('F_Tipo_Falta')

%inicializar vector
TipoFalta=zeros(1,10);
Alfa=0;
E_Falta=0;

%Rangos sobre tension
Kmin=1.5;
Imax=0;
%Calculo rango de Ioc en función de la corriente máxima
Imax=max(Iabc);
if 0.75*Imax>Kmin*In
    Ioc=0.5*Imax;
else
    Ioc=Kmin*In;
end

if Iabc(1)>Ioc || Iabc(2)>Ioc || Iabc(3)>Ioc %Existe Falta?
    E_Falta=1;

    if Iabc(1)>Ioc && Iabc(2)>Ioc && Iabc(3)>Ioc %Trifásica?
        disp('ABC')
        TipoFalta=[zeros(1,9) 1];
    else

        if ModuloIsec(3)>0.3*ModuloIsec(1)%Con desviación a tierra
            Alfa=Norm(Norm(AnguloIsec(3))-Norm(AnguloIsec(2)));
            %Normalización Alfa
            if Alfa<0
                Alfa=2*3.1416+Alfa;
            end
            if Alfa<0.96 || Alfa>5.323 %AN,BCN
                if Ioc>Iabc(2) && Ioc>Iabc(3) %AN
                    TipoFalta=[1 zeros(1,9)];
                    disp('AN')
                else %BCN
                    TipoFalta=[0 0 0 1 zeros(1,6)];
                    disp('BCN')
                end
            end
            if Alfa>1.134 && Alfa<3.05 %BN,ACN
                if Ioc>Iabc(1) && Ioc>Iabc(3) %BN
                    TipoFalta=[0 1 zeros(1,8)];
                    disp('BN-----')
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        else %ACN
            TipoFalta=[zeros(1,4) 1 zeros(1,5)];
            disp('ACN')
        end
    end
    if Alfa>3.23 && Alfa<5.149 %CN,ABN
        if Ioc>Iabc(2) && Ioc>Iabc(1) %CN
            TipoFalta=[0 0 1 zeros(1,7)];
            disp('CN')
        else %ABN
            TipoFalta=[zeros(1,5) 1 zeros(1,4)];
            disp('ABN')
        end
    end
    else %Sin desviación a tierra
        Alfa=Norm(Norm(AnguloIsec(2))-Norm(AnguloIsec(1)));

        if Alfa>0 && Alfa<2.094 %AB
            TipoFalta=[zeros(1,6) 0 0 1 0];
            disp('AB')
        end
        if Alfa>2.094 && Alfa<4.189 %BC
            TipoFalta=[zeros(1,6) 1 0 0 0];
            disp('BC')
        end
        if Alfa>4.189 %CA
            TipoFalta=[zeros(1,6) 0 1 0 0];
            disp('CA')
        end
    end

    end
end
else
    E_Falta=0;
    TipoFalta=zeros(1,10);
end

function Angulo_Norm=Norm(Angulo)
    if Angulo<0
        Angulo_Norm=2*pi+Angulo;
    else
        Angulo_Norm=Angulo;
    end
end
disp('-----')
end

function [L,Z_Falta] =
EcDistancia(TipoFalta,Iabc_V,Vabc_V,Isec_A_V,Vsec_A_Vct,Z_1,Z_0,Kn)

% TipoFalta=[an, bn,cn,cbn,acn,ban,bc,ac,ab,abc)
%Inom: corriente nominal
%In: corriente de neutro
% %inicializacion de L: valor absoluto de la diastancia (sin contar
blinders
% %ni unidad direccional)

disp('-----')
disp('Ec_Distancia: ')

```



```

%Valora imaginario resultados de la division
p=0+0*1j;
Z_sec0clc=0+0*1j;
Z_Falta=0+0*1j;
%In=Isec_A_V(3)/3;

L=0;

% Z1L_clc=0.0998+0.1222j;
% Z0L_clc=0.3569+0.3556j;
%
% Kn2=(Z0L_clc-Z1L_clc)/(3*Z1L_clc);

%AN
if TipoFalta(1)==1
    disp('Distancia AN: ')
    p=Vabc_V(1)/(Z_1*(Iabc_V(1)+Kn*3*Isec_A_V(3)));
    L=abs(p);
    disp(L)

end
%BN
if TipoFalta(2)==1
    disp('Distancia BN: ')
    p=Vabc_V(2)/(Z_1*(Iabc_V(2)+Kn*3*Isec_A_V(3)));
    L=abs(p);
    disp(L)

end
%CN
if TipoFalta(3)==1
    disp('Distancia CN: ')
    p=Vabc_V(3)/(Z_1*(Iabc_V(3)+Kn*3*Isec_A_V(3)));
    L=abs(p);
    disp(L)

end

%Corrientes compuestas
Iab=Iabc_V(1)-Iabc_V(2);
Ibc=Iabc_V(2)-Iabc_V(3);
Ica=Iabc_V(3)-Iabc_V(1);

