



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, SISTEMAS Y  
TELECOMUNICACIONES  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**METODOLOGÍA PARA LA UBICACIÓN DE RECONECTADORES EN  
SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN**

**MODALIDAD PRÁCTICA EMPRESARIAL – CENTRALES ELÉCTRICAS DE  
NORTE DE SANTANDER CENS**

**AUTOR: MARÍA DANIELA VILLAMIZAR JAIMES**

**DIRECTOR: EDISON ANDRÉS CAICEDO PEÑARANDA**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,  
SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
PAMPLONA N. DE S. – COLOMBIA  
JULIO 2021  
METODOLOGÍA PARA LA UBICACIÓN DE RECONECTADORES EN  
SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN**

**AUTOR: MARÍA DANIELA VILLAMIZAR JAIMES**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO  
ELÉCTRICO**

**DIRECTOR: EDISON ANDRÉS CAICEDO PEÑARANDA**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,  
SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
PAMPLONA N. DE S. – COLOMBIA  
JULIO 2021**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA ELECTRÓNICA SISTEMAS  
Y TELECOMUNICACIONES  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**AUTORIZACIÓN PARA SUSTENTAR  
TRABAJO PRESENTADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**METODOLOGÍA PARA LA UBICACIÓN DE RECONECTADORES EN  
SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN**

**FECHA DE INICIO DEL TRABAJO: 1 - MARZO- 2021**

**FECHA DE TERMINACIÓN DEL TRABAJO: 09 - JULIO - 2021**

**NOMBRES Y FIRMAS DE AUTORIZACIÓN PARA SUSTENTAR**

**AUTOR: MARÍA DANIELA VILLAMIZAR JAIMES**

**DIRECTOR: EDISON ANDRÉS CAICEDO PEÑARANDA**

**DIRECTOR DE PROGRAMA: YESID SANTAFÉ**

**JURADO CALIFICADOR:**

**PRESIDENTE: ING. \_\_\_\_\_**

**OPONENTE: ING \_\_\_\_\_**

**SECRETARIO: ING. \_\_\_\_\_**

**PAMPLONA, COLOMBIA**

**JULIO 2021**

## **DEDICATORIA**

A mi madre Gladis, por ser el cimiento de mi vida, gracias por ser mi motivación y apoyo constante a lo largo de estos años.

A mi padres y hermanos por ayudarme a trazar este camino, y ser partícipes de este logro.

## **AGRADECIMIENTOS**

*“A mi familia: a mi madre Gladis, a mi padre José, a mis hermanos: Klarena, Andrea, Sandra y Javier, a mis sobrinos, quienes durante mi etapa de formación profesional fueron mi principal motivación para lograr los objetivos propuestos.*

*De igual manera, durante este proceso no solo crecí como profesional, si no a nivel personal, y conocí seres humanos increíbles con los que compartí muchos momentos, agradezco a ellos, mis amigos: Dimas, Fabián, Oscar, Sergio, Yeiner.*

*Agradezco al ingeniero Edison Andrés Caicedo por ser mi director de trabajo de grado, quien brindó su apoyo y conocimientos para la culminación de esta etapa”.*

## CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN .....	14
2.	OBJETIVOS .....	16
2.1	OBJETIVO GENERAL .....	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	17
3.1	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	17
4.	MARCO TEÓRICO .....	18
4.1	BASES CONCEPTUALES.....	18
4.1.1	RECONECTADORES.....	18
4.1.2	SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN .....	19
4.1.3	CIRCUITOS PRIMARIOS DE DISTRIBUCIÓN .....	22
4.1.4	FIABILIDAD.....	23
4.1.5	PARÁMETROS DE CONFIABILIDAD .....	24
4.1.6	TASA DE FALLA.....	24
4.1.6	TIEMPOS DE REPARACIÓN:.....	24
4.1.7	ÍNDICES DE CONFIABILIDAD .....	25
4.1.8	SAIDI .....	25
4.1.9	SAIFI.....	26
5.	ESTRATEGIAS METODOLÓGICAS PARA LA UBICACIÓN DE RECONECTADORES EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE MT. ....	27
5.1	UBICACIÓN ÓPTIMA DE DISPOSITIVOS DE CONMUTACIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN RADIAL. ....	27
5.2	UBICACIÓN ÓPTIMA DE DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN EN REDES DE DISTRIBUCIÓN BASADA EN ANÁLISIS DE RIESGOS.....	27
5.3	PLANIFICACIÓN Y OPERACIÓN ÓPTIMAS DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN TENIENDO EN CUENTA LOS RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUIDOS Y LOS RECONECTADORES AUTOMÁTICOS. ....	28
5.4	UBICACIÓN ÓPTIMA DE RECONECTADORES NORMALMENTE ABIERTOS PARA TRANSFERENCIA DE CARGA. ....	28
5.5	UBICACIÓN ÓPTIMA DE RECONECTADORES EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN PARA MINIMIZAR LA FRECUENCIA MEDIA DE INTERRUPCIÓN. ....	30
5.6	UBICACIÓN ÓPTIMA MULTIOBJETIVO DE INTERRUPTORES Y DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE	

