



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID  
ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Desarrollo de una herramienta para la  
docencia de relés de distancia basada en el  
estudio de casos**

**Autor:**

**Vázquez Ramos, Diego**

**Tutor:**

**Moríñigo Sotelo, Daniel  
Dpto. Ingeniería eléctrica**

**Valladolid, marzo 2021.**





## Resumen

Un relé de protección es un dispositivo que detecta una perturbación en la señal que está recibiendo, normalmente proveniente de los equipos de medida ( transformadores de tensión y corriente). Si la magnitud de la señal supera un cierto umbral, los contactos del dispositivo actuarán implicando una operación posterior, normalmente ordenando la apertura o cierre de un interruptor automático.

Este trabajo tiene como objetivo la programación y simulación en Matlab de un relé de distancia, proponiendo diferentes casos de estudio que podrán pasar a ser una práctica del grado en ingeniería eléctrica.

## Palabras clave

Relé de distancia, Matlab-Simulink, Característica mho, Red de transporte, Selectividad.

## Abstract

A protection relay is a device which detects a disturbance in the signal it is receiving, usually comes from measurement equipment (voltage and current transformers). If the magnitude of the signal overcome certain threshold, the device contacts will trip, implying a subsequent operation, normally ordering the opening or closing of a circuit breaker.

The objective of this work is the programming and simulation of a distance relay in Matlab, proposing different case studies that may become a practice of the degree in electrical engineering.

## Key words

Distance relay, Matlab- Simulink, mho characteristic, Transport network, Selectivity



## Índice

<b>1. Introducción</b> .....	9
1.1 Justificación y objetivos.....	9
1.2 Cronograma.....	9
1.3 Competencias.....	10
1.4 Estructura de la memoria.....	10
<b>2. Estado del arte</b> .....	11
2.1 Introducción.....	11
2.2 Herramientas de software.....	11
2.2.1 PSCAD.....	11
2.2.2 ETAP.....	13
2.2.3 PCM600 ABB.....	14
2.2.4 DIGSI 5 Siemens.....	15
<b>3. Protección de redes de transporte de energía eléctrica</b> .....	19
3.1 Protección en redes radiales.....	19
3.2 Límite de aplicación de la protección por sobreintensidad.....	21
3.3. Tipos de selectividad.....	22
3.3.1 Selectividad amperimétrica.....	22
3.3.2 Selectividad cronométrica.....	23
3.3.3 Selectividad lógica [2].....	24
3.3.4 Selectividad energética.....	24
<b>4. Protección de distancia</b> .....	27
4.1 Introducción.....	27
4.2 Principio físico de funcionamiento.....	28
4.2.1 Relé electromecánico.....	28
4.2.2 Relé de distancia electrónico y digital.....	31
4.3 Magnitudes de medida en la protección de distancia.....	31
4.4 Curvas características de los relés de distancia.....	33
4.5 Relés digitales.....	37
4.5.1 REL670 ABB.....	38
4.5.2 S7A522 Siemens.....	40
<b>5. Implementación en Matlab de un relé de distancia</b> .....	43
5.1. Introducción a Matlab/Simulink.....	43
5.2. Como programar un relé de distancia.....	43
5.3 Simulación de línea de transporte.....	50



**Universidad de Valladolid**

5.3 Simulación del cortocircuito y del interruptor automático .....	51
5.4 Funcionamiento y simulación del ejemplo.....	52
<b>6. Casos de estudio.....</b>	<b>57</b>
6.1 Eliminando <b><i>ZE</i></b> determinar la nueva impedancia medida por el relé (en cortocircuito trifásico) .....	57
6.2 Añadir una segunda etapa mho con retraso de actuación de 0.25 s.....	60
6.3 Añadir una segunda etapa ohm con pendiente de 45° negativa.....	65
<b>7. Conclusiones y proyectos futuros .....</b>	<b>68</b>
<b>8. Bibliografía.....</b>	<b>69</b>



## Índice de figuras

Fig 2.1. Algunos elementos de la librería "protection" PSCAD limited version.....	14
Fig 2.2. Ejemplo programación del relé de distancia mho para la parte de faltas fase-fase. PSCAD limited version.....	15
Fig 2.3. Representación de la curva característica de un relé de protección de distancia.....	16
Fig 2.4. Interfaz de PCM600.....	17
Fig 2.5. Árbol de proyecto y área de trabajo DIGSI.....	19
Fig 3.1. Esquema de distribución radial.....	21
Fig 3.2. Curvas características relé de sobreintensidad.....	22
Fig 3.3. Red mallada.....	23
Fig 3.4. Ejemplo de selectividad amperimétrica.....	24
Fig 3.5. Ejemplo de selectividad cromométrica.....	25
Fig 3.6. Corriente de cortocircuito limitada.....	27
Fig 4.1. Escalones zonas de protección relé de distancia.....	29
Fig 4.2. Fuerzas electromagnéticas en relés de inducción.....	31
Fig 4.3. (1) Relé con barra de equilibrio. (2) Relé mho. (3) Relé cegador de carga (blinder).....	32
Fig 4.4. Estructura de un relé digital.....	33
Fig 4.5. Conexión para la obtención de las magnitudes de las unidades de medida...34	
Fig 4.6. Característica mho.....	36
Fig 4.7. Característica ohm.....	37
Fig 4.8. mho desplazado.....	37
Fig 4.9. Impedancia.....	38
Fig 4.10. Reactancia.....	38
Fig 4.11. Poligonal.....	38
Fig 4.12. Posibles combinaciones de curvas características.....	39
Fig 4.13. Esquema genérico de protección de una línea con tres escalones.....	39
Fig 4.14. Esquema protección relé REL670 ABB para un interruptor automático.....	40



**Universidad de Valladolid**

Fig 4.15. Característica del relé REL670 con la función intrusión en la carga.....41

Fig 4.16. Esquema de protección relé S7A522.....42

Fig 4.17. Protección de distancia característica poligonal y mho S7A522.....43

Fig 5.1. Ejemplo sistema eléctrico.....45

Fig 5.2. Circuito ejemplo.....46

Fig 5.3. Característica ohm en Matlab.....47

Fig 5.4. Circuito de secuencia directa.....48

Fig 5.5. Circuito de secuencia directa.....49

Fig 5.6. Circuito de secuencia para cortocircuito fase-fase sin tierra.....50

Fig 5.7. Característica mho con las impedancias de cortocircuito bifásico detectadas por la unidad de medida.....52

Fig 5.8. Parámetros típicos de las componentes de secuencia.....53

Fig 5.9. Bloque “Three - Phase fault” en Simulink.....53

Fig 5.10. Bloque “Three – Phase breaker” en Simulink.....54

Fig 5.11. Parámetros a modificar en la máscara del bloque de cortocircuito.....55

Fig 5.12. Parámetros del circuito en el workspace del modelo.....56

Fig 5.13. Función incrustada del bloque DistanceRelay.....56

Fig 5.14. Resultados simulación cortocircuito trifásico.....57

Fig 6.1. Circuito de secuencia directa.....59

Fig 6.2. Código curva característica mho, Matlab.....60

Fig 6.3. Lógica de control señales de activación.....63

Fig 6.4. Curva característica con dos etapas.....63

Fig 6.5. Gráfica de corrientes de cortocircuito.....64

Fig 6.6. Señales de activación de los I.A.....65

Fig 6.7. Curva característica con dos etapas, cortocircuito bifásico.....65

Fig 6.8. Gráfica corrientes de cortocircuito.....66

Fig 6.9. Señales de activación de los I.A.....66

Fig 6.10. Código característica ohm.....67

Fig 6.11. Código de la señal de comparación de la unidad de medida ab.....68

Fig 6.12. Característica ohm.....69

Fig 6.13. Cortocircuito sin despejar.....69



---

**Universidad de Valladolid**



## Introducción

### 1.1 Justificación y objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo afianzar los conocimientos sobre relés de distancia a los futuros alumnos mediante la implementación de un relé de distancia en Matlab-Simulink y abordar una serie de casos de estudio que podrá pasar a ser una práctica del grado.

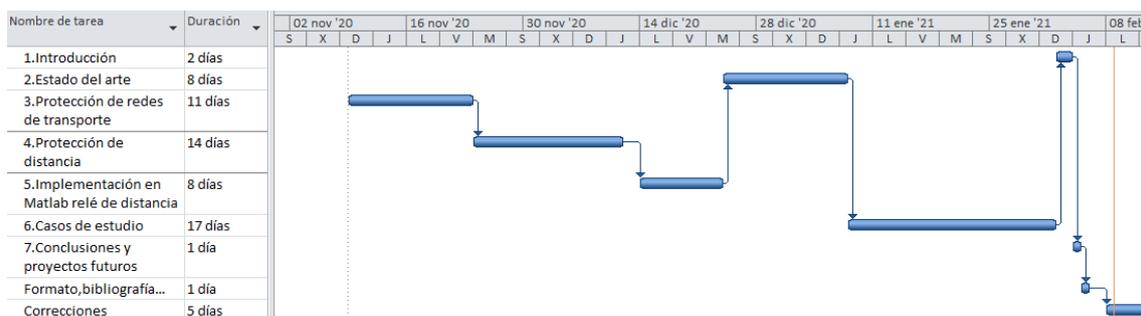
La justificación del empleo de este software se discutirá con mayor detalle en el siguiente capítulo, básicamente, la búsqueda se fundamentará en encontrar un programa de libre acceso para los estudiantes de la Universidad de Valladolid y esté dotado de gran flexibilidad a la hora de poder programar el relé de distancia, el resultado final será un interfaz sencillo y que realice las funciones características de éstos dispositivos que son principalmente medir la impedancia de falta y producir una señal de actuación que produzca el disparo de los interruptores automáticos. Es por ello que el programa a utilizar debe tener una amplia librería de recursos referido a simbología eléctrica con los que Matlab-Simulink sí que cuenta, en este trabajo se ha utilizado principalmente los elementos de la librería “*simscape/Electrical/Specialized power systems*”.

También se comentarán aspectos relativos a los sistemas eléctricos y redes a las que protegen este tipo de protecciones, mostrando características propias de los sistemas a proteger y otros aspectos relativos a los relés de protección: la tipología (electromecánicos, electrónicos, digitales), la selectividad (amperimétrica, cromométrica, lógica, energética), los tipos de funciones, que son mas características de los relés digitales en los que se profundiza mostrando relés reales de distintos fabricantes.

Finalmente, se analizarán diferentes curvas características producidas por el método de comparación de magnitud y se propondrán tres casos de estudio con una posible resolución.

### 1.2 Cronograma

A continuación, se muestra el diagrama de Gantt del desarrollo de este proyecto.





### 1.3 Competencias

Este TFG ha fomentado el desarrollo de las siguientes competencias generales:

- **CG1:** Capacidad de análisis y síntesis.
- **CG2:** Capacidad de aplicar los conocimientos a la práctica.
- **CG3:** Planificación y gestión del tiempo.
- **CG4:** Comunicación oral y escrita de la propia lengua.
- **CG5:** Comprensión de textos escritos en una segunda lengua relacionados con la propia especialidad.
- **CG7:** Habilidades de búsqueda.
- **CG9:** Habilidades de gestión de la información.
- **CG13:** Resolución de problemas.
- **CG14:** Toma de decisiones.

También ha fomentado el desarrollo de las siguientes competencias específicas:

- **CE10:** Conocimiento y utilización de los principios de teoría de circuitos y máquinas eléctricas.
- **CE13:** Conocimiento de los principios de teorías de máquinas y mecanismos.
- **CE20:** Conocimiento sobre el control de máquinas y accionamientos eléctricos y sus aplicaciones.
- **CE30:** Conocimientos de programación informática aplicados a problemas industriales de ingeniería eléctrica.

### 1.4 Estructura de la memoria

- Capítulo 1. Introducción: Se comenta de que trata el proyecto, la justificación de este y los objetivos principales.
- Capítulo 2. Estado del arte: Se comenta brevemente la evolución del relé y el desarrollo de esta tecnología y se justifica el software utilizado para la realización de los capítulos 5 y 6.
- Capítulo 3. Protección de redes de transporte de energía eléctrica: Se exponen los aspectos característicos de una red de transporte, justificando el uso de la protección de distancia y se tratan los diversos tipos de selectividad.
- Capítulo 4. Protección de distancia: Se comenta el principio físico de funcionamiento de los relés de protección, sus criterios de actuación y funciones que los caracterizan.
- Capítulo 5. Implementación en Matlab de un relé de distancia: Se detalla como programar un relé de distancia en un circuito ejemplo.
- Capítulo 6. Casos de estudio: Se exponen tres enunciados de posibles prácticas con su resolución.
- Capítulo 7. Conclusiones y proyectos futuros: Se comenta brevemente las repercusiones y aportaciones de este proyecto y se plantean futuros proyectos en los que podría derivar el desarrollo de este TFG.



## 2. Estado del arte

### 2.1 Introducción

En este capítulo se pretende señalar brevemente la evolución de los relés e introducir al software de simulación para la aplicación que se requiere en este trabajo, justificando el programa empleado.

El primer relé electromecánico fue inventado por Joseph Henry en el año 1835, constaba de una bobina y un electroimán que accionaba un juego de contactos. Las primeras aplicaciones que tendría el relé serían en telegrafía, aunque también comenzaría a utilizarse para controlar máquinas eléctricas en largas distancias. Su principio de funcionamiento y tipología se tratará en el capítulo 4.

Los primeros relés electrónicos debían estar en tubos de vacío, aparecerían en 1930, pero debido a su alto coste y baja fiabilidad no sustituirían a los relés electromecánicos [3]. No sería hasta mediados los 60, que el desarrollo de los transistores permitiría la creación de un equipo electrónico de protección más fiable y de menor coste.

Al principio eran dispositivos compuestos por electrónica analógica y posteriormente con el desarrollo del microprocesador y la electrónica digital se iniciaría su desarrollo en el ámbito comercial a gran escala sustituyendo en la mayoría de las aplicaciones a los relés electromecánicos.

En el ámbito de la selectividad estos relés permiten la modificación de su curva característica de actuación, tanto de la parte de sobrecarga como la de cortocircuito, pudiendo obtener la curva que más se ajuste a la seguridad de la instalación.

Los relés digitales también cuentan con software (la mayoría propietario de cada empresa) para su diseño y simulación en el sistema eléctrico a proteger, a menudo con el nombre de IED (dispositivos inteligentes electrónicos) managers.

### 2.2 Herramientas de software

A continuación, se mostrarán herramientas de software con las que se podría haber cumplido el objetivo de este TFG, la simulación de un relé de distancia en un sistema eléctrico.

#### 2.2.1 PSCAD

Es un entorno gráfico de desarrollo basado en el lenguaje Fortran, simulador de sistemas de potencia rápido, preciso y con una interfaz sencilla de cara al usuario. Se especializa en el análisis de transitorios electromagnéticos en los sistemas de potencia, por este motivo, determinadas librerías y elementos (como las líneas de alta tensión) se pueden modelar con mayor detalle que en el software escogido.

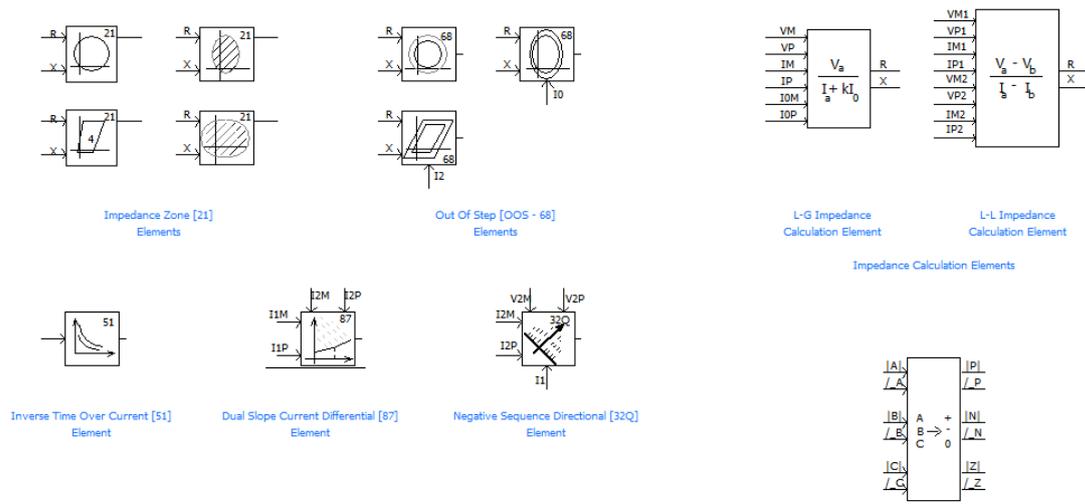


Fig 2.1 Algunos elementos de la librería "protection" PSCAD limited version

Algunas de las aplicaciones más habituales con este software son:

- Estudio de sobretensiones de potencia debido a faltas u operaciones de interruptores.
- Análisis de fenómenos no lineales, como la saturación de transformadores
- Estudios paramétricos para ejecutar diferentes simulaciones con el fin de identificar el peor escenario en caso de falta, tipo de falta o su ubicación y realizar análisis de contingencias.
- Búsquedas de sobretensiones originadas por la caída de un rayo
- Búsqueda y análisis de armónicos...

PSCAD posee una librería para elementos de protección (Fig 2.1) con la función de protección de distancia 21 según código ANSI/IEEE con la que se puede modelar el relé de distancia (Fig 2.2), previamente se requiere la descomposición de las ondas de tensión y corriente en fases individuales y en componentes de secuencia que se puede realizar con el bloque Fast Fourier transform ubicado en "CSMFuncions".

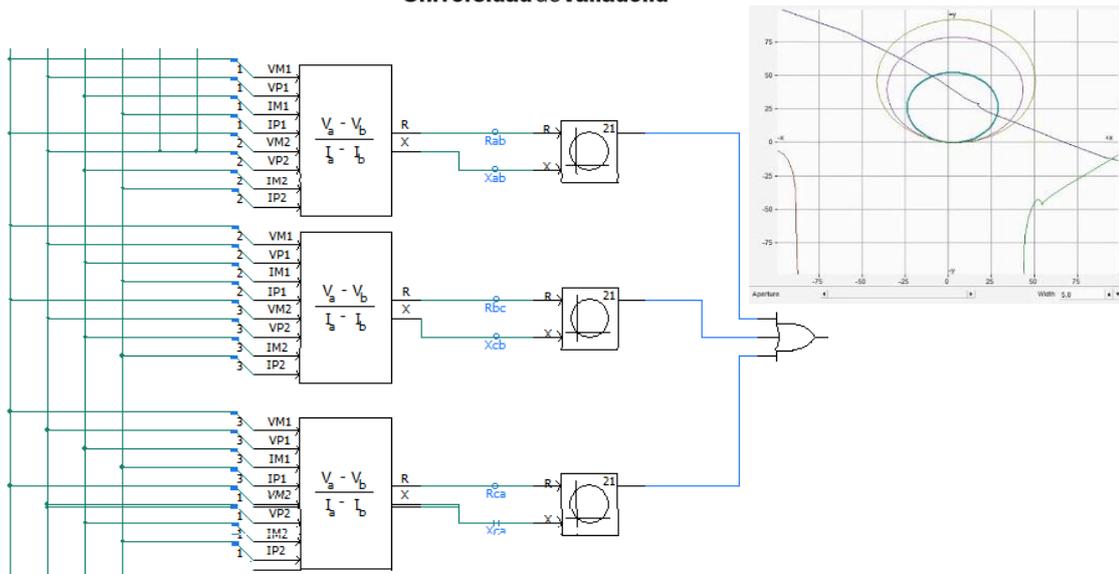


Fig 2.2 Ejemplo programación del relé de distancia mho para la parte de faltas fase-fase. PSCAD limited version

Si bien es cierto que determinados elementos se pueden modelar en mayor detalle que Matlab-simulink, el software presenta menor libertad a la hora de diseñar el relé de distancia que el software escogido al tener que ceñirse únicamente a los bloques que aparecen en la librería con gran limitación a la hora de modificarlos.

### 2.2.2 ETAP

Es un software propietario utilizado en el modelado de sistemas de energía eléctrica. Está integrado por un conjunto de módulos independientes que tratan diferentes ámbitos en la simulación y análisis de un sistema: flujos de cargas, arco eléctrico, cortocircuitos... Se puede comprobar que las fórmulas utilizadas en el programa siguen la normativa vigente. También cuenta con un módulo de coordinación de protecciones, útil para el estudio de la selectividad de los diferentes elementos de protección utilizados, (fusibles, relés, I.A.) comparándolos y analizando las curvas térmicas o de saturación del resto de elementos (cables, motores, transformadores...).

La librería de dispositivos de esta herramienta está validada y certificada y, como es de suponer al ser un software comercial es más completa que la del programa anterior.

Este programa cuenta además con un módulo para el análisis en protección y coordinación para sistemas de transmisión y distribución denominado StarZ. Emulando el rendimiento realista de los relés de distancia, considerando la opción de polarización, expansión dinámica y muchos otros factores.

El mayor inconveniente de este software es que no es de libre acceso, y la versión de prueba es muy limitada (no aparecen la mayoría de módulos), es por ello que Matlab-Simulink se presenta como una mejor alternativa al tener la Universidad de Valladolid acceso libre a este software para los estudiantes.



## Universidad de Valladolid

A continuación, se muestran otras herramientas de software para el diseño y parametrización de un relé de distancia en un sistema eléctrico.

### 2.2.3 PCM600 ABB

Es una herramienta para la configuración de la familia de dispositivos *Relion*, entre otros. Está diseñado para la comunicación de los IEDs, ya sea mediante TCP/IP LAN o WAN.

La comunicación entre equipos de protección, el control y la medida dentro de la subestación automatizada se rige por la norma IEC 61850. Norma que también abarca los aspectos relativos al diseño, operación y mantenimiento de una subestación en el ámbito de la protección, cuyo objetivo persigue la unificación de protocolos y la compatibilidad entre productos de distintos fabricantes.

También cuenta con representación gráfica de la parametrización de la función de protección de distancia (ANSI 21).(Fig 2.3)

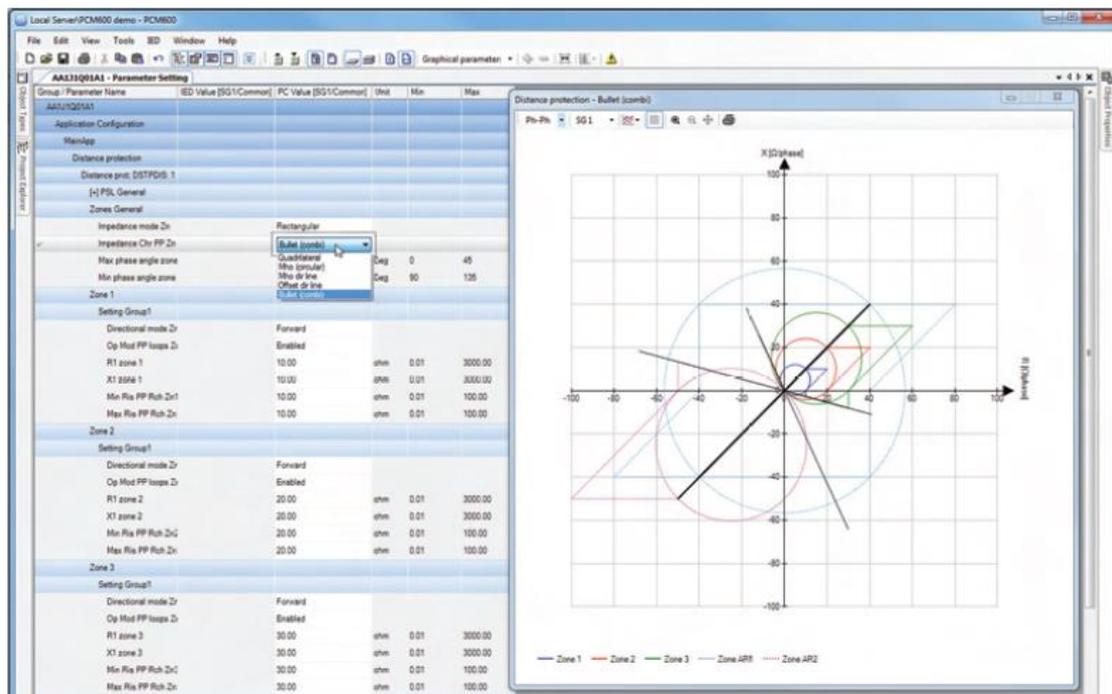


Fig 2.3 Representación de la curva característica de un relé de protección de distancia

Cuenta con un interfaz similar a otros programas de estas características (Fig 2.4).

