

**Metodología de coordinación de protecciones en redes de distribución de media tensión,
considerando generación fotovoltaica y eólica: estado del arte**

Hency Hernán Roballo Umaña

Juan Carlos Rueda López

**Monografía para optar al título de: Especialista en Sistemas de Distribución de Energía
Eléctrica**

Director:

Edison Andrés Soto Ríos

Dr. en Ingeniería – Línea Automática

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Especialización en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica

Bucaramanga

2020

Dedicatoria

Agradecer inicialmente a Dios, por su guía y fortaleza para alcanzar las metas propuestas.

*A la memoria de mi Madre Carmen a su esfuerzo permanente y a su amor inquebrantable para
con sus hijos Juan y Julián.*

*A mi familia, que poco a poco me acompañaron y apoyaron a recorrer el camino de mis estudios
profesionales a pesar de las adversidades y dificultades siempre estuvieron para darme una voz
de aliento.*

Agradecimientos

A mis jefes de área por permitirme desarrollar y ampliar mis conocimientos y capacidades, a mis compañeros de trabajo por su conocimiento y apoyo constante, a los compañeros de clase por su amistad y los conocimientos compartidos.

Juan Carlos Rueda López

A mi padre Dios y mi madre María por su infinito amor, por brindarme sabiduría y fortaleza en todos los instantes de mi vida y estar siempre presente en ella.

A la memoria de mi padre Marco Tulio a su gran ejemplo y esfuerzo permanente en mi vida, por su perseverancia y amor en la familia.

A mi hermosa madre Elsa Isabel por su apoyo incondicional y su gran amor por la familia.

A mis hermanos, primos, tíos, y demás familiares por su leal apoyo.

A mis amigos y compañeros de estudio por compartir sus experiencias profesionales y su gran aporte que permitieron la realización de este trabajo.

Hency Hernán Roballo Umaña.

Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Generalidades.....	16
1.1 Antecedentes y marco conceptual.....	16
1.1.1 Situación de la generación fotovoltaica y eólica en Colombia	16
1.1.1.1 Generación fotovoltaica.....	16
1.1.1.2 Generación eólica.....	17
1.1.2 Redes de distribución.....	18
1.1.2.1 Tipos de redes eléctricas de distribución.	18
1.1.3 Principales componentes de los sistemas de distribución.....	21
1.2 Planteamiento del problema.....	21
1.3 Justificación	22
1.4 Objetivos	23
1.4.1 Objetivo General.....	23
1.4.2 Objetivos Específicos.....	24
2. Dispositivos de protección en redes de distribución de Media Tensión (MT)	24
2.1 Reconectores	24
2.1.1 Usos del reconector o recloser.	25
2.1.2 Parámetros de funcionamiento.....	26

2.2 Fusibles	26
2.2.1 Factores a tener en cuenta. (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Industry Applications Society, 1986).....	27
2.2.2 Clasificación de los fusibles.....	27
2.3 Relés.....	29
2.3.1 Tipos de Relés.....	29
2.3.2 Relés de Sobrecorriente.	30
3. Protecciones eléctricas en redes de media tensión con generación distribuida	31
3.1 Coordinación de protecciones modelos tradicionales.....	32
3.1.1 Coordinación Fusible – Fusible.	32
3.1.2 Coordinación Recloser – Fusible.	34
3.1.3 Coordinación Relé – Relé.	35
3.1.4 Coordinación Relé – Recloser.	36
3.2 Coordinación de protecciones modelos adaptativos.....	38
3.2.1 Resumen de Impactos de generación distribuida eólica y solar sobre las protecciones eléctricas.	38
3.2.2 Estrategias de protección para los sistemas de distribución convencional conectando generación distribuida (GD).	42
3.2.3 Estrategias de protección modificando los sistemas de distribución convencional conectando generación distribuida (GD).	45
3.2.4 Relés direccionales de sobrecorriente.....	50
4. Conclusiones	54
Referencias Bibliográficas	56

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Red Radial	19
<i>Figura 2:</i> Red en anillo o bucle	20
<i>Figura 3:</i> Red Mallada.....	20
<i>Figura 4:</i> Principales componentes del sistema de distribución	21
<i>Figura 5:</i> Clasificación de fusibles	28
<i>Figura 6:</i> Coordinación tradicional fusible - fusible	33
<i>Figura 7:</i> Curvas de operación reconectador – fusible.....	34
<i>Figura 8:</i> Curva de operación relé - relé.....	36
<i>Figura 9:</i> Curva de operación Relé - Recloser	37
<i>Figura 10:</i> Estrategias de mitigación para mitigar el impacto de la GD en las redes de distribución	43
<i>Figura 11:</i> Ejemplo de red de esquema de protección con generación distribuida GD.	50
<i>Figura 12:</i> Ejemplo de falso efecto de disparo en NDOCR de CB3 debido a una falla en el alimentador 2	51
<i>Figura 13:</i> Ejemplo de ventaja de DOCR en CB3 para evitar que dispare debido a una falla del alimentador 2.	52

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Clasificación de algunos impactos causados por la generación distribuida sobre las protecciones eléctricas</i>	39
Tabla 2: <i>Estrategias de protección en las redes de distribución conectando GD</i>	44
Tabla 3: <i>Comparación de estrategias de sistemas de distribución conectando generadores distribuidos</i>	46

Resumen

Título: Metodología de coordinación de protecciones en redes de distribución de media tensión, considerando generación fotovoltaica y eólica: estado del arte*

Autores: Hency Hernán Roballo Umaña, Juan Carlos Rueda López**

Palabras Clave. Metodología, Coordinación, Protección, Distribución, media tensión, fotovoltaica

Descripción:

La presente investigación se revisa los temas relacionados con el impacto sobre las protecciones en las redes de media tensión al incorporar las fuentes de generación fotovoltaica y eólica. Revisando desde los conceptos fundamentales de redes de distribución y la situación de la generación fotovoltaica y eólica en Colombia.

Identificar los dispositivos de protección en redes de distribución y evidenciar las características más relevantes, se usó como base teórica para entender las técnicas actuales de protección en las redes de distribución clásicas y de esta manera interpretar el uso de estos en las redes de generación distribuida.

Dentro de las conclusiones de este trabajo se resalta que los sistemas de protección tradicionales en las redes de distribución deberán adaptarse o cambiar con el ingreso de la generación distribuida renovable (sistemas *On Grid*) dentro los sistemas de distribución, de tal manera que se pueda garantizar la selectividad, fiabilidad, seguridad, velocidad y sensibilidad, ante eventos de fallas en las redes de distribución.

* Monografía de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.
Director: Dr. Edison Andrés Soto Ríos.

Abstract

Title: Protection coordination methodology in half voltage distribution networks, considering photovoltaic and wind generation: state of art*

Authors: Hency Hernán Roballo Umaña,
Juan Carlos Rueda López**

Keywords. Methodology, Coordination, Protection, Distribution, medium voltage, photovoltaic

Description:

This research reviews the issues related to the impact on protections in medium voltage networks by incorporating photovoltaic and wind sources. Reviewing from the fundamental concepts of distribution networks and the situation of photovoltaic and wind generation in Colombia.

To identify the protection devices in distribution networks and to demonstrate the most relevant characteristics, it was used as a theoretical basis to understand the current protection techniques in the classic distribution networks and in this way interpret the use of these in distributed generation networks.

Inside the conclusions of this work it is highlighted that traditional protection systems in distribution networks must adapt or change with the income of the renewable distributed generation (On Grid systems) within the distribution systems, so that it can be guaranteed the selectivity, reliability, security, speed and sensitivity, in the event of failures in the distribution networks.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.
Director: Dr. Edison Andrés Soto Ríos.

Introducción

En Colombia y el mundo, la electricidad es la principal fuente de energía; con este recurso energético se mueven las grandes industrias, alumbrados, hogares, entre otros. Aprovechando la energía eléctrica la humanidad ha dado saltos significativos y la sociedad mundial ha dirigido sus esfuerzos hacia el desarrollo de nuevas tecnologías para generar energía eléctrica, entre ellas podemos destacar la generación eólica y fotovoltaica como las más utilizadas en las redes de distribución de media tensión (Bordons, García-Torres, & Valverde, 2015).

La coordinación de protecciones en el sistema de media tensión se ha implementado de manera clásica teniendo en cuenta el flujo de la corriente en un solo sentido, siendo los esquemas tradicionales predominantes en redes de distribución radiales. La integración de la generación distribuida al sistema de distribución de media tensión ha cambiado el concepto tradicional de coordinaciones eléctricas, esto es debido a que la red deja de comportarse de manera radial ya que aparecen flujos de corriente bidireccionales, impactando las protecciones eléctricas. . (Sherbilla, Kawady, Elkalashy, & Taalab, 2011)

Las redes inteligentes contribuyen a la integración de energías renovables (Fotovoltaica y eólica) así como la incorporación de tecnologías que mejoren el servicio en la red de distribución, de esta manera se logra que exista información de la red de distribución en presencia de flujos bidireccionales, datos que interesan a todos los actores de la red (Comercializadores, Usuarios, generadores, entre otros), con el fin de disminuir costos en la generación, transmisión, mejora de

la eficiencia y confiabilidad de los sistemas de distribución a través de nuevos esquemas de protección eléctricos que se están implementando en la actualidad (Real-Calvo, y otros, 2017)

Analizando las problemáticas anteriores surge la necesidad del desarrollo de nuevos sistemas y esquemas de protección eléctrica en los sistemas de distribución en media tensión, este trabajo busca realizar una revisión bibliográfica sobre metodologías de coordinación de protecciones que permitan dar solución a los impactos generados por la generación distribuida en media tensión y de esta manera analizar los ajustes que se están implementando en los sistemas de protección.

1. Generalidades

1.1 Antecedentes y marco conceptual.

Los sistemas de distribución tradicionales han sido diseñados de manera radial lo cual representa que los flujos de corriente circulan de manera unidireccional, por tanto, las protecciones han sido implementadas y dimensionadas de tal forma que operen en presencia de una falla cercana a la carga o equipo a proteger.

La conexión de la generación distribuida como lo son la energía fotovoltaica y los generadores eólicos, han modificado el concepto de red de distribución y ha evolucionado a redes inteligentes (Smart Grid), esto cambia la filosofía de la red ya que los flujos de corriente en el sistema son bidireccionales, y sus aportes de corriente al sistema modifica la metodología para coordinación de protecciones que actué de manera eficaz en el sistema.

1.1.1 Situación de la generación fotovoltaica y eólica en Colombia

1.1.1.1 Generación fotovoltaica. La energía solar consiste en el aprovechamiento de la radiación procedente del sol la cual es transformada en energía eléctrica empleando tecnologías basadas en efecto fotovoltaico. Al incidir la radiación del sol sobre los materiales semiconductores de las células fotoeléctricas se genera una diferencia de potencial entre ambas caras que hacen que

los electrones salten de un lugar a otro, produciendo corriente eléctrica. (Bayod Rújula, 2009) (Hatziaargyriou, N. et al., 2000) (Sarabia, s.f.)

1.1.1.1.1 Sistemas fotovoltaicos sin conexión a la red eléctrica. Estas instalaciones generalmente no están conectadas a la red eléctrica de distribución y donde la energía generada se utiliza para cubrir pequeños consumos de energía eléctrica en el mismo lugar donde se produce la demanda. Esta puede ser almacenada en baterías hasta que se produce el consumo de la misma. (Bayod Rújula, 2009) (Hatziaargyriou, N. et al., 2000) (Sarabia, s.f.)