%Tensiones compuestas
Vab=Vabc_V(1)-Vabc_V(2);
Vbc=Vabc_V(2)-Vabc_V(3);
Vca=Vabc_V(3)-Vabc_V(1);

%CB/CBN
if TipoFalta(4)==1 || TipoFalta(7)==1
    disp('Distancia CB/CBN: ')
    p=Vbc/(Ibc*Z_1); %Funciona perfecto

```

```

    L=abs(p);
    disp(L);
end
%AC/ACN
if TipoFalta(5)==1 || TipoFalta(8)==1
    disp('Distancia AC/ACN: ')
    p=Vca/(Ica*Z_1); %Funciona perfecto
    L=abs(p);
    disp(L);
end
%AB/ABN
if TipoFalta(6)==1 || TipoFalta(9)==1
    disp('Distancia AB/ABN: ')
    p=Vab/(Iab*Z_1); %Funciona perfecto
    L=abs(p);
    disp(L);
end

% %ABC
if TipoFalta(10)==1
    p=Vbc/Ibc;
    L=abs(p);
    disp('Distancia ABC: ')
    disp(L)
end

Z_Falta=L;

disp(p)

disp('-----')
end

function [Zona,t_disp,Trip] =
SelectorZona(Z_Dist,Ajst_1,Ajst_2,Ajst_3,E_Falta)

Zona=0;
t_disp=0;
Trip=0;

disp('-----')
disp('Logica Disparo')

disp('Z_falta:')
disp(Z_Dist)

%Condiciones Zona 1
if Z_Dist<15
    disp('Zona:')
    Zona=1;
    disp(Zona)
    %t_disp=Ajst_1(2)*100;
    t_disp=0;
    Trip=1;
end

%Condiciones Zona 2:
if Z_Dist>15
    disp('Zona:')

```

```

    Zona=2;
    disp(Zona)
    t_disp=40;
    Trip=1;
end

```

```

end

```

### 6.3 Unidad direccional

```

function Direccion =
Unit_Direccional(TipoFalta,Ang_V_Pref,Ang_Isec_A,Ang_Isec_B,Ang_Isec_C
)

% TipoFalta=(an,bn,cn,cbn,acn,ban,bc,ca,ab,abc)

%Por defecto consideramos direccion contraria:
Direccion=0;

%AN
if TipoFalta(1)==1
    Alfa=Norm(Norm(Ang_Isec_A(2))-Norm(Norm(Ang_V_Pref(1))));
    if Alfa<(pi/6) || Alfa>(4*pi)/3
        Direccion=1;
    else
        Direccion=0;
    end
end

%BN
if TipoFalta(2)==1
    Alfa=Norm(Norm(Ang_Isec_B(2))-Norm(Norm(Ang_V_Pref(2))));
    if Alfa<(pi/6) || Alfa>(4*pi)/3
        Direccion=1;
    else
        Direccion=0;
    end
end

%CN
if TipoFalta(3)==1
    Alfa=Norm(Norm(Ang_Isec_C(2))-Norm(Norm(Ang_V_Pref(3))));
    if Alfa<(pi/6) || Alfa>(4*pi)/3
        Direccion=1;
    else
        Direccion=0;
    end
end

%CBN/CB
if TipoFalta(4)==1 || TipoFalta(7)==1
    Alfa=Norm(Norm(Ang_Isec_A(2))-Norm(Norm(Ang_V_Pref(1))));
    if Alfa>(pi/3) && Alfa<(7*pi)/6
        Direccion=1;
    end
end

```

```

else
    Direccion=0;
end
% disp('Alfa;')
% X=Alfa*pi/180;
% disp(X)
% disp('I2;')
% X=Ang_Isec_A(2)*pi/180;
% disp(X)
% disp('V1;')
% X=Ang_V_Pref(1)*pi/180;
% disp(X)
end

%CAN/CA
if TipoFalta(5)==1 || TipoFalta(8)==1
    Alfa=Norm(Norm(Ang_Isec_B(2))-Norm(Ang_V_Pref(2)));
    if Alfa>(pi/3) && Alfa<(7*pi)/6
        Direccion=1;
    else
        Direccion=0;
    end
% disp('Alfa;')
% X=Alfa*pi/180;
% disp(X)
% disp('I2;')
% X=Ang_Isec_B(2)*pi/180;
% disp(X)
% disp('V1;')
% X=Ang_V_Pref(2)*pi/180;
% disp(X)
end