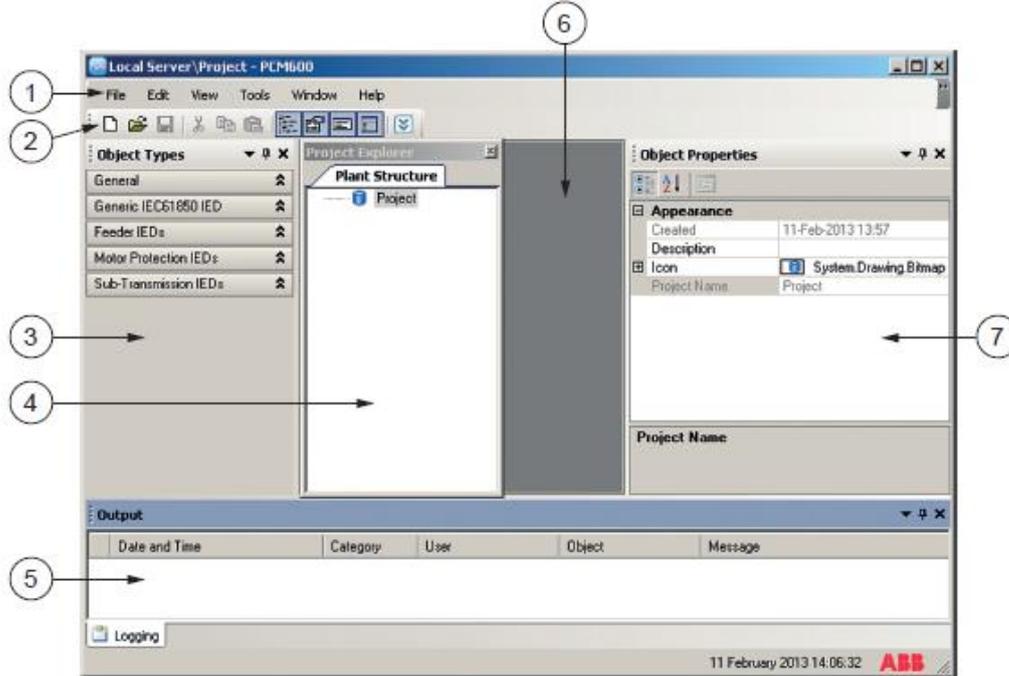


Fig 2.4 Interfaz de PCM600

Una barra de menús (1), otra de herramientas (2) y diferentes ventanas.

La ventana de tipos de objeto (3) muestra todos los objetos disponibles para el IED seleccionado. Antes de que se muestren en esta ventana los objetos deberán ser importados desde el paquete de conectividad a PCM600 por el *Upload Manager*.

El explorador de proyecto (4) se utiliza para navegar por los distintos dispositivos del proyecto y acceder a las distintas funciones de un IED. El planteamiento inicial con la estructura de la subestación, niveles de tensión, y conexiones de los puertos de los IEDs se realiza en esta ventana.

La ventana *Output* (5) muestra la información de los diferentes eventos de PCM600.

La ventana herramienta (6) es el espacio de trabajo.

La ventana de propiedades de objeto (7) muestra las propiedades del objeto seleccionado, aquí se puede cambiar el nombre del objeto, el estándar de su icono...

#### 2.2.4 DIGSI 5 Siemens

Es el software utilizado para controlar y configurar los dispositivos *SIPROTEC 5*. También cumple los estándares IEC 61850. Existen diferentes variantes de este programa: DIGSI 5 Compact, con el que se realizan las tareas más comunes en este ámbito, la modificación de parámetros del relé o la lectura de los datos procesados, DIGSI 5 Standard cuenta con un editor donde se pueden crear simbología propia del usuario y simular la topología de un sistema eléctrico unifilar de acuerdo con la IEC 61850, y DIGSI 5 Premium que tiene la capacidad de realizar tests de las funciones de los dispositivos *SIPROTEC 5*



El interfaz está dividido en 5 secciones:

- El árbol de proyecto(Fig 2.5): Es el elemento central del programa, contiene el acceso a todas las herramientas y datos de los objetos. Algunas de las pestañas son: *Single-line configuration* es un acceso al editor de la red del sistema de protección, la pestaña agregar nuevo dispositivo permite añadir un nuevo dispositivo *SIPROTEC 5*, en la pestaña de ajustes se puede configurar algunas de las funciones de los dispositivos
- Area de trabajo: Dispone de las siguientes herramientas de edición: Editores, Matrices y tablas de datos, información y enrutamiento, Inputs, displays y áreas de selección y una ventana de visión general.
- Carta de tareas: Dependiendo del objeto a editar o seleccionado, se abran un número determinado de pestañas para la ejecución de otras acciones

Seleccionar elementos de una librería o del catálogo de Hardware, encontrar elementos en el proyecto, seleccionar señales y asignarlas a un elemento...

En esta sección se encuentra la librería global de DIGSI 5.

- Ventana de inspección: Para mostrar mayor información sobre un determinado elemento o ventana de ejecución.

Finalmente, se ha elegido realizar este proyecto en Matlab-Simulink, ya que, además una mayor flexibilidad a la hora de poder programar la protección de distancia, es un software de libre acceso para los estudiantes de la Universidad de Valladolid.

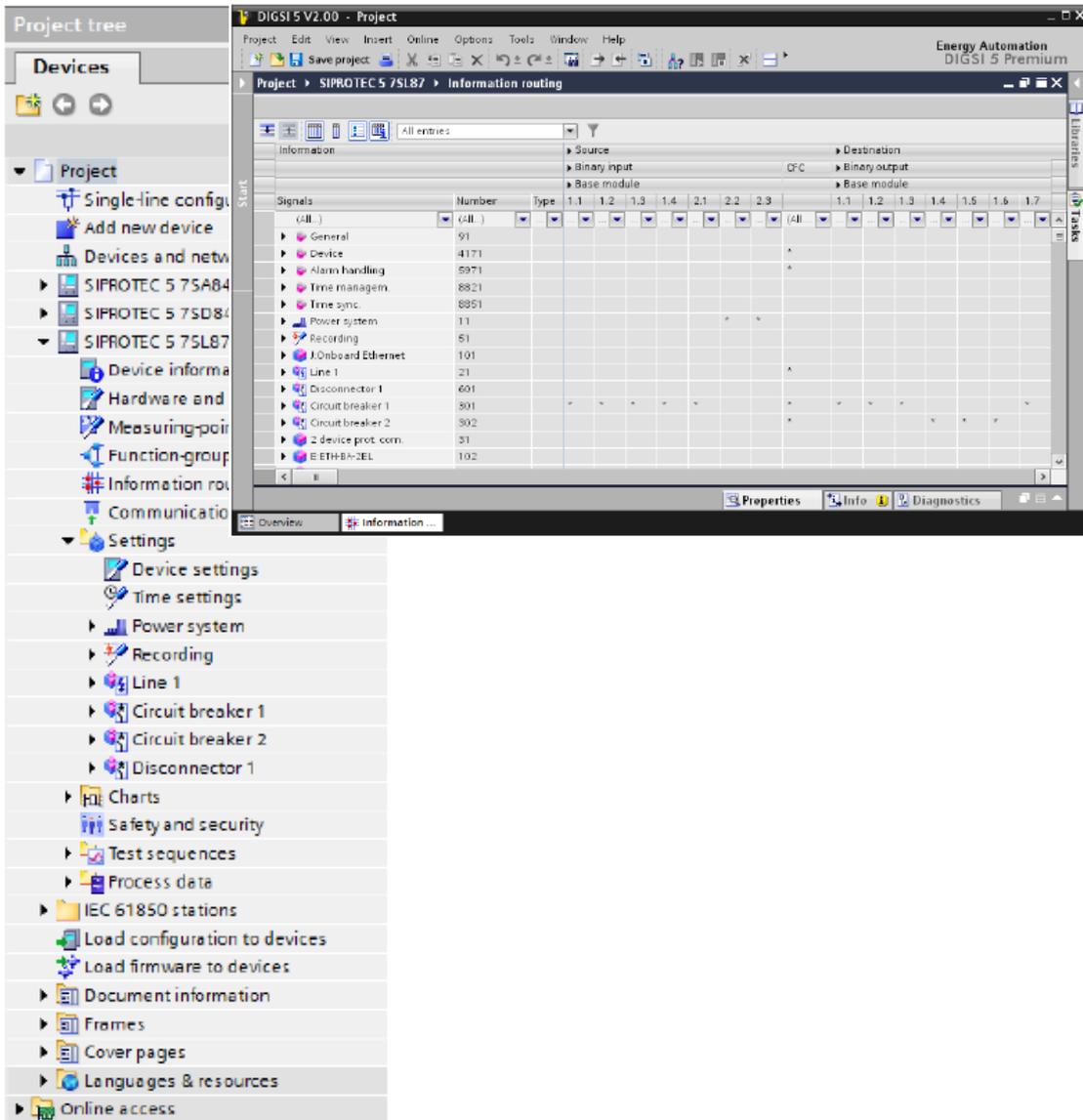


Fig 2.5 Árbol de proyecto y área de trabajo DIGSI



---

**Universidad de Valladolid**

### 3. Protección de redes de transporte de energía eléctrica

A continuación, se pretende dar una visión general de los aspectos característicos de una red de transporte, justificando para su protección la utilización de los relés de distancia frente a las técnicas convencionales de protección (por sobreintensidad normalmente).

Los sistemas de energía eléctrica se dividen en tres niveles principales: generación, transporte y distribución. Es en las subestaciones donde, además de interconectar los diferentes niveles, se hallan los elementos de protección y de maniobra.

#### 3.1 Protección en redes radiales

En Media Tensión (M.T.) por lo general, los esquemas de distribución son radiales (Fig 3.1), Es uno de los esquemas de distribución más sencillos, donde solo aparece un punto de alimentación. En este caso la selectividad amperimétrica (los diferentes tipos de selectividad se explicarán en la sección 3.3) garantiza la correcta coordinación de los dispositivos de protección, sin necesidad de recurrir a técnicas de mayor complejidad, teniendo como objetivo optimizar la continuidad del sistema con el mínimo coste.

En este tipo de protección, las faltas proporcionan un incremento de corriente, que será proporcional según la ley de Ohm al número de impedancias que haya en el sistema. Por tanto, la corriente de cortocircuito será mayor cuanto más próxima se encuentre la falta del punto de generación.

$$I_{cc} = \frac{E_s}{Z_{gen} + \sum Z_{sist}} \quad (3.1)$$

Para la señal de activación del interruptor automático, sólo será necesario que el relé tenga información de la corriente del sistema, que se podrá medir a través un transformador de corriente en relación generalmente  $I_n/5$ . [2]

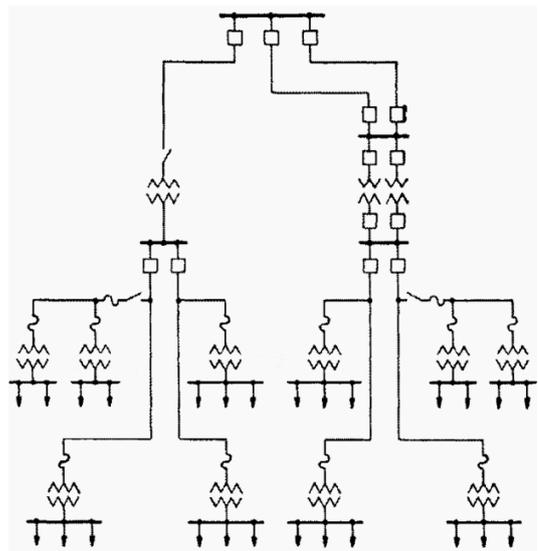


Fig. 3.1 . Esquema de distribución radial <https://electrical-engineering-portal.com>

Los relés de sobreintensidad son la forma más común de protección de los sistemas de distribución de energía eléctrica. Las curvas características (Fig 3.2) de este tipo de relé son [4]:

- Relé de corriente definida: Este relé opera de forma instantánea cuando la corriente alcanza un valor determinado.



- Relé de tiempo definido: Es un relé de corriente definida al que se le puede añadir un pequeño tiempo de retraso de activación, en este caso el sistema será más selectivo, pudiendo añadir mayores tiempos de retardo según se van acercando a la generación. El problema principal es el posible largo retraso en el tiempo de actuación de las protecciones más próximas a la fuente.
- Relé de tiempo inverso: Se caracterizan por tener una curva tiempo-corriente similar a una exponencial negativa, lo que deriva en conseguir tiempos de actuación mucho más restrictivos para las corrientes más elevadas, respetando la correcta selectividad de los elementos de protección.

Existen otros procedimientos para establecer el tiempo de disparo de las protecciones que no se base en gráficas sino en expresiones matemáticas, como la expresión siguiente recogida en los estándares ANSI/IEEE [4].

$$t = \frac{k\beta}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^\alpha - 1} + L \quad (3.2)$$

donde  $t$ : es el tiempo de operación,  $k$ : la posición del dial de tiempos que en los relés electromecánicos es la distancia física de los contactos,  $I$ : la corriente de falta vista desde el secundario,  $I_s$ : la corriente de pick-up a partir de este valor se permite la actuación y  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $L$  están tabulados en las correspondientes normas.

La estrategia básica para la coordinación de las protecciones de sobreintensidad es calibrar para las menores corrientes de cortocircuito los dispositivos más alejados de la generación e ir incrementando progresivamente aguas arriba. Los principales inconvenientes de este tipo de protección es la poca selectividad ante altos valores de la corriente de cortocircuito ( $I_{cc}$ ) y la dificultad en la distinción de la localización de la falta para diferencias de impedancias pequeñas en comparación con la fuente de generación.

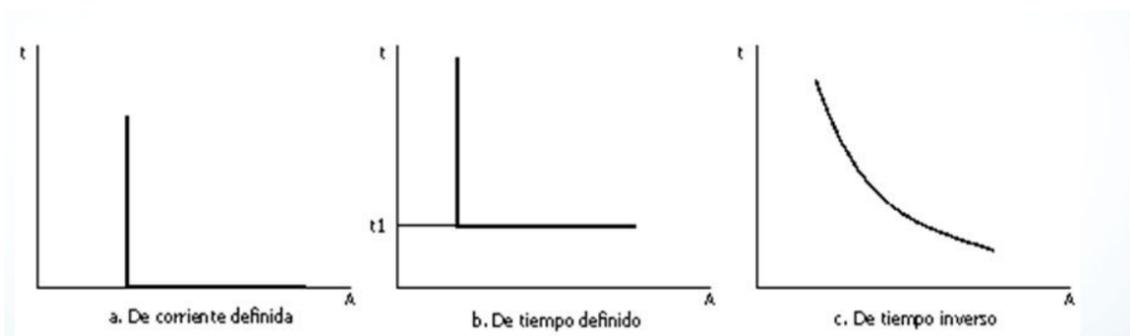


Fig. 3.2 Curvas características relé de sobreintensidad.  
“<https://slideplayer.es/slide/16109894>”

Es una práctica común [4] el uso de un “margen de tiempo de discriminación” entre 0.2 y 0.4 s entre dos relés sucesivos para evitar pérdidas de selectividad debido al



tiempo de apertura del relé que va a actuar, la corriente que sobrepasa cuando se despeja la falta, desviaciones de la curva de disparo real (márgenes de tolerancia)...

Una encuesta [3] sobre las técnicas de protección en la red de distribución de las industrias, señalaba que un gran porcentaje utilizaba protección de sobreintensidad de fase y tierra con disparo instantáneo para las faltas temporales, con unidad de retraso temporal para las faltas permanentes.

### 3.2 Límite de aplicación de la protección por sobreintensidad

No obstante, al llegar a las redes de transporte (Fig 3.3) la protección de sobreintensidad no consigue abarcar la complejidad de este tipo de sistemas. El inconveniente principal es su estructura que a diferencia de las zonas de distribución y rurales, el transporte es una estructura fuertemente mallada, donde suele intervenir más de un punto de alimentación, principalmente para garantizar una mayor continuidad de suministro, mayor flexibilidad de operación y control y una mayor facilidad de mantenimiento.

Ahora no sólo se requiere la magnitud de la corriente para establecer una protección selectiva.

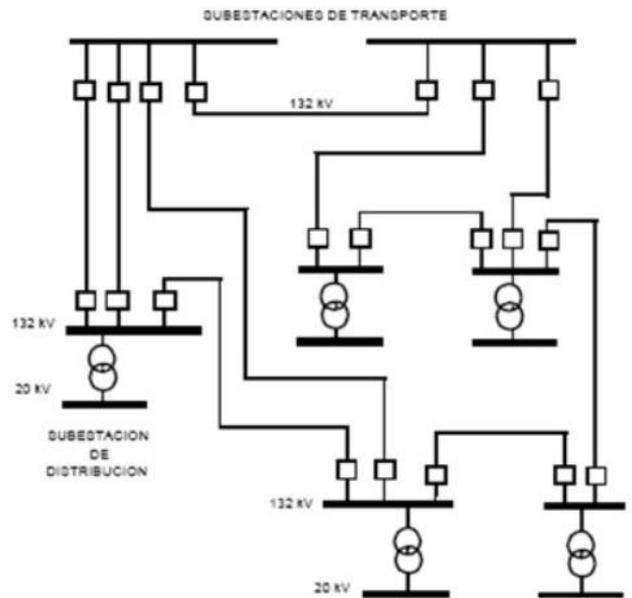


Fig. 3.3 Red mallada. "CNE, ARIAE"

Es el caso de una simple red de transporte alimentada desde dos puntos, donde la selectividad cronométrica establecería retrasos elevados en los tiempos de actuación en los dos sentidos, resultando en el disparo indeseado de las protecciones independientemente de la posición de la falta (pérdida de selectividad).

Además, las redes de transporte son las de mayor longitud, (en España pueden alcanzar los 300 km), lo que conlleva a una variación más acusada de la corriente de cortocircuito al desplazarse entre subestaciones, otro inconveniente para la protección de sobreintensidad.

A partir de esa necesidad surgen técnicas más complejas de protección. Si se conociese el "sentido" de la corriente de cortocircuito se podría establecer diferentes subestructuras para redes radiales, es decir añadir componente direccional al relé de protección. Otra forma sería medir la impedancia y representarla en el plano complejo para establecer un nuevo criterio de actuación del relé (relé de distancia).



### 3.3. Tipos de selectividad

Se define como selectividad a la capacidad de, requiriendo la actuación por parte de varios elementos de la instalación, que solo actúe o actúen los dispositivos que mas convengan para mantener el mayor suministro, la seguridad de la instalación... En definitiva, establecer un orden de prioridad de actuación de los diferentes dispositivos de protección de los que se requiera su operación, como en una maniobra o en el caso de una falta.

Según [2] el término selectividad significa “la capacidad que tiene un relé o un sistema de protección de producir únicamente la desconexión del elemento en falta manteniendo en servicio las partes de la red no afectadas”.

Los tipos más comunes de selectividad son:

#### 3.3.1 Selectividad amperimétrica

En la selectividad amperimétrica la falta se despeja atendiendo a criterios de corriente de cortocircuito, siendo el calibre de la protección más alto según se aproxima a la fuente (al disminuir el número de impedancias).

Este tipo de selectividad vendrá definida por: las corrientes de cortocircuito en cada punto de la instalación, la velocidad de actuación (delay) en los relés y el poder de corte último del interruptor automático que controlen.

El tipo de selectividad podrá ser parcial o total. Según la IEC 60947-2 la diferencia será que, en la parcial, ante la presencia de dos dispositivos de protección, la selectividad sin que actúen los dos será para un nivel de sobrecorriente máximo en lugar de para todas las  $I_{cc}$  de la instalación.

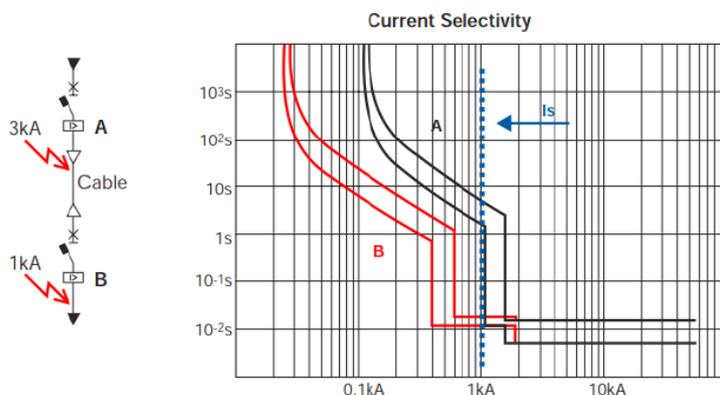


Fig 3.4. Ejemplo de selectividad amperimétrica “ABB Técnicas avanzadas de selectividad”.



**Universidad de Valladolid**

En el ejemplo de la Fig 3.4 puede observarse cómo para una falta de 1 kA actuará la protección B, no obstante, también podría actuar A en la zona de superposición de la curva que corresponde a la parte de cortocircuito. La actuación de uno u otro en esa zona dependerá de diversos factores (por lo general la energización de los relés electromecánicos será más lenta para mayores calibres, por ejemplo), si esto ocurriera sería una selectividad deficiente o incorrecta que se debería complementar con otros tipos de selectividad.

El tipo de curva de disparo de cada relé dependerá de su estado en el momento de actuación, pudiendo ser en frío ( la curva interior) cuando la protección no ha actuado pasado un tiempo prudencial o en caliente (curva exterior).

### 3.3.2 Selectividad cronométrica

Es la capacidad de despejar una corriente de falta mediante la introducción de unos tiempos de demora intencionados (Fig 3.5), siendo mínimos en las protecciones más lejanas a la alimentación y máximos las más cercanas (solo aplicable en redes radiales).

Normalmente en este tipo de selectividad se suele utilizar un interruptor automático “aguas abajo” sin la capacidad de selectividad cronométrica ( únicamente instantánea de sobreintensidad), denominado de categoría A, sin previsión de retardo para selectividad, y en los demás ya se utilizarían interruptores de categoría B (con posibilidad de retardo).

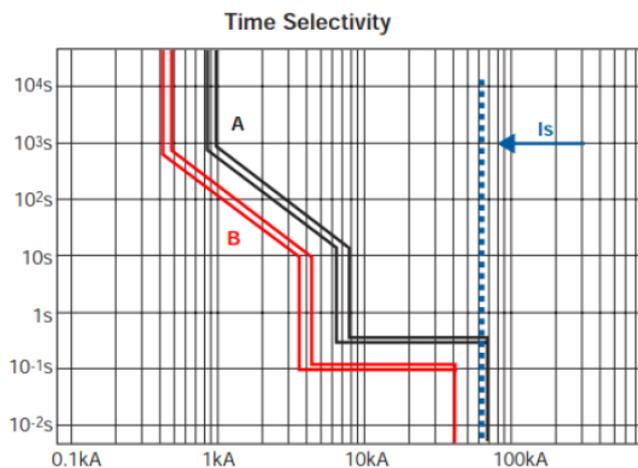


Fig 3.5 Ejemplo de selectividad cronométrica “ABB Técnicas avanzadas de selectividad”.