1.1.1.1.2 Sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica. Un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica de distribución debe priorizar el consumo de la instalación, en caso de ser insuficiente la red eléctrica de distribución proporciona la energía necesaria. Mientras que producir energía excedente con el sistema fotovoltaico, la energía sobrante se inyecta en la red eléctrica para distribuirse al consumo más cercano. (Bayod Rújula, 2009) (Hatziaargyriou, N. et al., 2000) (Sarabia, s.f.)

1.1.1.2 Generación eólica. El funcionamiento de la turbina eólica se debe al desplazamiento del viento (energía cinética) para transformarla en energía mecánica de rotación. La energía mecánica generada hace girar el generador inyectando energía eléctrica, la cual es conectada a un sistema de inversión el cual permite cambiar de energía eléctrica continua a alterna (Sarabia, s.f.) (Pérez Rodríguez, 2012)

1.1.2 Redes de distribución

1.1.2.1 Tipos de redes eléctricas de distribución. En redes eléctricas se pueden clasificar en función de la estructura, en redes radiales o antena, redes en anillo o bucle y red mallada. Estos son comúnmente utilizados, por lo cual se describe las principales características para cada una de las configuraciones. (Conejo, Arroyo, & Milano, 2007) (Montecelos, 2016)

1.1.2.1.1 Red radial. La red radial, es una de las más sencillas y comúnmente utilizada por los operadores de red debido a su economía y facilidad de instalación. Consta de una troncal alimentada por un único extremo que realiza el suministro del flujo de potencia (subestación alimentadora) y con conexiones transversales llamados ramales. De tal manera, que la energía solo circula en un solo camino hasta alcanzar los centros de consumo. Uno de los principales inconvenientes de este sistema es la baja confiabilidad ante fallas debido a las interrupciones no planeadas y planeadas, caídas de tensión y entre otras. (Conejo, Arroyo, & Milano, 2007) (Montecelos, 2016) (Espina Alvarado, s.f.) (Equinoccio, 2008)

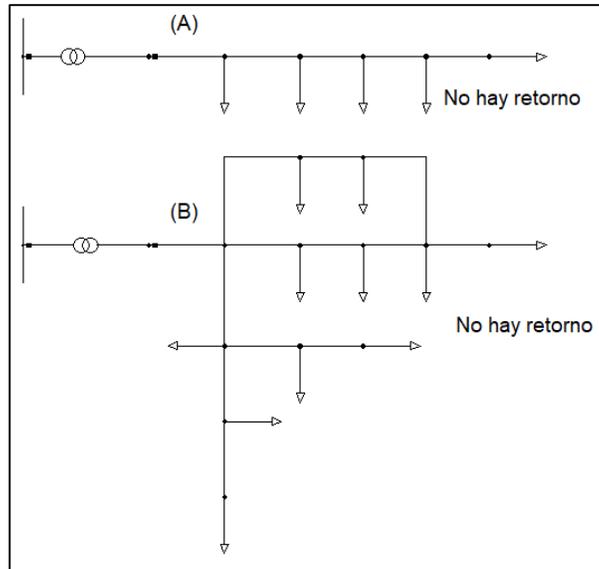


Figura 1: Red Radial

1.1.2.1.2 Red en anillo o bucle. La red en anillo o bucle, ante una red radial se presenta más confiable, debido que mínimo tiene dos extremos como fuentes de alimentación del flujo de potencia entre la fuente y el cliente. Una de las ventajas principales es la confiabilidad en la continuidad del servicio y permitiendo una mejor regulación de tensión, por lo cual es utilizado por los operadores de red para alimentar la carga de las industrias y consumidores industriales por su importancia. (Conejo, Arroyo, & Milano, 2007) (Montecelos, 2016) (Espina Alvarado, s.f.) (Equinoccio, 2008)

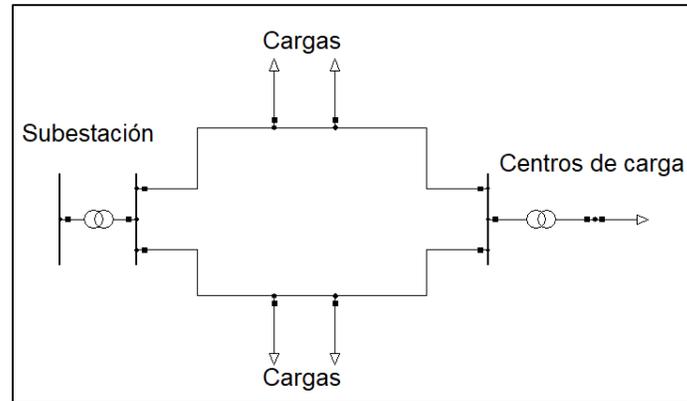


Figura 2: Red en anillo o bucle

1.1.2.1.3 Red mallada. La red mallada, es el resultado de entrelazar redes anilladas y redes radiales, donde la alimentación del flujo de potencia puede provenir de una o varias subestaciones cercanas. Este sistema es uno de los más costosos, pero permite una mejor seguridad y flexibilidad de la alimentación de la carga, siendo uno de los sistemas más complejos en protecciones y su aumento rápido de potencia de cortocircuito (Conejo, Arroyo, & Milano, 2007) (Montecelos, 2016)

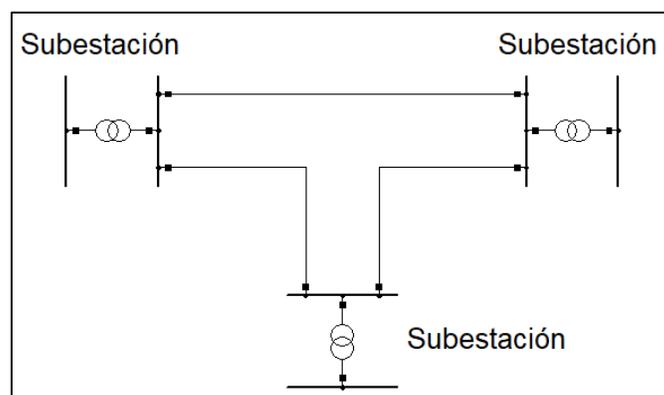


Figura 3: Red Mallada

1.1.3 Principales componentes de los sistemas de distribución. La red eléctrica de distribución que permite atender y suministrar energía a los usuarios y los diferentes centros de consumo, desde una de las subestaciones de transformación, los principales elementos que se encuentran en esas redes son: (Gutiérrez & Hernández, 2015)

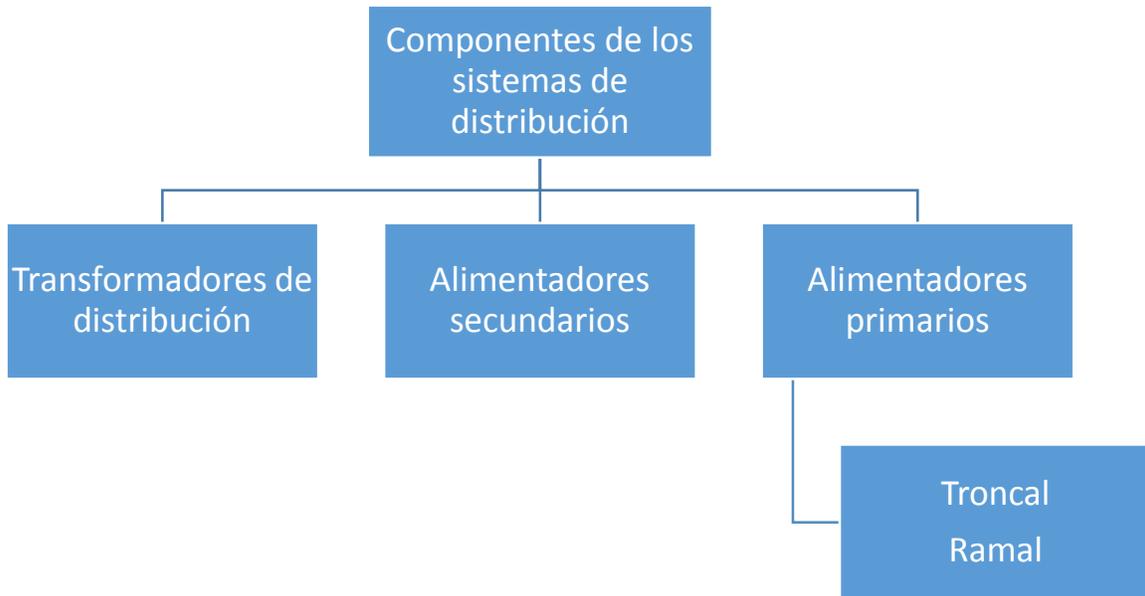


Figura 4: Principales componentes del sistema de distribución

1.2 Planteamiento del problema

En Colombia los sistemas de distribución eléctrica han sido diseñados para operar con generación síncrona, proporcionando estabilidad al sistema eléctrico de potencia. por lo anterior y teniendo en cuenta la entrada en operación de las nuevas fuentes de generación renovables (solar, eólica, biomasa, entre otros), incorporando de esta manera nuevos retos ante los cambios en el comportamiento de las redes eléctricas, donde se impactan las variables de tensión, corriente,

frecuencia, entre otras. Teniendo en cuenta lo anterior, es importante plantear las mejoras a las características de funcionalidad de las protecciones eléctricas que tienen como objeto la protección de los equipos del sistema eléctrico.

El incremento de la demanda eléctrica y el aumento de la generación distribuida mediante energías renovables en hogares, industrias, operadores de red y generadores hacen cada vez más exigente las funcionalidades de las protecciones eléctricas en los sistemas de distribución en media tensión; estas deben operar de manera más compleja garantizando la continuidad del servicio ante un evento de falla aislando el circuito y protegiendo a los elementos de la red y los usuarios; es por esto que la coordinación de protecciones debe realizarse de una manera más detallada, selectiva, precisa y confiable a la hora interactuar con el sistema eléctrico.

Al revisar el estado del arte, Se busca estudiar el impacto de las protecciones eléctricas debido a la incorporación de la generación distribuida en la red de distribución de media tensión, considerando las especificaciones de los fabricantes de equipos de protecciones eléctricas y condiciones del sistema, beneficiando a todos los agentes del sistema eléctrico nacional y a los clientes que son atendidos por las redes de distribución, siendo en su mayoría redes diseñadas para transmitir el flujo de potencia en una sola dirección (atención de la demanda), esto implica que los esquemas y dispositivos de protección eléctrica convencionales para redes de distribución están diseñados para redes con flujos unidireccional.

1.3 Justificación

Debido al constante crecimiento de la demanda de energía eléctrica, Colombia se ve en la necesidad de diversificar su matriz de generación con la incorporación de energías renovables,

para lo cual se requiere anticipar la entrada de estos nuevos recursos energéticos que permitan cubrir la demanda de Colombia. Las fuentes de generación renovables nacen como una posibilidad de cubrir gran parte de la demanda, reducir las inversiones en las redes de distribución tradicionales, reducción de las pérdidas de energía y mitigar el impacto ambiental en la transmisión de energía.

La utilización de fuentes renovables también impacta las redes de distribución de manera desfavorable dificultando el funcionamiento del sistema eléctrico, entre estos podemos encontrar:

- Flujos de potencia y corriente bidireccionales
- Fluctuación de tensión y frecuencia por efecto isla
- Afectación a los equipos de protecciones (relés, fusibles, reconectadores, etc.), por fallos en coordinación
- incremento de corrientes de cortocircuito

La presente monografía se basa en revisar los avances a nivel global sobre los métodos que están siendo utilizados en la coordinación de protecciones para generadores eólicos y solares en redes de Media tensión para dar seguridad y funcionalidad a los sistemas de distribución involucrados en el servicio de energía eléctrica.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General. Revisión del estado del arte de las metodologías utilizadas para la coordinación de protecciones en redes de distribución de media tensión, considerando la generación fotovoltaica y eólica en circuitos radiales y anillados.

