

**COORDINACIÓN DE RELÉS DE SOBRECORRIENTE EN SISTEMAS DE
DISTRIBUCIÓN CON PENETRACIÓN DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA**

MARTHA YESSICA VANESSA BEDOYA TORO

FELIPE CADAVID GIRALDO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PEREIRA, 2015

**COORDINACIÓN DE RELÉS DE SOBRECORRIENTE EN SISTEMAS DE
DISTRIBUCIÓN CON PENETRACIÓN DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA**

MARTHA YESSICA VANESSA BEDOYA TORO

FELIPE CADAVID GIRALDO

**Proyecto de grado para optar al título de
Ingeniero Electricista**

Director: MSc. RICARDO A. HINCAPIÉ ISAZA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PEREIRA, 2015

DEDICATORIAS

Este proyecto de grado está dedicado a:

Dios porque me dio constancia y valentía en el transcurso de toda mi carrera. A mi madre Martha Emilia Toro Herrera por sus consejos, apoyo moral y espiritual, que me motivaron para lograr mi meta. A Johnny F. Sánchez Gómez por creer en mí y estar siempre presente a pesar de las vicisitudes de la vida. A Ricardo A. Hincapié Isaza porque con su disponibilidad, sencillez, practicidad, incondicionalidad y comprensión nos guio durante el desarrollo de este proyecto.

Yéssica Bedoya Toro

AGRADECIMIENTOS

A Ricardo A. Hincapié Isaza, Carlos J. Zapata Grisales, Antonio H. Escobar Zuluaga y Juan Guillermo Valenzuela Hernández por su disponibilidad y asesoramiento.

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABLAS.....	8
INTRODUCCIÓN.....	9
CAPÍTULO 1: PROTECCIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	13
1.1. Relés de sobrecorriente	13
1.1.1. Clasificación	13
1.1.2. Ecuación característica de los relés temporizados	16
1.1.3. Selección de relés de sobrecorriente.....	18
1.2. Fusibles.....	18
1.3. Reconnectadores	19
1.4. Seccionalizadores	20
CAPÍTULO 2: COORDINACIÓN DE RELÉS DE SOBRECORRIENTE	21
2.1. Definiciones	21
2.2. Descripción de la metodología manual.....	22
2.3. Descripción de la metodología utilizando programación lineal.....	23
2.4. Ejemplo de aplicación	24
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA PROPUESTA.....	32
3.1. Generalidades de la metodología propuesta	32
3.2. Descripción de la metodología propuesta	33
CAPÍTULO 4: APLICACIONES Y RESULTADOS.....	35
4.1. Ejemplo de aplicación de la metodología propuesta	35

4.1.1. Caso 1: sin GD	35
4.1.2. Caso 2: con GD en el barraje B	40
4.1.3. Comentarios de los resultados obtenidos	44
4.2. Sistema de prueba 2	46
4.2.1. Caso 1: sin GD	46
4.2.2. Caso 2: con GD en C	47
4.2.3. Caso 3: con GD en D.....	48
4.2.4. Comentarios de los resultados del sistema 2.....	49
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	52
5.1. CONCLUSIONES.....	52
5.2. RECOMENDACIONES	53
BIBLIOGRAFÍA.....	54
ANEXOS.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Relé de corriente definida	14
Figura 1.2. Relé de corriente definida y tiempo definido	15
Figura 1.3. Relé de tiempo inverso	16
Figura 1.4. Tipos de curvas de los relés de tiempo inverso [12].....	16
Figura 1.5. Características de la corriente vs tiempo de operación en fusibles [12]	19
Figura 2.1. Sistema del ejemplo de aplicación	25
Figura 4.1. Ejemplo de aplicación sin GD	35
Figura 4.2. Ejemplo de aplicación con GD.....	40
Figura 4.3. Sistema de prueba 2 – Sin GD.....	46
Figura 4.4. Sistema de prueba 2 – Con GD en C.....	47
Figura 4.5. Sistema de prueba 2 – Con GD en D.....	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Constantes de forma para la ecuación exponencial - Norma IEC.....	17
Tabla 1.2. Constantes de forma para la ecuación exponencial - Norma ANSI	17
Tabla 1.3. Selección de relé de sobrecorriente de acuerdo a su aplicación.....	18
Tabla 2.1. Valores calculados de corrientes y RTC.....	25
Tabla 2.2. Valores de corriente de arranque	26
Tabla 2.3. Parámetros de ajuste.....	28
Tabla 2.4. Resultados de tiempos propios y de respaldo	28
Tabla 2.5. Valores calculados de corrientes y RTC.....	29
Tabla 2.6. Valores de corrientes de arranque	29
Tabla 2.7. Valores de G_{ii} y G_{ij}	30
Tabla 2.8. Parámetros de ajuste usando PL.....	31
Tabla 2.9. Tiempos optimizados para tiempos propios y de respaldo	31
Tabla 4.1. Valores calculados de corrientes y RTC.....	36
Tabla 4.2. Resultados del ejemplo ilustrativo sin GD.....	40
Tabla 4.3. Valores calculados de corrientes y RTC.....	40
Tabla 4.4. Resultados del ejemplo ilustrativo con GD	44
Tabla 4.5. Tiempos operativos de los relés	45
Tabla 4.6. Tiempos de las funciones objetivo [s]	45
Tabla 4.7. Función objetivo del Sistema 2 - Caso 1	46
Tabla 4.8. Valores encontrados para el Sistema 2 - Caso 1.....	47
Tabla 4.9. Función objetivo del Sistema 2 - Caso 2	48
Tabla 4.10. Valores encontrados para el Sistema 2 - Caso 2.....	48
Tabla 4.11. Función objetivo del Sistema 2 - Caso 3	49
Tabla 4.12. Valores encontrados para el Sistema 2 - Caso 3.....	49
Tabla 4.13. Consolidado de las funciones objetivo- Sistema 2.....	49
Tabla 4.14. Consolidado de los tiempos obtenidos [seg] – Estrategias local y global.....	50
Tabla 4.15. Consolidado de los tiempos obtenidos [seg] – Metodología manual y con PL	51
A 1. Datos de las líneas del sistema de prueba 1.....	56
A 2. Bases del sistema de prueba 1.....	56
A 3. Demanda del sistema de prueba 1	56
A 4. Corrientes de arranque y de falla para el sistema de prueba 1	56
A 5. Datos de las líneas del sistema de prueba 2.....	56
A 6. Bases del sistema de prueba 2.....	56
A 7. Demanda del sistema de prueba 2.....	57
A 8. Corrientes de arranque y de falla para el sistema de prueba 2 sin GD.....	57
A 9. Corrientes de arranque y de falla para el sistema de prueba 2 con GD en el nodo C.....	57
A 10. Corrientes de arranque y de falla para el sistema de prueba 2 con GD en el nodo D	57

INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente los sistemas de distribución han sido diseñados en forma radial lo que ocasiona que circulen flujos de potencia en una sola dirección. Con la penetración de la generación distribuida en los sistemas de distribución, los flujos de potencia circulan en ambos sentidos, lo que ocasiona diversos impactos en las condiciones operativas del sistema. Uno de estos aspectos está reflejado en el comportamiento inadecuado de las protecciones, básicamente desde el punto de vista de los relés de sobrecorriente [1].

La contribución de los generadores distribuidos pequeños en los niveles de falla no es significativa, sin embargo, las contribuciones agregadas de varias unidades pequeñas, o de unidades más grandes, pueden alterar los niveles de corto circuito de manera suficiente para causar una pérdida de coordinación en las protecciones. Esto puede afectar la confiabilidad y seguridad del sistema de distribución.

Debido a lo anterior, una inadecuada coordinación de relés de sobrecorriente puede ocasionar disparos indeseados o no operar en momentos en que deban hacerlo, lo que ocasiona pérdidas económicas para los consumidores, empeoramiento de los índices de confiabilidad, incremento en las penalizaciones realizadas por los organismos de regulación y control, y pérdidas debido al valor de la energía no servida.

De acuerdo a esto, la coordinación óptima de relés de sobrecorriente en sistemas de distribución con presencia de generación distribuida, cobra un interés cada vez mayor para las electrificadoras, siendo esta temática un área de investigación todavía por explorar y que presenta una gran cantidad de investigaciones y proyectos encaminados a solucionar este problema.

En la literatura especializada existen diversas metodologías para coordinar relés de sobrecorriente en sistemas tradicionales.

En [2] presentan una nueva metodología basada en la teoría de optimización, para tratar el problema de la coordinación óptima de los relés de sobrecorriente direccionales en sistemas de potencia. Con la aplicación de la técnica propuesta, el problema de coordinación se plantea como un problema de optimización que en general es de gran dimensión, sobre todo cuando el sistema tiene diferentes configuraciones y cuando se consideran todas las perturbaciones. Emplean varios procedimientos de optimización, incluidos métodos directos y técnicas de

descomposición para resolver el problema de coordinación, obteniendo resultados de forma óptima.

En [3] aplican el método simplex en la solución del problema de la coordinación de relés de sobrecorriente de tiempo inverso en sistemas radiales. Plantean el conjunto de ecuaciones que describe el problema de coordinación con el fin de obtener una solución óptima, realizando un planteamiento matemático que permite gran flexibilidad en el análisis dado que pueden evaluarse diversas alternativas de curvas de operación, corrientes de arranque y adiciones al sistema, simplemente cambiando algunos datos y ejecutando de nuevo el programa.

En [4] presentan una metodología para coordinar relés de sobrecorriente de tiempo inverso en sistemas enmallados. Plantean el conjunto de ecuaciones que describe el problema de coordinación con el fin de obtener una solución óptima junto con una selección de las corrientes de carga y falla que simplifica el problema.

En [1] los autores discuten formulaciones propuestas sobre el problema de coordinación de relés de sobrecorriente direccionales, reformulando este problema y teniendo en cuenta que los valores de la corriente de funcionamiento de los relés son discretos, obteniendo así un problema de programación lineal entera-mixta. Este problema es resuelto en un software de optimización comercial.

En [5] exponen una metodología que plantea el proceso de coordinación de relés como un problema de optimización matemática resuelta con programación lineal mediante el método de puntos interiores, el cual muestra ser una herramienta computacionalmente eficiente para la coordinación de relés de sobrecorriente direccionales de tiempo inverso en sistemas de potencia, cuando se usan como única protección y cuando hacen parte de un esquema de protección combinado con relés de distancia.

En [6] formulan el problema de coordinación de relés de sobrecorriente como un problema de programación no lineal para encontrar los valores de los diales y de la corriente de arranque, y como un problema de programación lineal para encontrar los valores de diales de los relés. Los modelos se resuelven usando una técnica de optimización por enjambre de partículas (PSO) modificado, con el fin de encontrar la configuración óptima del sistema.

Con respecto a la coordinación de elementos de protección en sistemas de distribución con generación distribuida (GD) se tienen los siguientes trabajos.

En [7] se propone una metodología para mitigar la pérdida de coordinación entre fusibles y reconectores cuando se conecta a la red la GD. Con el fin de solucionar este problema se deben obtener las corrientes de corto circuito en el punto de ubicación del fusible y en el punto final del ramal donde se encuentra, relacionando la

corriente vista por el fusible y la corriente vista por el reconectador en sus puntos de ubicación. Una vez obtenidos estos valores para fallas monofásicas y trifásicas, se incorporan estos valores en el nuevo ajuste de las curvas del reconectador. De esta forma se garantiza que ante cualquier tipo de falla aguas abajo del fusible, el reconectador opere primero. Con este nuevo ajuste se garantiza que el esquema de salvamento de fusibles permanezca a pesar de que exista o no generación distribuida en la red.

En [8] la coordinación de relés de sobrecorriente direccionales en un sistema en anillo se formula como un problema de optimización, considerando que los tiempos totales de funcionamiento de los relés deben minimizarse manteniendo al mismo tiempo su coordinación. Como técnica de solución emplea un algoritmo evolutivo.

En [9] se muestra un método generalizado para evaluar la pérdida de la coordinación entre los relés de sobrecorriente en función de los límites de penetración de GD, considerando su tamaño, ubicación y tecnología. El estudio de coordinación y construcción se realiza para diferentes esquemas de protección. Para el sistema en estudio, se determina una corriente mínima de cortocircuito en donde la pérdida de coordinación puede ocurrir entre todas las protecciones (fusibles). Con este estudio se garantiza que incluso con el aumento de la corriente de cortocircuito, al mover el punto de la intersección de las curvas principales y de respaldo, se mantenga un adecuado esquema de protección.

En [10] se propone un nuevo enfoque basado en la aplicación de FCL (Fault Current Limiter) como una opción atractiva para resolver el problema de coordinación de relés de sobrecorriente direccionales cuando se conecta la GD a la red. Se introduce el uso de un FCL conectado en serie con la GD, para limitar localmente la corriente del GD durante la falla.