Fig 5.2. Selectividad cronométrica “ABB Técnicas avanzadas de selectividad”

No obstante, este método no será válido para las grandes redes malladas de transporte ya que el tiempo en que se utilice el retardo de la protección, habrá interruptores que estarán soportando esa corriente de cortocircuito, parámetro



### Universidad de Valladolid

denominado corriente de corta duración admisible ( $I_{cw}$ ). Al igual que la anterior, la selectividad cronométrica podrá ser total o parcial, pero en este caso la selectividad total se referirá a que el sistema de protección es capaz de despejar la falta con el dispositivo más próximo.

Según [2] para conseguir selectividad cronométrica:

- Los I.A. de las alimentaciones a las cargas deben actuar sin retardo intencional (disparo instantáneo) o ser de tipo limitador.
- Los márgenes de temporización entre unidades de corto retardo sucesivos deben de ser al menos de 0.1 s.
- La selectividad cronométrica puede ser total en el caso de que los I.A. sean de categoría B y tengan una  $I_{cw}$  igual o superior a la máxima corriente de cortocircuito que tienen que despejar.

#### 3.3.3 Selectividad lógica [2]

Este tipo de selectividad se requiere la utilización de relés electrónicos, donde se comunicarán mediante señales para establecer el criterio de actuación de las protecciones. Habrá dos posibles configuraciones [2]:

- Disparo temporizado. El relé electrónico emite una señal y comprueba si recibe otras señales de otros relés aguas abajo. Si recibe una señal (señal de bloqueo) el relé retrasará su tiempo de actuación y actuará si la falta no fuera despejada en un determinado tiempo.
- Disparo instantáneo. El relé emite una señal y no recibe ninguna. Esto significará que la falta solo es observada por éste y actuará de forma inmediata.

#### 3.3.4 Selectividad energética

Este tipo de selectividad surge debido a:

- El aumento de las potencias instaladas, lo que representa un incremento de las corrientes de cortocircuito y de los poderes de ruptura necesarios.
- Reducir las corrientes de defecto de la instalación.

El concepto se basa en el empleo de interruptores limitadores de corriente (Fig 3.6), es decir: (IEC 60947-2) “un interruptor con un tiempo de interrupción suficientemente corto para evitar que la corriente de cortocircuito alcance su valor máximo”.

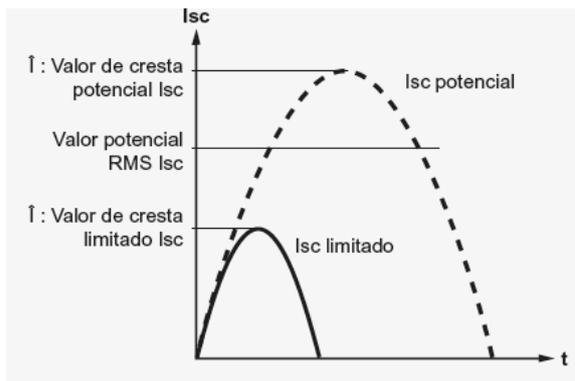


Fig 3.6 Corriente de cortocircuito limitada "COORDINACIÓN ENTRE DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN LEGRAND"

Este tipo de selectividad suele estar estrictamente ligado a tablas de fabricantes, donde ofrecen los valores máximos de selectividad para diferentes combinaciones de interruptores.



---

**Universidad de Valladolid**



## 4. Protección de distancia

### 4.1 Introducción

A la hora de proteger el sistema de transporte fuertemente mallado, la protección de sobreintensidad va adquiriendo una mayor complejidad para garantizar la total protección de la red, además de requerir tiempos de despejes más largos que otro tipo de protecciones. El relé de distancia no solo logrará tiempos más cortos, sino que además garantiza una amplia protección del circuito con un solo dispositivo, gracias a su funcionamiento mediante etapas, lo que repercutirá de forma significativa en los costes del sistema de protección.

Los relés de distancia tienen la capacidad de discriminar la localización de la falta en el sistema. Solo requiere la obtención de la impedancia del punto considerado, a partir de la tensión y de la corriente circulante. La impedancia medida se compara con la impedancia del tramo de línea asignado a dicha protección, conocido a priori, si la impedancia medida es menor que la impedancia de la línea se habrá detectado una falta y el relé mandará la orden de apertura al I.A.

Esta es una protección indirecta, ya que las señales que utiliza para su actuación provienen de los secundarios de los transformadores de medida.

Debido a imprecisiones en la toma de datos para implementar este tipo de protecciones (los errores en los transformadores de intensidad y de tensión y el procedimiento para calcular la impedancia de la línea), el alcance de la protección se ajusta a un valor inferior al 100% de la línea a proteger, es decir, se deja un margen de seguridad al final de la línea (10~20%). Esto se denomina “etapa de subalcance” que asegura la correcta discriminación entre faltas internas y externas a la zona de actuación del dispositivo.

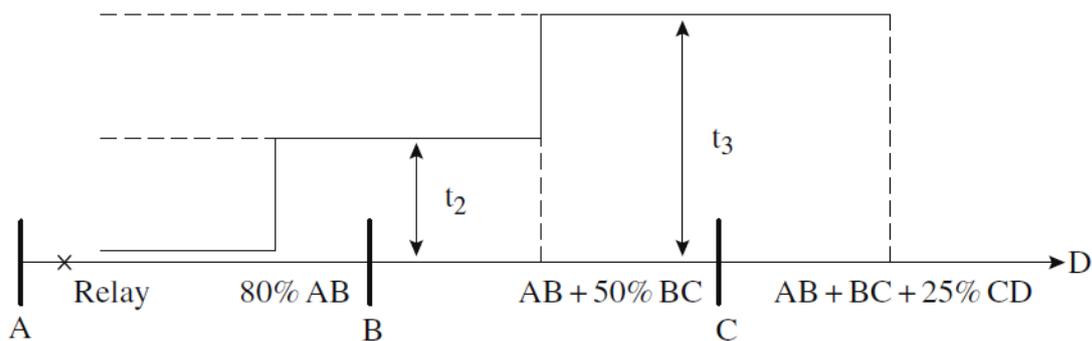


Fig. 4.1 Escalones zonas de protección relé de distancia [3]

También se suele disponer de zonas secundarias (Fig 4.1) que exceden el alcance del tramo de la línea a proteger, donde para asegurar una correcta selectividad, se complementará con una selectividad cronométrica introduciendo un tiempo de retraso en los siguientes escalones, que será mayor para relés electromecánicos. Estos escalones y la coordinación cronométrica permiten que el relé de distancia



actúe como protección de back-up o respaldo en otros tramos diferentes del que tiene asignado como protección primaria.

En secuencias de operaciones, el relé de distancia debería constar de: [3]

- Medida de tensión y corriente y filtrado de altas frecuencias (gracias al circuito equivalente del transformador, que actuará como filtro paso bajo).
- Cálculo de la impedancia.
- Comparación de la impedancia medida con la impedancia calculada previamente.
- Tiempo de retraso si la falta está en el segundo o tercer escalón

## 4.2 Principio físico de funcionamiento

### 4.2.1 Relé electromecánico

Este tipo de relé está constituido generalmente [5], por una bobina o bobinas de operación, una armadura y un contacto móvil. Admiten suministro de tensión en alterna y en continua, y su actuación se produce al atraer el contacto móvil el campo magnético generado por la bobina. El tipo de tecnología a utilizar variará en función de la categoría y curva en el plano R/X que se busque conseguir.

El movimiento se ha perfeccionado a lo largo de los años y puede ser: con movimiento del contacto tangencial a la bobina, con pivote axial mediante un pistón, giratorio, etc.

La fuerza de atracción en el relé será de la forma:

$$F = K_1 I^2 - K_2 \quad (4.1)$$

con:

$$K_1 = \frac{kN^2}{\left(\frac{e}{s} + re\right)^2 \cdot s} \quad (4.2)$$

donde la constante  $K_1$  dependerá del número de espiras del solenoide (N), el hueco de aire o entrehierro (e), la reluctancia resultante en el circuito magnético (re) entre otros factores, y una constante de signo contrario  $K_2$  que modela la fuerza del muelle de restricción y recupera la posición de contacto abierto según la ley de Hooke [2].

En la práctica los relés de distancia electromecánicos más comunes son los de inducción, que consisten en un sistema electromagnético que opera mediante la interacción de flujos magnéticos giratorios producidos por grupos de bobinas (teorema de Ferraris). Estos campos magnéticos giratorios se producen por el desfase de dos flujos magnéticos alimentados en corriente alterna que producirán el movimiento de un conductor, normalmente con forma de disco (Fig 4.2).

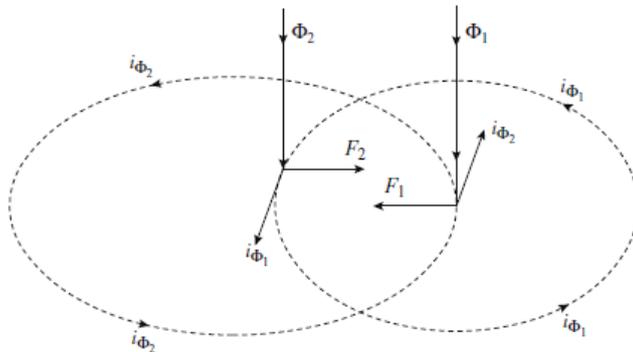


Fig. 4.2 Fuerzas electromagnéticas en relés de inducción

Como consecuencia de esos campos electromagnéticos desfasados, se produce un par sobre el elemento móvil del relé:

$$M = k\phi_1\phi_2 \sin \theta \quad (4.3)$$

donde  $\theta$  es el ángulo de desfase entre los flujos, siendo el par máximo para  $\theta = \pm 90^\circ$  y nulo cuando  $\theta = 0^\circ$ .

Estas protecciones se pueden complementar con diferentes elementos:

- Espira de sombra. Es una bobina en cortocircuito que producirá un desfase en el flujo producido por la bobina principal y evitará el “releto” (impacto de la armadura con el contacto cuando el flujo pasa por cero).
- Copa de inducción. Es el más parecido a un motor síncrono de polos salientes, donde cada polo será un par de bobinas. También consta de entrehierro. La restricción del movimiento se suele realizar mediante un muelle especial dispuesto en la posición central de la copa. En este caso la propia inercia del elemento rotativo proporciona la característica de tiempo de estos relés, en el caso del relé de copa de inducción será el que menor inercia tenga, luego será utilizado en aplicaciones que requieran características instantáneas.

En la Fig 4.3 se muestran algunos ejemplos de este tipo de relés, junto con sus curvas características de actuación en el plano R/X. El primero consta de una barra en un apoyo fijo que permite su inclinación. Si la corriente es suficientemente elevada la bobina atraerá la barra y producirá unión de los contactos. La característica de este relé se denomina impedancia, una circunferencia centrada en el origen. No tendrá componente direccional, esto es, el dispositivo no es capaz de discernir la impedancia resultante de una corriente en oposición de fase, que quedaría en el tercer cuadrante en el plano R/X.

El segundo relé es de copa de inducción. Consta de un bobinado de operación que producirá la actuación del relé y un bobinado (de frenado) que se opone a éste. Su característica es la denominada  $mho$ , aunque puede desplazarse hasta un par máximo gracias a la impedancia  $Z_b$ . Podrá tener componente direccional.

El tercer relé se denomina "blinder" y se utiliza como complemento a los relés anteriores, para delimitar la curva correspondiente a una impedancia de carga en funcionamiento normal ya que, por lo general, la característica tiende a ser mucho mayor que la zona correspondiente a la impedancia de cortocircuito real.

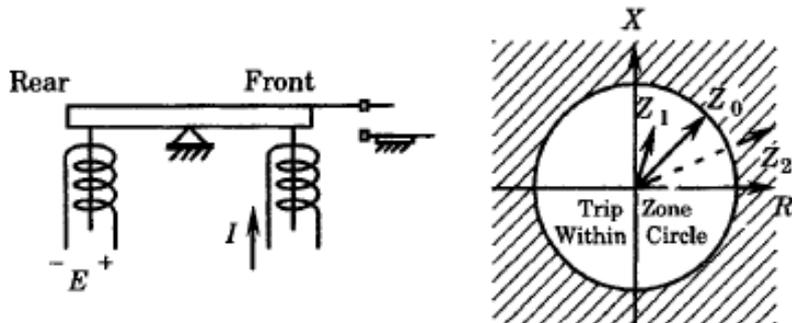
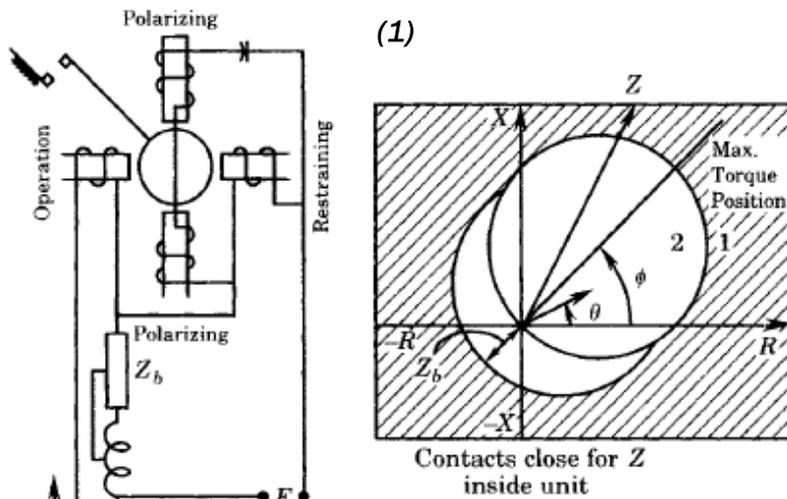
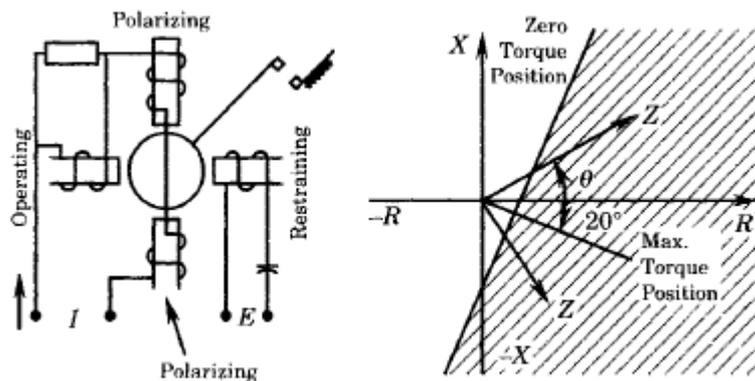


Fig. 4.3 (1) Relé con barra de equilibrio. (2) Relé  $mho$ . (3) Relé cegador de carga (blinder) [3]



(1)

(2)



(3)

#### 4.2.2 Relé de distancia electrónico y digital

El relé de distancia electrónico o de estado sólido es aquel en el que su característica de disparo ha sido desarrollada por componentes electrónicos y magnéticos sin componentes mecánicos. La primera generación utiliza transistores en sus esquemas de protección, mientras que la segunda emplea circuitos integrados y amplificadores operacionales en el diseño de los relés. El relé electrónico simula la característica de actuación de un relé electromecánico implementando mayor facilidad de modificación de la curva de actuación, entre otras muchas funciones. Finalmente, el relé digital (Fig 4.4) puede disponer de funcionalidades adicionales, como la comunicación de su microprocesador con un PC externo mediante interfaces (HMI), además de poseer mayor número de protecciones disponibles, como detección de faltas a tierra, funciones de medida y control...

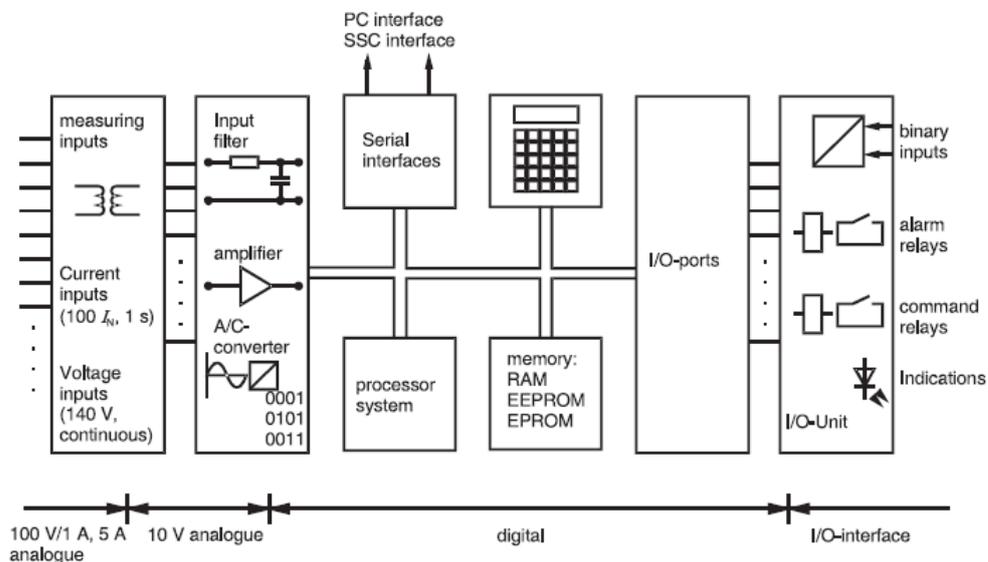


Fig. 4.4 Estructura de un relé digital [4]

### 4.3 Magnitudes de medida en la protección de distancia

Para poder comprobar faltas bifásicas y trifásicas el relé cuenta con una unidad de medida por fase (Tabla 4.1). Así el dispositivo medirá las tensiones compuestas y las diferencias de corrientes de fase para detectar faltas entre fases, y las tensiones simples y corrientes de línea compensadas con un término adicional para las faltas en una fase (Tabla 4.2).

Unidad	Intensidad de entrada	Tensión de entrada
R-S	$I_R - I_S$	$U_R - U_S$
S-T	$I_S - I_T$	$U_S - U_T$
T-R	$I_T - I_R$	$U_T - U_R$

Tabla 4.1 Unidades de medida de relé de distancia para faltas trifásicas y bifásicas [2]

Unidad	Intensidad de entrada	Tensión de entrada
R-E	$I_R + I_{compens}$	$U_{RE}$
S-E	$I_S + I_{compens}$	$U_{SE}$
T-E	$I_T + I_{compens}$	$U_{TE}$

Tabla 4.2 Unidades de medida de relé de distancia para faltas monofásicas [2]

El término adicional o de compensación se determina por la ecuación:

$$\overline{I_{compens}} = \overline{I_{0r}} \cdot \left( \frac{\overline{Z_{L0}}}{\overline{Z_L}} - 1 \right) \quad (4.4)$$

donde  $\overline{I_{0r}}$  es la componente homopolar de la corriente de fase,  $\overline{Z_{L0}}$  es la impedancia homopolar y  $\overline{Z_L}$  es la impedancia de secuencia directa.

Se muestra en la Fig 4.5 un posible montaje para la obtención de las señales recibidas por las unidades de medida, mas la corriente homopolar necesaria para el cálculo del término de compensación. El procedimiento se lleva a cabo mediante transformadores de intensidad de adaptación.

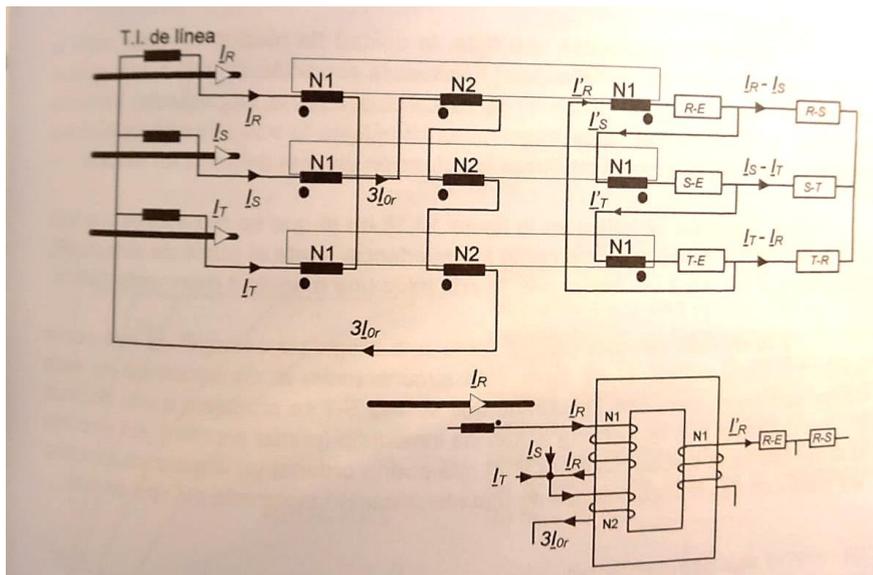


Fig. 4.5 Conexión para la obtención de las magnitudes de las unidades de medida.

Sabiendo que la relación de las nuevas corrientes de las unidades de medida cumple que:

$$\overline{I'_{R',S',T'}} = \overline{I_{R,S,T}} + 3\overline{I_{0r}} \cdot \frac{N_2}{N_1} \quad (4.5)$$

el otro término del término de compensación se consigue por la relación de transformación de espiras del T.I. de adaptación:



Universidad de Valladolid

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{3} \left( \frac{|\bar{Z}_{L0}|}{|\bar{Z}_L|} - 1 \right) \quad (4.6)$$

#### 4.4 Curvas características de los relés de distancia

Las curvas de actuación o características del relé se obtienen mediante la comparación de magnitudes complejas obtenidas a través de las unidades de medida. A partir de los valores que recibe de los transformadores de instrumentación, el relé obtiene unas nuevas señales de operación y frenado, que seguirán siendo números complejos. Finalmente se utilizan comparadores para obtener la curva de actuación del dispositivo, pudiendo ser comparadores de amplitud o de fase. Se comparan las señales de operación y frenado.

Las diferentes curvas de actuación se obtienen con diferentes expresiones para unas constantes. Se ilustrará con dos ejemplos: características MHO y ohm.

Si se analiza una unidad de medida (ver Fig. 4.5), por ejemplo, la unidad R-S, se observa que las magnitudes que recibe son:

$$\bar{I}_T = \bar{I}_R - \bar{I}_S \text{ y } \bar{U}_T = \bar{U}_R - \bar{U}_S = \bar{U}_{RS} \quad (4.7)$$

A partir de las magnitudes de entrada, el dispositivo crea unas nuevas señales complejas  $S_o$  (operación) y  $S_F$  (frenado):

$$\bar{S}_o = \bar{K}_A \cdot \bar{I}_T + \bar{K}_B \cdot \bar{U}_T \quad (4.8)$$

$$\bar{S}_F = \bar{K}_C \cdot \bar{I}_T + \bar{K}_D \cdot \bar{U}_T \quad (4.9)$$

Así pues, la condición  $|S_o| = |S_F|$  será la condición de equilibrio (es decir, el relé no actúa), mientras que el relé actuará para  $|S_o| > |S_F|$ .

Finalmente, para determinar la característica de actuación del relé se deberá evaluar la siguiente condición [2]:

$$\frac{|\bar{S}_F|}{|\bar{S}_o|} = 1 = \frac{|\bar{K}_C + \bar{K}_D \cdot \bar{Z}_t|}{|\bar{K}_A + \bar{K}_B \cdot \bar{Z}_t|} \cdot \frac{|I_T|}{|I_T|} = \frac{|\bar{K}_C + \bar{K}_D \cdot \bar{Z}_t|}{|\bar{K}_A + \bar{K}_B \cdot \bar{Z}_t|} \quad (4.10)$$

Donde  $Z_t$  es la impedancia medida por la unidad  $Z_t = U_t/I_t$ .

Los coeficientes complejos pueden adoptar diferentes valores, lo que dará lugar a las diferentes curvas características de los relés de distancia, que serán los lugares geométricos de  $Z_t$  en el plano R/X.