<b>ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE LA OPTIMIZACIÓN DE COLONIAS DE HORMIGAS.....</b>	<b>30</b>
<b>5.7 UBICACIÓN ÓPTIMA DE ELEMENTOS DE PROTECCIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA. ....</b>	<b>31</b>
<b>5.8 IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTRATEGIA PARA LA UBICACIÓN DE PROTECCIONES DE SOBRECORRIENTE EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN EMPLEANDO UN ALGORITMO GENÉTICO. ....</b>	<b>31</b>
<b>5.9 UTILIZACIÓN DE ALGORITMOS GENÉTICOS PARA LA UBICACIÓN ÓPTIMA DE RECONECTADORES EN REDES RADIALES DE DISTRIBUCIÓN – APLICACIÓN A LA EMPRESA ELÉCTRICA QUITO.....</b>	<b>32</b>
<b>6. MÉTODOS DE UBICACIÓN DE RECONECTADORES BASADOS SUS REQUERIMIENTOS Y EN LA INCIDENCIA EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN. ..</b>	<b>33</b>
<b>7. SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE LA UBICACIÓN DE LOS RECONECTADORES EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE MT EN CENS. ....</b>	<b>40</b>
<b>7.1 DESCRIPCIÓN DE DIGSILENT POWER FACTORY .....</b>	<b>41</b>
<b>7.2 DESCRIPCIÓN DEL CIRCUITO EN MT. ....</b>	<b>42</b>
<b>7.2 CASO I .....</b>	<b>44</b>
<b>7.3 CASO II .....</b>	<b>45</b>
<b>7.4 CASO III .....</b>	<b>47</b>
<b>8. GUÍA CON LOS MÉTODOS SELECCIONADOS PARA LA UBICACIÓN DE RECONECTADORES EN MT PARA CENS. ....</b>	<b>50</b>
<b>8.1 OBJETO .....</b>	<b>50</b>
<b>8.2 ALCANCE .....</b>	<b>50</b>
<b>8.3 DEFINICIONES .....</b>	<b>50</b>
<b>8.4 CRITERIOS GENERALES PARA LA UBICACIÓN DE RECONECTADORES .....</b>	<b>51</b>
<b>8.4.1 PARÁMETROS REGULATORIOS .....</b>	<b>51</b>
<b>8.4.2 TIPO DE CARGAS AGUAS ABAJO DEL EQUIPO .....</b>	<b>51</b>
<b>8.4.3 EVALUACIÓN DE INDICADORES DE CALIDAD DEL SERVICIO .....</b>	<b>52</b>
<b>8.4.4 LONGITUD DEL CIRCUITO, TOPOLOGÍA Y DISTRIBUCIÓN DE LA CARGA. ....</b>	<b>52</b>
<b>8.4.5 COORDINACIÓN DE PROTECCIONES.....</b>	<b>52</b>

8.4.7 ACCESO AL PUNTO DE INSTALACIÓN.....	52
8.4.8 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL EQUIPO. ....	53
8.5 CRITERIOS TÉCNICOS DE UN RECONECTADOR. ....	53
8.6 METODOLOGÍA PARA LA UBICACIÓN DE RECONECTADORES .....	55
8.6.1 METODOLOGÍA PROPUESTA: .....	55
8.6.2 CARACTERÍSTICAS.....	55
8.6.2 PROCEDIMIENTO DE LA METODOLOGÍA .....	56
9.    CONCLUSIONES .....	57
10.  BIBLIOGRAFÍA .....	59