En este trabajo se presenta una metodología general con el fin de solucionar el problema de la pérdida de coordinación de relés de sobrecorriente en sistemas de distribución con penetración de GD. En esta metodología se emplean dos estrategias para coordinar estos relés, las cuales están en función de algunas variables y parámetros de ajustes de estos elementos. Como objetivo principal se tiene la minimización de los tiempos de operación de los relés, los cuales están sujetos a un conjunto de restricciones técnicas y operativas, que buscan garantizar una adecuada coordinación. Para solucionar el problema se emplea el software de optimización comercial GAMS [11]. Con el fin de verificar la eficiencia de la metodología propuesta se realiza un estudio comparativo con dos metodologías tradicionales, en sistemas sin GD [2] y con GD [12].

Este proyecto es organizado de la siguiente forma. En el capítulo uno se describe los diferentes tipos de protecciones empleados en sistemas eléctricos de distribución. En el capítulo dos se explican las metodologías presentadas en [2] y [12] y su aplicación

en una red eléctrica. En el capítulo tres se ilustra la metodología propuesta. En el capítulo cuatro se muestra la aplicación y resultados obtenidos. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas de este proyecto.

CAPÍTULO 1

PROTECCIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Las protecciones juegan un papel muy importante en los sistemas de distribución ya que este cuenta con un conjunto de elementos que deben ser protegidos ante un aumento significativo de la corriente que puede circular por la red a causa de una falla ocurrida en el sistema. Tradicionalmente diferentes tipos de protecciones han sido empleadas para proteger estos sistemas. A continuación se presentan algunas de estas protecciones.

1.1. Relés de sobrecorriente

Los relés de protección son dispositivos empleados para detectar condiciones intolerables o no deseadas dentro de un área asignada y operan en conjunto con los interruptores. Estos relés se pueden clasificar de diferentes maneras, las cuales se presentan a continuación [12].

1.1.1. Clasificación

- De acuerdo al sentido de detección de la corriente

Teniendo en cuenta el sentido de detección de la corriente, los relés de sobrecorriente se pueden clasificar en dos tipos: no direccionales y direccionales.

- No direccional: opera para sobrecorrientes que circulan en ambos lados de su ubicación. Ejecuta su función sin importar el sentido en que circula la corriente. En la norma ANSI se designan por los números 50 y 51. Normalmente son utilizados en sistemas radiales [13].
- Direccional: solo opera para sobrecorrientes que circulan en su sentido de ajuste. Ejecuta su función verificando que el sentido en que circula la corriente en su zona de protección corresponda al asignado. La direccionalidad se logra mediante una señal adicional de referencia, la cual usualmente es el voltaje. En la norma ANSI se designan por el número 67 [13].

- De acuerdo al tiempo de operación

Teniendo en cuenta el tiempo de operación, los relés de sobrecorriente se pueden clasificar en dos tipos: instantáneos y temporizados.

- Instantáneos: se denomina relé instantáneo a aquel equipo que opera en un tiempo menor o igual a 50 ms. Presentan un disparo inmediato cuando la corriente observada alcanza el valor de ajuste. En la norma ANSI se designan por el número 50 [13].
- Temporizado: se denomina relé temporizado a aquel equipo que opera un tiempo después de la detección de la falla, cuando la corriente observada alcanza el valor de ajuste. Según su característica de operación tiempo-corriente se clasifican en tiempo inverso y tiempo definido. En la norma ANSI se designan por el número 51 [13].

- De acuerdo a la característica de operación

Teniendo en cuenta las características de operación, los relés de sobrecorriente se pueden clasificar en tres tipos: de corriente definida, de corriente y tiempo definido y de tiempo inverso.

- Relés de corriente definida: en este tipo de relé se presenta una operación instantánea cuando la corriente alcanza un valor prefijado (I_a). El ajuste de este relé se hace de tal forma que el extremo más alejado de la fuente opere con el valor más bajo de corriente y progresivamente los ajustes van aumentando a medida que se acerca a la fuente. Según esto, el dispositivo con menor ajuste opera primero y desconecta la carga en el punto más cercano a la falla. Este tipo de protección tiene la desventaja de ser poco selectiva para altos valores de cortocircuito. Esto se debe a la dificultad para distinguir la corriente de falla entre un punto y otro, cuando la impedancia entre ellos es pequeña en comparación a la impedancia de la fuente (ver figura 1.1).

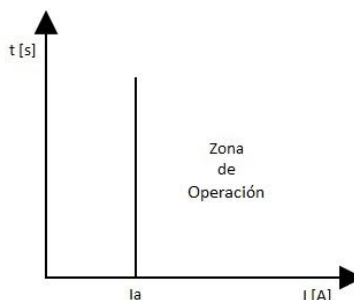


Figura 1.1. Relé de corriente definida

Por lo anterior, los relés de corriente definida no son muy utilizados como única protección de sobrecorriente. Su uso es común como unidad instantánea cuando hay otro tipo de protección.

- Relés de corriente definida y tiempo definido: este tipo de relés permite ajustar la operación para diferentes niveles de corriente con diferentes tiempos de operación. Por lo tanto los ajustes se hacen en forma tal, que el interruptor que alimenta la carga se dispare en el tiempo más corto y después sucesivamente los demás interruptores hacia la fuente, en tiempos cada vez mayores. La diferencia entre los tiempos de disparo para la misma corriente se denomina tiempo de margen o de respaldo (ver figura 1.2).

Como en este relé el tiempo de operación puede ajustarse en valores definidos, no se presentan los inconvenientes del relé anterior, y por lo tanto, la protección es más selectiva. Sin embargo la gran desventaja con este método de discriminación es que fallas cerca a la fuente (donde circulan las mayores corrientes) son clarificadas en un tiempo que puede ser relativamente largo. El ajuste de este tipo de relés se hace con un dial que determina el tiempo exacto de operación y con un selector de corriente para escoger a partir de qué valor debe empezar a trabajar el temporizador.

Este tipo de relés son muy utilizados cuando la impedancia de la fuente es mayor con respecto a la del elemento a proteger y por lo tanto los niveles de falla en el punto de ubicación del relé son similares a los del extremo de la línea.

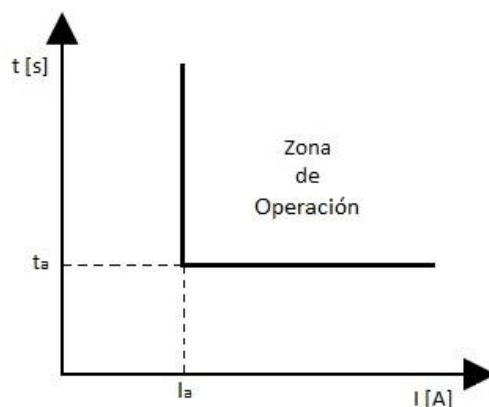


Figura 1.2. Relé de corriente definida y tiempo definido

- Relés de tiempo inverso: la propiedad fundamental de estos relés es que operan en un tiempo inversamente proporcional a la corriente de falla de acuerdo a un grupo disponible de curvas características. Por lo tanto la ventaja de estos relés sobre los anteriores es que ante altas corrientes pueden obtenerse tiempos de disparo muy cortos sin tener que sacrificar la selectividad. Los relés de tiempo inverso se clasifican de acuerdo a la curva característica que determina la rapidez de operación en: inverso, muy inverso, extremadamente inverso tiempo definido (ver figuras 1.3 y 1.4).

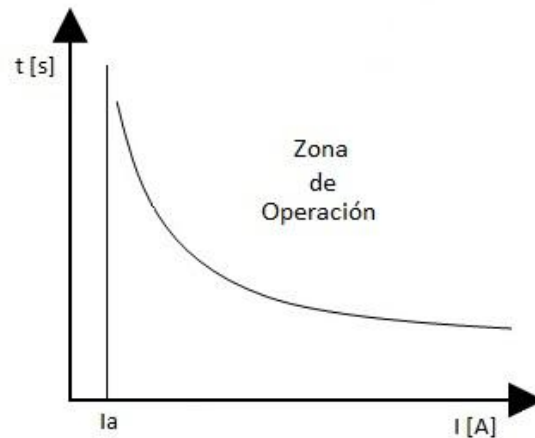


Figura 1.3. Relé de tiempo inverso

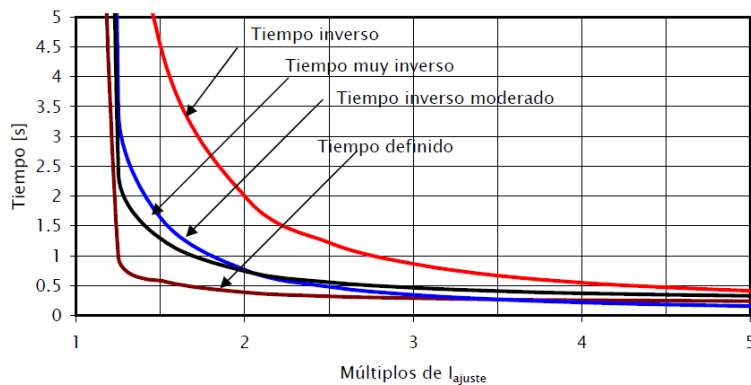


Figura 1.4. Tipos de curvas de los relés de tiempo inverso [12]

1.1.2. Ecuación característica de los relés temporizados

Todos los tipos de curvas de operación de los relés temporizados se pueden modelar matemáticamente por medio de una ecuación característica. Existen dos formas básicas para expresar matemáticamente esta ecuación [12, 14]:

- Exponencial:

$$t = \frac{a * \text{DIAL}}{(M^n - 1)} \text{ Norma IEC} \quad (1.1)$$

$$t = a * \frac{\text{DIAL}}{M^n - 1} + b * \text{DIAL Norma ANSI} \quad (1.2)$$

- Polinomial:

$$t = c_0 + \frac{c_1}{M - 1} + c_2(M^2 - 1) + c_3(M^3 - 1) + \dots \quad (1.3)$$

$$t = c_0 + c_1(M - 1) + c_2(M - 1)^2 + c_3(M - 1)^3 + \dots \quad (1.4)$$

Donde,

- a, b, n, c0, c1, c2, c3: son las constantes de forma de la ecuación característica.
- M (o MULT): es la relación entre la corriente de operación del relé (Icc) y su corriente de ajuste (Ia o TAP).
- DIAL: es el factor para un tipo de curva dado, el cual permite obtener diferentes tiempos de operación para un mismo tipo de curva de operación.
- t: es el tiempo de operación del relé en segundos.

Algunos fabricantes presentan otras ecuaciones o variaciones a las ecuaciones presentadas. Las ecuaciones normalizadas tienen los siguientes valores de forma presentados en las tablas 1.1 y 1.2 [12]:

Tabla 1.1. Constantes de forma para la ecuación exponencial - Norma IEC

Tipo de curva	a	n
Tiempo inverso estándar	0,14	0,02
Muy inversa	13,50	1,00
Extremadamente inversa	80,00	2,00
Tiempo inverso largo	120,00	1,00

Tabla 1.2. Constantes de forma para las ecuación exponencial - Norma ANSI

Tipo de curva	a	n	b
Tiempo inverso estándar	59,50	2,00	1,80
Muy inversa	39,22	2,00	0,98
Extremadamente inversa	56,40	2,00	0,24
Moderadamente inversa	0,10	0,02	0,22

1.1.3. Selección de relés de sobrecorriente

A continuación se presentan algunas recomendaciones para la selección del tipo de relé de sobrecorriente de acuerdo a la aplicación necesaria [12]:

Tabla 1.3. Selección de relé de sobrecorriente de acuerdo a su aplicación

Aplicación	Tipo de relé recomendado
Protección principal	Instantáneos y temporizados de tiempo inverso
Protección de respaldo	Temporizados
Protección de equipos individuales	Temporizados de tiempo definido
Protección de extremos del sistema radial	Temporizados de tiempo definido
Protección de sistemas en anillo	Temporizados de tiempo inverso, muy inverso y extremadamente inverso
Combinación de relés y fusibles	Temporizados de tiempo inverso, muy inverso y extremadamente inverso
Protección de líneas largas	Temporizados de tiempo inverso
Protección de líneas cortas	Temporizados de tiempo inverso
Sistemas con variaciones apreciables en la generación (cortocircuito)	Temporizados de tiempo inverso y muy inverso
Sistemas con poca variación en el nivel de corto local y remoto	Temporizados de tiempo definido

1.2. Fusibles

Los fusibles son elementos de protección de sobrecorriente los cuales se caracterizan por tener un elemento que es calentado directamente por el paso de una corriente y se destruye cuando ella supera un valor determinado [12, 15]. De manera similar a los relés de sobrecorriente, los fusibles tienen características inversas de tiempo. Se utilizan para proteger ramales o derivaciones, transformadores, cables subterráneos, capacitores, etc.