A continuación, se muestran algunos ejemplos de curvas características modificando el valor de los coeficientes:

- Para  $\bar{K}_A = Z_{2|\beta}$ ,  $K_B = 0$ ,  $\bar{K}_C = -Z_{1|\alpha}$ ,  $K_D = 1|_{0^\circ}$ , la ecuación 4.10 resulta:

$$\frac{|\bar{Z}_t - \bar{Z}_1|}{|\bar{Z}_2|} = 1 \quad (4.11)$$

Esta expresión representa en el plano complejo R/X la ecuación de una circunferencia con centro en el afijo de  $\bar{Z}_1$  y de radio  $Z_2$ , como se muestra a continuación (Fig. 4.6):



Universidad de Valladolid

$$|\bar{Z}_t - \bar{Z}_1| = |\bar{Z}_2|$$

$$(Z_t \cos \theta - Z_1 \cos \alpha)^2 + (Z_t \sin \theta - Z_1 \sin \alpha)^2 = |Z_2|^2 \quad (4.12)$$

La ecuación de una circunferencia en coordenadas polares, u operando resulta la forma polar estándar de una circunferencia de radio  $Z_2$  y desplazada el afijo del número complejo  $\bar{Z}_1$  (Fig. 4.6) :

$$Z_t^2 + Z_1^2 - 2Z_t Z_1 \cos(\theta - \alpha) = |\bar{Z}_2|^2 \quad (4.13)$$

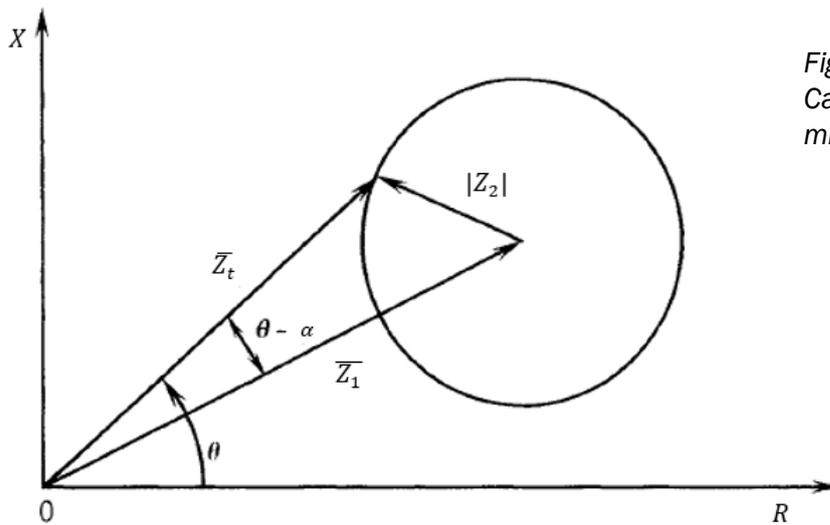


Fig. 4.6  
Característica  
mho

Esta característica se conoce como mho desplazada y el dispositivo actuará cuando la impedancia medida se encuentre en el interior de la circunferencia.

- Para  $\bar{K}_A = -Z_1|_{\beta}$ ,  $K_B = 1$ ,  $K_C = 0$  y  $K_D = 1$  se obtiene:

$$\frac{|\bar{Z}_t|}{|\bar{Z}_t - \bar{Z}_1|} = 1 \quad (4.14)$$

Esta expresión, en el plano R/X, es la ecuación de la recta perpendicular al complejo  $\bar{Z}_1$  que pasa por su punto medio (Fig. 4.7). Efectivamente, operando se verifica la ecuación:

$$\frac{Z_1}{2} = Z_t \cos(\theta - \beta) \quad (4.15)$$

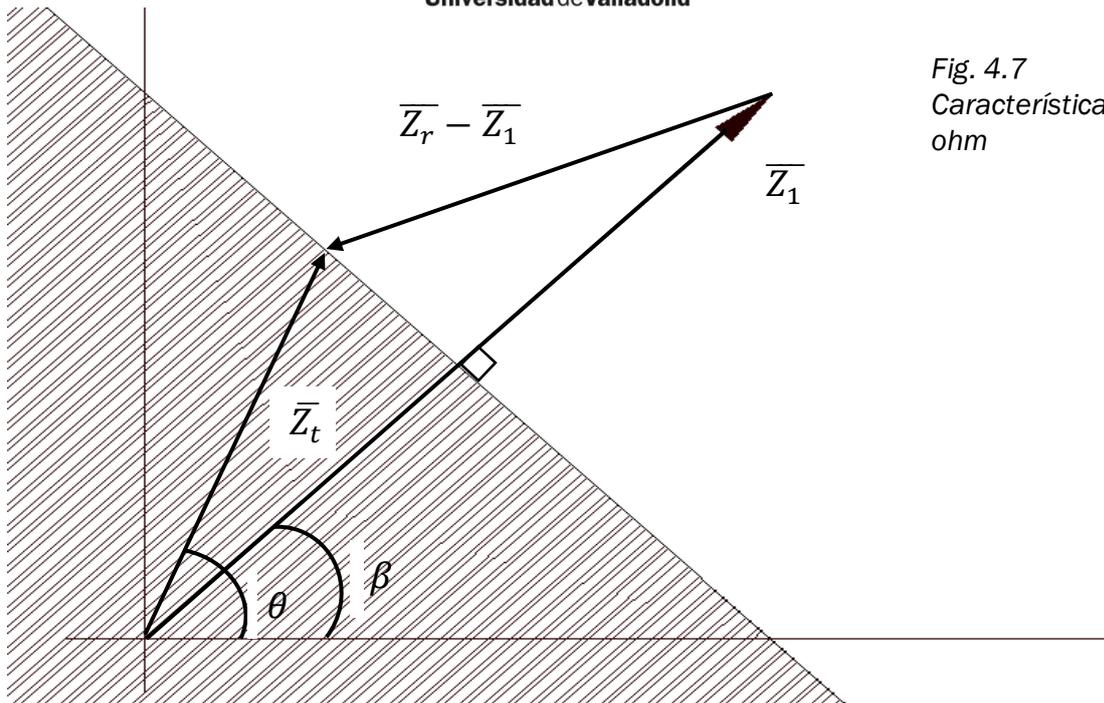


Fig. 4.7  
Característica  
ohm

Esta característica es no direccional. Deberá de usarse con otro elemento direccional además de una posible intrusión de la protección en la impedancia de carga, en ese caso deberá utilizarse juntamente con otra característica.

La operación del relé tiene lugar cuando la impedancia medida cae dentro de la zona rallada (Fig. 4.7). Un caso especial de esta característica es cuando  $\beta = 90^\circ$  la característica pasa a denominarse reactancia al ser una recta horizontal en el plano R/X.

A continuación, se resumen los aspectos principales de algunas curvas características [2].

**Característica mho desplazada (Fig. 4.8):**

- No direccional (en general no es apta para protección en el primer y segundo escalón).
- Acomodable a valores de resistencia de falta.
- Impedancia de carga fuera de la característica, salvo que esté ajustada para un alcance (tercer escalón).

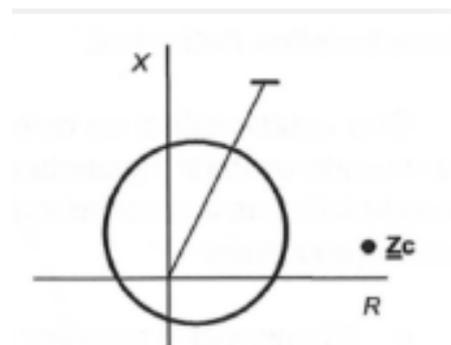


Fig. 4.8 mho desplazado



### Característica impedancia (Fig. 4.9):

- No direccional.
- Generalmente se debe utilizar con otro elemento direccional para poder cubrir el primer y segundo escalón de protección.
- Valores de resistencia de falta aceptables.

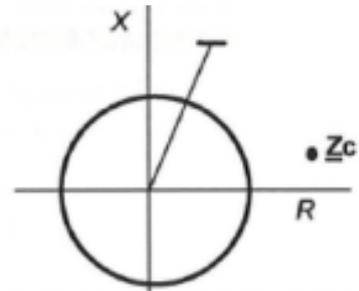


Fig. 4.9 Impedancia

### Característica Reactancia (Fig. 4.10):

- No direccional, debe de usarse con otro elemento direccional.
- Permite cualquier valor de resistencia de falta.
- Incluye siempre en la zona de operación, la impedancia de carga, por lo tanto, es necesario acotar el alcance con otro elemento.
- Aplicable preferentemente a líneas cortas.

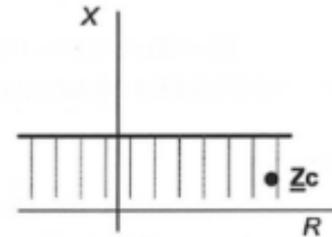


Fig. 4.10 Reactancia

### Característica Poligonal (Fig. 4.11):

Proporcionada por los relés digitales a microprocesador

- Direccional si pasa por el origen.
- Permite elevada resistencia de falta.
- $Z_c$  fuera de la característica.
- Puede presentar problemas de coordinación con características circulares en el segundo y tercer escalón.

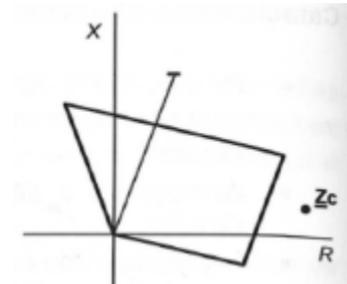


Fig. 4.11 Poligonal

Finalmente cabe destacar que se pueden generar curvas características de mayor complejidad mediante la combinación (usando puertas lógicas) del resultado de varios comparadores como se ilustra en las Fig. 4.12 y 4.13.

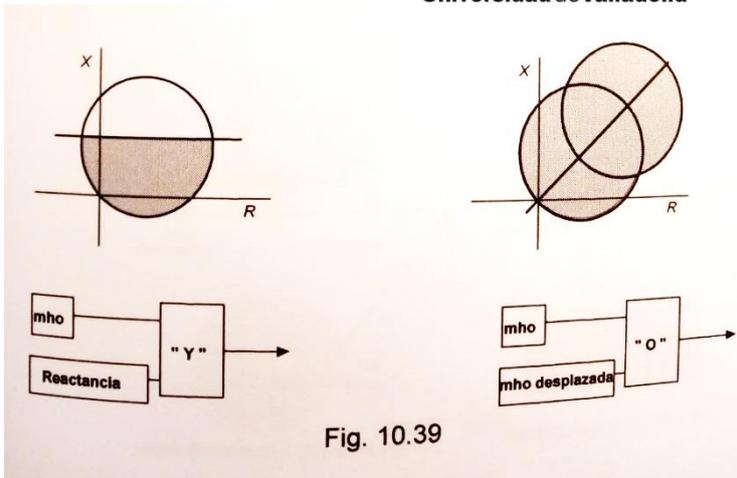


Fig. 10.39

Fig. 4.12 Posibles combinaciones de curvas características

El esquema de protección de la Fig. 4.13 emplea características de impedancia para los distintos escalones, y se limitan mediante una característica ohm que corta al origen dotando las protecciones de direccionalidad. El tercer escalón deberá quedar fuera de la zona de carga.

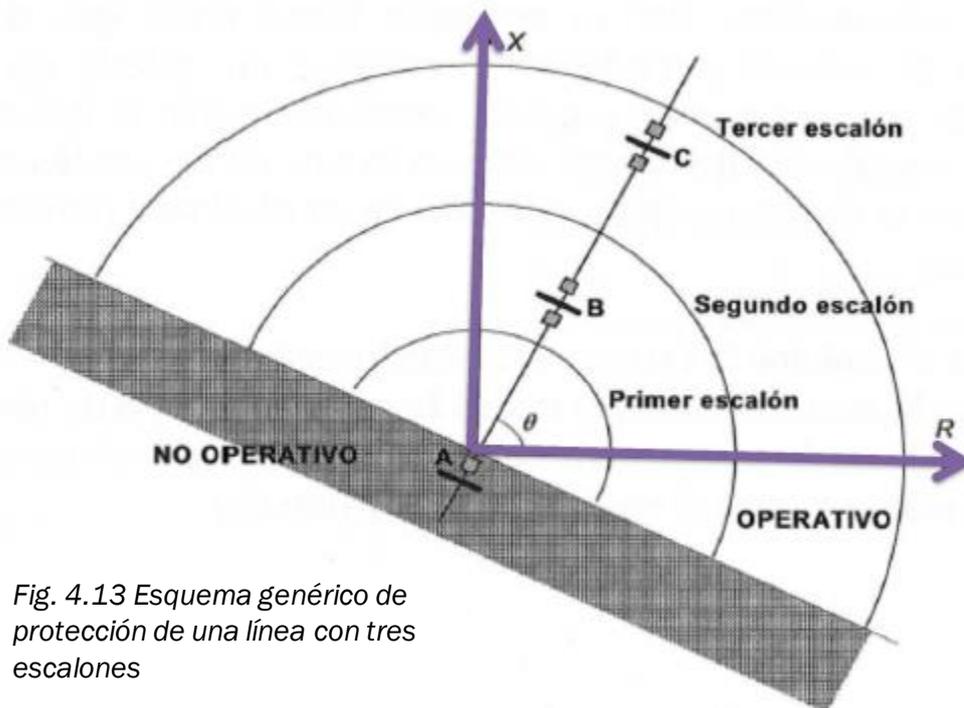


Fig. 4.13 Esquema genérico de protección de una línea con tres escalones

## 4.5 Relés digitales

En la actualidad los relés más utilizados, y que están sustituyendo a los electromecánicos y electrónicos analógicos son los relés numéricos, también

denominados de tipo microprocesador. Son del tipo electrónico digital, que mediante algoritmos matemáticos implementan multitud de funciones para la protección de un sistema de transmisión eléctrico, aparte de otras funciones de medida y comunicación.

Este tipo de relés cuenta con una unidad de conversión A/D para poder procesar las señales analógicas de los transformadores de medida. A continuación, se describen dos relés comerciales de tipo de digital para ilustrar todas las funcionalidades incorporadas en este tipo de dispositivos de protección.

#### 4.5.1 REL670 ABB

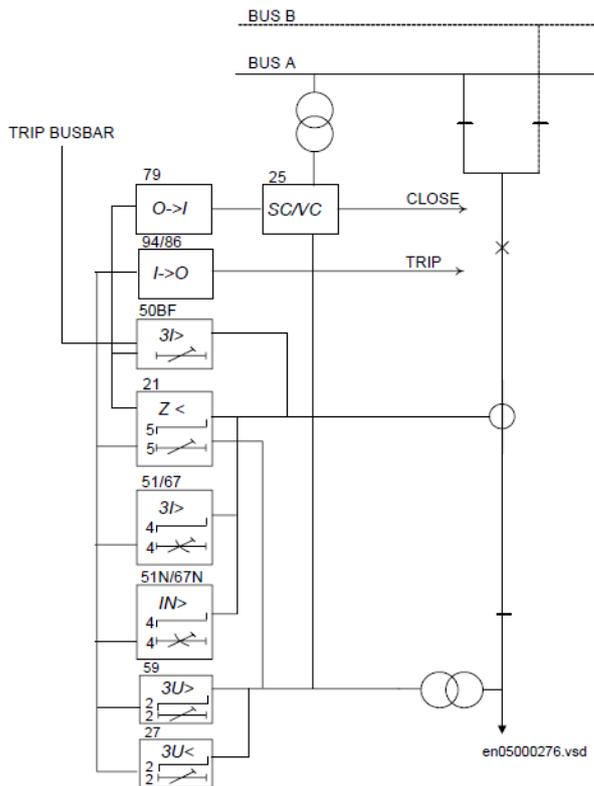


Fig. 4.14 Esquema protección relé REL670 ABB para un interruptor automático

Este apartado está dedicado a mostrar las funcionalidades del relé REL670 de la compañía ABB. En la Fig. 4.14 se muestra el esquema de conexiones del dispositivo. Este relé consta de las siguientes unidades según estándares ANSI/IEEE:

- **21.** Zonas de protección de distancia (PDIS). Cuenta con hasta cinco zonas de protección totalmente independientes, pudiendo tener cada una componente direccional o no. Su característica permite la detección de faltas con alta resistividad sin entrar en la zona de funcionamiento normal de la carga (Fig 4.15).
- **25.** Comprobación de sincronismo y de energización. Esta función verifica que la onda de tensión a ambos lados

del dispositivo tiene la misma frecuencia y fase.

- **79.** Dota al interruptor automático de auto-reconector, se podrán programar hasta cinco reconexiones para verificar el régimen transitorio de la falta.
- **94/86.** Proporciona la orden de disparo, además de implementar otras funciones como la prolongación del pulso de actuación o el posible bloqueo del interruptor.

- **50BF.** Protección de fallo de interruptor que asegura una rápida respuesta como respaldo y otros I.A.
- **51/67.** Protección de sobrecorriente con cuatro etapas, pudiendo ser de tiempo definido o tiempo inverso, de forma independiente para cada etapa. También se puede establecer la direccionalidad de cada curva.

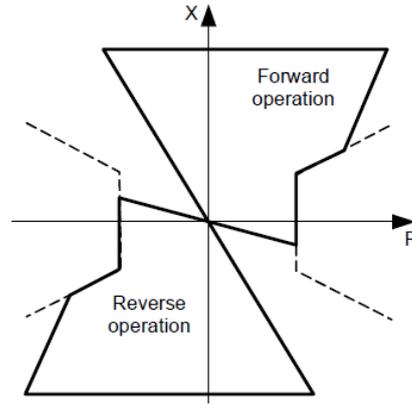


Fig. 4.15 Característica del relé REL670 con la función intrusión en la carga

- **51N/67N.** Mismas características que la función anterior, pero para corrientes residuales. Con esta función se podrá usar el dispositivo como protección principal para faltas fase – tierra.
- **59.** Protección para sobretensiones.
- **27.** Protección para subtensiones.

En la Tabla 4.3 se puede observar el amplio rango de configuración de la curva de disparo de este dispositivo.

### Distance protection

Table 21: Distance protection zones (PDIS, 21)

Function	Range or value	Accuracy
Number of zones	5 with selectable direction	-
Minimum operate current	(10-30)% of $I_{base}$	-
Positive sequence reactance	(0.50-3000.00) $\Omega$ /phase	$\pm 2.0\%$ static accuracy
Positive sequence resistance	(0.10-1000.00) $\Omega$ /phase	$\pm 2.0$ degrees static angular accuracy
Zero sequence reactance	(0.50-9000.00) $\Omega$ /phase	Conditions:
Zero sequence resistance	(0.50-3000.00) $\Omega$ /phase	Voltage range: $(0.1-1.1) \times U_r$
Fault resistance, Ph-E	(1.00-9000.00) $\Omega$ /loop	Current range: $(0.5-30) \times I_r$
Fault resistance, Ph-Ph	(1.00-3000.00) $\Omega$ /loop	Angle: at 0 degrees and 85 degrees
Dynamic overreach	<5% at 85 degrees measured with CVT's and $0.5 < SIR < 30$	-
Impedance zone timers	(0.000-60.000) s	$\pm 0.5\% \pm 10$ ms

Tabla 4.3 Parámetros configurables del bloque función 21 REL670

#### 4.5.2 S7A522 Siemens

Este apartado está dedicado a mostrar las funcionalidades del relé S7A522 de la compañía Siemens. En la Fig. 4.16 se muestra el esquema de conexiones del dispositivo y las diferentes protecciones que tiene incorporadas.

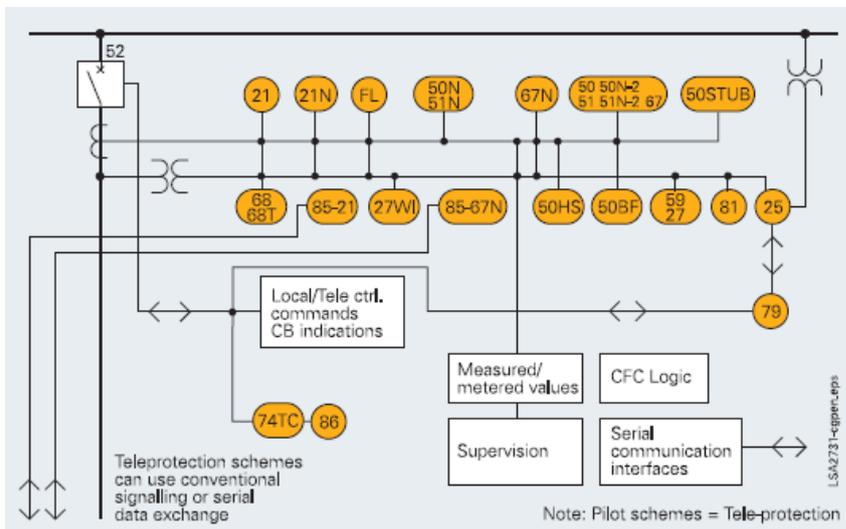


Fig 4.16 Esquema de protección relé S7A522 Siemens

Algunas de las funciones de las que consta el relé son las siguientes según estándares ANSI/IEEE:

- **21.** Protección de distancia. Posee característica poligonal o  $mho$  (Fig 4.17) pudiéndose utilizar independientemente para faltas de fase o faltas a tierra. Cuenta con hasta 6 zonas de protección, con tiempos de operación inferiores a 20ms.

La protección evita disparos intempestivos para líneas fuertemente cargadas con la característica límite de intrusión, discriminando las situaciones normales de funcionamiento de las de cortocircuito.

El uso de filtros digitales inmuniza a la unidad de ruidos que contienen las magnitudes medidas, como componente de DC o cambios de frecuencia.

- **51N/67N.** Función utilizada para detectar faltas a tierra con gran valor resistivo. Esta función cuenta con 4 características de protección por sobreintensidad. Tres de tiempo definido y una de tiempo inverso (IDMT), de acuerdo con IEC 60255-3.

La componente de dirección se determina a partir de la corriente del neutro y la componente homopolar de la tensión o bien a través de las componentes inversas  $I_2$  y  $V_2$  de tensión y corriente. Se podrá configurar para que estas características sean o no direccionales.

El dispositivo también cuenta con otras 3 zonas de protección de back-up.

- **FL.** (Fault locator). Localiza la distancia a la falta, el resultado se puede mostrar en ohmios o en kilómetros.

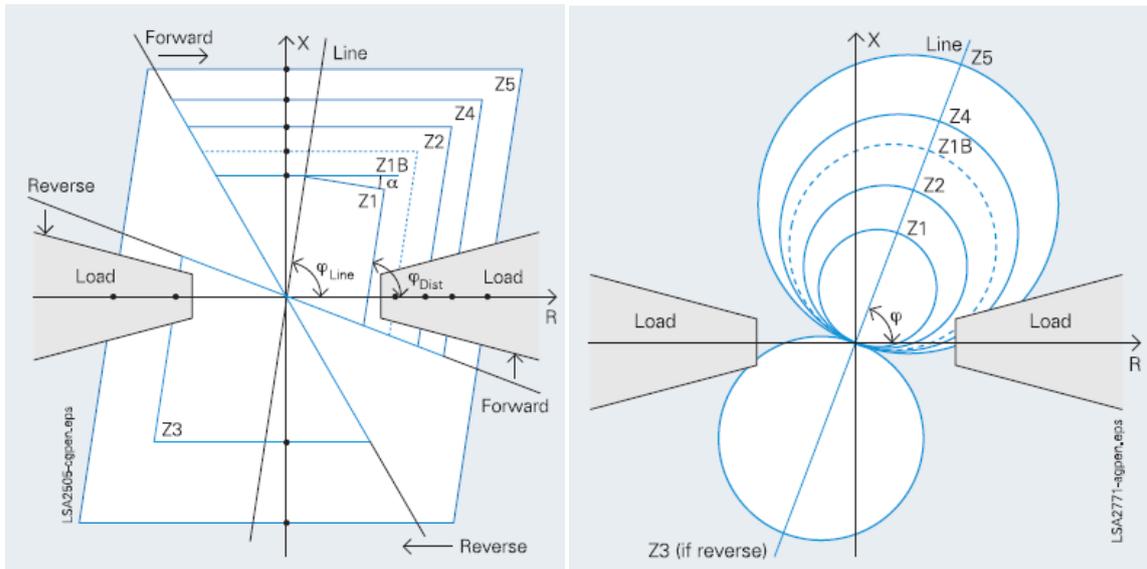


Fig 4.17 Protección de distancia característica poligonal y mho STA522 Siemens

- **68.** Detección y monitorización de oscilaciones de potencia.
- **50HS.** Disparo instantáneo de sobrecorriente de alta velocidad.
- **50BF.** Protección de fallo de interruptor. Si la falta no es despejada después de un cierto tiempo se volverá a mandar una señal de apertura
- **59/27.** Protección contra sobretensiones y subtensiones. Se pueden medir los siguientes tipos de sobretensiones: Fase-tierra, Fase-Fase y la medida de las tres componentes de secuencia. Mientras que subtensiones: Fase-tierra, Fase-Fase y la secuencia directa.
- **810/U.** Protección de frecuencia. Establece un rango máximo de variación de frecuencia permisible.