%ABN/AB
if TipoFalta(6)==1 || TipoFalta(9)==1
    Alfa=Norm(Norm(Ang_Isec_C(2))-Norm(Ang_V_Pref(3)));
    if Alfa>(pi/3) && Alfa<(7*pi)/6
        Direccion=1;
        %disp('%ABN/AB')
    else
        %disp('%ABN/AB')
        Direccion=0;
    end
% disp('Alfa-ABN;')
% X=Alfa*pi/180;
% disp(X)
% disp('I2;')
% X=Ang_Isec_C(2)*pi/180;
% disp(X)
% disp('V1;')
% X=Ang_V_Pref(3)*pi/180;
% disp(X)
end

end

```

```
function Angulo_Norm=Norm(Angulo)
    if Angulo<0
        Angulo_Norm=2*pi+Angulo;
    else
        Angulo_Norm=Angulo;
    end
end
```

## 6.4 Unidad diferencial

```
function Trip = DiffTrip(Iop, Ires)
%Argumentos:

%, Ires1, m1, Ires2, m2
%Iop=(mod(Iabc1)+mod(Iabc2))/2; [0 0 0]
X=[0 0 0];

%Ires=mod(Iabc1+Iabc2);

disp('-----')
disp('Diferencial de Linea')

IresNom=160;
m1=0.5;
m2=1.5;

Trip=0 ;
for i=1:3

    if Ires(i)<0.2*IresNom && Iop(i)>0.2*IresNom
        disp('1')
        Trip=1;
    end

    if Ires(i)>(0.2*IresNom) && Ires(i)<(1.5*IresNom) &&
Iop(i)>(m1*Ires(i))
        disp('2')
        Trip=1;
    end

    if Ires(i)>(1.5*IresNom) && Iop(i)>(m2*Ires(i))
        disp('3')
        Trip=1;
    end

end

disp('-----')
%
%     disp('Trip:')
%     disp(Trip)
%
%     disp('Iop:')
%     disp(Iop)
```

```

%
% disp('Ires:')
% disp(Ires)
end

```

## 6.5 Unidad direccional de neutro

```
function Direccion = DireccionalNeutro(V0_Ang,I0_Ang,E_Falta)
```

```

Alfa=Norm(Norm(V0_Ang(3))-Norm(Norm(I0_Ang(3))));
if (Alfa>(2*pi/3) || Alfa<(11*pi)/6) && E_Falta==1
    Direccion=1;
else
    Direccion=0;
end
end

```

```
end
```

```
function Angulo_Norm=Norm(Angulo)
if Angulo<0
    Angulo_Norm=2*pi+Angulo;
else
    Angulo_Norm=Angulo;
end
end
end

```

## 6.6 Unidad de sobrecorriente temporizada

```
function [Trip50,FaseFalta]= Sobrecorriente(Irms,Ioc)
```

```

FaseFalta=[0 0 0];
Trip50=0;

for i=1:3
    if Irms(i)>Ioc
        FaseFalta(i)=1;
    end
end

if sum(FaseFalta)>0
    Trip50=1;
end

end

```

## 7 Bibliografía

- [1] P Ramachandran, "Tertiary Winding in Power Transformers", Technical Note, ABB Ltd, 2018.
- [2] L60 Universal Relay Manual, General Electric Company, Inc., 2018, p.32.
- [3] Professor A K Pradhan, Power System Protection, Department of Electrical Engineering Indian Institute of Technology, Kharagpur, Lecture 21.
- [4] Steven W. Smith, Ph.D., "The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing", chap 19, McGrawHill, 1998.
- [5] A. G. J. Roberts and I. E. O. Schweitzer, *Z = V/I Does Not Make a Distance Relay*. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc, 1994.
- [6] Joseph Coffey, "Latency in optical fiber systems", Commscope, White Paper.
- [7] Kasztenny B., Kulidjian A., "Operate and Restraint Signals of a Transformer Differential Relay", Conferencia anual de relés de protección de Georgia (USA) nº54, GE Power Managment, 2000.
- [8] Lewis Blackburn, J., "Protective Relaying, Principles and Applications", 4ª Edición, CRC Press, 2014, Cap. 9, p.298
- [9] Lewis Blackburn, J., "Protective Relaying, Principles and Applications", 4ª Edición, CRC Press, 2014, Cap. 12, p.457
- [10] Charles L. Fortescue, "Method of Symmetrical Co-Ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks". Convención anual nº34 de la AIEE (American Institute of Electrical Engineers) en Atlantic City, N.J. 1918.