Estos elementos solo pueden operar una vez a diferencia de los relés que pueden actuar muchas veces. Por otro lado, los fusibles y las cajas primarias (lugar donde estos se instalan), son una alternativa económica en comparación con los sistemas de protección conformados por transformadores de corriente, relé e interruptor.

Los cortacircuitos constan de un soporte aislante y un tubo móvil llamado "cañuela", "tubo portafusible", "vela" o "chopo" equipado con un fusible, el cual al fundirse

permite que el tubo "cañuela" donde reside este, se abra y caiga para proveer una señalización visual de que el fusible ha operado [16].

Un fusible seleccionado adecuadamente debe abrir el circuito mediante la destrucción del elemento fusible y eliminar el arco establecido durante la destrucción del elemento. Normalmente los fusibles de todas las marcas son mecánicamente intercambiables; sin embargo, sus características eléctricas no son las mismas.

La zona de operación está limitada por dos curvas: límite inferior (representa el tiempo mínimo requerido para la fundición del elemento fusible -mínimum melting time) y límite superior (representa el tiempo total máximo que toma el fusible en interrumpir la corriente - total clearing time). La diferencia entre estos límites es el tiempo para extinción del arco dentro del fusible (ver figura 1.5).

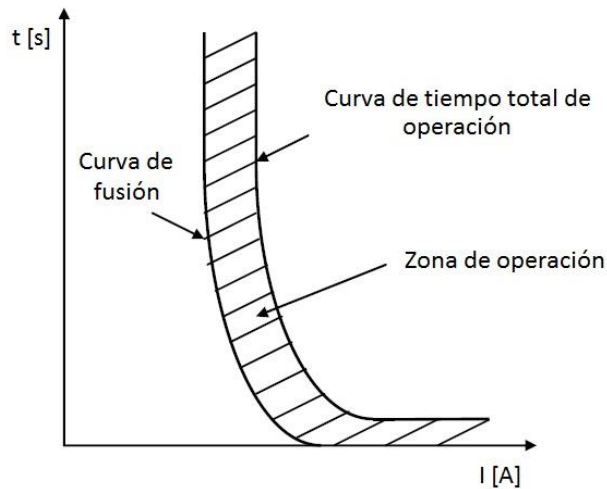


Figura 1.5. Características de la corriente vs tiempo de operación en fusibles [12]

1.3. Reconectadores

Con el fin de evitar los problemas de cambio de fusibles es una práctica común utilizar interruptores de recierre (reclosers). Los interruptores de recierre pueden instalarse en postes a la intemperie con un costo menor que el conjunto TC, relé e interruptor; además proporcionan varias aperturas del segmento de línea que protegen antes de que los fusibles se fundan. Esto permite despejar las fallas temporales en circuitos primarios [14-16].

El recloser es un dispositivo que tiene la habilidad de detectar condiciones de sobrecorriente, interrumpir el circuito si esta se mantiene por un tiempo determinado y cerrar automáticamente para reenergizar la línea. Si la falla que originó la operación es permanente, el recloser terminará abierto después de un número preestablecido de

operaciones (usualmente tres o cuatro), aislando así la sección bajo falla del resto del sistema.

Dado que la mayoría de las fallas son de naturaleza temporal y duran como máximo pocos ciclos de tiempo, este dispositivo elimina la posibilidad de dejar por fuera un circuito de distribución debido a fallas de tipo temporal.

Los reclosers se construyen monofásicos y trifásicos, con mecanismo de operación hidráulico o electrónico y en vacío, aceite o SF₆. Se utilizan en los siguientes puntos:

- En subestaciones como dispositivo de protección primaria de un circuito.
- En los circuitos a cierta distancia de la subestación, para seccionar líneas largas y así prevenir la salida del circuito completo por causa de una falla al final del mismo.
- En derivaciones de circuitos principales, para prevenir la salida del circuito principal por causa de fallas en las derivaciones.

1.4. Seccionalizadores

Es un dispositivo que automáticamente desconecta secciones en falla de un circuito de distribución; normalmente son utilizados en sitios aguas abajo de un recloser. Los seccionalizadores no tienen capacidad para interrumpir corrientes de falla [14-16].

Estos dispositivos cuentan las operaciones del recloser durante condiciones de falla. Después de un número preseleccionado de apertura del recloser asociado y cuando este último está abierto, el seccionalizador abre y aísla la sección en falla de la línea. Esta operación permite al recloser cerrar y restablecer el servicio en las zonas libres de falla. Si la falla es temporal, el mecanismo de operación del seccionalizador se repone.

Los seccionalizadores se construyen monofásicos o trifásicos y con mecanismos de operación hidráulicos o electrónicos.

CAPÍTULO 2

COORDINACIÓN DE RELÉS DE SOBRECORRIENTE

En este capítulo se presentan dos metodologías que han sido empleadas comúnmente en la coordinación de relés de sobrecorriente en sistemas de distribución tradicionales (sin GD) [2, 12].

2.1. Definiciones

- Corriente nominal (I_n): es el valor de corriente que circula por el punto de ubicación de un relé, bajo condiciones de operación normal. Para un sistema trifásico se obtiene como:

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3}V_{Ln}} \quad (2.1)$$

- Corriente de arranque: determina el valor de corriente a partir del cual el relé de sobrecorriente empieza a operar. También se conoce como corriente de ajuste, pickup o TAP. Está en función de K veces la corriente nominal. K es conocido como un factor de seguridad y se encuentra entre 1,1 y 1,5. En la ecuación (2.2) se encuentra en valores primarios, sin embargo al dividirse por la RTC se podrá obtener en valores secundarios:

$$I_p = K I_n \quad \text{o} \quad I_s = \frac{(K I_n)}{RTC} \quad (2.2)$$

Algunos relés tienen como ajuste un valor de x veces la corriente nominal secundaria, por lo que la ecuación (2.2) se divide entre 5 A (ó 1 A), para luego ajustarse a los parámetros del relé. Por lo tanto:

$$xI_{\text{nom-sec}} = \frac{(K I_n)}{RTC * 5} \quad (2.3)$$

- DIAL o TDS (Time Dial Setting): permite obtener diferentes tiempos de operación para una familia del mismo tipo de curvas para una corriente dada. En los relés

modernos los pasos del dial son muy cercanos entre sí, por ejemplo, de 0,1 a 1, en pasos de 0,05 (equivale a 18 curvas), lo cual permite considerar el ajuste del dial como una función continua [12].

- Relación de transformación del transformador de corriente (RTC): permite aislar el relé de valores altos de corriente que circulan por el sistema de potencia, y además entrega valores normalizados (1 A ó 5 A). Se obtiene en función de la corriente que circula por el sistema de potencia en el punto de ubicación del relé. La relación entre la corriente primaria (devanado primario o sistema de potencia) y la corriente secundaria (devanado secundario o sistema de protecciones) está dada por:

$$I_{sec} = \frac{I_{prim}}{RTC_{Rn}} \quad (2.4)$$

- Tiempo de operación del relé: se puede obtener empleando las ecuaciones (1.1) ó (1.2). En este trabajo se usará la ecuación (1.1) (Norma IEC). Por lo tanto:

$$t = \frac{a * Dial}{(M)^n - 1} = \frac{a * Dial}{\left(\frac{I_{cc}}{I_a}\right)^n - 1} = G * Dial \quad (2.5)$$

Siendo

$$G = \frac{a}{(M)^n - 1} = \frac{a}{\left(\frac{I_{cc}}{I_a}\right)^n - 1} \quad (2.6)$$

- Tiempo de respaldo: es el tiempo que se debe garantizar para que un relé primario opere primero que uno de respaldo. Se denota como Δt .
- Valores propios y de respaldo: todo relé posee valores propios y de respaldo. Los primeros hacen referencia al punto de su ubicación y los segundos a la ubicación del relé aguas abajo que está protegiendo. Usualmente se denotan con dos subíndices, donde el primer subíndice hace referencia al relé y el segundo al barraje. De acuerdo a esto, los subíndices i-i hacen referencia a los valores propios y los subíndices i-j a valores de respaldo.

2.2. Descripción de la metodología manual [12]

- **Paso 1.** Determinar la topología del sistema bajo estudio, garantizando el conocimiento de los valores nominales de elementos y de operación del sistema.

- **Paso 2.** Definir los parámetros de ajuste como tiempos de respaldo y valores de K, así como las características de los relés involucrados.
- **Paso 3.** Calcular la I_{cc} para los barrajes del sistema y además obtener la I_n y RTC para cada relé.
- **Paso 4.** Hallar la corriente de arranque usando la ecuación (2.3).
- **Paso 5.** Determinar el valor del Dial (TDS) para cada relé empezando por el relé más cercano a la carga (o más lejano a la fuente). Si un relé no tiene requerimiento de tiempo mínimo de operación se selecciona el menor valor posible para su dial. En este procedimiento se debe hacer uso del tiempo de respaldo con el fin de garantizar una adecuada selectividad.

Para el primer relé se asigna $t_{min} = t_{ii}$. Luego se debe calcular M_{ii} (o MULT) en función de la I_{cc_i} e I_{a_i} (ver ecuación 2.5). Con estos dos valores se obtiene el valor del Dial usando la misma ecuación.

Posteriormente se continúa con el relé aguas arriba (protección de respaldo), para lo cual se obtiene su tiempo de respaldo usando la ecuación 2.7:

$$t_{ij} = t_{ii} + \Delta t \quad (2.7)$$

Con este valor y el valor de M_{ij} (calculado en función de I_{cc_j} e I_{a_j}) se obtiene el Dial de dicho relé.

El procedimiento continúa hasta que se llega al relé más próximo a la fuente.

- **Paso 6.** Verificar si todos los relés fueron ajustados. El procedimiento termina cuando todos los relés tiene definidos sus parámetros de ajuste (Dial y $xI_{nom-sec}$ o I_a).

2.3. Descripción de la metodología utilizando programación lineal [2]

- **Paso 1.** Determinar la topología del sistema bajo estudio, garantizando el conocimiento de los valores nominales de elementos y de operación del sistema.
- **Paso 2.** Definir los parámetros de ajuste como tiempos de respaldo y valores de K, así como las características de los relés involucrados.
- **Paso 3.** Calcular la I_{cc} para los barrajes del sistema y además obtener la I_n y RTC para cada relé.

- **Paso 4.** Hallar la corriente de arranque usando la ecuación (2.3).
- **Paso 5.** Plantear una función objetivo a minimizar en función de los tiempos propios y de respaldo de cada relé usando la ecuación (2.8):

$$\min FO = \sum t_{\text{propio}} + t_{\text{respaldo}} \quad (2.8)$$

- **Paso 6.** Plantear el conjunto de restricciones del modelo matemático. Estas deben incluir las características técnicas y operativas involucradas.

Se debe garantizar que el Dial de cada relé seleccionado se encuentre entre los límites de ajuste que este posee.

$$\text{Dial}_{\min} \leq \text{Dial} \leq \text{Dial}_{\max} \quad (2.9)$$

Para garantizar selectividad se deben tener en cuenta los tiempos de respaldo como sigue:

$$t_{\text{respaldo}} \geq t_{\text{propio}} + \Delta t \quad (2.10)$$

Adicionalmente se deben plantear las relaciones existentes entre los tiempos propios y de respaldo y las Icc vistas por cada relé (ver Ecuación 2.5). Por lo tanto:

$$t_{ii} = G_{ii} * \text{Dial}_{Ri} \quad (2.11)$$

$$t_{ij} = G_{ij} * \text{Dial}_{Ri} \quad (2.12)$$

- **Paso 7.** Solucionar el modelo compuesto por las ecuaciones (2.8) a (2.12), con el fin de encontrar los parámetros de ajuste de cada relé. Las variables continuas del problema son los tiempos de operación y diales. Este problema es del tipo lineal, por lo que puede ser fácilmente solucionado usando un software de optimización comercial.

2.4. Ejemplo de aplicación

En este numeral se presenta un ejemplo de aplicación con el fin de ilustrar las dos metodologías presentadas en los numerales 2.2 y 2.3. El sistema de distribución considerado tiene tres líneas entre subestaciones por lo que se usarán tres relés (en los barrajes A, B y C). La tensión nominal es 13.2 kV y la demanda conectada en los nodos C y D es 5 MVA.