---

**Universidad de Valladolid**

## 5. Implementación en Matlab de un relé de distancia

### 5.1. Introducción a Matlab/Simulink

Matlab es una abreviatura del término “laboratorio de matrices”. Es un lenguaje de programación de alto nivel basado en matrices para expresar las matemáticas computacionales. Su gran versatilidad, amplio conjunto de bibliotecas y su propio entorno de desarrollo le ha permitido abarcar un amplio conjunto de campos de estudio (automática, procesamiento de señales, imágenes, mecánica, electrónica, aeromodelismo, etc.).

Además, es compatible con un gran número de lenguajes de programación pudiendo exportar el código de Matlab a C, C++ o Fortran.

El tipo de lenguaje es interpretado (similar a Python), y se puede ejecutar tanto en su entorno interactivo como a través de un archivo de script.

Matlab dispone de dos potentes herramientas que complementan al programa: GUIDE para la creación de interfaces gráficas de usuario para cualquier programa implementado en Matlab y Simulink, un entorno gráfico orientado al análisis de sistemas de control de varios campos diferentes. Algunas de las aplicaciones de Simulink son: procesamiento de señal y comunicaciones, simulación de sistemas en tiempo real, generación de código, etc.

### 5.2. Como programar un relé de distancia

En primer lugar, se describirán los elementos de un sistema eléctrico de protección utilizados en el ejemplo propuesto a continuación (Fig. 5.1).

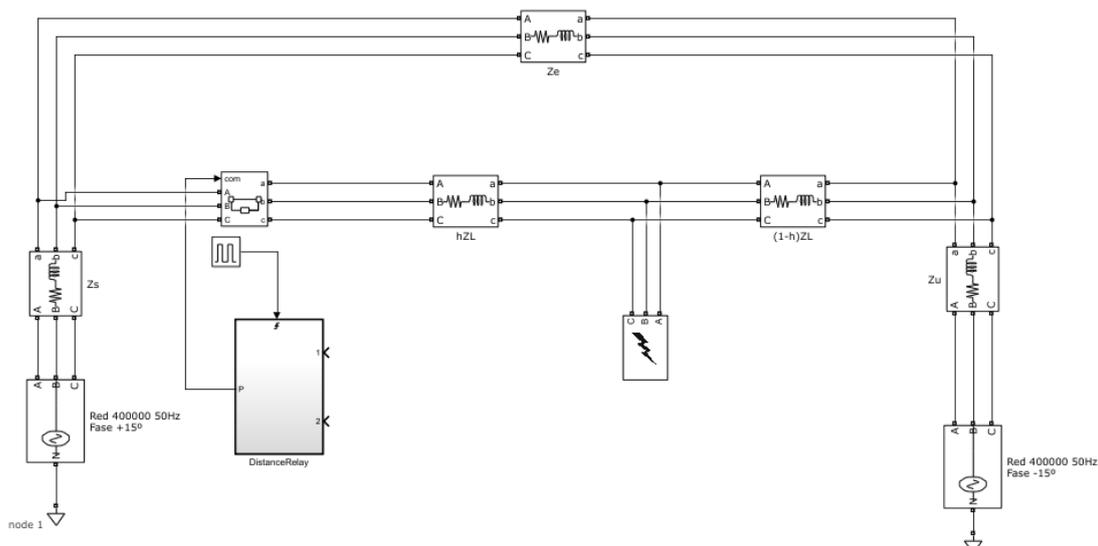


Fig 5.1 Ejemplo sistema eléctrico

El circuito consta de un interruptor automático, encargado de cortar el flujo de corriente en caso de falta, en este caso, la falta se producirá en un punto de la línea de transporte  $Z_L$ . También aparecen dos generadores de tensión alterna sinusoidal de 50 Hz y 400kV con su impedancia interna  $Z_U$  y  $Z_S$  y una segunda línea de transporte en paralelo parametrizada por  $Z_E$ , aproximadas por dipolos pasivos. Aunque faltaría los aparatos de medida del relé, encargados de reducir las magnitudes de las señales de un sistema de potencia, los transformadores de tensión y de corriente no se han incluido en el circuito por mayor simplicidad, y por ser la impedancia invariante al trabajar con los valores “reales” del circuito con respecto a los del secundario de un transformador de medida.

El objetivo de la simulación es que el relé de distancia obtenga la impedancia de defecto medida y la compare con la impedancia de la línea a proteger ( $Z_L$ ) conocida e implementada como una curva característica, produciendo la señal de disparo “P” que en función de su valor producirá o no la actuación del interruptor automático.

Se ha implementado la característica del relé de distancia con la impedancia de la línea conocida a priori. Volviendo a la configuración de coeficientes de la ecuación 4.8 se han escogido de forma que resulte la característica mho, así pues, se tiene:

$$K_A = -Z_{2|\alpha}, K_B = 0, K_C = -Z_{2|45^\circ}, K_D = 1$$

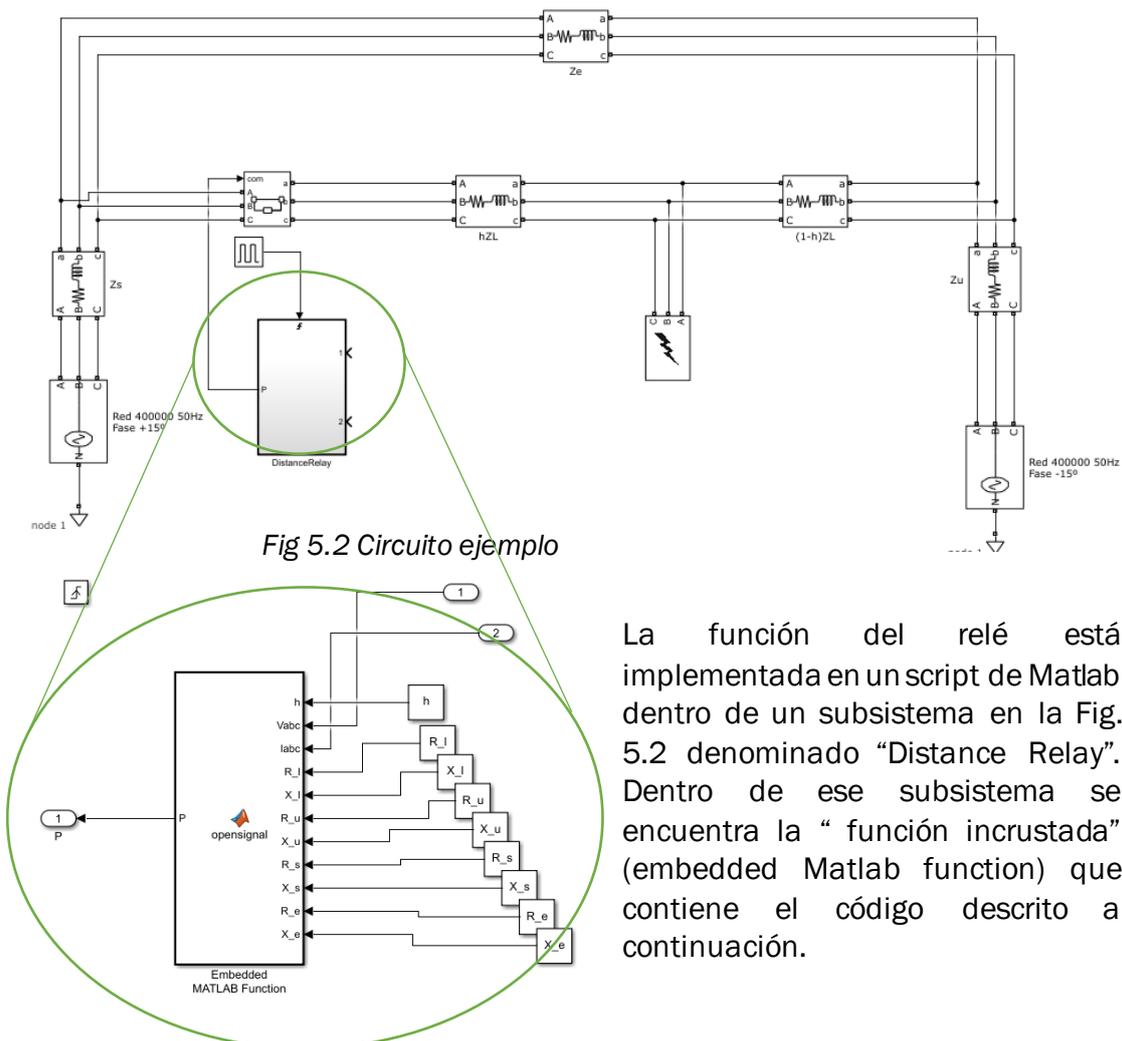


Fig 5.2 Circuito ejemplo

La función del relé está implementada en un script de Matlab dentro de un subsistema en la Fig. 5.2 denominado “Distance Relay”. Dentro de ese subsistema se encuentra la “función incrustada” (embedded Matlab function) que contiene el código descrito a continuación.



La expresión de la curva característica implementada en la función incrustada se asemeja a la expresión 4.12, de una circunferencia desplazada en coordenadas polares:

$$\begin{aligned} x &= 0.85 * (Z\_Lpol * \cos(\theta) + Z\_Lpol * \cos(\pi/4)); \\ y &= 0.85 * (1i * Z\_Lpol * \sin(\theta) + 1i * Z\_Lpol * \sin(\pi/4)); \end{aligned} \quad (5.1)$$

Donde se ha escogido como  $Z_1$  y  $Z_2$  el módulo de  $Z_L$  y el ángulo del coeficiente  $K_c$  de  $45^\circ$

Resultando una circunferencia en el plano complejo tangente al origen de coordenadas y, por tanto, con componente direccional (Fig 5.3).

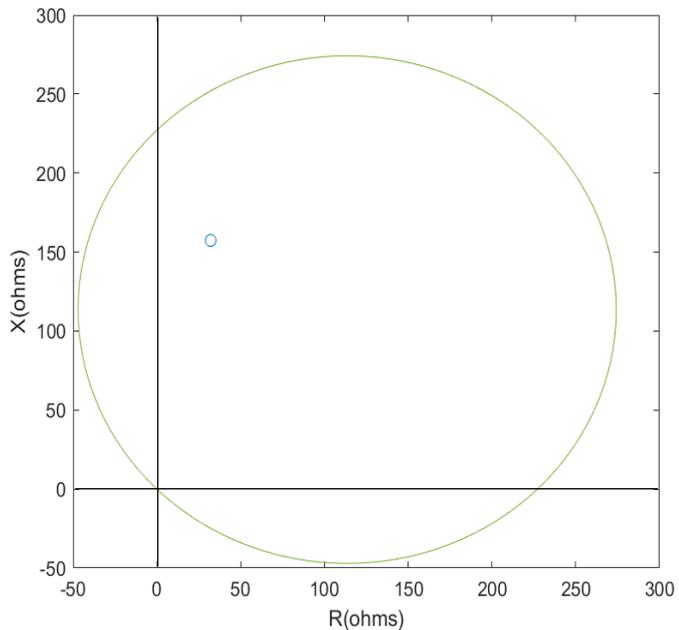


Fig 5.3 Característica mho en Matlab

A continuación, se procede al cálculo de la impedancia obtenida por cada unidad de medida, una por cada fase. Para ello se ha requerido el cálculo de la impedancia equivalente del circuito y la obtención de las componentes de secuencia que se relacionan con los valores de fase reales mediante la siguiente expresión según el teorema de Fortescue, donde  $a=1_{120^\circ}$ :

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

A la función incrustada le llegan las señales  $Z_L, Z_U, Z_S, Z_E$ , las tensiones compuestas, la corriente de fase y el parámetro h. Donde h representa la distancia a la que se produce la falta (es el tanto por uno de  $Z_L$ ).

Para hallar el circuito equivalente de cada secuencia se analiza el circuito de la siguiente forma (Fig 5.4).

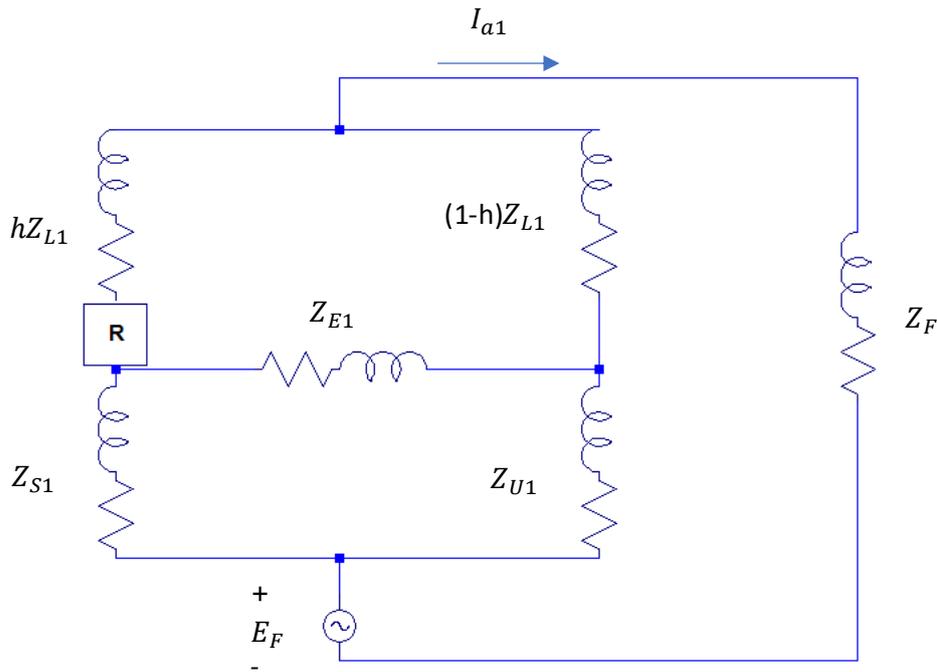


Fig 5.4 Circuito de secuencia directa

Donde  $E_F$  es la tensión prefalla. De la transformación triángulo estrella de  $Z_{S1}$ ,  $Z_{E1}$  y  $Z_{U1}$  se obtiene:

$$\begin{pmatrix} Z_{I1} \\ Z_{J1} \\ Z_{K1} \end{pmatrix} = \frac{1}{Z_{S1} + Z_{E1} + Z_{U1}} \begin{pmatrix} Z_{U1}Z_{S1} \\ Z_{S1}Z_{E1} \\ Z_{E1}Z_{U1} \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

Ya se puede obtener la impedancia equivalente de la secuencia directa  $Z_1$ :

$$Z_{M1} = Z_{J1} + hZ_{L1} \quad (5.4)$$

$$Z_{N1} = Z_{K1} + (1-h)Z_{L1} \quad (5.5)$$

$$Z_1 = Z_{I1} + \frac{Z_{M1}Z_{N1}}{Z_{M1} + Z_{N1}} \quad (5.6)$$

La corriente vista por el relé será:

$$I_{R1} = C_1 I_{a1}$$

Donde el coeficiente  $C_1$  se obtiene de aplicar la 2ª ley de Kirchhoff a la malla interna del circuito de la figura 5.5:

$$\begin{aligned} I_{R1}Z_{M1} - (I_{a1} - I_{R1})Z_{N1} &= 0 ; \\ I_{R1} &= \frac{I_{a1}Z_{N1}}{Z_{M1} + Z_{N1}} = C_1 I_{a1} \quad (5.7) \end{aligned}$$

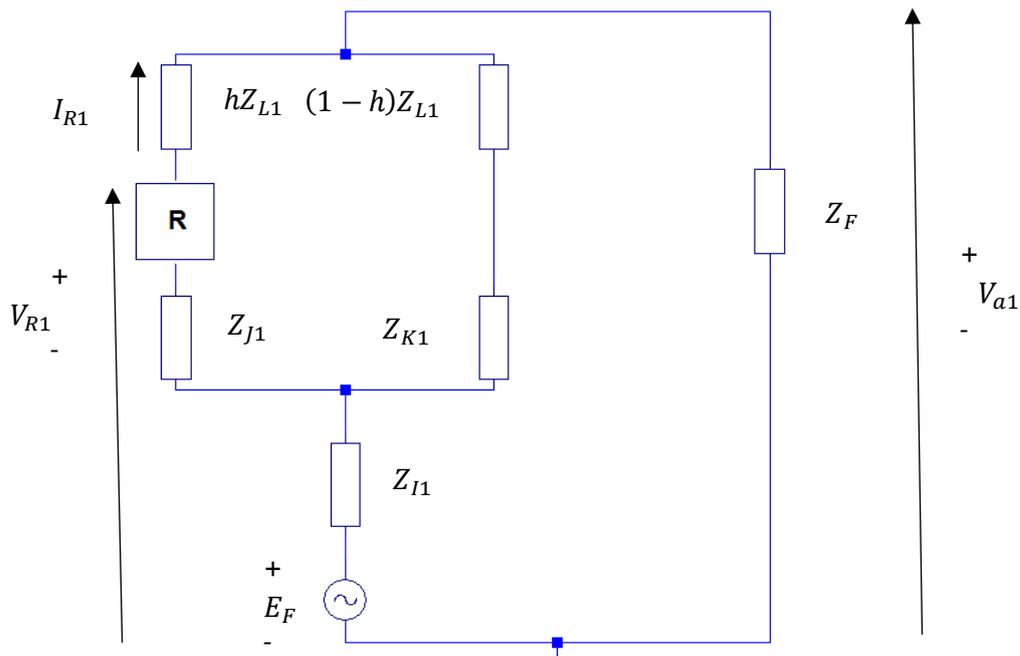


Fig 5.5 Circuito de secuencia directa

Para el cortocircuito trifásico (equilibrado) solo será necesario analizar la secuencia directa.

Expresando la corriente total de la secuencia directa como:

$$I_{a1} = \frac{E_F}{Z_1 + Z_F} = \frac{1}{K} ; KI_{a1} = 1 \quad (5.8)$$

La ecuación 5.7 queda de la forma:

$$KI_{R1} = C_1 \quad (5.9)$$

Usando la ecuación 5.1 las corrientes de línea serán:

$$\begin{aligned} KI_{aR} &= C_1 \cdot 1 \\ KI_{bR} &= a^2 C_1 \\ KI_{cR} &= a C_1 \end{aligned} \quad (5.10)$$

Y las tensiones simples:

$$\begin{aligned} KV_a &= Z_F \\ KV_b &= a^2 Z_F \\ KV_c &= a Z_F \end{aligned} \quad (5.11)$$

De los respectivos cocientes se obtiene que:

$$Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = \frac{Z_F}{C_1} \quad (5.12)$$



Se habría llegado a las mismas conclusiones a partir de la relación de las tensiones y corrientes compuestas.

Finalmente, se compararían la curva característica programada al comienzo del apartado con el valor de la impedancia obtenida, emitiendo una señal lógica para el control del interruptor automático, si el valor cae dentro de la zona de actuación se enviará un 1 y si se encuentra fuera de la zona un 0.

La comparación se ha implementado restando a la impedancia obtenida la posición del centro de la circunferencia ( el valor  $Z_1$ ) y verificando que el valor no excede del radio de la circunferencia ( $Z_2$ )

Este código implementado solo serviría para cortocircuitos trifásicos si se quisiera analizar otro cortocircuito habría que realizar otro procedimiento similar.

Si bien valdría con incluir esta última ecuación (5.12) en la función incrustada, se ha puesto todo el procedimiento para poder obtener diferentes resultados en función de los valores de las señales de referencia (inputs) declaradas en el workspace de simulink.

También se ha declarado una variable persistente denominada “tipo de cortocircuito” para que, en función de su valor, el relé trabaje con las ecuaciones y el circuito de secuencia de un tipo de cortocircuito u otro.

Así pues, para cortocircuitos bifásicos sin tierra (entre fases b-c) la corriente de fase de la secuencia indirecta sería:

$$I_{a1} = -I_{a2} = \frac{E_F}{Z_1 + Z_2 + Z_F} = \frac{1}{K} \quad (5.13)$$

Igual que la de secuencia directa en magnitud y de sentido contrario como se observará a continuación analíticamente. Realizando el mismo procedimiento que en el apartado anterior, pero para el circuito de secuencia de la figura 5.6 las impedancias vistas por el relé en este caso serán.