1.4.2 Objetivos Específicos

Realizar una revisión literaria de las metodologías más significativas utilizadas para la coordinación de protecciones en redes de media tensión que utilizan generación fotovoltaica y eólica.

Explicar el impacto de las protecciones eléctricas en redes de media tensión con la entrada de energías fotovoltaica y eólica.

2. Dispositivos de protección en redes de distribución de Media Tensión (MT)

En las redes de distribución de los dispositivos más utilizados en el sistema de protecciones son:

2.1 Reconectores

El reconector o recloser es un interruptor de reconexión automática que detecta fallas en las líneas de distribución, su funcionamiento se basa en reconocer fallas de sobrecorriente, interrumpiendo el circuito en falla por un tiempo determinado, pasado este instante cierra nuevamente para que el circuito se energice nuevamente. Si la falla no es despejada, el recloser realiza la misma maniobra 4 veces quedando finalmente abierto y de esta manera aísla la falla.

Como las fallas en las líneas son de tipo temporal con una duración estimada en ciclos de tiempo, el recloser descarta la posibilidad de dejar por fuera un circuito o línea de distribución si la falla es temporal. (Blackburn & Domin, 1997) (Univ. Nacional de Colombia)

La principal tarea de un recloser es discriminar o aislar una falla temporal y una permanente, permitiendo a la primera maniobra un tiempo para que pueda ser despejada por el elemento correspondiente aguas arriba o que la falla sea de aguas abajo, en caso de que la falla sea de carácter permanente el recloser operara de tal manera que su posición final sea abrir el circuito. (Blackburn & Domin, 1997)

Los tiempos de apertura y cierre pueden determinarse de acuerdo a las curvas características (tiempo vs Corriente). Es importante aclarar que los reconectores pueden tener 2 tipos de curvas para su operación y estas serían: (Mason, 2015)

- Una primera curva de operación rápida (ANSI e IEC)
- Una segunda curva de operación lenta o retardada (ANSI e IEC)

Los reconectores son fabricados en modelos monofásicos y trifásicos, sin embargo, ambos funcionan bajo el mismo principio.

2.1.1 Usos del reconector o recloser. El reconector o recloser tiene diferentes usos entre los cuales se diferencian: (NOJA-581-06 NOJA Power OSM15-27-38 Guia de Producto - es_4.pdf) (Short, 2018)

- En líneas de distribución para media tensión a una distancia de la subestación principal, su función es seccionalizar los circuitos largos, previniendo las salidas del circuito completo cuando la falla sea permanente.

- En subestaciones son utilizados como dispositivos de protección de los circuitos de distribución principales, su función es aislar el alimentador en caso de falla permanente.
- En circuitos ramales importantes con el objetivo de resguardar el alimentador principal de salidas e interrupciones debidas a fallas que se den en el circuito ramal.

2.1.2 Parámetros de funcionamiento. Para un óptimo funcionamiento del reconectador o recloser se deben considerar los siguientes factores: (Short, 2018) (IEEE, s.f.)

- La tensión nominal de la red debe ser menor o igual a la tensión de diseño del recloser.
- La corriente plena carga permanente en el punto de conexión debe ser menor o igual a la corriente nominal del reconectador.
- la corriente de cortocircuito máxima debe ser menor o igual a la corriente de falla del reconectador.
- Las curvas tiempo – Corriente y la secuencia de operación se deben seleccionar de manera adecuada, de tal manera que su coordinación opere de manera correcta.

2.2 Fusibles

Un fusible es un dispositivo de protección que actúa contra sobrecorriente, generalmente es utilizado en redes de distribución en niveles de media tensión son económicos, fáciles de utilizar y confiables dado que brinda protección sin estar sujeto a mantenimiento. (Torres, Mazon, Zamora, & Pérez Quesada, 2007)

El principio de operación del fusible, se basa en la fusión térmica del filamento que actúa como protección, una vez se funde se inicia un proceso de arco eléctrico al interior del fusible, siendo extinguido en la apertura. (Torres, Mazon, Zamora, & Pérez Quesada, 2007)

2.2.1 Factores a tener en cuenta. (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Industry Applications Society, 1986)

- La frecuencia donde se utilizan los fusibles deben ser en un rango de 50 a 60 Hz
- La corriente nominal del fusible debe estar por encima de la corriente de plena carga en el punto de conexión
- La tensión de fase del fusible debe ser menor o igual a la nominal.
- El fusible debe actuar para una falla en el final de la sección a proteger.
- La selección del fusible debe coordinar con los demás dispositivos de protección en el circuito de distribución a proteger.
- Corriente de cortocircuito en el punto de instalación
- Debe coordinar correctamente con la curva de magnetización del transformador.

2.2.2 Clasificación de los fusibles. Los fusibles se clasifican de acuerdo al tipo de operación, velocidad de operación y capacidad interruptora. a continuación, se presenta un resumen de la clasificación de fusibles. (Short, 2018) (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Industry Applications Society, 1986) (Ramírez Castaño, 2003)

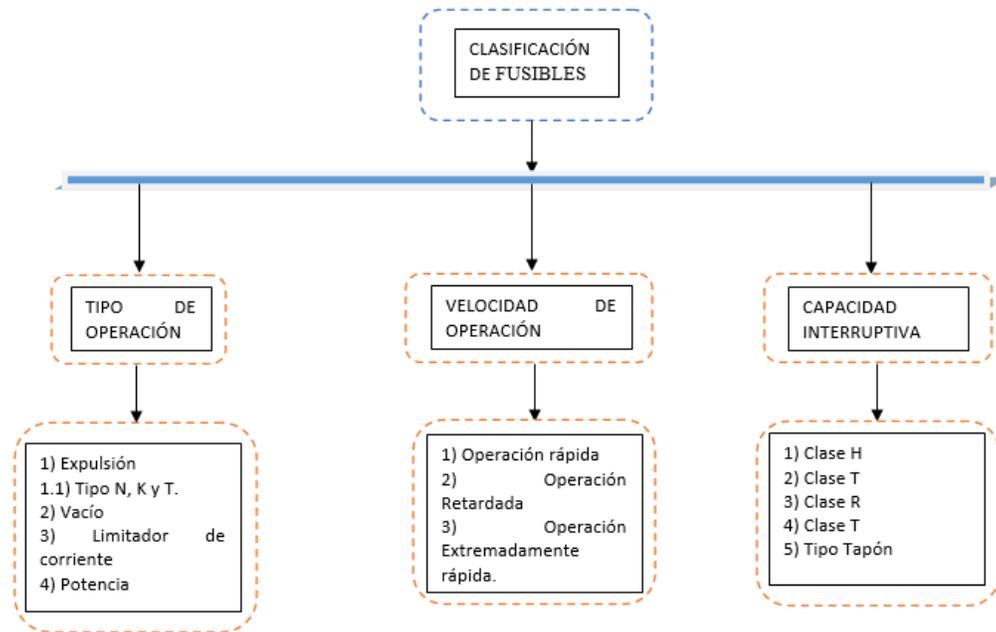


Figura 5: Clasificación de fusibles

- **Fusibles tipo N:** Son fusibles rápidos que conducen el 100% de la corriente nominal y generalmente se funden al 230% de la corriente nominal en un tiempo máximo de 5 minutos. (Short, 2018) (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Industry Applications Society, 1986) (Ramírez Castaño, 2003)
- **Fusibles tipo K:** Estos fusibles pueden transportar hasta el 150 % de la corriente nominal y su velocidad de operación puede ser de 0,1 a 10 seg. (Short, 2018) (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Industry Applications Society, 1986) (Ramírez Castaño, 2003)
- **Fusibles tipo T:** Estos fusibles son más lentos que los fusibles tipo K, pueden transportar el 150% de la corriente nominal y su tiempo de operación es de hasta 13 seg. (Short, 2018) (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Industry Applications Society, 1986) (Ramírez Castaño, 2003)

2.3 Relés

En sistemas de distribución la utilización de relés como protección para las redes y equipos es cada día más común ya que estos pueden ser programados y operados u observados desde el centro de control de los operadores de red. (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Industry Applications Society, 1986) (Ramírez Castaño, 2003)

Generalmente las fallas en los sistemas de distribución generan corrientes muy altas que son detectadas por los relés de protección, aislando dicha falla de manera automática. (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Industry Applications Society, 1986) (Ramírez Castaño, 2003)

El relé de protección es un dispositivo que compara señales de entrada de tipo eléctrica, con un valor referencia de la misma naturaleza; en otras palabras, los relés actúan cuando las señales de entrada son mayores a los valores de referencia programados en el dispositivo de protección. Cuando opera un relé sus contactos o relés auxiliares se abren desconectando el circuito o el equipo que se protege. (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Industry Applications Society, 1986) (Ramírez Castaño, 2003)

2.3.1 Tipos de Relés. En los sistemas de distribución con generación distribuida en el mayor de los casos energía eólica y solar se implementa como dispositivos protección relés de sobrecorriente. Los relés como equipos de protección están diseñados para soportar las corrientes de cortocircuito; además estos poseen sistemas de control que tienen sensibilidad ante corrientes de falla, los cuales permiten operar sus contactos auxiliares para aislar la falla del circuito. (Srivastava & Bhogal, 2007)

2.3.2 Relés de Sobrecorriente. Los relés de sobrecorriente monitorean de manera permanente las corrientes que circulan por equipos y redes. Su corriente de arranque es ajustable, si la corriente pasa el ajuste del relé este actúa cerrando sus contactos e inicia el disparo de interruptores. (Ramírez Castaño, 2003)

Los relés de sobre corriente se clasifican en tres grupos como lo son:

- a. Relé de sobrecorriente con corriente con valor definido.

Este tipo de relé opera de manera instantánea cuando la corriente de operación alcanza un valor determinado. El relé se ajusta de tal manera que, en la subestación que se encuentra a una distancia lejana de la fuente, el relé de sobrecorriente debe actuar para una intensidad baja y las corrientes de ajuste y operación de los relés deben ser incrementadas progresivamente por cada subestación hasta llegar a la fuente principal, de esta manera el relé con un ajuste bajo debe actuar, mientras la carga es desconectada en el punto más cerca a la falla. (Nichols & Castro, 1990) (Reza, y otros, 2008)

- b. Relé de sobrecorriente de tiempo definido.

Este relé de sobrecorriente permite ser programado para manejar diferentes corrientes utilizando diferentes tipos de operación cuando este sea activado por una falla. (Singh, 2016)

Los ajustes pueden ser previamente calculados para que el interruptor que se encuentre más cerca a la falla pueda actuar en el menor tiempo posible y los demás interruptores se activen sucesivamente de acuerdo a los tiempos que hubiesen sido programados los relés. (Singh, 2016)

- c. Relé de sobrecorriente de tiempo inverso.

Estos relés operan en un tiempo inversamente proporcional a la corriente de falla del sistema de distribución. Los relés de tiempo inverso se diferencian de los relés de tiempo definido que para

altas corrientes los tiempos de disparo con más cortos sin preocuparse por la selectividad. (Srivastava & Bhogal, 2007) (Eismin, 2019) (IEEE, s.f.)