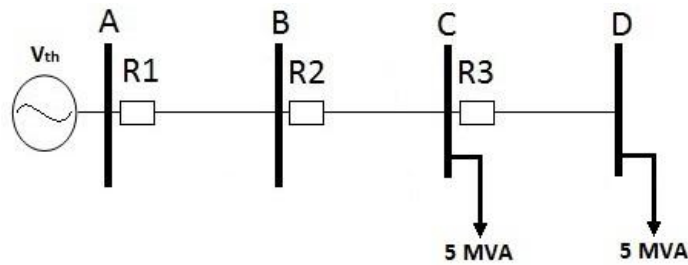


Figura 2.1. Sistema del ejemplo de aplicación

2.4.1. Usando la coordinación manual

- **Paso 1.** Determinar la topología del sistema bajo estudio, garantizando el conocimiento de los valores nominales de elementos y de operación del sistema (ver la figura 2.1).
- **Paso 2.** Definir los parámetros de ajuste como tiempos de respaldo y valores de K, así como las características de los relés involucrados.

Los valores definidos son un K igual a 1,5 y un Δt igual a 0,3 segundos. Los valores máximos y mínimos de los diales son 3, y 0,1, respectivamente, en pasos de 0,05. El rango de $xI_{nom-sec}$ es 0,4 a 4 en pasos de 0,05. El tiempo mínimo de operación es 0,30 segundos (para todos los relés). Los valores seleccionados para las constantes a y n son 0,14 y 0,02, respectivamente (ver Tabla 1.1).

- **Paso 3.** Calcular la I_{cc} y I_{in} para los barrajes del sistema y además obtener la I_n y RTC para cada relé.

Las I_{cc} fueron obtenidas simulando fallas trifásicas en cada barraje (donde están ubicados los relés) en una red de secuencia positiva. La I_n se determinó usando la Ecuación (2.1) y la RTC fue seleccionada en función de la corriente nominal como un valor de múltiplos de 100 (por encima del valor calculado). Por lo tanto:

Tabla 2.1. Valores calculados de corrientes y RTC

Relé	I_{cc} [A]	I_n [A]	RTC
R_1	2730 (en A)	437,40	500/5
R_2	1800 (en B)	437,40	500/5
R_3	1220 (en C)	218,70	400/5

- **Paso 4.** Hallar la corriente de arranque usando la ecuación (2.3).

Tabla 2.2. Valores de corriente de arranque

Relé	Ia [A]	xI _{nom-sec}	
		Valor Obtenido	Valor aproximado
R ₁	675	1,31	1,35
R ₂	675	1,31	1,35
R ₃	440	1,09	1,10

- **Paso 5.** Determinar el valor del Dial (TDS) para cada relé empezando por el relé más cercano a la carga (o más lejano a la fuente).

➤ Para R₃

Aplicando la ecuación (2.6) se obtiene:

$$G_{3C} = 5,26$$

Reemplazando (2.6) en (2.11) y asumiendo t_{3C} como 0,30 [s] se tiene que:

$$0,30 = 5,26 * \text{Dial}_{R3}$$

Despejando Dial_{R3}:

$$\text{Dial}_{R3} = 0,06$$

Aproximando el Dial_{R3} en pasos de 0.05 (por encima para garantizar selectividad):

$$\text{Dial}_{R3} \cong 0,10$$

Recalculando el t_{3C} con el Dial aproximado:

$$t_{3C} = G_{3C} * 0,10$$

$$t_{3C} = 0,52 \text{ [s]}$$

➤ Para R₂

Se halla el tiempo de respaldo de R3 aplicando la ecuación (2.7) con Δt=0,30:

$$t_{2C} = 0,82 \text{ [s]}$$

Aplicando la ecuación (2.6) se obtiene:

$$G_{2C} = 11,21$$

Reemplazando (2.6) en (2.11) y asumiendo t_{3C} como 0,30 [s] se tiene que:

$$0.826 = 11,21 * \text{Dial}_{R2}$$

Despejando Dial_{R2} :

$$\text{Dial}_{R2} = 0,07$$

Aproximando el Dial_{R3} en pasos de 0.05:

$$\text{Dial}_{R3} \cong 0,10$$

Recalculando el t_{2C} con el Dial aproximado:

$$t_{2C} = G_{2C} * 0,10$$

$$t_{2C} = 1,12 \text{ [s]}$$

➤ Para R_1

Se halla G_{2B} con la ecuación (2.6):

$$G_{2B} = 6,86$$

Aplicando la ecuación (2.11) se obtiene el tiempo principal para t_{2B} :

$$t_{2B} = G_{2B} * 0,10$$

$$t_{2B} = 0,68 \text{ [s]}$$

Con la ecuación (2.7) se obtiene el t_{1B} con $\Delta t = 0,30$ como sigue:

$$t_{1B} = 0,98 \text{ [s]}$$

Reemplazando valores en (2.12) se obtiene:

$$0,98 = \text{Dial}_{R1} * 6,86$$

Despejando el Dial_{R1} se tiene que:

$$\text{Dial}_{R1} = 0,14$$

Aproximando el Dial según los pasos:

$$\text{Dial}_{R1} \cong 0,15$$

Recalculando el t_{3C} con el Dial aproximado aplicando la ecuación (2.11):

$$t_{1B} = G_{1B} * 0,15$$

$$t_{1B} = 1,02 \text{ [s]}$$

Aplicando la formula (2.6) se tiene:

$$G_{1A} = 4,84$$

Para el cálculo del t_{1A} se reemplazan los valores obtenidos en la ecuación (2.11):

$$t_{1A} = G_{1A} * 0,15$$

$$t_{1A} = 0,72 \text{ [s]}$$

- **Paso 6.** Verificar si todos los relés fueron ajustados. El procedimiento termina cuando todos los relés tiene definidos sus parámetros de ajuste (Dial y $xI_{\text{nom-sec}}$).

Los valores de ajuste encontrados para cada relé se presentan en la Tablas 2.3 y 2.4.

Tabla 2.3. Parámetros de ajuste

Relé	$xI_{\text{nom-sec}}$	Dial
R ₁	1,35	0,15
R ₂	1,35	0,10
R ₃	1,10	0,10

Tabla 2.4. Resultados de tiempos propios y de respaldo

Relé	t_{propio} [s]	t_{respaldo} [s]
R ₁	0,72	1,02
R ₂	0,68	1,12
R ₃	0,52	---

2.4.2. Usando programación lineal

- **Paso 1.** Determinar la topología del sistema bajo estudio, garantizando el conocimiento de los valores nominales de elementos y de operación del sistema (ver la figura 2.1).

- **Paso 2.** Definir los parámetros de ajuste como tiempos de respaldo y valores de K, así como las características de los relés involucrados.

Los valores definidos son un K igual a 1,50 y un Δt igual a 0,30 segundos. Los valores máximos y mínimos de los diales son 3 y 0,10, respectivamente, en pasos de 0,05. El rango de $xI_{nom-sec}$ es 0,40 a 4 en pasos de 0,05. Los valores seleccionados para las constantes a y n son 0,14 y 0,02, respectivamente (ver Tabla 1.1).

- **Paso 3.** Calcular la I_{cc} para los barrajes del sistema y además obtener la I_n y RTC para cada relé.

Las I_{cc} fueron obtenidas simulando fallas trifásicas en cada barraje en una red secuencia positiva. La I_n se determinó usando la Ecuación (2.1) y la RTC fue seleccionada en función de la corriente nominal como un valor de múltiplos de 100 (por encima del valor calculado). Por lo tanto:

Tabla 2.5. Valores calculados de corrientes y RTC

Relé	I_{cc} [A]	I_n [A]	RTC
R ₁	2730	437,40	500/5
R ₂	1800	437,40	500/5
R ₃	1220	218,70	300/5

- **Paso 4.** Hallar la corriente de arranque usando la ecuación (2.3).

Tabla 2.6. Valores de corrientes de arranque

Relé	I_a [A]	$xI_{nom-sec}$	
		Valor obtenido	Valor aproximado
R ₁	675	1,31	1,35
R ₂	675	1,31	1,35
R ₃	440	1,09	1,10

- **Paso 5.** Plantear la función objetivo a minimizar en función de los tiempos propios y de respaldo de cada relé usando la ecuación (2.8).

Se tienen tres tiempos propios y dos tiempos de respaldo. Por lo tanto:

$$\min FO = t_{3C} + t_{2B} + t_{1A} + t_{2C} + t_{1B}$$

- **Paso 6.** Calcular los G_{ii} y G_{ij} para relés principales y de respaldo usando la ecuación (2.6).

Tabla 2.7. Valores de G_{ii} y G_{ij}

Valores propios	G_{ii}	Valores de respaldo	G_{ij}
G_{1A}	4,84	G_{1B}	6,86
G_{2B}	6,86	G_{2C}	11,20
G_{3C}	5,25	---	---

- **Paso 7.** Plantear el conjunto de restricciones del modelo matemático. Estas deben incluir las características técnicas y operativas involucradas.

Las ecuaciones para los diales son:

$$0,10 \leq \text{Dial}_{R1} \leq 3,00$$

$$0,10 \leq \text{Dial}_{R2} \leq 3,00$$

$$0,10 \leq \text{Dial}_{R3} \leq 3,00$$

Las ecuaciones para los tiempos propios y de respaldo, y la relación con los Dial son:

$$t_{2C} \geq t_{3C} + 0,30$$

$$t_{1B} \geq t_{2B} + 0,30$$

$$t_{3C} = 5,25 * \text{Dial}_{R3}$$

$$t_{2B} = 6,86 * \text{Dial}_{R2}$$

$$t_{1A} = 4,84 * \text{Dial}_{R1}$$

$$t_{2C} = 11,20 * \text{Dial}_{R2}$$

$$t_{1B} = 6,86 * \text{Dial}_{R1}$$

- **Paso 8.** Solucionar el modelo matemático.

El modelo completo se ilustra a continuación.

$$\begin{aligned} \min FO = & t_{3C} + t_{2B} + t_{1A} + t_{2C} + t_{1B} \\ \text{s.a. } & 0,10 \leq \text{Dial}_{R1} \leq 3,00 \\ & 0,10 \leq \text{Dial}_{R2} \leq 3,00 \\ & 0,10 \leq \text{Dial}_{R3} \leq 3,00 \\ & t_{2C} \geq t_{3C} + 0,30 \\ & t_{1B} \geq t_{2B} + 0,30 \\ & t_{3C} = 5,25 * \text{Dial}_{R3} \\ & t_{2B} = 6,86 * \text{Dial}_{R2} \\ & t_{1A} = 4,84 * \text{Dial}_{R1} \\ & t_{2C} = 11,20 * \text{Dial}_{R2} \\ & t_{1B} = 6,86 * \text{Dial}_{R1} \end{aligned}$$

Una vez el modelo es solucionado usando el software GAMS [11], se obtiene los resultados presentados en las Tablas 2.8 y 2.9.

Tabla 2.8. Parámetros de ajuste usando PL

Relé	$xI_{\text{nom-sec}}$	Dial
R ₁	1,35	0,15
R ₂	1,35	0,10
R ₃	1,10	0,10

Tabla 2.9. Tiempos optimizados para tiempos propios y de respaldo

Relé	$t_{\text{propio}} [s]$	$t_{\text{respaldo}} [s]$
R ₁	0,72	1,02
R ₂	0,68	1,12
R ₃	0,52	---

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA PROPUESTA

A continuación se describe la metodología propuesta en este trabajo con el fin de garantizar una adecuada coordinación de los relés de sobrecorriente cuando se incorpora al sistema GD. Inicialmente se presentan las generalidades de la metodología y posteriormente se detallan cada uno de los pasos que las componen.

3.1. Generalidades de la metodología propuesta

Las dos estrategias planteadas consisten en considerar diferentes formas para las curvas de cada relé, es decir, diferentes valores para a y n (ver Tabla 1.1) [17]. Como se observó en el capítulo anterior, estos valores siempre permanecen constantes durante el proceso, es decir, son valores predefinidos. Sin embargo si estos valores son considerados como variables que se mueven entre unos límites máximos y mínimos dados por normatividad, se podrá tener una mayor flexibilidad para coordinar todos los relés.

Los valores obtenidos para a y n pueden ser diferentes de los estandarizados, sin embargo, aún con valores diferentes, las curvas de operación pueden ser construidas dadas las características de los relés modernos. En este trabajo se considera un relé con referencia MMCO (Microprocessor Time Overcurrent Relay) fabricado por ABB [18].

Las estrategias se llamarán en este trabajo como global y local. La diferencia entre ambas consiste en obtener diferentes valores de a y n para cada relé, es decir, la primera determina los mismos valores de a y n para todos los relés mientras la segunda permite que cada relé posea valores diferentes.