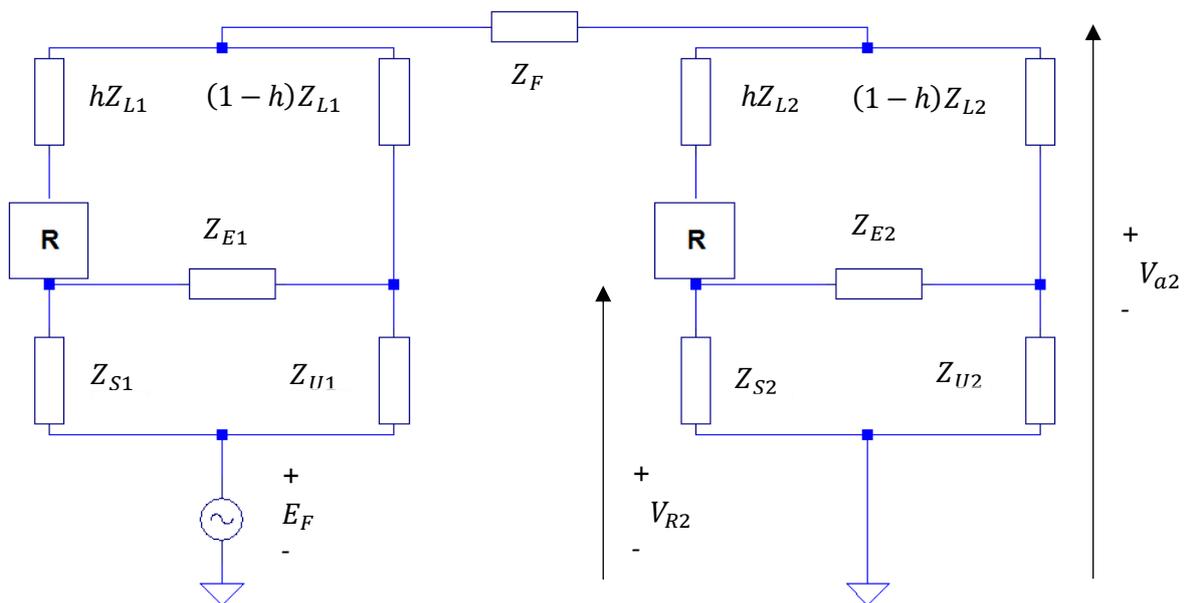


Fig 5.6 Circuito de secuencia para cortocircuito fase-fase sin tierra



De la ecuación anterior se obtiene:

$$KI_{a1} = -KI_{a2} = 1 \quad (5.14)$$

Del análisis del circuito:

$$KV_{a1} = Z_F + Z_2 \quad (5.15)$$

$$KV_{a2} = Z_2 \quad (5.16)$$

Al tener el circuito de secuencia inversa la misma estructura que el de secuencia directa se deduce:

$$Z_2 = Z_{I2} + \frac{Z_{M2}Z_{N2}}{Z_{M2} + Z_{N2}} \quad (5.17)$$

Donde:

$$Z_{M2} = Z_{J2} + hZ_{L2} \quad (5.18)$$

$$Z_{N2} = Z_{K2} + (1 - h)Z_{L2} \quad (5.19)$$

También se calcula el coeficiente  $C_2$  usando el mismo procedimiento que  $C_1$ :

$$I_{R2} = \frac{I_{a2}Z_{N2}}{Z_{M2} + Z_{N2}} = C_2 I_{a2} \quad (5.20)$$

Usando la expresión 5.1 las corrientes de fase quedan de la forma:

$$K \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ a^2 - a \\ a - a^2 \end{pmatrix} \quad (5.21)$$

Y las tensiones simples sustituyendo las ecuaciones 5.15 y 5.16:

$$K \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ Z_{F2} + Z_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_F + 2Z_{F2} \\ a^2 Z_F - Z_2 \\ a Z_F - Z_2 \end{pmatrix} \quad (5.22)$$

De el cociente de las dos expresiones anteriores obtendríamos las impedancias de cada unidad vistas desde el punto de defecto, para hacer el paso a los valores vistos por el relé se utilizan las siguientes expresiones:

$$I_{R1} = C_1 I_{a1}$$

$$I_{R2} = C_2 I_{a2} \quad (5.23)$$

$$V_{R2} = V_{a2} + hZ_{L2} I_{R2} = \frac{Z_2 - hZ_{L2} C_2}{K}$$



Finalmente, las impedancias vistas por el relé para cortocircuito bifásico sin tierra serán:

$$Z_{ab} = \frac{(1 - a^2)(Z_F + C_1 hZ_{L1} + Z_2) + (1 - a)(Z_2 - C_2 hZ_{L2})}{(1 - a^2)C_1 + (a - 1)C_2}$$

$$Z_{bc} = \frac{(a^2 - a)(Z_F + C_1 hZ_{L1} - C_2 hZ_{L2})}{(a^2 - a)(C_1 + C_2)}$$

$$Z_{ca} = \frac{(a - 1)(Z_F + C_1 hZ_{L1} + Z_2) + (a^2 - 1)(Z_2 - C_2 hZ_{L2})}{(a - 1)C_1 + (1 - a^2)C_2}$$

Que también se ha contemplado en la simulación introduciendo estas expresiones en la “función incrustada” del relé de distancia. Observando que para el ejemplo en cuestión (Fig 5.7) el relé produciría el disparo del I.A. gracias a la unidad de medida  $Z_{bc}$  (ya que aparece dentro de la zona de disparo)

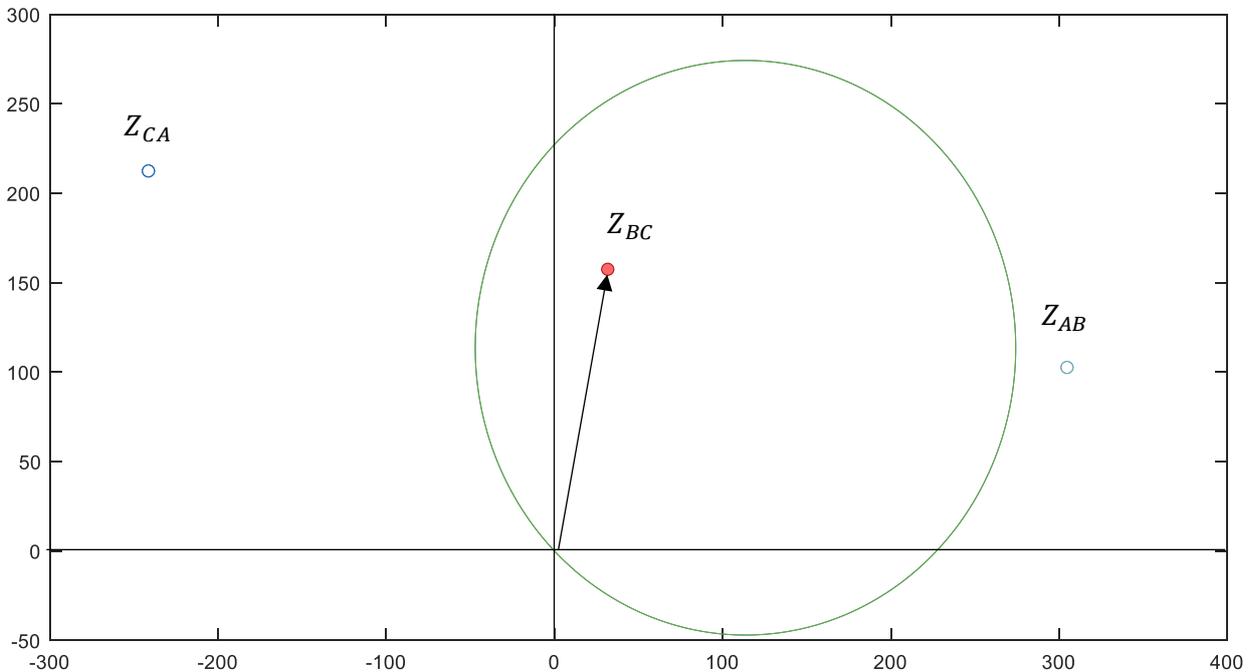


Fig 5.7 Característica mho con las impedancias de cortocircuito bifásico detectadas por la unidad de medida

### 5.3 Simulación de línea de transporte

Matlab ya tiene implementado en la librería “simscape/Electrical/Specialized power systems” diferentes modelos de líneas de transporte, como el modelo en pi que consta de la impedancia serie dispuesta entre dos impedancias en paralelo de valor mitad al de la impedancia en paralelo de la línea y el modelo genérico de parámetros distribuidos basado en el modelo de Bergerón, que se fundamenta en fenómenos de difusión de ondas viajeras presentes en la línea de transmisión y distribuidos a lo largo de la línea. Sin embargo, se ha elegido modelar las dos líneas de transporte como un dipolo pasivo, suponiendo una línea trifásica equilibrada y regularmente traspuesta, despreciando el efecto de capacidad de las líneas.

Se han utilizado parámetros típicos de acuerdo con [6] (Fig. 5.8) para modelar la impedancia del dipolo pasivo y la impedancia interna de los generadores  $Z_U$  y  $Z_S$ .

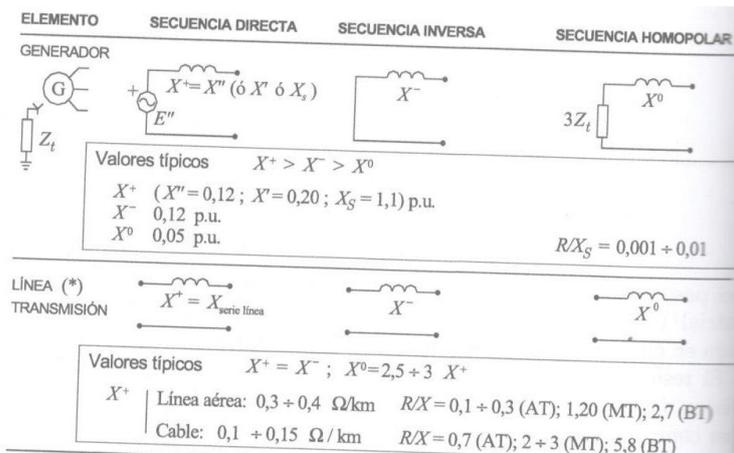


Fig 5.8 Parámetros típicos de las componentes de secuencia

### 5.3 Simulación del cortocircuito y del interruptor automático

Para la simulación del cortocircuito se ha utilizado el bloque “Three-Phase fault”, localizado en la misma librería que el elemento anterior (Simscape/Electrical/Specialized power systems) en él se parametriza el cortocircuito mediante la apertura y cierre de interruptores con resistencias puestas al potencial de referencia del circuito (Fig 5.9), y un conjunto RC serie de amortiguamiento. Donde  $R_{on}$  indica la resistencia de fase y  $R_g$  la resistencia de puesta a tierra.

La lógica de control de inicio y fin del cortocircuito puede operarse bien mediante un vector que indique los tiempos de apertura y cierre de los interruptores (“switching time”) o por una señal externa.

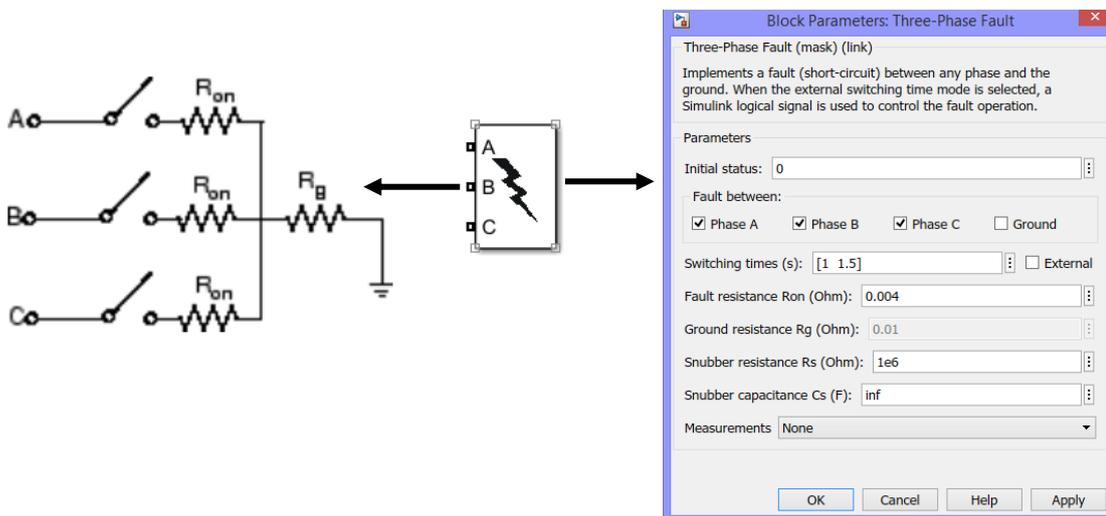


Fig 5.9 Bloque “Three- Phase fault” en Simulink

Como puede observarse en el circuito equivalente de la figura 5.9, se ha omitido la componente inductiva de la impedancia de falta, asumiendo que el cortocircuito es puramente resistivo. Para el ejemplo del apartado anterior se ha utilizado el valor



arbitrario de  $Z_F=0.004$  ohm, si bien este valor puede aproximarse por la fórmula de Warrington [3] .

$$R_{arc} = \frac{8750(s + ut)}{I^{1.4}}$$

donde  $s$  es la distancia entre conductores (pies),  $u$  es la velocidad del viento (millas/hora),  $t$  es la duración (segundos), e  $I$  es el valor eficaz de la corriente de falta (A).

Para el interruptor se ha utilizado el bloque “Three-phase-breaker”, tiene una máscara similar al bloque de cortocircuito como se muestra en la figura 5.10. En este bloque se deberá indicar:

- el estatus inicial,
- el número de fases a cortar,
- el tiempo de actuación en la secuencia de cierres y aperturas (que también podrá venir dada por un vector o una señal externa),
- la resistencia interna del interruptor y
- las dos componentes de amortiguación.

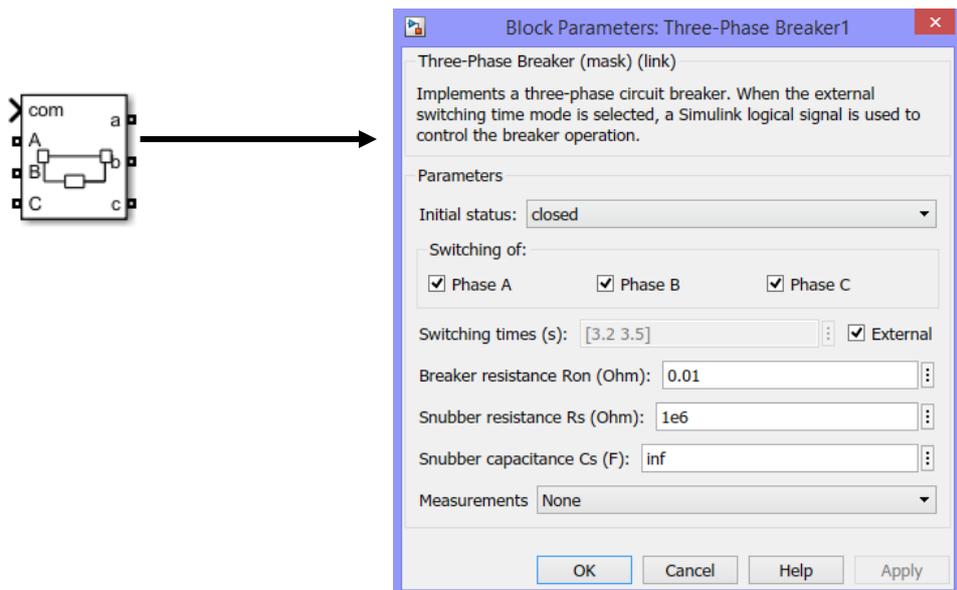


Fig 5.10 Bloque “Three - Phase breaker” en Simulink

## 5.4 Funcionamiento y simulación del ejemplo.

Se abre el archivo .slx y, antes de ejecutar la simulación, se verifica que el tipo de cortocircuito es el correcto en dos pasos:

- Abriendo la máscara del bloque de cortocircuito se comprueba el cortocircuito seleccionado (Fig 5.11).

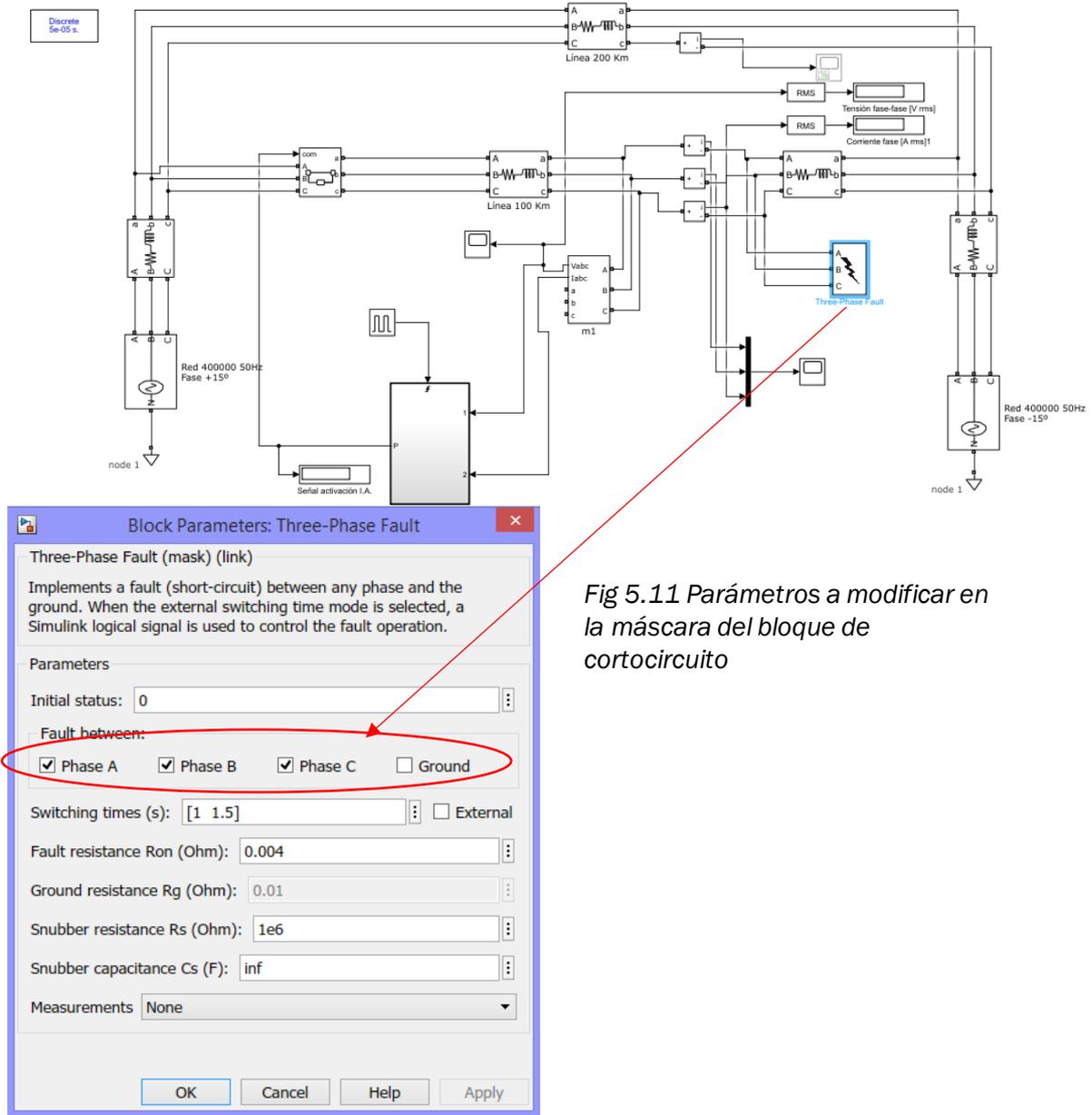


Fig 5.11 Parámetros a modificar en la máscara del bloque de cortocircuito

También se podrá modificar el tiempo de inicio y fin del cortocircuito en el campo inferior en este caso inicia en el segundo 1 se la simulación y finaliza en el segundo 1.5.

En el workspace del modelo de simulink, abriendo el *model explorer* podremos cambiar la posición en la que se produce la falta (cambiando el valor del parámetro h) donde también se podrían cambiar otros valores como las impedancias del circuito (Fig 5.12)

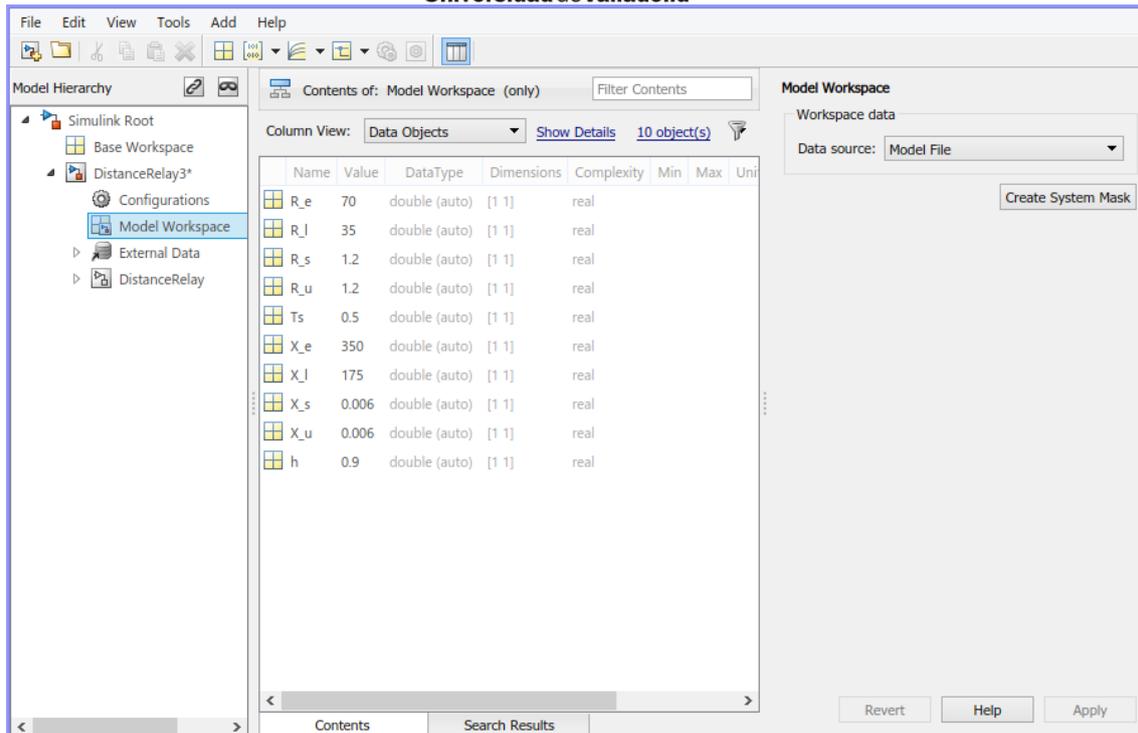


Fig 5.12 Parámetros del circuito en el workspace del modelo

-Entrando en el código de la función incrustada modificamos el valor de la variable “tipo de cortocircuito”(Fig. 5.13), si vale 1 se utilizarán en la simulación las ecuaciones del cortocircuito trifásico sin tierra, y si vale 2 las de cortocircuito bifásico sin tierra entre fases b-c.

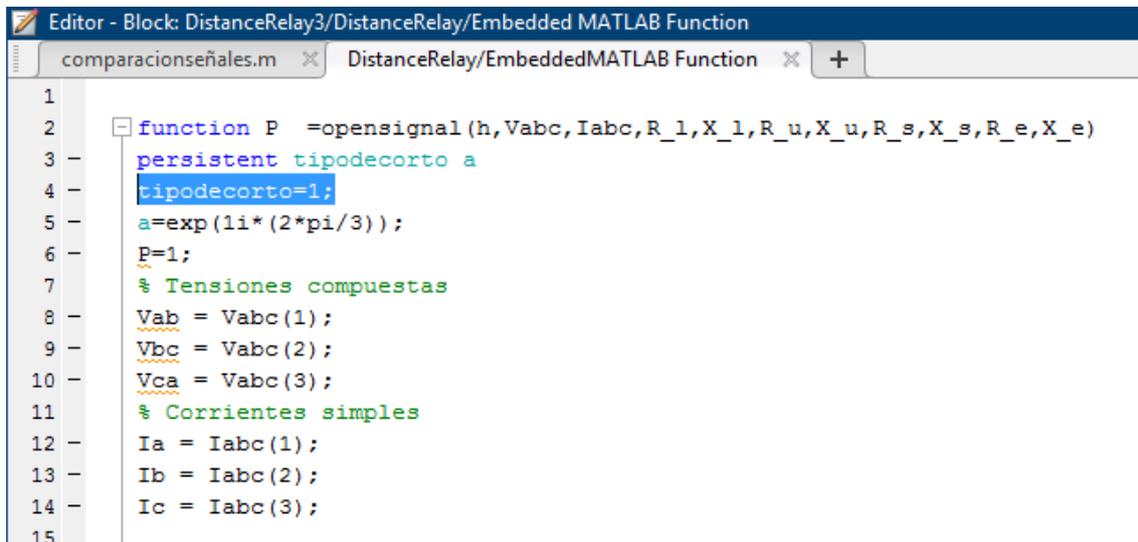


Fig 5.13 Función incrustada del bloque DistanceRelay

Finalmente se ejecuta la simulación y se observan los resultados. Para el corto trifásico se ha obtenido las siguientes gráficas (Fig 5.14).