Los relés de tiempo inverso se clasifican de acuerdo a su curva característica, dicha curva indica la velocidad de operación del relé. Los relés de tiempo inverso generalmente se usan en sistemas de distribución de tipo radial, para realizar una coordinación correcta se deben conocer los siguientes parámetros del relé de sobrecorriente de tiempo inverso; a continuación, se describen sus características. (Srivastava & Bhogal, 2007) (Eismin, 2019) (IEEE, s.f.)

- **Corriente de arranque:** Este valor se da cuando empieza la operación de temporización del relé; en los relés actuales los valores de ajuste están en múltiplos y submúltiplos del valor de la corriente nominal generalmente de 1 a 5 A de acuerdo al CT utilizado en pasos de 0,01 A. (Srivastava & Bhogal, 2007) (Eismin, 2019) (IEEE, s.f.)
- **Dial:** el Dial permite al relé variar su tiempo de operación para un mismo tipo de curvas, para una corriente de falla a analizar, en los relés actuales el Dial se puede mover en pasos muy cercanos entre sí, esto va de acuerdo al tipo de relé y de curva por ejemplo 0,1 a 2 en intervalos de 0,05 s, esto equivale a unas 36 curvas que permite ajustar el dial de los relés. (Srivastava & Bhogal, 2007) (Eismin, 2019) (IEEE, s.f.)

3. Protecciones eléctricas en redes de media tensión con generación distribuida

El dinamismo de la configuración de la red y los flujos de corrientes unidireccionales de las redes actuales, la introducción de la generación distribuida hace que esta consideración ya no sea válida

y se presenten en la red flujos de corrientes bidireccionales, los cuales están sometidos a constantes perturbaciones de fallas en la red para su operación. En el estado del arte existe una gran variedad de esquemas de protección, que busca dar respuesta a la necesidad del sistema con la integración de fuentes de energía no convencionales con la generación fotovoltaica, eólica, entre otras. Entre los principales esquemas es posible identificar dos enfoques, modelos tradicionales y modelos de protecciones adaptativas.

3.1 Coordinación de protecciones modelos tradicionales

La coordinación clásica de protecciones en los sistemas de distribución, se realiza a través de esquemas de protección los cuales están diseñados de manera que la corriente eléctrica circule en una sola dirección (Fuente – Carga), para llevar a cabo una óptima y eficiente coordinación de protecciones en los sistemas de distribución se deben cumplir criterios tales como: selectividad, fiabilidad, seguridad, velocidad y sensibilidad. A continuación, se presenta un resumen de las configuraciones clásicas en la coordinación de protecciones en media tensión. (Ramírez Castaño, 2003)

3.1.1 Coordinación Fusible – Fusible. La coordinación entre fusible – fusible generalmente se da entre dispositivos ubicados en líneas, este tipo de coordinación se realiza tradicionalmente en sistemas de distribución radiales. (Girgis & Brahma, 2001)

La configuración de esta protección se da cuando un fusible aguas arriba sirve de respaldo a un fusible secundario aguas abajo; como tal el criterio de coordinación entre fusibles establece que debe haber una diferencia del 25% entre los tiempos entre las curvas coordinadas. Este rango de

tiempo entre las curvas garantiza que no existan modificaciones en las características del fusible, en donde t_1 es el tiempo máximo de apertura del fusible primario y t_2 tiempo mínimo de fusión del fusible de respaldo para una misma falla. (Girgis & Brahma, 2001)

Se hace necesario aclarar que un estudio de coordinación de protecciones sin la presencia de generación distribuida, en la cual se involucren fusibles, se debe tener presente las características de operación tiempo-corriente dadas por el fabricante, a fin de identificar todas las clases de fusibles involucrados en el estudio. (Short, 2018) (Girgis & Brahma, 2001)

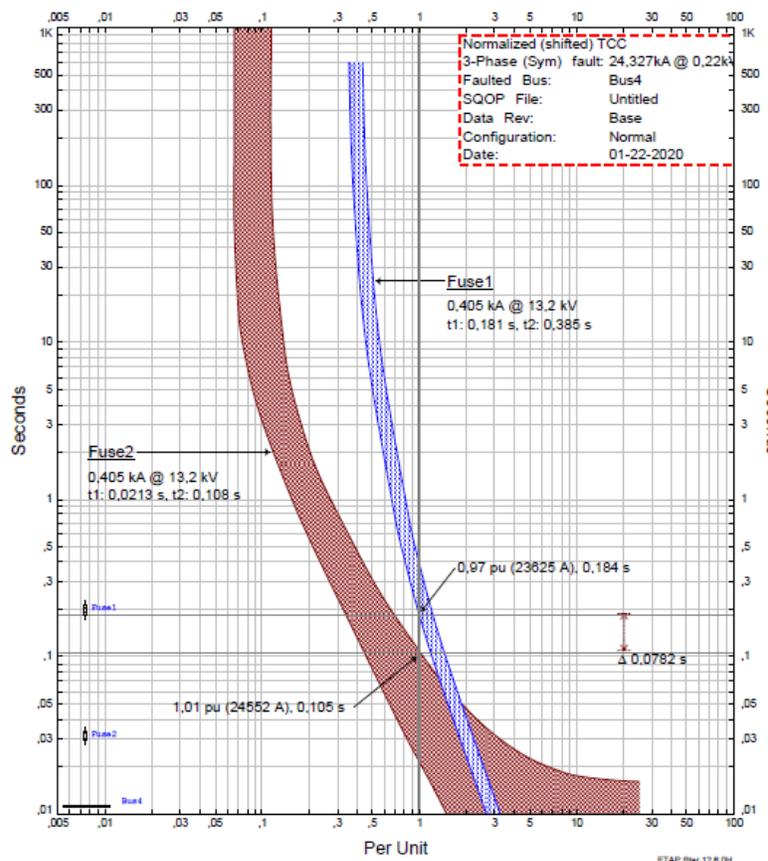


Figura 6: Coordinación tradicional fusible - fusible

La grafica representa una coordinación clásica de configuración fusible – fusible para la cual la curva del lado de la carga no debe exceder el 75% del tiempo de la curva del lado del alimentador principal.

3.1.2 Coordinación Recloser – Fusible. Para la coordinación clásica entre el reconectador y el fusible se ilustra una configuración entre estos dos dispositivos, el cual tiene ubicado al fusible como la protección más cercana a la carga y como protección de respaldo.

El criterio aplica de manera que las fallas sean despejadas por maniobras sucesivas del Recloser con el fin de evitar la fusión del fusible ya que si este opera será necesario remplazarlo. (Girgis & Brahma, 2001) (Alam, Das, & Pant, 2018) (Tuta & Hincapié, 2011)

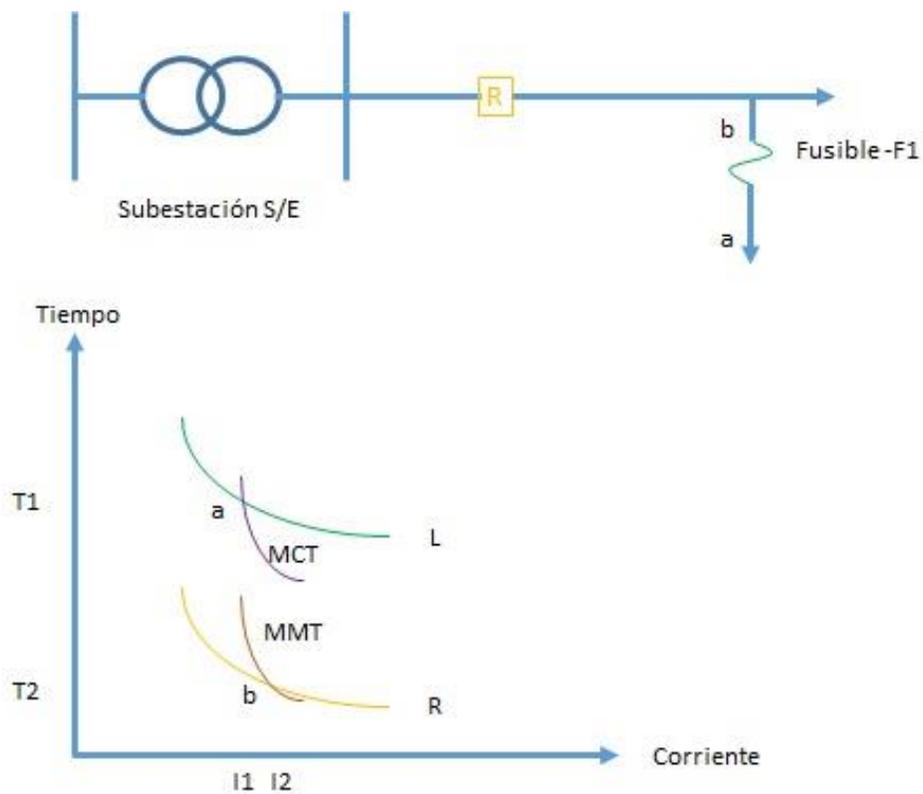


Figura 7: Curvas de operación reanclador – fusible

Para realizar la coordinación Recloser-Fusible se debe cumplir:

- El máximo punto de coordinación para una corriente de falla común para ambos equipos de protección se tiene en la intersección de la curva rápida del Reconectador corregida mediante un factor “k” de acuerdo a las características del fusible MMT. (Girgis & Brahma, 2001) (Tuta & Hincapié, 2011)
- El mínimo punto de coordinación para una corriente de cortocircuito que sea común entre ambos dispositivos de protección, debe ser en la intersección de la característica del fusible MCT con la curva lenta del Recloser. (Girgis & Brahma, 2001) (Alam, Das, & Pant, 2018)
- El delta de corrientes para estos dos puntos, es el rango de coordinación que debe cumplir el criterio para corrientes de falla que están fuera del rango, estas deben actuar mediante operaciones no selectivas. (Girgis & Brahma, 2001) (Alam, Das, & Pant, 2018)

3.1.3 Coordinación Relé – Relé. La figura muestra un alimentador para una red de distribución principal mediante un generador y protegido por los relés de sobre corriente RA y RB. La filosofía de la coordinación es la máxima corriente de falla común entre los relés y de los cuales sus curvas deben tener una diferencia de tiempo para que no exista traslape en el estudio de coordinación, este intervalo de tiempo entre curvas de los relés es llamado “Intervalo de tiempo de coordinación (CTI)” y este depende de factores como deficiencias en los transformadores de corriente y potencial. En conclusión, los relés de sobrecorriente que se conectan en serie deben tener una diferencia de tiempo de 0.2 S y 0.4S entre el valor mínimo y máximo de falla. (Girgis & Brahma, 2001) (Mohammadzadeh, Mohammadi Chabanloo, & Ghotbi Maleki, 2019) (Zapata & Mejía, 2003)