Nótese de la ecuación (1.1) que si a y n no son constantes, el modelo matemático se convierte en uno del tipo no lineal debido a los valores que estos podrían tomar. De acuerdo a esto, el modelo matemático asociado a ambas estrategias es del tipo no lineal.

Otra diferencia notable con las dos metodologías descritas previamente es que los valores de arranque no son fijos, es decir, estos valores pueden variar entre un rango que oscila entre un valor mínimo (2 veces la corriente nominal) y un valor máximo (corriente de cortocircuito mínima).

3.2. Descripción de la metodología propuesta

El algoritmo general para ambas estrategias se ilustra a continuación.

- **Paso 1.** Determinar la topología del sistema bajo estudio, garantizando el conocimiento de los valores nominales de elementos y de operación del sistema.
- **Paso 2.** Definir los parámetros de ajuste como tiempos de respaldo y valores de K, así como las características de los relés involucrados.
- **Paso 3.** Calcular la I_{cc} para los barrajes del sistema y además obtener la I_n y RTC para cada relé.
- **Paso 4.** Plantear una función objetivo a minimizar en función de los tiempos propios y de respaldo de cada relé:

$$\min FO = \sum t_{propio} + t_{respaldo} \quad (3.1)$$

- **Paso 5.** Plantear el conjunto de restricciones del modelo matemático. Estas deben incluir las características técnicas y operativas involucradas.

Se debe garantizar que el Dial de cada relé seleccionado se encuentre entre los límites de ajuste que este posee.

$$Dial_{min} \leq Dial \leq Dial_{max} \quad (3.2)$$

Para garantizar selectividad se deben tener en cuenta los tiempos de respaldo como sigue:

$$t_{respaldo} \geq t_{propio} + \Delta t \quad (3.3)$$

Posteriormente se deben plantear las relaciones existentes entre los tiempos propios y de respaldo de cada relé. Por lo tanto:

$$t_{ii} = G_{ii}(a, n) * Dial_{Ri} \quad (3.4)$$

$$t_{ij} = G_{ij}(a, n) * Dial_{Ri} \quad (3.5)$$

Se deben además considerar los intervalos de a y n como sigue:

$$a_{min} \leq a \leq a_{max} \quad (3.6)$$

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max} \quad (3.7)$$

En este punto radica la diferencia entre las estrategias global y local. La primera estrategia considera valores de a y n iguales para todos los relés, por lo que solamente se tendrán dos ecuaciones de este tipo para todo el modelo (una para a y otra para n). La segunda estrategia permite que a y n sean diferentes para cada relé, por lo que se tendrán dos ecuaciones por cada relé del sistema.

Definir los intervalos de la corriente de arranque de cada relé, como sigue:

$$I_{a_{\min-Ri}} \leq I_{a-Ri} \leq I_{a_{\max-Ri}} \quad (3.8)$$

- **Paso 6.** Solucionar el modelo compuesto por las ecuaciones (3.1) a (3.8), con el fin de encontrar los parámetros de ajuste de cada relé. Las variables continuas del problema son los tiempos de operación, diales, corrientes de arranque (I_a) y los valores de a y n . Este problema es del tipo no lineal, y puede ser solucionado en cualquier software de optimización comercial.

CAPÍTULO 4

APLICACIONES Y RESULTADOS

En este capítulo se emplean dos sistemas de prueba con el fin de verificar la eficiencia de la metodología propuesta. En el primer sistema se describe detalladamente la aplicación de cada estrategia (local y global) propuesta. En el segundo sistema de prueba se realiza una comparación con las dos metodologías descritas en el capítulo 2.

4.1. Ejemplo de aplicación de la metodología propuesta

4.1.1. Caso 1: sin GD

- **Paso 1.** Determinar la topología del sistema bajo estudio, garantizando el conocimiento de los valores nominales de elementos y de operación del sistema.

Para ilustrar la metodología se considera el sistema de la Figura 4.1 sin generación distribuida, cuyo voltaje nominal es 13,20 kV. El sistema tiene demandas en los nodos A, B y C con valores de 4,70 MVA cada una.

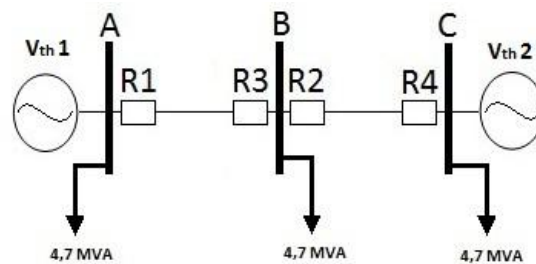


Figura 4.1. Ejemplo de aplicación sin GD

- **Paso 2.** Definir los parámetros de ajuste como tiempos de respaldo y valores de K, así como las características de los relés involucrados.

Los valores definidos son un K igual a 1,5 y un Δt igual a 0,3 segundos. Los valores máximos y mínimos de los diales son 3 y 0,1, respectivamente, en pasos de 0,05.

- **Paso 3.** Calcular la I_{cc} para los barrajes del sistema y además obtener la I_n y RTC para cada relé.

Tabla 4.1. Valores calculados de corrientes y RTC

Relé	Icc trifásicas [A]	In	RTC
R ₁	9045,78	621,74	700/5
R ₂	9035,06	311,22	400/5
R ₃	9043,52	527,57	600/5
R ₄	9035,06	311,24	400/5

- **Paso 4.** Plantear una función objetivo a minimizar en función de los tiempos propios y de respaldo de cada relé:

$$\min FO = t_{1A} + t_{4B} + t_{2B} + t_{3C} + t_{3B} + t_{1B}$$

- **Paso 5.** Plantear el conjunto de restricciones del modelo matemático. Estas deben incluir las características técnicas y operativas involucradas.

Las ecuaciones para los diales son:

$$0,10 \leq \text{Dial}_{R1} \leq 3,00$$

$$0,10 \leq \text{Dial}_{R2} \leq 3,00$$

$$0,10 \leq \text{Dial}_{R3} \leq 3,00$$

$$0,10 \leq \text{Dial}_{R4} \leq 3,00$$

Las ecuaciones para los tiempos propios y de respaldo, y la relación con los Dial son:

$$t_{1B} \geq t_{2B} + 0,30$$

$$t_{3B} \geq t_{4B} + 0,30$$

$$t_{1A} = \frac{a}{\left(\frac{I_{CC_A}}{I_{aR1}}\right)^n - 1} * \text{Dial}_{R1}$$

$$t_{4B} = \frac{a}{\left(\frac{I_{CC_B}}{I_{aR4}}\right)^n - 1} * \text{Dial}_{R4}$$

$$t_{2B} = \frac{a}{\left(\frac{I_{CC_B}}{I_{aR2}}\right)^n - 1} * \text{Dial}_{R2}$$

$$t_{3C} = \frac{a}{\left(\frac{I_{CC}}{I_{AR3}}\right)^n - 1} * Dial_{R3}$$

$$t_{1B} = \frac{a}{\left(\frac{I_{CCB}}{I_{AR1}}\right)^n - 1} * Dial_{R1}$$

$$t_{3B} = \frac{a}{\left(\frac{I_{CCB}}{I_{AR3}}\right)^n - 1} * Dial_{R3}$$

Las ecuaciones para a y n son:

$$0,14 \leq a \leq 13,50$$

$$0,02 \leq n \leq 1,00$$

Los intervalos de la corriente de arranque de cada relé, como sigue:

$$1243,48 \leq I_{AR1} \leq 2806,90$$

$$622,44 \leq I_{AR2} \leq 2903,50$$

$$1055,14 \leq I_{AR3} \leq 2903,50$$

$$622,48 \leq I_{AR4} \leq 2823,30$$

- **Paso 6.** Solucionar el modelo matemático.

Para la estrategia global se tiene que:

$$\min FO = t_{1A} + t_{2B} + t_{3C} + t_{1B} + t_{3B} + t_{4B}$$

$$\text{s.a. } 0,10 \leq Dial_{R1} \leq 3,00$$

$$0,10 \leq Dial_{R2} \leq 3,00$$

$$0,10 \leq Dial_{R3} \leq 3,00$$

$$0,10 \leq Dial_{R4} \leq 3,00$$

$$t_{1B} \geq t_{2B} + 0,20$$

$$t_{3B} \geq t_{4B} + 0,20$$

$$t_{1A} = \frac{a}{\left(\frac{9045.788}{Ia_{R1}}\right)^n - 1} * Dial_{R1}$$

$$t_{2B} = \frac{a}{\left(\frac{9035.064}{Ia_{R2}}\right)^n - 1} * Dial_{R2}$$

$$t_{3C} = \frac{a}{\left(\frac{9043.52}{Ia_{R3}}\right)^n - 1} * Dial_{R3}$$

$$t_{1B} = \frac{a}{\left(\frac{9035.064}{Ia_{R1}}\right)^n - 1} * Dial_{R1}$$

$$t_{3B} = \frac{a}{\left(\frac{9035.064}{Ia_{R3}}\right)^n - 1} * Dial_{R3}$$

$$t_{4B} = \frac{a}{\left(\frac{9035.064}{Ia_{R4}}\right)^n - 1} * Dial_{R4}$$

$$0,14 \leq a \leq 13,5$$

$$0,02 \leq n \leq 1,00$$

$$1243,48 \leq Ia_{R1} \leq 2806,9$$

$$622,48 \leq Ia_{R4} \leq 2823,3$$

$$1055,14 \leq Ia_{R3} \leq 2903,5$$

$$622,44 \leq Ia_{R2} \leq 2903,5$$

Para la estrategia local se tiene que:

$$\min FO = t_{1A} + t_{2B} + t_{3C} + t_{3B} + t_{1B} + t_{4B}$$

$$\text{s.a. } 0,10 \leq Dial_{R1} \leq 3,00$$

$$0,10 \leq Dial_{R2} \leq 3,00$$

$$0,10 \leq Dial_{R3} \leq 3,00$$

$$0,10 \leq Dial_{R4} \leq 3,00$$

$$t_{1A} = \frac{a_{R1}}{\left(\frac{9045,788}{Ia_{R1}}\right)^{nR1} - 1} * Dial_{R1}$$

$$t_{2B} = \frac{a_{R2}}{\left(\frac{9035,064}{Ia_{R2}}\right)^{nR2} - 1} * Dial_{R2}$$

$$t_{3C} = \frac{a_{R3}}{\left(\frac{9043,52}{Ia_{R3}}\right)^{nR3} - 1} * Dial_{R3}$$

$$t_{1B} = \frac{a_{R1}}{\left(\frac{9035,064}{Ia_{R1}}\right)^{nR1} - 1} * Dial_{R1}$$

$$t_{3B} = \frac{a_{R3}}{\left(\frac{9035,064}{Ia_{R3}}\right)^{nR3} - 1} * Dial_{R3}$$

$$0,02 \leq n_{R1} \leq 1,00$$

$$0,02 \leq n_{R2} \leq 1,00$$

$$0,02 \leq n_{R3} \leq 1,00$$

$$0,02 \leq n_{R4} \leq 1,00$$

$$0,14 \leq a_{R1} \leq 13,00$$

$$0,14 \leq a_{R2} \leq 13,00$$

$$0,14 \leq a_{R3} \leq 13,00$$

$$0,14 \leq a_{R4} \leq 13,00$$

$$1243,48 \leq Ia_{R1} \leq 2806,90$$

$$622,48 \leq Ia_{R4} \leq 2823,30$$

$$1055,14 \leq Ia_{R3} \leq 2903,50$$

$$622,44 \leq Ia_{R2} \leq 2903,50$$

Los resultados obtenidos para cada estrategia se presentan a continuación.

Tabla 4.2. Resultados del ejemplo ilustrativo sin GD

Relé	Estrategia Global				Estrategia Local			
	Dial	Ia	a	n	Dial	Ia	a	n
R ₁	0,30	2072,47	3,55	1,00	0,30	2072,47	3,36	1,00
R ₂	0,10	414,96	3,55	1,00	0,10	414,96	0,14	1,00
R ₃	0,30	2074,28	3,55	1,00	0,10	2074,28	3,66	1,00
R ₄	0,10	415,21	3,55	1,00	0,10	415,21	0,14	1,00

4.1.2. Caso 2: con GD en el barraje B

- **Paso 1.** Determinar la topología del sistema bajo estudio, garantizando el conocimiento de los valores nominales de elementos y de operación del sistema.

Para ilustrar la metodología se considera el sistema de la Figura 4.2 con generación distribuida (en el nodo B con 5 MVA), cuyo voltaje nominal es 13,2 kV. El sistema tiene demandas en los nodos A, B y C con valores de 4.7 MVA cada una.