Universidad de Valladolid

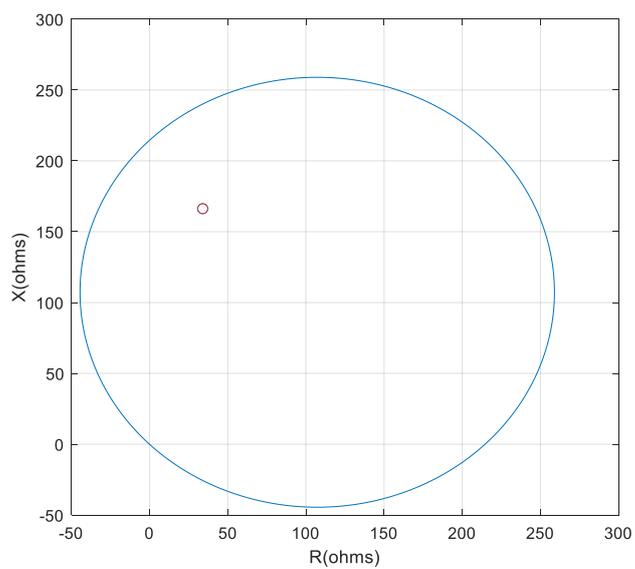
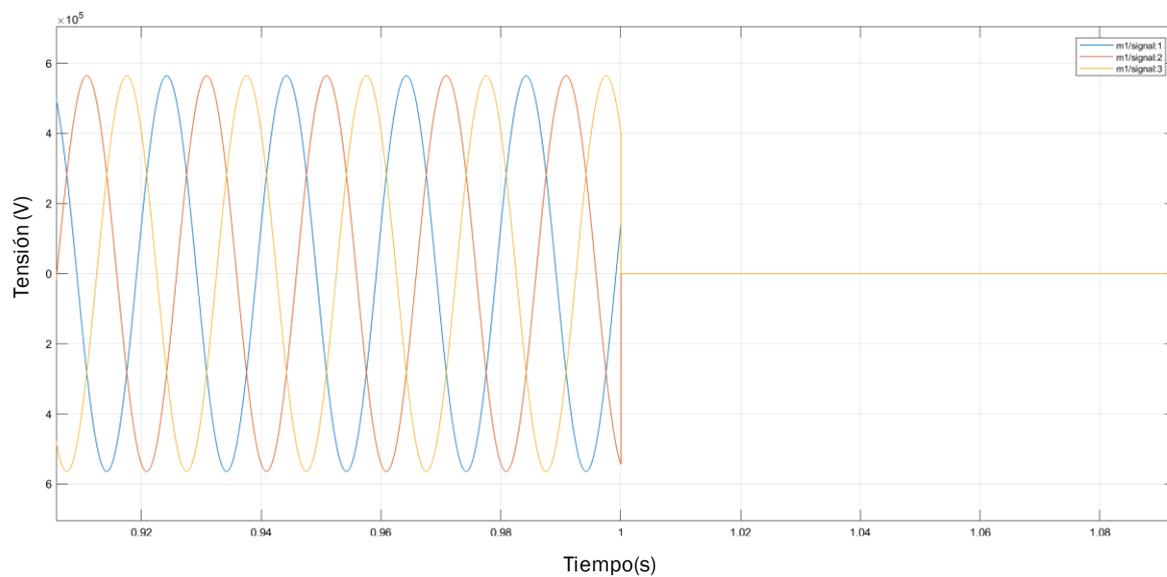
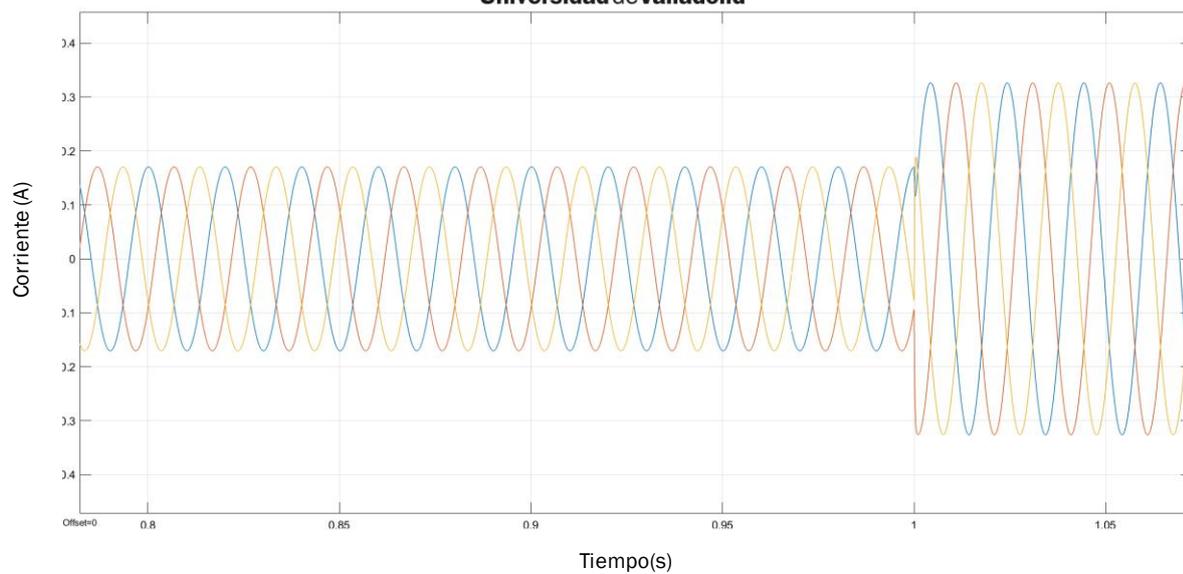


Fig 5.14 Resultados simulación cortocircuito trifásico.



---

**Universidad de Valladolid**

También se observa en el display “señal de activación I.A.” como pasa a valer 0 al caer la impedancia medida dentro de la zona de actuación del dispositivo.

## 6. Casos de estudio

En este capítulo se propondrán diferentes ejercicios partiendo del circuito realizado en el ejemplo del capítulo 5 y se planteará una posible solución.

### 6.1 Eliminando $Z_E$ determinar la nueva impedancia medida por el relé (en cortocircuito trifásico)

El enunciado de este primer caso es el siguiente:

Suprimir el bloque de la impedancia en paralelo  $Z_E$  (Fig 6.1) y modificar las ecuaciones del circuito de secuencia. Al ser cortocircuito trifásico solo se requerirá trabajar con el circuito de secuencia directa.

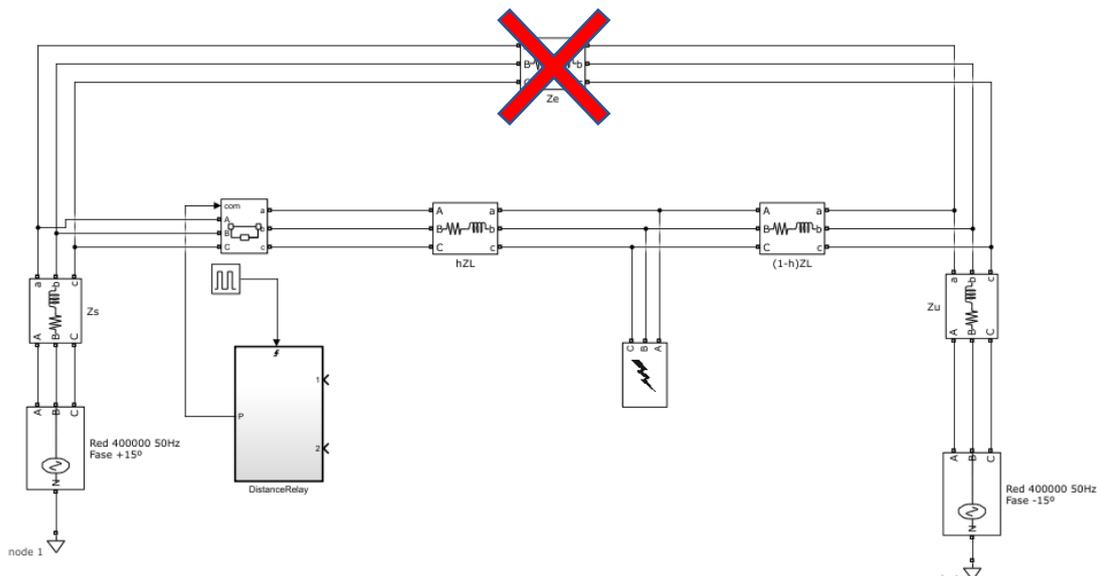


Fig 6.1. Circuito ejemplo

Se dejarán todos los parámetros iguales que en el circuito del ejemplo por defecto, con un valor del coeficiente  $h$  de 0.85. Este coeficiente representa un tanto por uno de la impedancia  $Z_{L1}$  es decir, la distancia a la que se produce la falta en esa línea. (Para su modificación se encuentra en el model workspace de simulink)

El objetivo será obtener la impedancia detectada por las tres unidades de medida del relé.

Ahora, el circuito de secuencia será el mostrado en la Fig. 6.2.

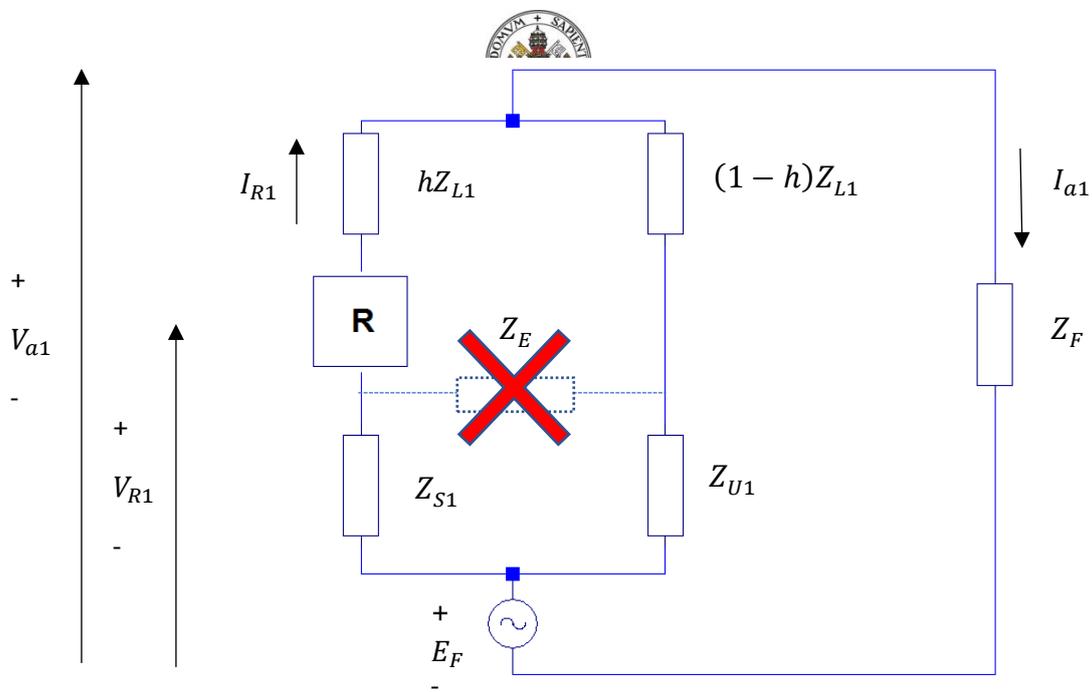


Fig 6.2 Circuito de secuencia directa del ejemplo eliminando  $Z_E$

A continuación, se explica la solución al caso planteado:

La corriente total  $I_{a1}$  se expresará en función del coeficiente  $K$ , siendo  $Z_1$  la impedancia equivalente del circuito de la figura:

$$I_{a1} = \frac{E_F}{Z_1 + Z_F} = \frac{1}{K} ; \quad KI_{a1} = 1 \quad (6.1)$$

Y la corriente vista por el relé:

$$I_{R1} = C_1 I_{a1} \quad (6.2)$$

La impedancia equivalente  $Z_1$  será:

$$Z_{M1} = Z_{S1} + hZ_{L1} \quad (6.3)$$

$$Z_{N1} = Z_{U1} + (1-h)Z_{L1} \quad (6.4)$$

$$Z_1 = \frac{Z_{M1}Z_{N1}}{Z_{N1} + Z_{M1}} \quad (6.5)$$

Se determina el valor del coeficiente  $C_1$  aplicando la segunda ley de Kirchhoff a la malla interna formada por las impedancias  $Z_{M1}$  y  $Z_{N1}$  resultado de la asociación en serie de las impedancias de las ecuaciones 6.3 y 6.4:

$$Z_{M1}I_{R1} - (I_{a1} - I_{R1})Z_{N1} = 0 ;$$

$$I_{R1} = I_{a1} \cdot \frac{Z_{N1}}{Z_{M1} + Z_{N1}} ; \quad (6.6)$$

También se deduce del circuito y usando la ecuación 6.1:

$$KV_{a1} = Z_F \quad (6.7)$$



**Universidad de Valladolid**

La tensión vista por el relé, analizando “la malla” de la izquierda formada por las impedancias  $hZ_{L1}$ ,  $Z_{S1}$  y la tensión  $V_{a1}$  del circuito de la figura 6.2:

$$V_{a1} + I_{R1} hZ_{L1} - V_{R1} = 0 \quad ;$$

$$V_{R1} = V_{a1} + I_{R1} hZ_{L1} \quad ;$$

Usando la ecuación 6.2 y sustituyendo la expresión 6.7:

$$KV_{R1} = KV_{a1} + hZ_{L1} C_1 \quad ;$$

$$KV_{R1} = Z_F + hZ_{L1} C_1 \quad (6.8)$$

Ya se puede obtener las impedancias medidas por cada unidad de medida, utilizando el teorema de Fortescue:

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{K} \\ 0 \end{pmatrix} \quad ;$$

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{K} \\ a^2 \frac{1}{K} \\ \frac{1}{K} \end{pmatrix} \quad ; \quad \begin{pmatrix} KI_a \\ KI_b \\ KI_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix} \quad ;$$

$$\begin{pmatrix} KI_{aR} \\ KI_{bR} \\ KI_{cR} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_1 \\ a^2 C_1 \\ a C_1 \end{pmatrix} \quad (6.9)$$

$$\begin{pmatrix} KV_a \\ KV_b \\ KV_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ Z_F \\ 0 \end{pmatrix} \quad ;$$

$$\begin{pmatrix} KV_a \\ KV_b \\ KV_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_F \\ a^2 Z_F \\ a Z_F \end{pmatrix} \quad (6.10)$$

$$\begin{pmatrix} KV_{aR} \\ KV_{bR} \\ KV_{cR} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_F + hZ_{L1} C_1 \\ a^2 (Z_F + hZ_{L1} C_1) \\ a (Z_F + hZ_{L1} C_1) \end{pmatrix} \quad (6.11)$$

Del cociente de las expresiones 6.11 y 6.9 se obtiene:



Universidad de Valladolid

$$\begin{pmatrix} Z_{ab} \\ Z_{bc} \\ Z_{ac} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{Z_{F1}}{C_1} \\ Z_{F1} \\ \frac{C_1}{Z_{F1}} \\ \frac{Z_{F1}}{C_1} \\ C_1 \end{pmatrix} \quad (6.12)$$

Siendo:  $Z_{F1} = Z_F + hZ_{L1}C_1$

Implementando la ecuación 6.12 en la función incrustada que simula el relé de distancia se obtiene una impedancia para un cortocircuito trifásico de (con todos los parámetros iguales que en el circuito ejemplo):

$$Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ac} = 30.016 + i148.75 \Omega$$

## 6.2 Añadir una segunda etapa mho con retraso de actuación de 0.25 s

El enunciado de este segundo caso es el siguiente:

Añadir a la función incrustada del relé de distancia una segunda etapa mho con retraso de actuación de 0.25 s. El coeficiente de ajuste, escalar que modifica la amplitud de la curva característica (viene indicado en el código del ejemplo), tendrá de valor 1, multiplica a toda la ecuación de la curva característica.

```
x= 0.55*(Z_Lpol*cos(theta)+Z_Lpol*cos(pi/4)); % 0.55 coeficiente de
ajuste
y= 0.55*(1i*Z_Lpol*sin(theta)+1i*Z_Lpol*sin(pi/4));
```

Realizar la práctica para que la función incrustada tenga dos señales de activación de los interruptores automáticos “P” y “P2”. Representarán lógica de control de los comparadores, P2 será la que tenga la correspondiente a la segunda etapa y el retraso en el tiempo de actuación. Se recomienda utilizar el bloque “transport delay” para proporcionar el ajuste de tiempo.

También se pide obtener las curvas características, las gráficas de las corrientes y de las señales de activación de los siguientes casos:

- Para un coeficiente  $h=0.85$ , cortocircuito trifásico en el segundo 1
- Para un coeficiente  $h=0.95$ , cortocircuito bifásico en el segundo 1

Conclusiones de los resultados obtenidos. ¿Por qué no es instantánea la primera etapa?

La solución de este segundo caso propuesto es la siguiente:

La segunda etapa será igual que la primera (mho), solo habrá que modificar el coeficiente de ajuste como se muestra en la Fig 6.3.



```
Editor - Block: DistanceRelay7dosetapasbien/DistanceRelay/Embedded MATLAB Function
comparacionseñales.m DistanceRelay/EmbeddedMATLAB Function
31 - Z_B=10;
32 - Z_S1 = 6e-3+ 1i*0.12 ; Z_S2 = 6e-3+ 1i*0.12 ; Z_S0 = 1i*6e-3 ;
33 - Z_U1 = 6e-3+ 1i*0.12 ; Z_U2 = 6e-3+ 1i*0.12 ; Z_U0 = 1i*6e-3 ;
34 - Z_E1 = Z_e; Z_E2 = Z_e ; Z_E0 = 2.5* Z_e ;
35 - % característica mho
36 - theta= linspace (0,2*pi,1000)';
37 - Z_Lpol=sqrt (R_1^2+X_1^2);
38 - x= 0.55*(Z_Lpol*cos(theta)+Z_Lpol*cos(pi/4)); % 0.55 y 1 coeficiente de ajuste
39 - y= 0.55*(1i*Z_Lpol*sin(theta)+1i*Z_Lpol*sin(pi/4));
40 - x2=1*(Z_Lpol*cos(theta)+Z_Lpol*cos(pi/4));
41 - y2=1*(1i*Z_Lpol*sin(theta)+1i*Z_Lpol*sin(pi/4));
42
```

Fig 6.3 Script de Matlab con el código de la curva característica mho

También se deberá añadir la condición de operación como una nueva señal de salida “P2” y su correspondiente lógica de control.

Las dos señales de salida llegarán a una puerta OR para que cualquiera de ellas produzca el disparo de los I.A. (Fig 6.4).

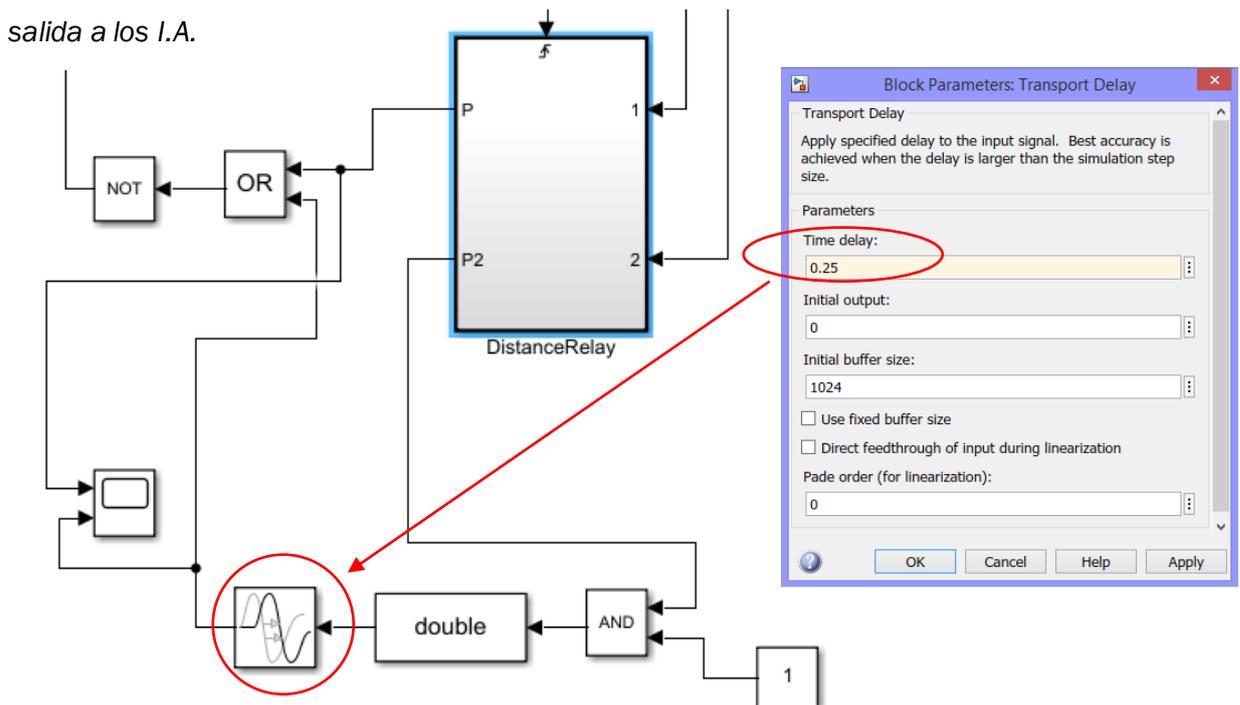


Fig 6.4 Lógica de control señales de activación



Los bloques de la parte inferior de la figura corresponden con una solución para añadir la función de retraso en el tiempo de actuación.

Para ello se ha utilizado el bloque “*transport delay*” y los otros tres bloques debido a que la señal de entrada, para retrasarla, ha de ser siempre distinta de cero (que no lo cumple la señal inicial P2) y se ha requerido utilizar un bloque de “*data type conversion*” porque la señal de entrada debe ser tipo de variable numérico (y la salida de AND es booleana).

- Para un coeficiente  $h=0.85$ , cortocircuito trifásico en el segundo 1.