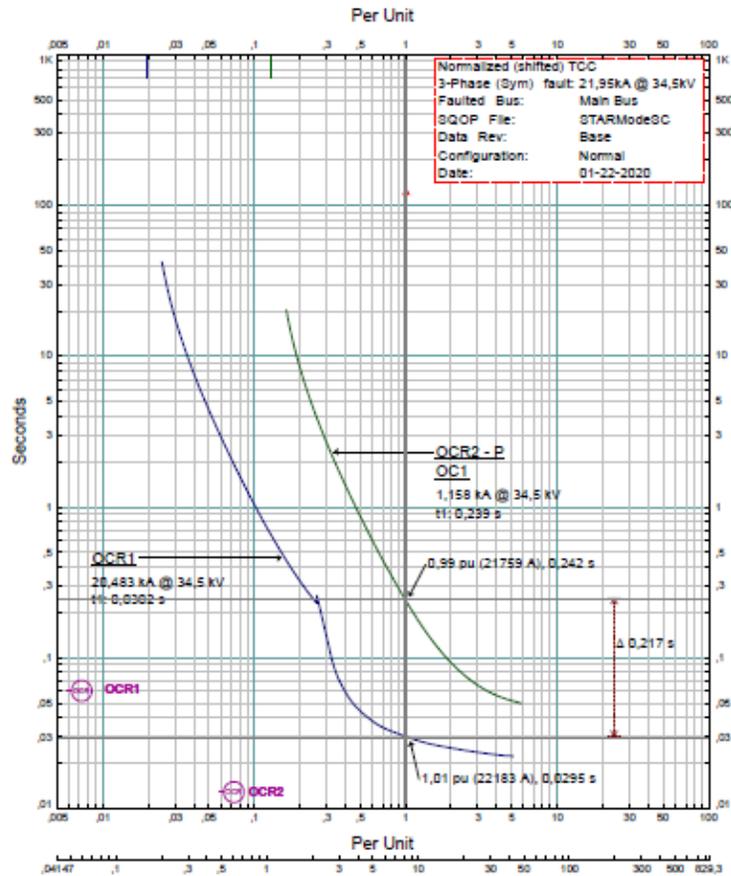


Figura 8: Curva de operación relé - relé

La grafica representa una Cordinación clásica entre relés de sobrecorriente y de la cual se establece que para una óptima Cordinación el delta de tiempos entre curvas de los relés debe estar entre de 0.2S a 0.4S

3.1.4 Coordinación Relé – Recloser. Para la coordinación tradicional entre un Relevador de corriente y un Reconectador se puede dar de dos maneras en un sistema de distribución: (Ruschel & Ashley, 1989) (Il-Kyoung, Sung-Hun, Jae-Chul, & Ok-Bae, 2010)

- Entre dispositivos de protección instalados en ubicaciones lejanas (Relé en alimentador principal y Recloser sobre la línea de distribución).

- para dispositivos ubicado en una misma subestación

Como característica principal para la coordinación entre un Relé y un Reconector se debe garantizar como mínimo un delta de tiempo de coordinación de 0.3 a 0.4 segundos entre las curvas de ambos dispositivos de protección eléctrica, esto para una corriente máxima de falla común entre ellos. (Ruschel & Ashley, 1989) (Il-Kyoung, Sung-Hun, Jae-Chul, & Ok-Bae, 2010)

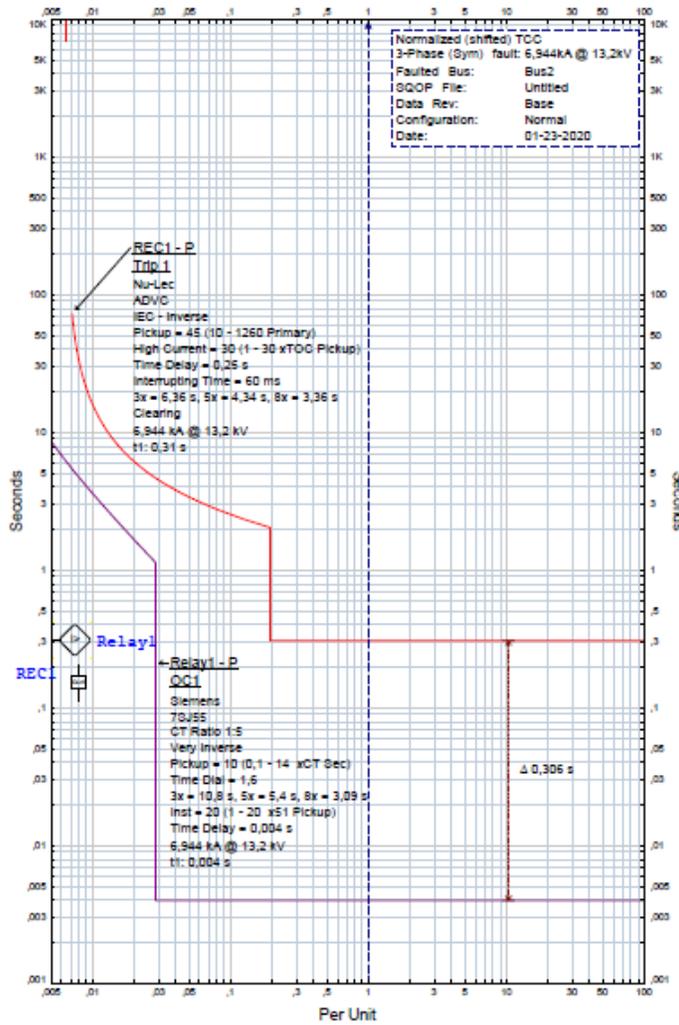


Figura 9: Curva de operación Relé - Recloser

La figura representa una coordinación clásica de protecciones entre un relé y un recloser, del cual se establece que la diferencia para los tiempos de coordinación entre curvas debe estar alrededor de 0.3s a 0.4s

3.2 Coordinación de protecciones modelos adaptativos

3.2.1 Resumen de Impactos de generación distribuida eólica y solar sobre las protecciones eléctricas. Los sistemas de protección eléctrica en redes de distribución en presencia de generación distribuida no es una tarea sencilla debido a que en su mayoría las configuraciones de las redes son radiales, debido a la generación distribuida en su mayoría fotovoltaica y eólica presentan una serie de impactos sobre las protecciones eléctricas de las cuales se pueden mencionar y clasificar algunos de estos: (Real-Calvo, y otros, 2017) (Razavi, S.-E.; et al., 2019)

- Recierre no sincronizado.
- No reenganche automático de reconectores y relés
- Contribución de niveles de coro circuito.
- Sistema de protección cegado
- Mal funcionamiento de la protección del alimentador principal.

A continuación se presenta una clasificación de algunos impactos causados por la generación distribuida sobre las protecciones eléctricas:

Tabla 1.

Clasificación de algunos impactos causados por la generación distribuida sobre las protecciones eléctricas

Impacto sobre protecciones eléctricas.	Explicación de impactos.	Tipo de generador
Aumento de corrientes de cortocircuito.	<p>Al ocurrir una falla en un alimentador de un circuito de distribución, el generador distribuido aporta una corriente de falla, debido a la conexión del generador distribuido en la red, el aporte de corriente de falla depende del dimensionamiento del generador y de la ubicación de este, el GD proporciona un valor adicional de corriente de falla, excediendo la capacidad de cortocircuito de las protecciones eléctricas. (Pholborisut, Saksornchai, & Eua-arporn, 2011)</p> $I_{falla} = I_{Fuente} + I_{GD}$	Fotovoltaico y/o Eólico.
Flujos bidireccionales de corriente.	<p>Este fenómeno se da cuando hay generadores distribuidos conectados a la red de distribución y estos aportan corrientes y flujos de potencia en direcciones contrarias a las de las fuentes convencionales en el sistema de distribución, ocasionando en ocasiones falsos disparos en los dispositivos de protección, y aportes de corrientes a los sistemas de distribución en caso de falla. En un sistema de distribución con generación convencional y distribuida, si la generación convencional se ausenta, los generadores distribuidos inyectan corriente a la red generando flujos contrarios para el cual fueron diseñados los dispositivos de protección pudiendo ocasionar un falso disparo de estos en un ramal secundario del sistema. (Pholborisut, Saksornchai, & Eua-arporn, 2011)</p>	Fotovoltaico y/o Eólico
Agotamiento de fusible para una	<p>Sucede generalmente cuando el fusible comienza a fundirse antes que actué el reconectador con su operación rápida</p>	Fotovoltaico y/o Eólico

Impacto sobre protecciones eléctricas.	Explicación de impactos.	Tipo de generador
configuración recloser – fusible.	<p>(Curva rápida), ocasionado desgaste en la vida útil del reconectador, y ocasionado una posible interrupción del servicio, la cual no es deseada, este impacto ocurre en la configuración Recloser – Fusible y debido a la presencia de generación distribuida en un sistema de distribución, este sucede por el aporte de corriente de falla del generador distribuido en la red la cual no es notado por el recloser ya que este no tiene la función de bidireccionalidad sumando esta corriente a la falla del sistema ocasionado un agotamiento del fusible cercano a la carga. (Pholborisut, Saksornchai, & Eua-arporn, 2011)</p> $I_{falla/Fusible} = I_{Fuente} + I_{GD}$	Fotovoltaico y/o Eólico
Desconexión del circuito, o disparo incorrecto. Configuración recloser - fusible.	<p>Generalmente se produce cuando un recloser el cual se encuentra fuera de la zona de la falla opera ocasionado interrupción en el servicio y generando problemas en la confiabilidad del sistema de protección, esta operación del reconectador es ocasionada por flujos bidireccionales inyectados por las fuentes de generación distribuida. (Pholborisut, Saksornchai, & Eua-arporn, 2011)</p>	Fotovoltaico y/o Eólico
Desconexión del circuito, o disparo incorrecto. Configuración recloser – recloser.	<p>El disparo incorrecto entre reconectores se presenta cuando ocurre una falla en un circuito ramal y este tiene aportes de generación distribuida, como la corriente circula del generador hacia la red y el recloser más cercano no posee función bidireccional esta corriente de falla no es detectada por este, pero es detectada aguas arriba por un reconectador de diferente ramal abriendo el circuito equivocado, el cual ocasiona fallas en la confiabilidad del sistema de protección. (Khedrzadeh, Javadi, & Mousavi, 2010)</p>	Fotovoltaico y/o Eólico

Impacto sobre protecciones eléctricas.	Explicación de impactos.	Tipo de generador
Operación inapropiada configuración relé - reconectador.	Este impacto sucede cuando la fuente de GD está conectada a un alimentador que viene de la subestación de distribución de media tensión de tal manera que los relés de protección no operen debido a que la corriente de falla es pequeña, en tal caso puede ocurrir que cuando el interruptor de la subestación este cerrado, en el reconectador de ubicado sobre el alimentador se genere un arco eléctrico sostenido generando problemas en el Recierre del recloser. (Qin, Wang, Hao, & Li, 2011)	Fotovoltaico y/o Eólico
Perdida de coordinación en relés y reconectadores por deficiente ubicación de generadores distribuidos	La mala ubicación de generadores distribuidos en la red tiene como consecuencia la elevación de tensiones del sistema, problemas de regulación de voltaje, inestabilidad del sistema, afectado el normal funcionamiento de las protecciones eléctricas. (Wang, Qin, Guo, & Jin, 2011)	Fotovoltaico y/o Eólico
Deficiente relevo en relés por excesivo dimensionamiento y generadores distribuidos en la red.	En la red de distribución el mayor aporte lo realiza la energía fotovoltaica generando impactos significativos en la función de relevo de los relés debido a fenómenos impuestos en la red de distribución por generadores fotovoltaicos tal como son aumento de tensiones, inyección de armónicos ocasionado perdida de la función de relevo en los relés, el impacto de los generadores solares depende en gran parte por la mala ubicación y la magnitud de potencia inyectada en la red. (Mendes, Vargas, Batista, & Simonetti, 2018) (Akmal, Al-Naemi, Iqbal, Al-Tarabsheh, & Meegahapola, 2019)	Solar.