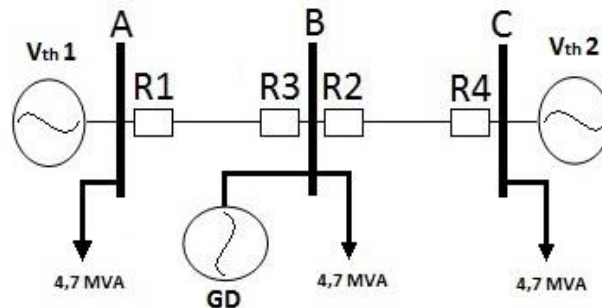


Figura 4.2. Ejemplo de aplicación con GD

- **Paso 2.** Definir los parámetros de ajuste como tiempos de respaldo y valores de K, así como las características de los relés involucrados.

Los valores definidos son un K igual a 1,5 y un Δt igual a 0,3 segundos. Los valores máximos y mínimos de los diales son 3 y 0,1, respectivamente, en pasos de 0,05.

- **Paso 3.** Calcular la I_{cc} para los barrajes del sistema y además obtener la I_n y RTC para cada relé.

Tabla 4.3. Valores calculados de corrientes y RTC

Relé	I_{cc} [A]	I_n [A]	RTC
R ₁	9834,23	527,29	600/5
R ₂	9892,11	311,17	400/5
R ₃	9814,49	527,57	600/5
R ₄	9892,11	311,24	400/5

- **Paso 4.** Plantear una función objetivo a minimizar en función de los tiempos propios y de respaldo de cada relé:

$$\min FO = t_{1A} + t_{4B} + t_{2B} + t_{3C} + t_{3B} + t_{1B}$$

- **Paso 5.** Plantear el conjunto de restricciones del modelo matemático. Estas deben incluir las características técnicas y operativas involucradas.

Las ecuaciones para los diales son:

$$0,10 \leq \text{Dial}_{R1} \leq 3,00$$

$$0,10 \leq \text{Dial}_{R2} \leq 3,00$$

$$0,10 \leq \text{Dial}_{R3} \leq 3,00$$

$$0,10 \leq \text{Dial}_{R4} \leq 3,00$$

Las ecuaciones para los tiempos propios y de respaldo, y la relación con los Dial son:

$$t_{1B} \geq t_{2B} + 0,30$$

$$t_{3B} \geq t_{4B} + 0,30$$

$$t_{1A} = \frac{a}{(M_{1A}^n - 1)} * \text{Dial}_{R1}$$

$$t_{4B} = \frac{a}{(M_{4B}^n - 1)} * \text{Dial}_{R4}$$

$$t_{2B} = \frac{a}{(M_{2B}^n - 1)} * \text{Dial}_{R2}$$

$$t_{3C} = \frac{a}{(M_{3C}^n - 1)} * \text{Dial}_{R3}$$

$$t_{1B} = \frac{a}{(M_{1B}^n - 1)} * \text{Dial}_{R1}$$

$$t_{3B} = \frac{a}{(M_{3B}^n - 1)} * \text{Dial}_{R3}$$

Las ecuaciones para a y n son:

$$0,14 \leq a \leq 13,50$$

$$0,02 \leq n \leq 1,00$$

Los intervalos de la corriente de arranque de cada relé, como sigue:

$$1054,58 \leq I_{aR1} \leq 8501,31$$

$$622,34 \leq I_{aR2} \leq 7716,46$$

$$1055,14 \leq I_{aR3} \leq 7716,46$$

$$622,48 \leq I_{aR4} \leq 7187,87$$

- **Paso 6.** Solucionar el modelo matemático.

Para la estrategia global se tiene que:

$$\min FO = t_{1A} + t_{2B} + t_{3C} + t_{1B} + t_{3B} + t_{4B}$$

$$\text{s.a. } 0,10 \leq \text{Dial}_{R1} \leq 3,00$$

$$0,10 \leq \text{Dial}_{R2} \leq 3,00$$

$$0,10 \leq \text{Dial}_{R3} \leq 3,00$$

$$0,10 \leq \text{Dial}_{R4} \leq 3,00$$

$$t_{1B} \geq t_{2B} + 0,30$$

$$t_{3B} \geq t_{4B} + 0,30$$

$$t_{1A} = \frac{a}{\left(\frac{9834,23}{I_{aR1}}\right)^n - 1} * \text{Dial}_{R1}$$

$$t_{2B} = \frac{a}{\left(\frac{9892,11}{I_{aR2}}\right)^n - 1} * \text{Dial}_{R2}$$

$$t_{3C} = \frac{a}{\left(\frac{9814,49}{I_{aR3}}\right)^n - 1} * \text{Dial}_{R3}$$

$$t_{1B} = \frac{a}{\left(\frac{9892,11}{I_{aR1}}\right)^n - 1} * \text{Dial}_{R1}$$

$$t_{3B} = \frac{a}{\left(\frac{9892,11}{I_{aR3}}\right)^n - 1} * \text{Dial}_{R3}$$

$$t_{4B} = \frac{a}{\left(\frac{I_{CCB}}{I_{aR4}}\right)^n - 1} * Dial_{R4}$$

$$0,14 \leq a \leq 13,50$$

$$0,02 \leq n \leq 1,00$$

$$1054,58 \leq I_{aR1} \leq 8501,31$$

$$622,34 \leq I_{aR2} \leq 7716,46$$

$$1055,14 \leq I_{aR3} \leq 7716,46$$

$$622,48 \leq I_{aR4} \leq 7187,87$$

Para la estrategia local se tiene que:

$$\min FO = t_{1A} + t_{2B} + t_{3C} + t_{1B} + t_{3B} + t_{4B}$$

$$\text{s.a. } 0,10 \leq Dial_{R1} \leq 3,00$$

$$0,10 \leq Dial_{R2} \leq 3,00$$

$$0,10 \leq Dial_{R3} \leq 3,00$$

$$0,10 \leq Dial_{R4} \leq 3,00$$

$$t_{1A} = \frac{a_{R1}}{\left(\frac{9834,23}{I_{aR1}}\right)^{n_{R1}} - 1} * Dial_{R1}$$

$$t_{2B} = \frac{a_2}{\left(\frac{9892,11}{I_{aR2}}\right)^{n_2} - 1} * Dial_{R2}$$

$$t_{3C} = \frac{a_{R3}}{\left(\frac{9814,49}{I_{aR3}}\right)^{n_{R3}} - 1} * Dial_{R3}$$

$$t_{1B} = \frac{a_{R1}}{\left(\frac{9892,11}{I_{aR1}}\right)^{n_{R1}} - 1} * Dial_{R1}$$

$$t_{3B} = \frac{a_{R3}}{\left(\frac{9892,11}{I_{aR3}}\right)^{n_{R3}} - 1} * Dial_{R3}$$

$$t_{4B} = \frac{a_{R4}}{\left(\frac{9892,11}{I_{aR4}}\right)^{n_{R4}} - 1} * Dial_{R4}$$

$$0,02 \leq n_{R1} \leq 1,00$$

$$0,02 \leq n_{R2} \leq 1,00$$

$$0,02 \leq n_{R3} \leq 1,00$$

$$0,02 \leq n_{R4} \leq 1,00$$

$$0,14 \leq a_{R1} \leq 13,00$$

$$0,14 \leq a_{R2} \leq 13,00$$

$$0,14 \leq a_{R3} \leq 13,00$$

$$0,14 \leq a_{R4} \leq 13,00$$

$$1054,58 \leq Ia_{R1} \leq 8501,31$$

$$622,34 \leq Ia_{R2} \leq 7716,46$$

$$1055,14 \leq Ia_{R3} \leq 7716,46$$

$$622,48 \leq Ia_{R4} \leq 7187,87$$

Los resultados obtenidos para cada estrategia se presentan a continuación.

Tabla 4.4. Resultados del ejemplo ilustrativo con GD

Relé	Estrategia Global				Estrategia Local			
	Dial	Ia	a	n	Dial	Ia	a	n
R ₁	0,30	2806,94	2,62	1,00	0,30	703,06	0,14	0,02
R ₂	0,10	414,90	2,62	1,00	0,10	414,90	0,14	1,00
R ₃	0,30	2806,96	2,62	1,00	0,30	703,43	0,14	0,02
R ₄	0,10	414,99	2,62	1,00	0,10	414,99	0,14	1,00

4.1.3. Comentarios de los resultados obtenidos

En las Tabla 4.5 y 4.6 se encuentran los resultados consolidados de las dos estrategias, donde se muestran los tiempos de los relés y de las funciones objetivo, respectivamente.

Tabla 4.5. Tiempos operativos de los relés

Relé	Estrategia Local				Estrategia Global			
	Caso 1	Caso 2	Caso 1	Caso 2	Caso 1	Caso 2	Caso 1	Caso 2
	t_{propio} [s]	t_{propio} [s]	$t_{respaldo}$ [s]	$t_{respaldo}$ [s]	t_{propio} [s]	t_{propio} [s]	$t_{respaldo}$ [s]	$t_{respaldo}$ [s]
R ₁	0,30	0,30	0,30	0,30	0,31	0,31	0,31	0,31
R ₂	6,70E-4	6,10E-4	---	---	0,01	0,01	---	---
R ₃	0,30	0,30	0,30	0,30	0,31	0,31	0,31	0,31
R ₄	6,70E-4	6,10E-4	---	---	0,01	0,01	---	---

Tabla 4.6. Tiempos de las funciones objetivo [s]

Relé	Estrategia Local	Estrategia Global
Caso 1	1,20	1,30
Caso 2	1,20	1,27

De las Tablas 4.5 y 4.6 se observa que los tiempos de los relés y los tiempos totales (funciones objetivo) son similares, independiente de la presencia o no de generación distribuida en el sistema. Adicionalmente se aprecia como los valores obtenidos con la estrategia local presenta menores tiempos totales de operación, debido a la flexibilidad que este presenta, pues tiene un mayor grado de libertad al permitir un rango de operación diferente para a y n en cada relé.

Otro aspecto importante es que la estrategia local encuentra menores valores para la corriente de arranque. Por ejemplo el relé R₁ opera con un valor de 703,06 amperios a diferencia de la estrategia global en donde opera a partir de 2806,94 amperios. Al igual que lo mencionado previamente, esto se debe a la flexibilidad que tienen las variables dentro del modelo matemático, lo cual permite tener menores tiempos de operación y menores corrientes de arranque.

Es importante resaltar que el objetivo básico de este ejemplo es presentar la aplicación de la metodología; de acuerdo a esto se emplearon valores límites para los diales (0,1 y 3,0) y corrientes de arranque ($2 \cdot I_{nom}$ y $I_{cc_{monofásica}}$) iguales a los presentados en la referencia [17]. Sin embargo no es adecuado tener límites operativos para la en función de las corrientes de cortocircuito, pues en sistemas de potencia que presenten valores altos para estas corrientes, podría ocurrir que ante un inadecuado incremento de la corriente de carga (en operación normal), los relés no operen debido a que no se alcanza el umbral requerido para su accionamiento ya que está en función de una corriente de cortocircuito monofásica.

De acuerdo a esto, en el siguiente sistema de prueba se harán algunas modificaciones para los límites operativos, garantizando que se encuentren en función de las corrientes nominales.

4.2. Sistema de prueba 2

En este sistema se aplican las cuatro metodologías descritas (manual, PL, global y local) en los capítulos dos y tres. El sistema tiene 6 nodos y el análisis se efectúa con y sin la presencia de generación distribuida, con el fin de realizar un análisis comparativo. Para una información más completa de este sistema se puede consultar el anexo [19].

Cabe resaltar que para análisis comparativos, en la metodología manual el valor de la función objetivo corresponde a la suma de los tiempos de operación de los relés (propios y de respaldo). Se emplearon los mismos valores y parámetros considerados en el numeral 4.1; las únicas excepciones son unos límites para los diales entre 0,1 y 1 y para la corriente de arranque entre 1,1 y 2.

4.2.1. Caso 1: sin GD

En la Figura 4.3 se presenta el sistema de distribución empleado.

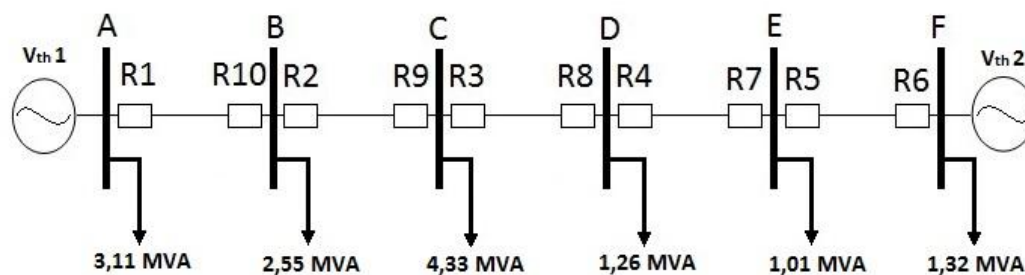


Figura 4.3. Sistema de prueba 2 – Sin GD

Los resultados obtenidos para cada una de las metodologías se presentan en las Tablas 4.7 y 4.8.