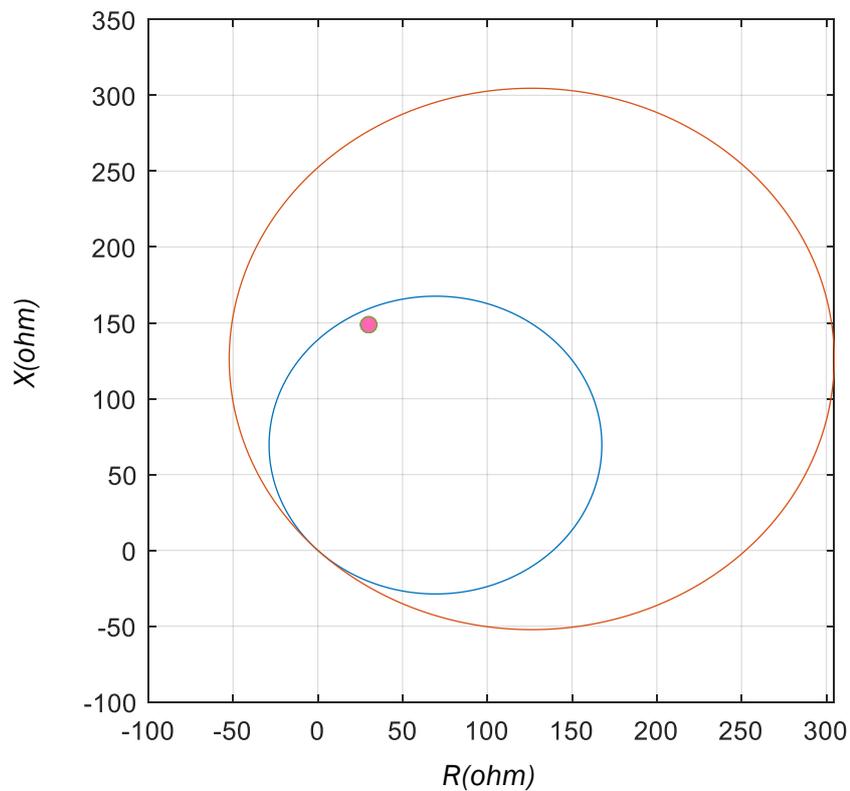


Fig 6.5 Curva característica con dos etapas etapas en azul la de coeficiente de ajuste de 0.55 y en rojo la de 1

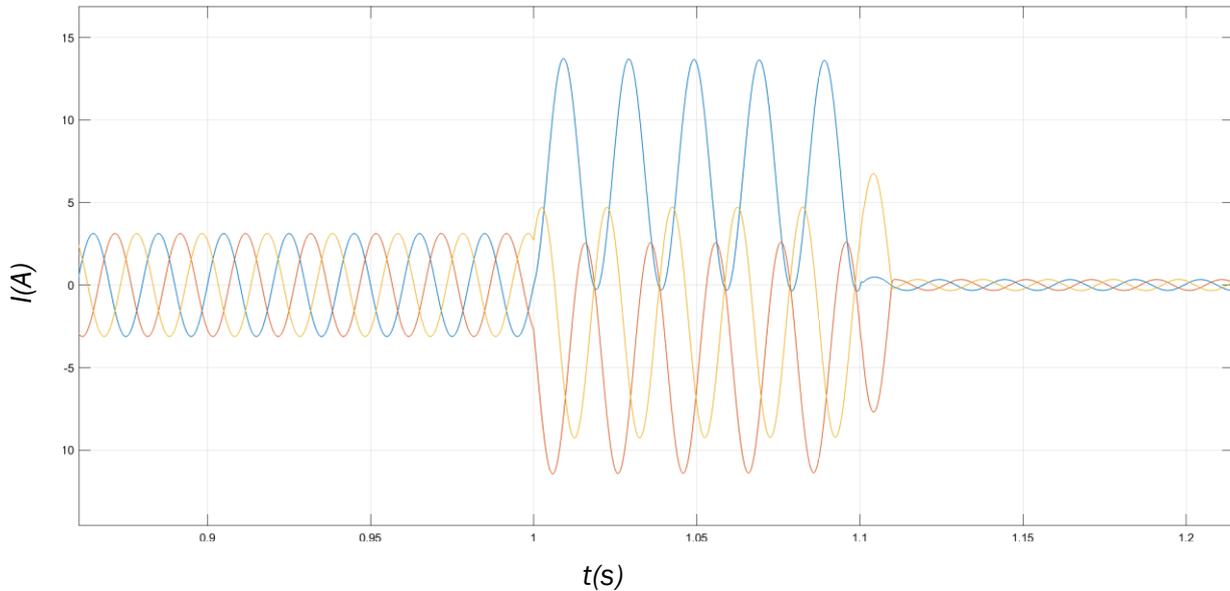


Fig 6.6 Gráfica de corrientes de cortocircuito

Se observa en la gráfica de la curva característica del relé (Fig. 6.5) que la impedancia detectada cae dentro de la curva interior, la unidad instantánea, no obstante, el cortocircuito se despeja en aproximadamente 0.1 s, esto se debe a que el bloque de activación *trigger* de la función incrustada realiza la comprobación de el correcto funcionamiento de la red con ese período. Si se dispusiera de un PC de mayor potencia de cómputo se podría reducir ese valor hasta alcanzar valores prácticamente instantáneos.

En la gráfica de corrientes (Fig 6.6) podemos observar como el cortocircuito comienza en el segundo 1 y es despejado en aproximadamente 0.1 s como ya se ha comentado.

También se puede observar en la Fig. 6.7 como la señal de activación de los I.A. es P y no P2 que correspondería a la activación de la segunda zona.

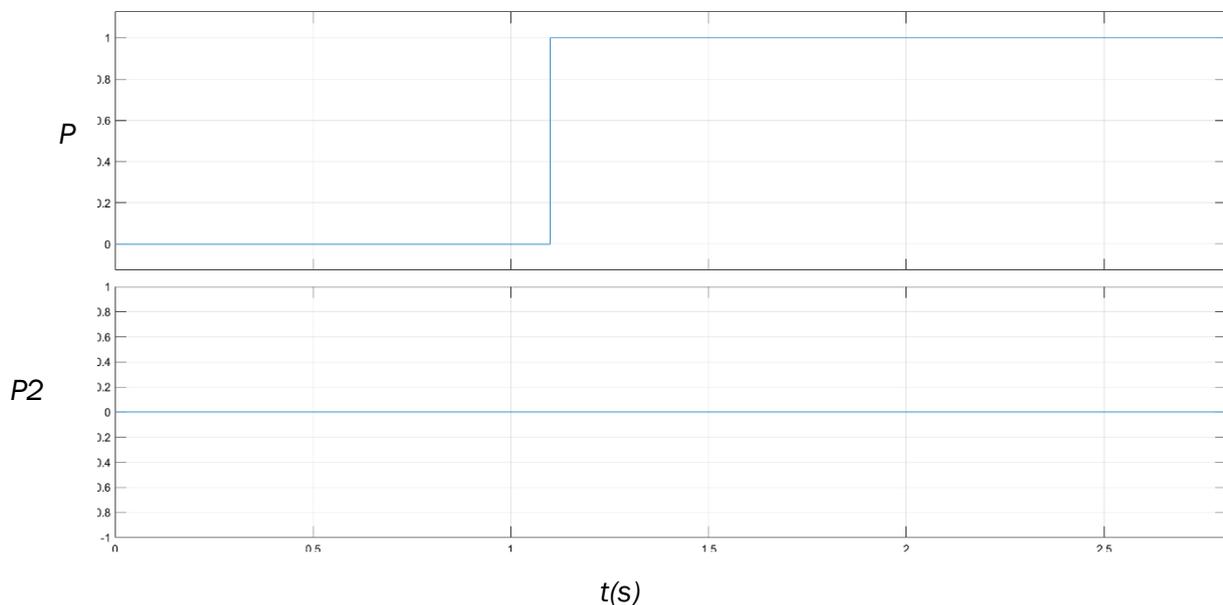


Fig 6.7 Señales de activación de los I.A.



- Para un coeficiente  $h=0.95$ , cortocircuito bifásico en el segundo 1.

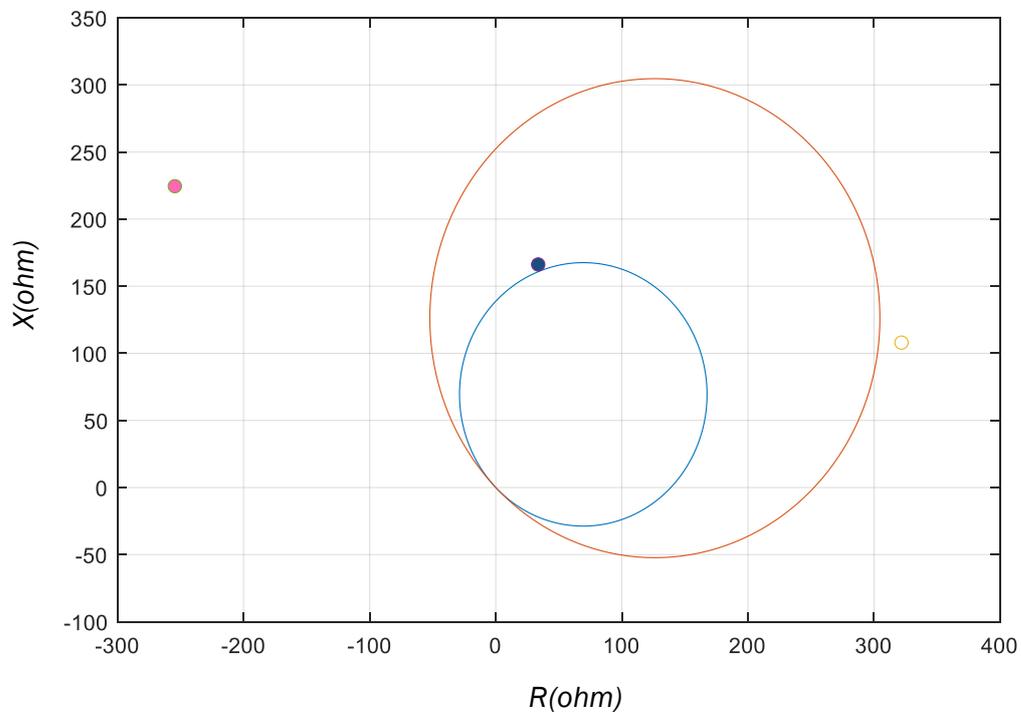


Fig 6.8 Curva característica en cortocircuito trifásico

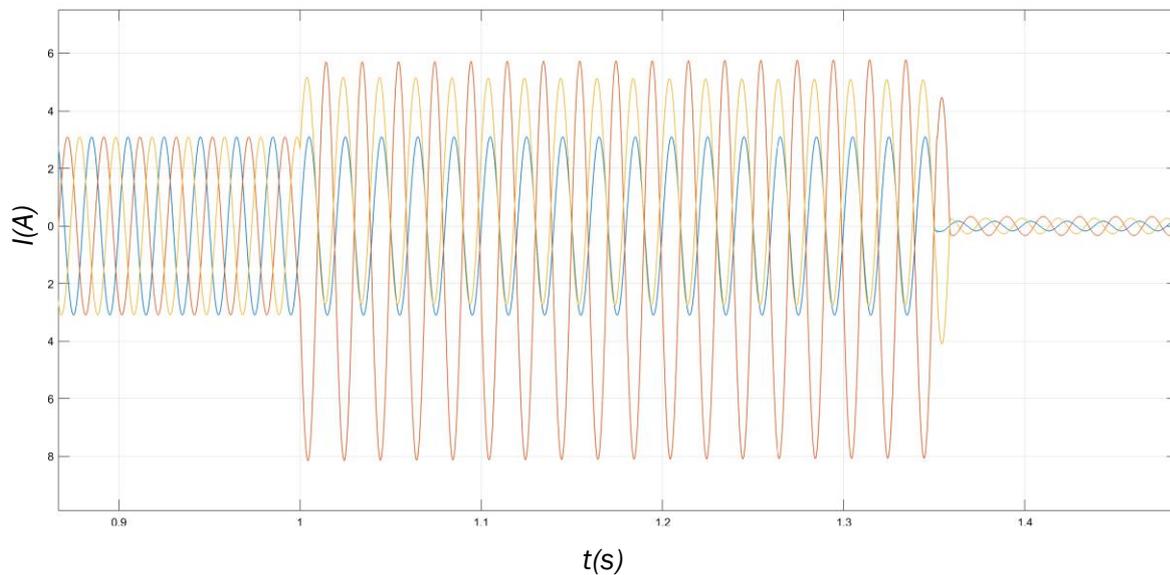


Fig 6.9 Gráfica de corrientes de cortocircuito



En este caso las unidades de medida detectan diferentes valores de impedancia, y uno queda dentro de la zona 2 de la característica del relé (Fig 6.8), luego se produce el retraso en el tiempo de actuación de la protección de 0.25s (Fig 6.9).

Se aprecia con mayor claridad en la gráfica de las señales de activación, como ahora produce el disparo de los I.A. la señal P2.

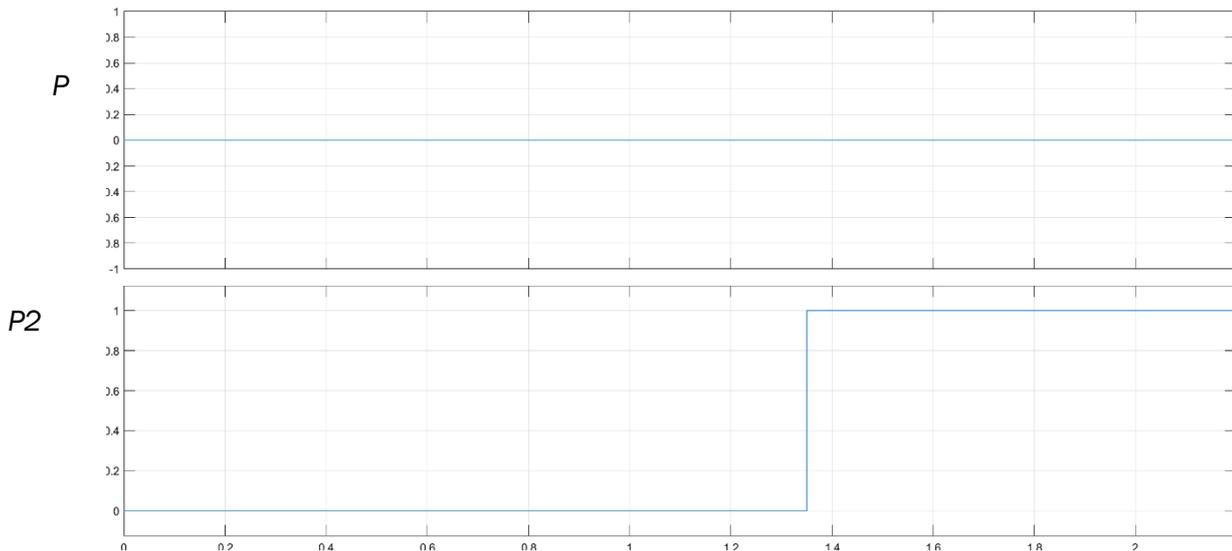


Fig 6.10 Señales de activación de los I.A.

### 6.3 Añadir una segunda etapa ohm con pendiente de 45° negativa

El enunciado del tercer caso de estudio propuesto es el siguiente:

Aunque esta característica viene impuesta por una ecuación de mayor complejidad se podrá definir por la ecuación de una recta, para ello se requiere un punto de corte o un vector director, en este caso se ha tomado el punto que coincide con el 80% del diámetro de la característica mho siendo este paralelo a la recta de 45° positiva que corta al origen de coordenadas. Se partirá del circuito ejemplo proporcionado.

Se pide para las siguientes condiciones obtener la curva característica con la impedancia detectada por las unidades de medida y las gráficas de las corrientes:

Coefficiente  $h=0.95$ , variación de la característica ohm dada por la ecuación  $y=-x+180$ , coeficiente de ajuste de 0.85.

Con esas condiciones, ¿el cortocircuito llega ha ser despejado?

La solución de este tercer caso es la siguiente:

Con los datos del enunciado se podrá obtener la característica ohm buscada.



```
Editor - Block: DistanceRelay8comho/DistanceRelay/Embedded MATLAB Function*
comparacionseñales.m DistanceRelay/EmbeddedMATLAB Function* +
30 - V_B=4e5;
31 - Z_B=10;
32 - Z_S1 = 6e-3+ 1i*0.12 ; Z_S2 = 6e-3+ 1i*0.12 ; Z_S0 = 1i*6e-3 ;
33 - Z_U1 = 6e-3+ 1i*0.12 ; Z_U2 = 6e-3+ 1i*0.12 ; Z_U0 = 1i*6e-3 ;
34 - Z_E1 = Z_e; Z_E2 = Z_e ; Z_E0 = 2.5* Z_e ;
35 - % característica mho
36 - theta= linspace (0,2*pi,1000)';
37 - Z_Lpol=sqrt(R_l^2+X_l^2);
38 - x= 0.85*(Z_Lpol*cos(theta)+Z_Lpol*cos(pi/4)); % 0.85 coeficiente de ajuste
39 - y= 0.85*(1i*Z_Lpol*sin(theta)+1i*Z_Lpol*sin(pi/4));
40 - x2=linspace(-10,300,1000);
41 - y2=-1i*x2+1i*386.1546; % datos enunciado y=mx+n m=-1 y dan un punto de corte de la recta
42
```

Fig 6.11 Script de Matlab con el código de la característica mho

La parte del código de la señal de operación diferirá respecto de la característica mho. En esta última se comparaba el valor de la impedancia medida desplazada un valor  $\overline{Z}_1$  según la ecuación 4.12 con el radio de la característica mho ( $Z_2$ ).

El algoritmo implementado en la categoría ohm buscará el punto que coincide con la parte real de la impedancia medida en x2 (Fig 6.11) y utilizará el índice del vector "i" de x2 para comprobar si la parte imaginaria de la impedancia medida es mayor o menor que la curva mho (y2(i))(Fig 6.12).

```
if sqrt((real(Zab)-Z_Lpol*cos(pi/4))^2+(imag(Zab)-Z_Lpol*sin(pi/4))^2)
<= 0.95*Z_Lpol
    %P=1;
    %si es menor que la recta. Busco índice de x2 que coincida con
    %real zab
    comp1=1000;
    for b= 1:length(x2)
        comp2= abs(x2(b)-real(Zab))
        if comp2<comp1
            comp1=comp2;
            ind=b;
        end
    end
    if isempty(ind)
        P=1;
        return
    end
    if ind~=1001 && imag(y2(ind))>= imag(Zab)
        P=1;
    else
        P=0;
    end
end
```

Fig 6.12 Código de la señal de comparación de la unidad de medida ab

A continuación se modifican los parámetros correspondientes al enunciado:

Coefficiente  $h=0.95$ , variación de la característica ohm dada por la ecuación  $y=-x+180$ , coeficiente de ajuste de 0.85.

En este caso la impedancia detectada queda (Fig. 6.13) dentro de la zona de actuación mho, pero por encima de la característica ohm, por lo tanto, la protección



Universidad de Valladolid

no deberá actuar como se observa en la gráfica  $I(t)$  (Fig 6.14) , luego la falta nunca llega ha ser despejada.

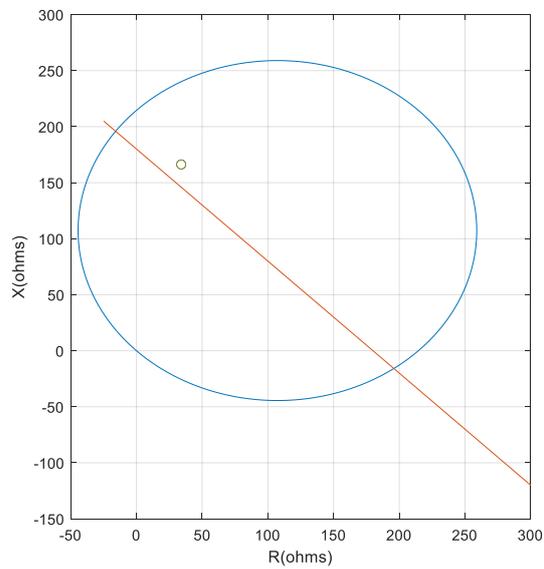


Fig 6.13 Característica rho

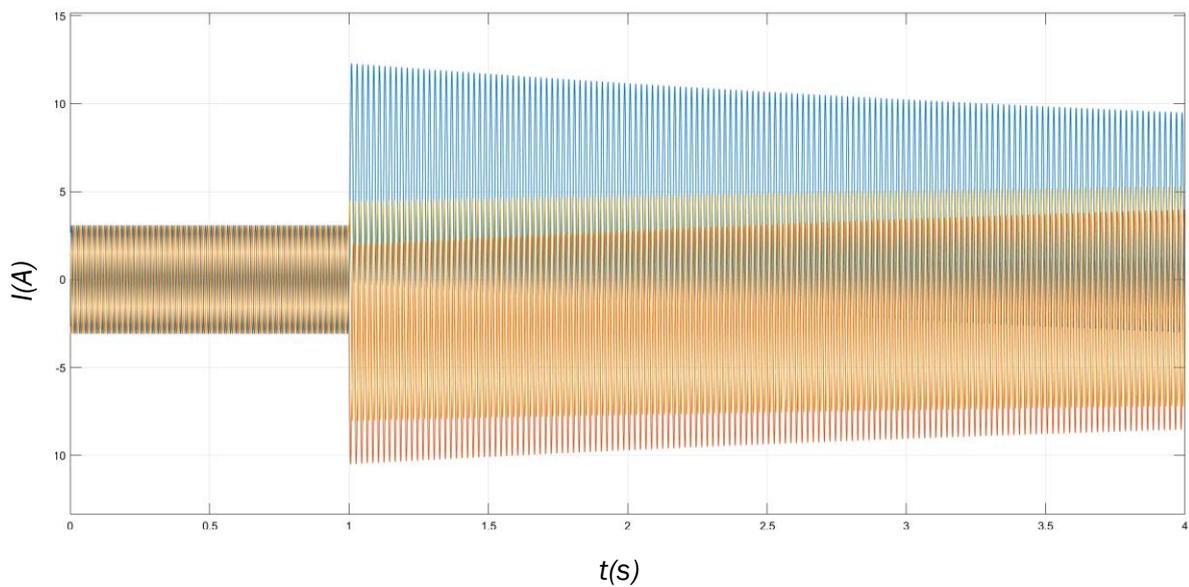


Fig 6.14 Cortocircuito sin despejar



## 7. Conclusiones y proyectos futuros

En este proyecto se ha profundizado en el estudio de los relés de distancia y no solo ha servido para ampliar el conocimiento en este ámbito, sino también a fomentado la capacidad de resolución de problemas al conseguir realizar la simulación de un relé de distancia en un software de propósito general, sin estar específicamente diseñado para esta aplicación en concreto.

Ha fomentado la búsqueda y contrastación de la información, ya sea bibliografía científica como la alusión a catálogos de fabricantes y reflejar en el trabajo el ámbito pragmático y la utilidad de esta tecnología, un ejemplo claro de la aplicación del conocimiento y principios físicos como solución a un problema fundamental en las redes de transporte.

A continuación, se detallan otros casos o proyectos que podrían desarrollarse a partir de este trabajo:

En la aplicación de los casos de estudio, sólo se ha implementado el análisis de la actuación de un relé en el caso de cortocircuito trifásico, y bifásico sin analizar el circuito más común en redes de transporte y el que aporta una mayor complejidad a los circuitos de secuencia, el cortocircuito monofásico, donde el código de los comparadores del relé sería distinto al igual que sus circuitos de secuencia.

También se podría indagar más detenidamente en los comparadores de fase, otro método de obtención de las curvas características de los relés donde la bibliografía demuestra la analogía entre los dos métodos, por comparación de fase y amplitud [2] [3]

Otra mejora e incluso un avance en el proyecto sería poder programar el código del relé para que funcionara en tiempo real, analizando las ondas de tensión y de corriente mientras Matlab va resolviendo el circuito simultáneamente, así no sólo se podría apreciar criterios de actuación de los relés sino también apreciar la selectividad cronológica entre varios dispositivos.



## 8. Bibliografía

- [1] IEC 60947-2 *Aparata de baja tensión*
- [2] Suárez Creo. (3ªed). (2015). *Protección de instalaciones y redes eléctricas*. Andavira
- [3] P.M. Anderson. (1999). *Power system protection*. IEEE Press Power Engineering Series
- [4] Gerhard Ziegler. (4ªed). (2011). *Numerical distance protection*. Siemens
- [5] Juan M. Gers and Edward J. Holmes (2ªed). (2004). *Protection of Electricity Distribution Networks*. The Institution of Electrical Engineers
- [6] Fermín Barrero. (2004). *Sistemas de energía eléctrica*. Paraninfo
- [7] Donald D. Fentie. (2016). *Understanding the Dynamic Mho Distance Characteristic*. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.
- [8] ABB. (2020). *Protection and Control IED Manager PCM600, Getting Started Guide*. Document ID: 1MRS757866
- [9] Siemens. (2015). *SIPROTEC 5 Engineering guide DIGSI 5*
- [10] Bogdan Kasztenny, Dale Finney y General Electric – Multilin. *Fundamentals of distance protection*. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/4333315> (21/2/2021)
- [11] ABB. (2007). *Line distance protection IED REL 670, Buyer's guide*. Document ID: 1MRK506264BEN
- [12] Siemens. *Distance Protection 7SA522*
- [13] Apuntes de *Instalaciones eléctricas de alta tensión* de la Universidad de Valladolid
- [14] ABB Jarbas Ferro. (2018). *Técnicas Avanzadas de selectividad*
- [15] Legrand. (2016). *Coordinación entre dispositivos de protección*
- [16] General Electric. *Relay Selection Guide*. Document ID: GET- 8048A Recuperado de <http://www.ge.com> (21/2/2021)
- [17] Guía LAT-07. (2019). *Líneas aéreas con conductores desnudos*
- [18] Red eléctrica. (2017). *Criterios de ajuste y coordinación de protecciones*
- [19] Edvar Csanyi. (2012). *Principles and Characteristics of Distance Protection*. Recuperado de <https://electrical-engineering-portal.com/principles-characteristics-distance-protection> (21/2/2021)