Impacto sobre protecciones eléctricas.	Explicación de impactos.	Tipo de generador
Aportes de corriente de corto circuito de acuerdo al tipo de generador utilizado en turbinas eólicas.	Los aportes de corriente de cortocircuito que los generadores eólicos inyectan a la red en caso de falla, presentan un impacto diferente en cuanto a la magnitud del aporte de corriente, esto sucede por el tipo de generador que se utilice en las turbinas eólicas y se puede deducir que cuando se comprara un generador síncrono y uno asíncrono, el generador síncrono presenta un aporte más significativo de corriente de falla; comparado un generador asíncrono y un generador de inducción doblemente alimentado los aportes de corrientes de falla son similares, impactando las protecciones eléctricas de manera que estas pierden confiabilidad, este aporte de corrientes de cortocircuito se da por el valor de las impedancias internas de los generadores, dando un impacto más significativo al generador síncrono. (Khederzadeh, Javadi, & Mousavi, 2010)	Eólico

3.2.2 Estrategias de protección para los sistemas de distribución convencional conectando generación distribuida (GD). Varias de las estrategias de mitigación propuestas para la conexión de los generadores distribuidos a los sistemas de distribución, están enfocadas a: cambios mínimos en los sistemas de protección convencional, lo que minimiza costos y la interrupción operativa de la red. Otro de los enfoques, es modificar el sistema de distribución convencional con la introducción de nuevos componentes en el sistema de protección. Algunas de estas estrategias de mitigación se presentan en el siguiente resumen: (Norshahrani, Mokhlis, Abu Bakar, Jamian, & Sukumar, 2017)

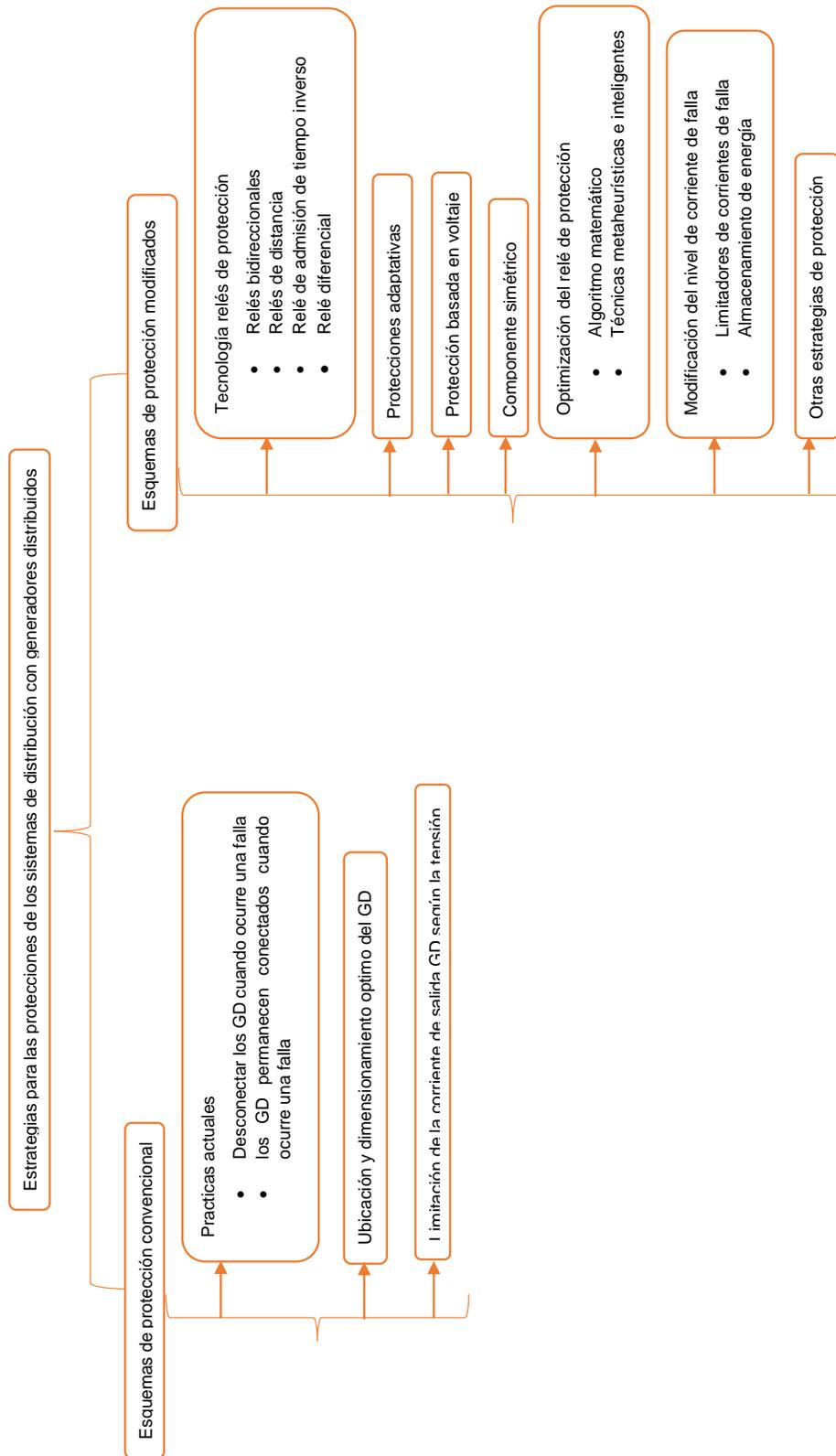


Figura 10: Estrategias de mitigación para mitigar el impacto de la GD en las redes de distribución

La principal motivación para las estrategias de protección es minimizar los costos de la implementación, por lo que se utiliza la protección convencional existente, componentes de conmutación y detección, para comparar por el tipo de dispositivo de protección, requisitos de comunicaciones, costo, ventajas y desventajas de cada uno, cada estrategia se define en la siguiente tabla (Norshahrani, Mokhlis, Abu Bakar, Jamian, & Sukumar, 2017):

Tabla 2:

Estrategias de protección en las redes de distribución conectando GD.

Estrategia de protección	Ventajas	Desventajas	Dispositivo de protección	Necesita comunicación	Costo
Desconectar GD de la red cuando ocurra la falla	a. Evita que la falla afecte otras zonas. b. Efecto isla. c. Importante para la propia protección GD. d. No requiere cambios en la configuración del relé existente.	a. Limitar la capacidad del GD b. La desconexión de GD cada vez que ocurre la falla puede afectar la confiabilidad de la red.	Relé de sobrecorriente	No	Razonable
GD permanece conectado	a. Ayuda a mejorar el perfil de tensión. b. Proporciona soporte a la red y aumenta la seguridad y flexibilidad del suministro de energía. c. Protege al personal de accidentes y lesiones.	a. Mayor costo para cumplir con los requisitos. B. Riesgos de efecto isla no intencionales. C. Dificultades en la detección de fallas y aislamiento, debido al aporte de corriente de los GD.	Relé de sobrecorriente	No	Costoso

Estrategia de protección	Ventajas	Desventajas	Dispositivo de protección	Necesita comunicación	Costo
Capacidad y ubicación óptima de GD	<p>a. No afecta la protección de la red al alimentar la potencia suficiente de la carga del circuito.</p> <p>b. Minimizar incidentes de pérdidas de coordinación de protecciones.</p>	<p>a. Para una GD existente, limita la entrada de otros basado en la plena capacidad del existente.</p> <p>b. Limitaciones en determinar la ubicación debido a la geografía y adquisición de terrenos.</p>	Relé de sobrecorriente	No	Razonable
Límites del GD acorde al voltaje del GD	<p>a. Fácil implementación.</p> <p>b. No limita la capacidad del GD a la red existente.</p> <p>c. Estable contra perturbaciones transitorias.</p>	Aplicación limitada a los inversores del GD.	Coordinación fusible - recloser	No	Razonable

Nota. Tomado de: M. Norshahrani, H. Mokhlis, Ab. H. Abu Bakar, J. J. Jamian, y S. Sukumar, «Progress on Protection Strategies to Mitigate the Impact of Renewable Distributed Generation on Distribution Systems.»

3.2.3 Estrategias de protección modificando los sistemas de distribución convencional conectando generación distribuida (GD). Para esta estrategia de mitigar el impacto de la generación distribuida modificando el sistema de distribución convencional, algunas teorías son simples y otras son innovadoras, para lo cual se presenta en la siguiente tabla la comparación, beneficios y deficiencias, la estrategia se basa en la tecnología de los relés de protección, protección adaptativa, modificación de la corriente de falla, voltaje, componentes simétricos y la

optimización del relé de protección (Norshahrani, Mokhlis, Abu Bakar, Jamian, & Sukumar, 2017).

Tabla 3:

Comparación de estrategias de sistemas de distribución conectando generadores distribuidos

Estrategia de protección	Ventajas	Desventajas	Dispositivo de protección	Necesita comunicación	Costo
Tecnología de relé de protección bidireccional al actual	<ul style="list-style-type: none"> a. Detecta corriente en ambas direcciones de manera efectiva verificando el impacto del flujo de energía bidireccional. b. Buena selectividad y capaz de evitar efectos de disparos de alimentadores adyacentes. 	<ul style="list-style-type: none"> a. Capital inicial elevado. b. Dificultad para establecer el escenario de todas las contingencias. 	Relé bidireccional actual	No	Elevado
Relé de distancia	<ul style="list-style-type: none"> a. La configuración del relé es constante. b. Adecuado para circuitos cerrados o malla debido a su direccionalidad. c. Tiempo rápido de operación de relé. 	<ul style="list-style-type: none"> a. Rango mínimo para las características del relé. b. Se requiere un transformador de voltaje adicional, contribuye a un costo adicional. c. Configuración del relé de distancia puede ser más difícil que un relé convencional. 	Relé de distancia	Si	Razonable

Estrategia de protección	Ventajas	Desventajas	Dispositivo de protección	Necesita comunicación	Costo
Relé de admitancia de tiempo inverso	<p>a. Capaz de distinguir y aislar fallas en microrredes autónomas conectadas a la red.</p> <p>b. Capaz de detectar múltiples niveles de falla</p> <p>c. Proporciona protección de respaldo a relés aguas abajo.</p> <p>d. No requiere margen de seguridad para cubrir las zonas de protección.</p>	<p>a. Posibles errores en cálculo de entrada</p> <p>b. La efectividad del sistema no ha sido validada.</p>	Relé de admitancia de tiempo inverso	No	Elevado
Relé diferencial	<p>a. Capaz de proteger en redes de alimentadores radiales y malla.</p> <p>b. No es sensible a los efectos de los flujos de corriente bidireccional</p>	<p>a. Difícil y costoso de aplicar debido a demasiadas líneas de distribución.</p> <p>b. Efectivo solo para protección de líneas</p>	Relé digital	Si	Muy elevado
Protecciones adaptativas	<p>a. Funciones de cambio dinámico en la configuración entre relé.</p> <p>b. La comunicación mejora la velocidad de comunicación.</p>	<p>a. Análisis de datos fuera de línea consume grandes cantidades de almacenamiento de memoria.</p> <p>b. Mayor costo debido a relés digitales.</p> <p>c. Falla en el sistema de comunicación</p>	Relé de sobre corriente	Si	Elevado

Estrategia de protección	Ventajas	Desventajas	Dispositivo de protección	Necesita comunicación	Costo
		resulta en una falla en el sistema de coordinación de protecciones.			
Modificación nivel de corriente de falla	a. Costo bajo. b. Aumenta el tiempo de recuperación, lo que reduce la interrupción. c. Mejora la confiabilidad. d. El almacenamiento de energía ayuda en la recuperación rápida del voltaje de la red.	a. Valores de impedancia difíciles de determinar. b. Alto costo de inversión para los dispositivos de almacenamiento que sean capaces de soportar altos niveles de corriente. c. Almacenamiento de energía es más adecuada para los GD basadas en inversores.	Relé de sobre corriente	No	Elevado
Protección basado en voltaje	a. Rápido en la identificación de la falla. b. Se puede usar tanto para protección contra fallas fuera y dentro de zona.	a. La caída de voltaje en la red afecta el rendimiento. b. Difícil detectar fallas simétricas. c. Necesita enlaces de comunicación que aumentan el costo.	Relé de monitoreo	Si	Elevado

Fuente: X M. Norshahrani, H. Mokhlis, Ab. H. Abu Bakar, J. J. Jamian, y S. Sukumar, «Progress on Protection Strategies to Mitigate the Impact of Renewable Distributed Generation on Distribution Systems.»