Tabla 4.7. Función objetivo del Sistema 2 - Caso 1

Función objetivo	Metodología			
	Manual	Usando PL	Estrategia global	Estrategia local
FO [seg]	26,14	20,44	12,38	11,55

Tabla 4.8. Valores encontrados para el Sistema 2 - Caso 1

Relé	Metodología manual		Metodología usando PL		Estrategia Global				Estrategia Local			
	Dial	Ia	Dial	Ia	Dial	Ia	a	n	Dial	Ia	a	n
R ₁	0,80	680,50	0,55	680,50	0,75	952,70	13,50	0,94	1,00	952,70	11,05	1,00
R ₂	0,70	513,21	0,45	513,21	0,70	718,50	13,50	0,94	1,00	718,50	10,81	1,00
R ₃	0,70	229,78	0,45	229,78	1,00	321,70	13,50	0,94	1,00	321,70	13,50	0,94
R ₄	0,60	149,18	0,30	149,18	0,80	208,85	13,50	0,94	1,00	208,85	12,07	1,00
R ₅	0,25	86,98	0,10	86,98	0,10	63,78	13,50	0,94	0,10	63,78	0,14	1,00
R ₆	1,00	206,21	0,75	206,21	1,00	689,95	13,50	0,94	0,34	587,54	0,19	0,02
R ₇	1,00	374,95	0,65	374,95	1,00	545,83	13,50	0,94	0,21	545,83	0,25	0,02
R ₈	0,50	661,44	0,55	661,40	0,80	485,09	13,50	0,94	0,17	485,09	0,22	0,02
R ₉	0,30	744,31	0,55	744,35	0,75	274,96	13,50	0,94	0,12	274,96	0,18	0,02
R ₁₀	0,15	801,26	0,10	801,26	0,10	151,22	13,50	0,94	0,10	151,22	0,14	1,00

4.2.2. Caso 2: con GD en C

En la Figura 4.4 se presenta el sistema de distribución empleado.

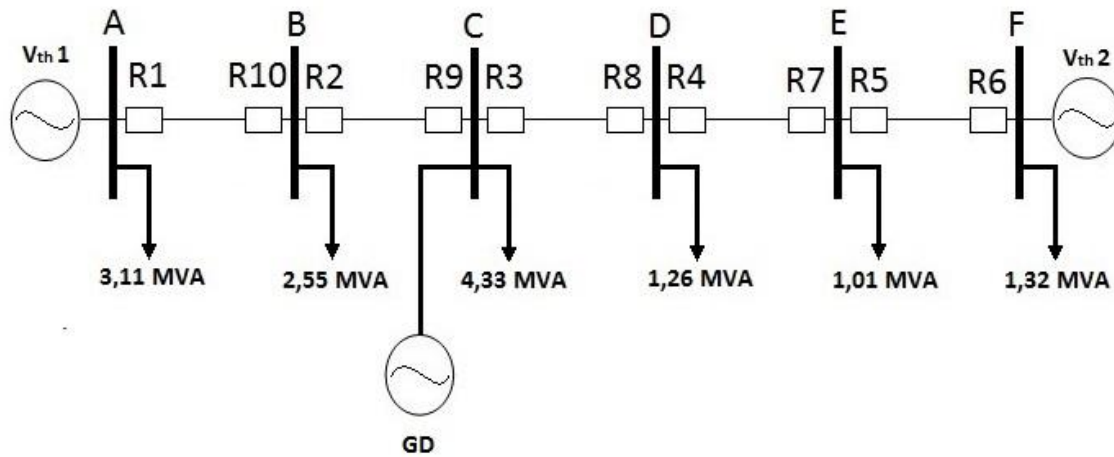


Figura 4.4. Sistema de prueba 2 - Con GD en C

Los resultados obtenidos para cada una de las metodologías se presentan en las Tablas 4.9 y 4.10.

Tabla 4.9. Función objetivo del Sistema 2 - Caso 2

Función objetivo	Metodología			
	Manual	Usando PL	Estrategia global	Estrategia local
FO [seg]	25,27	23,38	13,08	11,62

Tabla 4.10. Valores encontrados para el Sistema 2 - Caso 2

Relé	Metodología manual		Metodología usando PL		Estrategia Global				Estrategia Local			
	Dial	Ia	Dial	Ia	Dial	Ia	a	n	Dial	Ia	a	n
R ₁	0,75	317,25	0,70	317,25	0,75	423,00	13,50	0,69	1,00	423,00	13,50	0,78
R ₂	0,65	149,89	0,65	149,89	0,97	199,86	13,50	0,69	1,00	199,86	13,50	0,70
R ₃	0,60	82,47	0,55	82,47	1,00	109,97	13,50	0,69	1,00	109,97	13,50	0,70
R ₄	0,45	148,39	0,30	148,39	0,33	197,85	13,50	0,69	1,00	197,85	13,50	0,99
R ₅	0,25	86,51	0,10	86,51	0,10	63,44	13,50	0,69	0,10	63,44	0,14	1,00
R ₆	1,00	275,84	1,00	275,84	1,00	300,06	13,50	0,69	0,45	202,28	0,21	0,02
R ₇	0,85	217,88	1,00	217,88	1,00	217,76	13,50	0,69	0,21	159,77	0,37	0,02
R ₈	0,65	135,37	1,00	135,37	1,00	136,24	13,50	0,69	0,19	99,27	0,31	0,02
R ₉	0,50	372,11	0,70	372,11	0,33	272,88	13,50	0,69	0,10	272,88	0,21	0,02
R ₁₀	0,20	204,65	0,10	204,65	0,10	150,08	13,50	0,69	0,10	150,08	0,14	1,00

4.2.3. Caso 3: con GD en D

En la Figura 4.5 se presenta el sistema de distribución empleado.

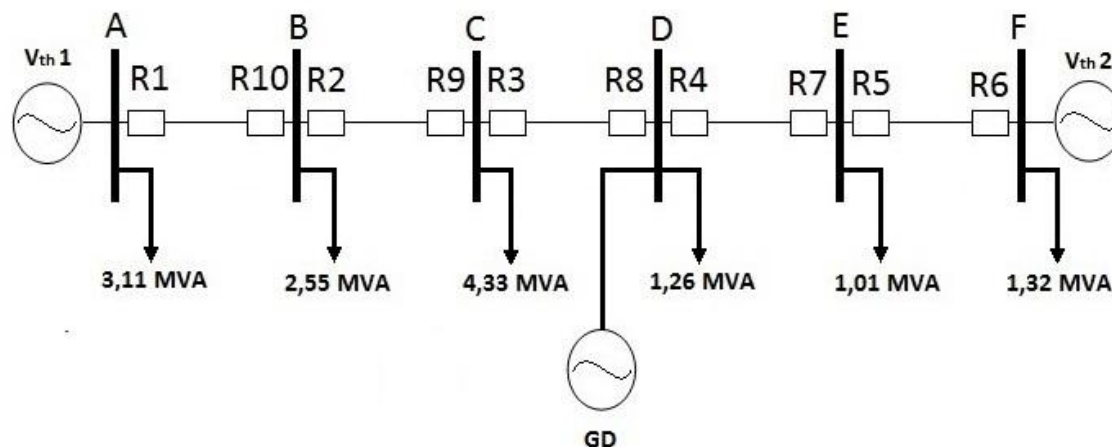


Figura 4.5. Sistema de prueba 2 - Con GD en D

Los resultados obtenidos para cada una de las metodologías se presentan en las Tablas 4.11 y 4.12.

Tabla 4.11. Función objetivo del Sistema 2 - Caso 3

Función objetivo	Metodología			
	Manual	Usando PL	Estrategia global	Estrategia local
FO [seg]	23,48	22,96	14,42	10,69

Tabla 4.12. Valores encontrados para el Sistema 2 - Caso 3

Relé	Metodología manual		Metodología usando PL		Estrategia Global				Estrategia Local			
	Dial	Ia	Dial	Ia	Dial	Ia	a	n	Dial	Ia	a	n
R ₁	0,75	680,50	0,75	452,81	0,80	603,75	0,14	0,02	1,00	603,75	13,50	0,80
R ₂	0,65	513,21	0,65	285,19	0,80	380,25	0,14	0,02	1,00	380,25	13,50	0,79
R ₃	0,60	229,78	0,40	658,08	0,40	877,44	0,14	0,02	1,00	877,44	7,99	1,00
R ₄	0,45	149,18	0,40	148,23	0,50	108,70	0,14	0,02	0,23	108,70	0,18	0,02
R ₅	0,25	86,98	0,10	86,42	0,10	63,38	0,14	0,02	0,10	63,38	0,14	1,00
R ₆	1,00	206,21	1,00	275,84	1,00	367,79	0,14	0,02	0,42	202,28	0,14	0,02
R ₇	1,00	374,95	1,00	217,88	0,75	290,50	0,14	0,02	1,00	290,50	13,5	0,77
R ₈	0,45	661,44	0,70	658,08	0,45	482,59	0,14	0,02	0,19	482,59	0,19	0,02
R ₉	0,30	744,31	0,70	373,04	0,35	273,56	0,14	0,02	0,16	273,56	0,14	0,02
R ₁₀	0,15	801,26	0,10	205,16	0,10	150,45	0,14	0,02	0,10	150,45	0,14	1,00

4.2.4. Comentarios de los resultados del sistema 2

Para facilitar el análisis de los resultados, en la Tabla 4.13 se presenta el consolidado de las funciones objetivo obtenidas en cada caso.

Tabla 4.13. Consolidado de las funciones objetivo- Sistema 2

Función objetivo [seg]	Metodología			
	Manual	Usando PL	Estrategia global	Estrategia local
Caso 1	26,14	20,44	12,38	11,55
Caso 2	25,27	23,38	13,08	11,62
Caso 3	23,48	22,96	14,42	10,69

De la Tabla 4.13 se observa que los tiempos totales de operación (función objetivo) de todos los relés (suma de tiempos propios y de respaldo) varían muy poco cuando se analiza cada metodología por separado. Para las metodologías manual, PL, global y local se presentan diferencias (considerando los tres casos) en los tiempos de operación de 2,66 segundos (caso 1 y caso 3), 2,93 segundos (caso 2 y caso 1), 2,04 segundos (caso 3 y caso 2) y 0,93 (caso 2 y caso 3) segundos. Esto evidencia que la metodología que menos varía es la estrategia local, pues sus tiempos de operación permanecen casi constantes.

Adicionalmente se aprecia que en los tres casos los tiempos obtenidos con la estrategia local (valores de a y n independientes para cada relé) son menores que los

obtenidos con las otras tres estrategias. En todos los casos se observan que los mayores tiempos de operación (peores tiempos) se obtienen con la metodología manual. Al comparar esta metodología con la estrategia local (mejores respuestas encontradas) se aprecia que para los casos 1, 2 y 3 se obtiene una reducción en los tiempos de operación del 55,7%, 53,69% y 54,4%, respectivamente; esto refleja las ventajas de emplear esta estrategia por encima de las otras tres metodologías.

En las Tablas 4.14 y 4.15 se presentan los tiempos propios y de respaldo obtenidos para cada relé, en cada caso de estudio y considerando las cuatro metodologías.

Al realizar la comparación de los tiempos de operación de cada relé (principal y de respaldo) en las Tablas 4.14 y 4.15, se puede notar que el cambio de los tiempos para cada uno de ellos es pequeño en la metodología local y global cuando se adiciona GD al sistema, lo cual no ocurre con las otras metodologías. En todos los casos los mejores tiempos de operación se obtienen con la estrategia local.