La integración de la generación distribuida en los esquemas actuales o tradicionales es más compleja debido a las condiciones de la red y de la normativa de cada país.

De tal manera de ilustrar un ejemplo de un generador distribuido GD, en una topología radial (ver figura 13). Si ocurre una falla en el punto K1, la corriente de falla del relé más cercano R5 se aumentaría. En este momento, las zonas protegidas R1 y R3 como relés de respaldo disminuyen. Puede que la sensibilidad de los relés R1 y R3 disminuya haciendo que no funcionen correctamente. (Razavi, S.-E.; et al., 2019)

Si ocurre una falla en el punto K2, los relés R1 y R3 detectarían la falla y reaccionarían a la corriente de falla inyectada por la fuente de energía principal (generador “Es” o la red principal). Además, después de la operación de R1 y R3, la GD inyecta una corriente de falla a la ubicación de la falla, causando el retraso del reenganche del alimentador (Razavi, S.-E.; et al., 2019).

Si se produce una falla en el punto K3, el relé R1 deberá disparar correctamente para la corriente de falla debido a la alimentación principal. Simultáneamente, la corriente de falla inyectada por el GD causa un mal funcionamiento del relé R3 (Razavi, S.-E.; et al., 2019).

Si se produce una falla en el punto K4, la corriente a través del relé R7 aumenta porque el GD pone en peligro la selectividad de la protección. Respecto a esto, si los relés R1 y R3 no son bidireccionales, puede provocar un mal funcionamiento y la prolongación de la falla en todo el sistema (Razavi, S.-E.; et al., 2019).

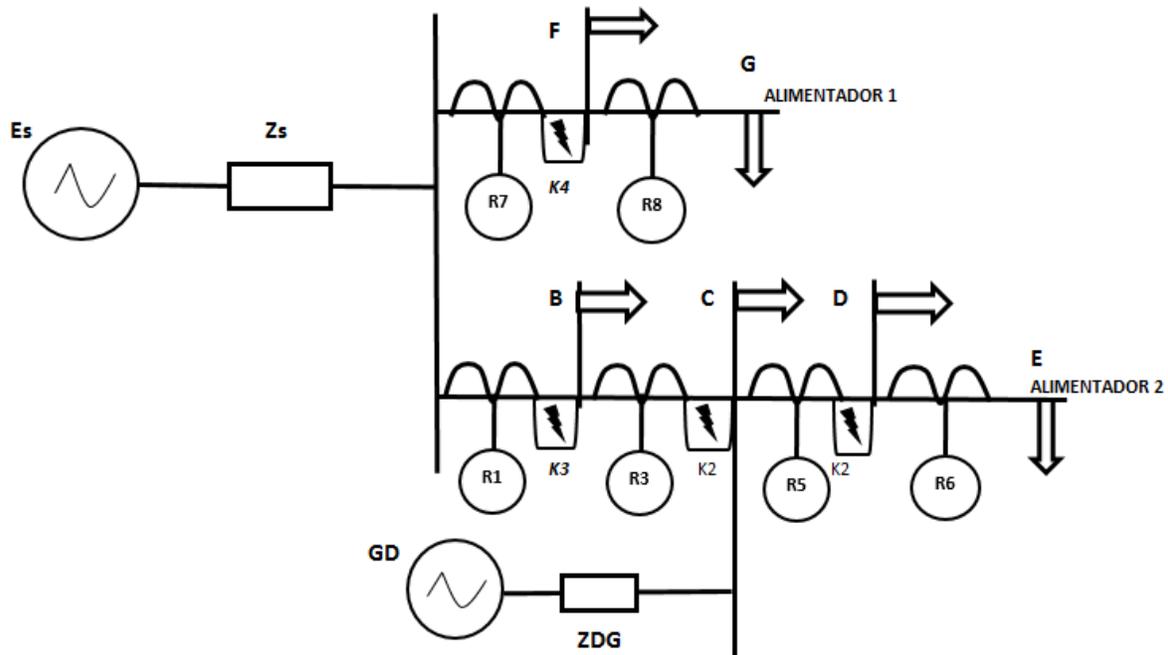


Figura 11: Ejemplo de red de esquema de protección con generación distribuida GD.

Muchos de los análisis de los esquemas de protección presentan mejoras con la entrada de la generación distribuida (GD), donde ha propuesto un método de detección de isla con GD, que requiere de una pequeña carga computacional que lo hace adecuado para los relés de protección. (Razavi, S.-E.; et al., 2019) (Ma, Ma, Wang, & Wang, 2013)

En otros, el sistema de distribución con generación distribuida GD, se puede separar en diferentes zonas, donde cada zona tiene la capacidad de operación en isla, llevando a cabo una evaluación de riesgo de las zonas de protección mediante la ubicación óptima de los dispositivos de protección. (Razavi, S.-E.; et al., 2019) (Javadian, Haghifam, Bathae, & Fotuhi Firoozabad, 2013) (Marchesan, Cardoso, & Mariotto, 2016)

3.2.4 Relés direccionales de sobrecorriente. La conexión de generación distribuida en redes de distribución en sistemas radiales, aplica para fundamentos de protección de manera direccional.

Para el caso de varias fuentes de generación distribuida conectadas a la red, las características de direccionalidad de un relé de sobrecorriente debe ser bien implementadas ya que en su estado normal los relés de sobrecorriente son incapaces de detectar flujos de corriente bidireccionales, por tanto, para mitigar el riesgo de falla en la línea protegida se recomienda que los elementos de protección tengan incluidos la función de bidireccionalidad de corriente. (Norshahrani, Mokhlis, Abu Bakar, Jamian, & Sukumar, 2017)

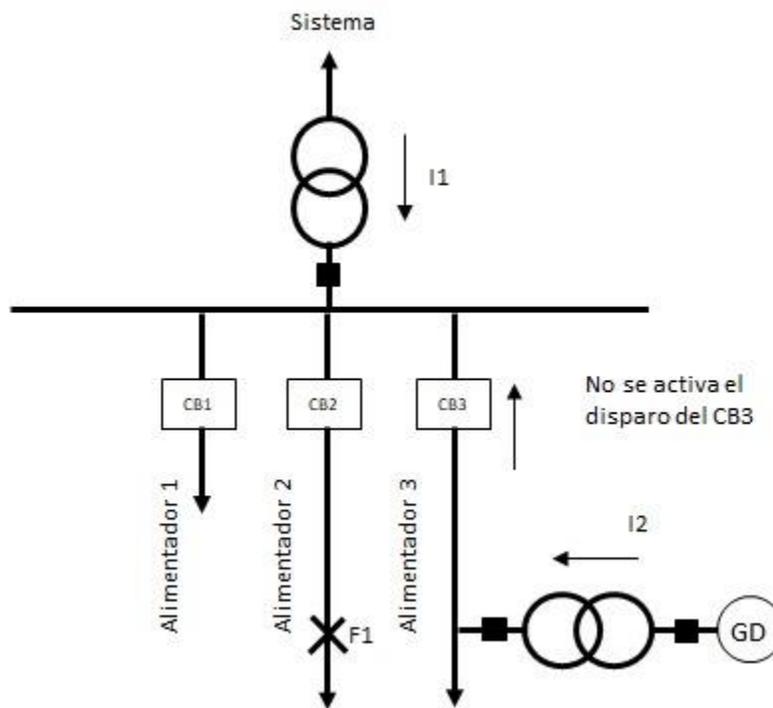


Figura 12: Ejemplo de falso efecto de disparo en NDOCR de CB3 debido a una falla en el alimentador 2

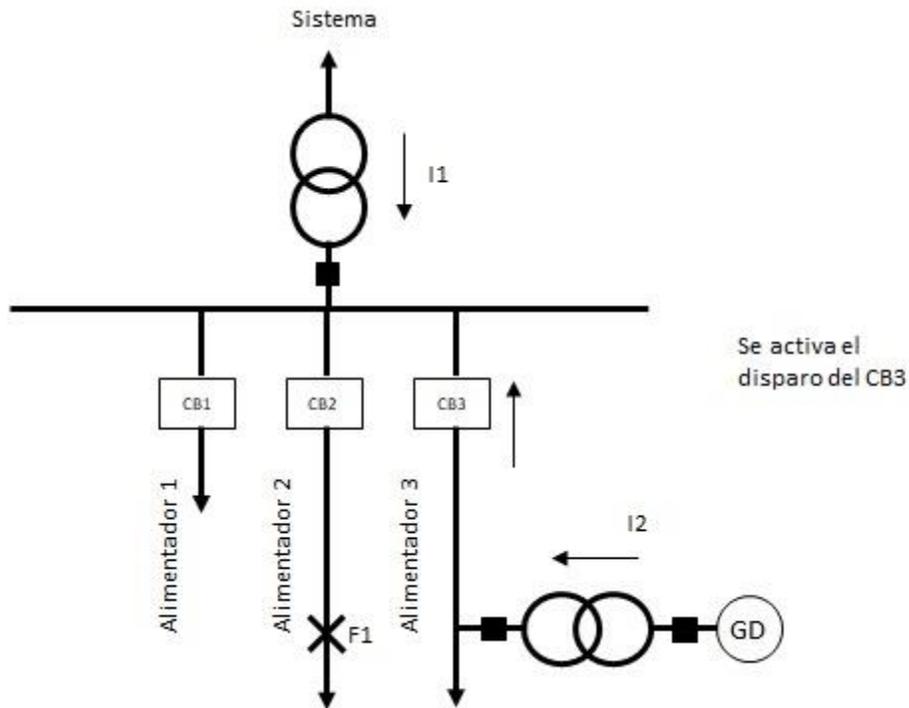


Figura 13: Ejemplo de ventaja de DOCR en CB3 para evitar que dispare debido a una falla del alimentador 2.

Las figuras 14 y 15, explican la diferencia entre un sistema de protección mediante un relé de corriente con función direccional y un relé con funciones bidireccionales el cual previene un disparo falso debido a la entrada de generación distribuida, en la primera figura la corriente de falla $F1$ causa que $CB3$ se dispare debido a un efecto falso de disparo debido a que el relé de sobrecorriente no es bidireccional (NDOCR) detecta la falla de la línea 2. Esto ocurre cuando hay generadores distribuidos conectados a la red de distribución, en este caso un generador eólico.

La figura 15 muestra una correcta selectividad y coordinación mediante el uso de relés con funciones bidireccionales (DORC), esta característica para $CB3$ solo detecta una falla directa y por lo tanto no se disparó debido al impacto de la falla que ocurre en el alimentador adyacente, la

función DORC (relé de sobrecorriente bidireccional). (Norshahrani, Mokhlis, Abu Bakar, Jamian, & Sukumar, 2017)

De este análisis surge una estrategia que utiliza la configuración dual (DORC) para proteger los sistemas enmallados en presencia de generación distribuida. Los relés de configuración dual están programados con dos características inversas de tiempo-corriente las cuales van de acuerdo al evento de falla que ocurra y formuladas usando una optimización de programación no lineal. Este tipo de estrategia se compara con la convencional para el relé direccional de acuerdo a la IEEE 30 y se evidencio una mejora del 50% en el relevo total del tiempo de funcionamiento sin importar la ubicación de la generación distribuida en la red de distribución. (Norshahrani, Mokhlis, Abu Bakar, Jamian, & Sukumar, 2017)

4. Conclusiones

Las redes de distribución de media tensión tradicionales están diseñadas y proyectadas para atender la demanda desde los grandes centros de generación hasta el usuario final, además, están diseñadas para interrumpir y aislar la falla sin considerar la presencia de la generación distribuida.

La inclusión de la generación distribuida realiza aportes bajos en corrientes de falla, representando problemas potenciales en la coordinación de protecciones en las redes de los sistemas eléctricos de Colombia; esto representa un cambio necesario en la manera de planificar, gestionar el crecimiento y protección de la red, considerando la flexibilidad, confiabilidad y seguridad de esta.

Al incluir la generación distribuida se hace necesario realizar cambios en los esquemas clásicos de protección de la subestación de la red de distribución, así como en la configuración y lógica en su modo de operación, con el fin evitar interrupciones innecesarias por fallos en la coordinación.

Para establecer los impactos de la generación distribuida sobre las protecciones eléctricas, se realizó una revisión bibliográfica minuciosa en la cual se puede resaltar que las generaciones fotovoltaica y eólica en los sistemas de distribución crean impactos similares sobre las protecciones eléctricas y la consecuencia más destacada es la pérdida de coordinación en la red.

Los efectos adversos sobre los dispositivos de protección en la red de distribución corresponden en gran parte a la generación fotovoltaica, esto debido a que es la más común y masificada en los sistemas de distribución.

Con este trabajo de monografía, se expone la influencia de la inyección de la generación en las redes de distribución y por consiguiente la afectación en la protección de las redes de distribución, las cuales tendrán que adaptarse con la inclusión de la generación en la red con flujos bidireccionales dependiendo de la demanda para mantener la selectividad, fiabilidad, seguridad, velocidad y sensibilidad del sistema sin afectar a los usuarios del servicio de energía.

Referencias Bibliográficas

- Akmal, M., Al-Naemi, F., Iqbal, N., Al-Tarabsheh, A., & Meegahapola, L. (2019). Impact of Distributed PV Generation on Relay Coordination and Power Quality», en . *IEEE Milan PowerTech, Milan, Italy*, doi: 10.1109/PTC.2019.8810791, 1-6.
- Alam, M. N., Das, B., & Pant, V. (2018). Optimum recloser–fuse coordination for radial distribution systems in the presence of multiple distributed generations. *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, n.o 11 doi: 10.1049/iet-gtd.2017.1532, 2585-2594.
- Bayod Rújula, Á. A. (2009). *Energías renovables: sistemas fotovoltaicos*. Zaragoza: UNKNOWN: Prensas de la Universidad de Zaragoza.
- Blackburn, J. L., & Domin, T. J. (1997). *Protective Relaying: Principles and Applications, Second Edition* . CRC Press.
- Bordons, C., García-Torres, F., & Valverde, L. (2015). Gestión Óptima de la Energía en Microrredes con Generación Renovable. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, vol. 12, n.o 2, doi: 10.1016/j.riai.2015.03.001, 117-132.
- Conejo, A. J., Arroyo, J. M., & Milano, F. (2007). *Instalaciones eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill España.
- Eismin, T. K. (2019). *Generator Control*. New York: McGraw-Hill Education.
- Equinoccio. (2008). *Proyecto del sistema de distribución eléctrico. Procesamiento e interpretación* .
- Espina Alvarado, J. (s.f.). *Caracterización de la Carga en Sistemas Eléctricos de Distribución*.

- Girgis, A., & Brahma, S. (2001). Effect of distributed generation on protective device coordination in distribution system. *LESCOPE 01. 2001 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering. Conference Proceedings. Theme: Powering Beyond (Cat. No.01ex490), Halifax, NS, Canada doi: 10.1109/LESCPE.2001.941636*, 115-119.
- Gutiérrez, R. A., & Hernández, H. D. (2015). *Evaluación de esquemas de protección integral en redes de distribución radial de media tensión con generación distribuida*.
- Hatziargyriou, N. et al. (2000). *Modeling new forms of generation and storage TF 38.01.10*.
- IEEE. (s.f.). *IEEE Guide for Automatic Reclosing of Line Circuit Breakers for AC Distribution and Transmission Lines*.
- IEEE. (s.f.). *IEEE Standard for Inverse-Time Characteristics Equations for Overcurrent Relays*.
- Il-Kyoung, Y., Sung-Hun, L., Jae-Chul, K., & Ok-Bae, H. (2010). Study on Protection Coordination Between Protective Devices in a Power Distribution System With an SFCL. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 20, n.o 3, doi: 10.1109/TASC.2010.2040267, 1168-1171.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Industry Applications Society. (1986). *IEEE Standards Board, y American National Standards Institute, Eds., IEEE recommended practice for protection and coordination of industrial and commercial power systems: an American national standard*. New York, NY, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers : Distributed in cooperation with Wiley-Interscience.
- Javadian, S. A., Haghifam, M.-R., Bathaee, S. M., & Fotuhi Firoozabad, T. M. (2013). Adaptive centralized protection scheme for distribution systems with DG using risk analysis for protective devices placement. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 44, n.o 1, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.07.056. , 337-345.
- Khederzadeh, M., Javadi, H., & Mousavi, S. M. (2010). Source type impact of Distributed Generation (DG) on the distribution protection. *en 10th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP). Managing the Change, Manchester UK*, doi: 10.1049/cp.2010.0299, 24-24.

- Ma, J., Ma, W., Wang, X., & Wang, Z. (2013). A New Adaptive Voltage Protection Scheme for Distribution Network With Distributed Generations. *Can. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 36, n.o 4 doi: 10.1109/CJECE.2014.2302858, 142-151.
- Marchesan, G. M., Cardoso, G., & Mariotto, L. D. (2016). Method for distributed generation anti-islanding protection based on singular value decomposition and linear discrimination analysis. *Electric Power Systems Research*, vol. 130, 124-131.
- Mason, C. R. (2015). *The Art & Science of Protective Relaying*, C. Russell Mason. Protective Relaying. Bukupedia.
- Mendes, M. A., Vargas, M. C., Batista, O. E., & Simonetti, D. S. (2018). A review on the methods for mitigate the impacts of photovoltaic distributed generation in power systems protection. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, Niteroi, doi: 10.1109/SBSE.2018.8395867, 1-6.
- Mohammadzadeh, N., Mohammadi Chabanloo, R., & Ghotbi Maleki, M. (2019). Optimal coordination of directional overcurrent relays considering two-level fault current due to the operation of remote side relay. *Electric Power Systems Research*, vol. 175, doi: 10.1016/j.epsr.2019.105921, 105921.
- Montecelos, J. T. (2016). *Sistemas eléctricos en centrales*. Ediciones Paraninfo, S.A.
- Nichols, W. H., & Castro, C. A. (1990). Power system phase rotation and polarized protective relays. *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 26, n.o 6, doi: 10.1109/28.62390, 1075-1080.
- NOJA-581-06 NOJA Power OSM15-27-38 Guia de Producto - es_4.pdf. (s.f.).
- Norshahrani, M., Mokhlis, H. A., Abu Bakar, H. J., Jamian, J., & Sukumar, S. (2017). Progress on Protection Strategies to Mitigate the Impact of Renewable Distributed Generation on Distribution Systems. *Energies (19961073)*, vol. 10, n.o 11, 1864.
- Pérez Rodríguez, M. D. (2012). *Gestión de operación y puesta en servicio de instalaciones de energía eólica (2a. ed.)*. Madrid: ICB.

- Pholborisut, N., Saksornchai, T., & Eua-arporn, B. (2011). Evaluating the impact of distributed generation on protection system coordination using protection miscoordination index. *The 8th Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand - Conference 2011, Khon Kaen, Thailand*, doi: 10.1109/ECTICON.2011.5947977, 865-868.
- Qin, L., Wang, Y., Hao, C., & Li, M. (2011). Multi-Agent System wide area protection considering distributed generation impact. *International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, Beijing, China*, doi: 10.1109/APAP.2011.6180462, 549-553.
- Ramírez Castaño, J. (2003). *Protección de Sistemas Eléctricos*.
- Razavi, S.-E.; et al. (2019). Impact of distributed generation on protection and voltage regulation of distribution systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 105, doi: 10.1016/j.rser.2019.01.050., 157-167.
- Real-Calvo, R., Moreno-Munoz, A., Pallares-Lopez, V., Gonzalez-Redondo, M. J., Moreno-Garcia, I. M., & Palacios-Garcia, E. J. (2017). Sistema Electrónico Inteligente para el Control de la Interconexión entre Equipamiento de Generación Distribuida y la Red Eléctrica. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, vol. 14, n.o 1, doi: 10.1016/j.riai.2016.11.002, 56-69.
- Reza, M., Chabanloo, H., Askarian, A., Somayeh, S., Hashemi, K., & Razavi, F. (2008). A new genetic algorithm method for optimal coordination of overcurrent and distance relays considering various characteristics for overcurrent relays. *IEEE 2nd International Power and Energy Conference, Johor Bahru, Malaysia*, doi: 10.1109/PECON.2008.4762540, 569-573.
- Ruschel, W. J., & Ashley, A. W. (1989). Coordination of relays, reclosers, and sectionalizing fuses for overhead lines in the oil patch. *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 25, n.o 6, doi: 10.1109/28.44240, 1041-1048.
- Sarabia, A. F. (s.f.). *Impact of distributed generation on distribution system*.
- Sherbilla, N. F., Kawady, T. A., Elkalashy, N. I., & Taalab, A.-M. I. (2011). Modified setting of overcurrent protection for distribution feeders with distributed generation. *IET Conference*

on Renewable Power Generation (RPG 2011), Edinburgh, UK, doi: 10.1049/cp.2011.0168, 173-173.

Short, T. A. (2018). *Electric Power Distribution Handbook*. CRC Press.

Singh, M. (2016). Zone-2 setting of distance relays using user defined time-inverse over current relay characteristics. *2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Dallas, TX, USA, doi: 10.1109/TDC.2016.7519864, 1-5.*

Srivastava, M. K., & Bhogal, N. (2007). *Protective Relays*. McGraw-Hill.

Torres, E., Mazon, A. J., Zamora, E., & Pérez Quesada, J. (2007). *New fem model for thermal analysis of medium voltage fuses.*

Tuta, Ó. F., & Hincapié, R. (2011). Coordinación óptima de dispositivos de protección en sistemas de distribución con presencia de generación distribuida. *Scientia et technica, vol. 3, n.o 49, doi: 10.22517/23447214.1457, 14-19.*

Univ. Nacional de Colombia. (s.f.). *Redes de Distribucion de Enetgia.*

Wang, Y., Qin, L., Guo, Q., & Jin, H. (2011). The study of CIM based relay protection model considering Distributed Generation. *International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, Beijing, China,doi: 10.1109/APAP.2011.6180670, 1875-1879.*

Zapata, C. J., & Mejía, G. E. (2003). Coordinación de relés de sobrecorriente en sistemas enmallados utilizando programación lineal. *Scientia et technica, vol. 3, n.o 23, , doi: 10.22517/23447214.7373.*