Tabla 4.14. Consolidado de los tiempos obtenidos [seg] – Estrategias local y global

Relé	Caso 1				Caso 2				Caso 3			
	Local		Global		Local		Global		Local		Global	
	t _{propio}	t _{respaldo}	t _{propio}	t _{respaldo}	t _{propio}	t _{respaldo}	t _{propio}	t _{respaldo}	t _{propio}	t _{respaldo}	t _{propio}	t _{respaldo}
R ₁	0,96	---	1,98	---	1,02	---	1,06	---	0,97	---	1,37	---
R ₂	0,77	1,07	0,79	1,09	0,80	1,10	0,84	1,14	0,77	1,25	1,11	1,41
R ₃	0,53	0,83	0,55	0,85	0,54	0,84	0,59	0,89	0,52	1,00	0,84	1,14
R ₄	0,27	0,57	0,29	0,59	0,27	0,57	0,32	0,62	0,27	0,75	0,56	0,86
R ₅	1,4E-4	0,30	0,01	0,31	9,6E-5	0,30	0,04	0,34	0,00	0,30	0,06	0,36
R ₆	1,26	---	1,42	---	1,24	---	1,43	---	1,38	---	1,64	---
R ₇	0,94	1,24	1,07	1,37	0,93	1,23	1,09	1,39	1,04	0,46	0,62	0,92
R ₈	0,62	0,92	0,69	0,99	0,61	0,91	0,72	1,02	0,66	0,91	0,74	1,04
R ₉	0,30	0,60	0,34	0,64	0,30	0,60	0,38	0,68	0,32	0,60	0,42	0,72
R ₁₀	1,9E-4	0,30	0,02	0,32	1,83-4	0,30	0,07	0,37	0,008	0,30	0,11	0,41

Tabla 4.15. Consolidado de los tiempos obtenidos [seg] – Metodología manual y con PL

Relé	Caso 1				Caso 2				Caso 3			
	PL		Manual		PL		Manual		PL		Manual	
	t _{propio}	t _{respaldo}	t _{propio}	t _{respaldo}	t _{propio}	t _{respaldo}	t _{propio}	t _{respaldo}	t _{propio}	t _{respaldo}	t _{propio}	t _{respaldo}
R₁	1,25	---	1,90	---	1,27	---	1,74	---	1,42	---	1,74	---
R₂	0,99	1,29	1,56	1,97	1,00	1,30	1,41	1,80	1,16	1,46	1,41	1,80
R₃	0,72	1,02	1,25	1,60	0,72	1,02	1,04	1,44	0,89	1,19	1,04	1,44
R₄	0,43	0,73	0,97	1,27	0,43	0,73	0,71	1,07	0,61	0,91	0,71	1,07
R₅	0,14	0,44	0,36	0,99	0,14	0,44	0,35	0,73	0,09	0,39	0,35	0,73
R₆	2,10	---	2,82	---	2,41	---	2,97	---	2,66	---	2,68	---
R₇	1,77	2,07	2,48	2,80	2,09	2,39	2,30	2,93	1,27	1,57	2,22	2,65
R₈	1,42	1,72	1,28	1,64	1,74	2,04	1,62	1,19	1,73	2,03	1,12	1,47
R₉	1,08	1,38	0,78	1,25	1,41	1,71	1,00	1,58	1,39	1,69	0,76	1,09
R₁₀	0,76	1,06	0,39	0,76	1,08	1,38	0,33	0,98	1,06	1,36	0,38	0,74

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Con el fin de solucionar el problema de la coordinación óptima de relés de sobrecorriente en sistemas con GD, en este trabajo se presentan dos estrategias basadas en una formulación matemática del problema, las cuales son resueltas en el software de optimización comercial GAMS. Ambos modelos matemáticos son del tipo no lineal, donde la función objetivo a minimizar es la suma de los tiempos de operación propios y de respaldo de cada relé. Para verificar su eficiencia, ambas estrategias son comparadas con respecto a metodologías tradicionales, obteniendo resultados que respaldan lo propuesto en este trabajo.

Las metodologías tradicionales consideran valores fijos para a y n en las ecuaciones características de los relés de tiempo inverso. Las estrategias propuestas (local y global) tratadas en este trabajo permiten que a y n posean un rango de operación, es decir, no son consideradas como parámetros definidos. La diferencia entre las estrategias local y global radica en que la primera permite que cada relé tenga valores diferentes de a y n , y la segunda los mismos valores para todos los relés. El rango permitido para estos valores corresponde a las curvas de tiempo inverso estándar y curvas muy inversas (norma IEC). Estas dos estrategias (local y global), a diferencia de las dos metodologías tradicionales, permiten que el valor de la corriente de arranque sea una variable del problema, la cual se encuentra entre dos límites operativos. Dado que el objetivo es minimizar los tiempos de operación (propios y de respaldo), al considerar estas variaciones (a , n e I_a como variables) se permite una mayor flexibilidad en la coordinación de relés de sobrecorriente de tiempo inverso, con lo cual se obtienen mejores resultados que con las metodologías tradicionales.

Es importante resaltar que las variaciones mencionadas previamente proporcionan valores diferentes a los estandarizados por normatividades como ANSI/IEEE o IEC. Sin embargo con el desarrollo de nuevas tecnologías y la aparición de relés con características funcionales diferentes como el considerado en este trabajo [18], las curvas operativas pueden ser construidas por el usuario de acuerdo a los valores encontrados por la metodología.

Las dos estrategias consideradas están basadas en las empleadas en [17]. En este artículo los autores plantean los rangos de operación de la corriente de arranque en

función de la corriente de cortocircuito mínima (monofásica). Sin embargo este puede causar problemas en la operación de un relé, pues en sistemas con valores grandes de corrientes de falla el umbral operativo será alto. Bajo esta situación y cuando se presentan incrementos excesivos de la corriente de carga, el relé no operará debido a un valor alto en su ajuste. De acuerdo a esto, en este proyecto de grado se modificó este criterio, con el fin de sensibilizar la operación del relé ante situaciones de sobrecargas que sean anormales en el sistema, por lo que los límites operativos para la corriente de arranque fueron definidos en función de k veces la corriente nominal en el punto de ubicación del relé.

La metodología propuesta es general y flexible, pues puede ser aplicada a sistemas de diferentes tamaños con características operativas diferentes. Adicionalmente se aprecia que en forma general la incorporación de GD en el sistema no impacta considerablemente los tiempos de operación de los relés involucrados.

5.2. RECOMENDACIONES

Sería interesante aplicar la metodología a un sistema real, con el fin de comparar su comportamiento con respecto a los ajustes actuales.

Dado que la formulación del problema es de del tipo no lineal, se podría solucionar este modelo haciendo uso de técnicas heurísticas o metaheurísticas que puedan mejorar su eficiencia.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Zeineldin, H., El-Saadany, E. F., Salama, M. A. "Optimal coordination of directional overcurrent relay", PowerEngineeringSociety General Meeting, June 2005, Vol. 2.
- [2] Urdaneta, A. J., Nadira, R. , Perez L. G.."Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays in Interconnected power Systems", IEEETransactions on Power Delivery, vol. 3, pp. 903-911, July 1988.
- [3] Zapata, C. J., Mejía, G.E. "Coordinación de relés de sobrecorriente en sistemas radiales utilizando programación lineal",Revista Scientia et Technica, No. 22, Octubre de 2003.
- [4] Zapata, C.J., Mejía, G. E. "Coordinación de relés de sobrecorriente en sistemas enmallados utilizando programación lineal",RevistaScientia et Technica No. 23, Diciembre de 2003.
- [5] Estrada, N. J., Gómez, O., Garcés, A. "Coordinación de relés de sobrecorriente usando el método de optimización de puntos interiores",Revista Scientia et Technica, No. 32, Diciembre de 2006.
- [6] Vijayakumar, D., Nema, R. K. "Superiority of PSO relay coordination algorithm over non-linear programming: A comparison, review and verification", Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008. POWERCON 2008.
- [7] Tuta, O.F., "Coordinación Óptima de Dispositivos de Protección en Sistemas de Distribución con Presencia de Generación Distribuida", Tesis de Pregrado, Facultad de Ingenierías, Programa de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, 2011.
- [8] Amraee, T., "Coordination of Directional Overcurrent Relays Using Seeker Algorithm", IEEE Transaction on PowerDelivery, vol. 27, No. 3, July 2012.
- [9] Reza, A. H., "New Method on the Relays Protective Coordination Due To Presence Of Distributed Generation", Power Engineering and Automation Conference, 2012.
- [10] Javadi, H., Ali, S.M., Khederzadeh, M., "A novel approach to increase FCL application in preservation of over-current relays coordination in presence of asynchronous DGs", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 44, 2013.

- [11] www.gams.com
- [12] Zapata, C.J., "Protección de Sistemas de Transmisión y Distribución de Electricidad", Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, 2010.
- [13] Norma ANSI/IEEE C37.2.
- [14] Blackburn, J. L., "Protective Relaying: Principles and Applications", Third Edition, CRC Press, 2006.
- [15] Gers, J. M. "Aplicación de Protecciones eléctricas a sistemas de potencia", Centro editorial Universidad del Valle. Colombia. 1993.
- [16] Ramírez, S, "Redes de Distribución de Energía", Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia, Tercera Edición.
- [17] Sharaf, H. M., Zeineldin, H. H., Ibrahim, D. K.; El-Zahab, E. E., "Directional Inverse Time Overcurrent Relay for Meshed Distribution Systems with Distributed Generation with Additional Continuous Relay Settings", Developments in Power System Protection, 12th IET International Conference, 2014.
- [18] <http://www05.abb.com/global/scot>
- [19] Horowitz, S., Arung, P., "Power System Relaying", Third Edition, Jhon Willey and Sons, 2008.

ANEXOS

A 1. Datos de las líneas del sistema de prueba 1

LINEA	R(1)=R(2)[pu]	X(1)=X(2) [pu]	R(0) [pu]	X(0) [pu]	R(1)=R(2)[Ω/km]	X(1)[Ω/km]	R (0)[Ω/km]	X (0) [Ω/km]
1	0.01	0.05	0.02	0.13	0.017424	0.08712	0.034848	0.226512
2	0.003	0.04	0.01	0.16	0.0052272	0.069696	0.017424	0.278784

A 2. Bases del sistema de prueba 1

Sbase	100 [MVA]
Vbase	13,2 [kV]

A 3. Demanda del sistema de prueba 1

NODO	P [MW]	Q [MVar]	S [MVA]
A	2.5	4	4.717
B	2.5	4	4.717
C	2.5	4	4.717

A 4. Corrientes de arranque y de falla para el sistema de prueba 1

I arranque [A]	527.2965	311.25	311.177	527.5755
I falla monofasica [A]	2806.944	2903.5	2903.5	2823.303
I falla trifasica [A]	9834.234	9892.1	9892.12	9814.495

A 5. Datos de las líneas del sistema de prueba 2

LINEA	R(1)=R(2) [pu]	X(1)=X(2) [pu]	R(0) [pu]	X(0) [pu]	R(1)=R(2) [Ω/km]	X(1) [Ω/km]	R(0) [Ω/km]	X (0) [Ω/km]
1	0,01	0,05	0,02	0,13	0,017424	0,08712	0,034848	0,226512
2	0,003	0,04	0,01	0,16	0,0052272	0,069696	0,017424	0,278784
3	0,008	0,04	0,04	0,15	0,0139392	0,069696	0,069696	0,26136
4	0,01	0,05	0,03	0,15	0,017424	0,08712	0,052272	0,26136
5	0,003	0,02	0,01	0,06	0,0052272	0,034848	0,017424	0,104544

A 6. Bases del sistema de prueba 2

Sbase	100 [MVA]
Vbase	13,20 [Kv]

A 7. Demanda del sistema de prueba 2

Nodo	P [MW]	Q [Mvar]	S [MVA]
A	2,80	1,36	3,11
B	2,30	1,10	2,55
C	3,90	1,89	4,33
D	1,13	0,55	1,25
E	0,45	1,00	1,09
F	1,20	0,54	1,31

A 8. Corrientes de arranque y de falla para el sistema de prueba 2 sin GD

Iarranque [A]	680,50	206,21	513,21	374,90	229,70	661,40	149,10	744,30	86,90	801,20
1Φ I cc [A]	2657,40	2673,30	2673,30	2717,80	2717,80	2761,70	2761,70	2797,80	2797,80	2813,80
3Φ I cc [A]	11897,50	10742,70	10742,70	9984,60	9984,60	9319,40	9319,40	8611,90	8611,70	8361,60

A 9. Corrientes de arranque y de falla para el sistema de prueba 2 con GD en el nodo C

Iarranque [A]	317,20	204,60	149,80	372,10	82,40	135,30	148,30	217,80	86,50	275,80
1Φ I cc [A]	2684,10	2706,30	2706,30	2757,20	2757,20	2801,80	2801,80	2838,20	2838,20	2853,60
3Φ I cc [A]	12710,00	11580,40	11580,40	10841,60	10841,60	10051,90	10051,90	9223,50	9223,50	8933,30

A 10. Corrientes de arranque y de falla para el sistema de prueba 2 con GD en el nodo D

Iarranque [A]	452,80	205,10	285,19	373,00	658,00	658,00	148,20	217,80	86,40	275,80
1Φ I cc [A]	2683,80	2705,90	2705,90	2756,60	2756,60	2807,80	2807,80	2844,20	2844,20	2859,70
3Φ I cc [A]	12693,03	11562,00	11562,00	10822,70	10822,70	10176,40	10176,40	90326,50	90326,50	9029,20