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1. Comparación de los métodos seleccionados.....</b>	<b>39</b>
<b>Tabla 2. Especificaciones circuito SANC43.....</b>	<b>42</b>
<b>Tabla 3. Especificaciones de sección del circuito de estudio SANC43. ....</b>	<b>43</b>
<b>Tabla 4. Especificaciones de índices de confiabilidad de la red sin reconectores. ....</b>	<b>45</b>
<b>Tabla 5. Especificaciones de índices de confiabilidad de la red con tres reconectores. ....</b>	<b>45</b>
<b>Tabla 6. Especificaciones de índices de confiabilidad de la red con ocho reconectores. ....</b>	<b>47</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1. Reconectador. ....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 2. Descripción general de la infraestructura del sistema eléctrico. ...</b>	<b>20</b>
<b>Figura 3. Descripción general de la infraestructura del sistema eléctrico. ...</b>	<b>22</b>
<b>Figura 4. Ejemplo de circuito primario en un sistema de distribución. ....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 5. Datos de entrada del alimentador bajo estudio.....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 6. Datos de entrada de alimentadores vecinos bajo estudio. ....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 7. Diagrama de flujo de un Algoritmo Genético básico. ....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 8. Diagrama de esquemático del Algoritmo Multiobjetivo NSGA II. ...</b>	<b>35</b>
<b>Figura 9. Diagrama de flujo del Algoritmo Multiobjetivo NSGA II.....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 10. Criterios para la selección de los métodos. ....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 11. Diagrama general para el estudio de confiabilidad.....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 12. Circuito SANC43. . ....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 13. Sección de estudio.. ....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 14. Sección de estudio en DlgSILENT Power Factory sin reconectores. ....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 15. Sección de estudio en DlgSILENT Power Factory ingresando tres reconectores en la red.. ....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 16. Sección de estudio en DlgSILENT Power Factory ingresando ocho reconectores en la red.. ....</b>	<b>48</b>

## LISTA DE GRÁFICAS

<b>Gráfica 1. Índices de confiabilidad sin reconectores en los tramos de la red</b> .....	<b>45</b>
<b>Gráfica 2. Índices confiabilidad con tres reconectores en los tramos de la red.</b> .....	<b>46</b>
<b>Gráfica 3. Índices confiabilidad con ocho reconectores en los tramos de la red.</b> .....	<b>47</b>
<b>Gráfica 4. Índices de confiabilidad con ocho reconectores en la red.</b> .....	<b>49</b>

## **RESUMEN**

En este libro se presenta el diseño de una metodología para la ubicación de reconectores en sistemas de distribución en Centrales Eléctricas de Norte de Santander (CENS), donde se inició por determinar las estrategias metodológicas con el fin de la selección de los métodos basados sus requerimientos y en las incidencias en la red de distribución, el cual utilizó como una orientación, para evaluar posibles soluciones a diferentes problemas que se presentan en la alteración del sistema, y así mismo, para verificar el desempeño de la metodología se realizó una simulación de los efectos de la ubicación de reconectores en MT.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el sistema de distribución de energía, la ubicación de los dispositivos de protección como los reconectores se está volviendo importante. Este tipo de factores están directamente relacionados con la calidad y continuidad del servicio, debido a que durante el desarrollo de la obra se produce una falla temporal o permanente del sistema que afecta al usuario. Estas fallas fueron cuantificadas midiendo su frecuencia de aparición, así como la duración. Las diferentes metodologías exponen criterios y estrategias para la solución al problema. Los reconectores son elementos de protección que mejoran significativamente los índices de fiabilidad de un sistema por la característica que tienen de diferenciar entre una falla permanente o por el contrario una falla temporal. A continuación, los trabajos más relevantes que se han adoptado a la temática. En 1996 R. Billinton and S. Jonnavithula [1], realizan un trabajo titulado "Ubicación óptima del dispositivo de conmutación en sistemas de distribución radial ", En este trabajo se propuso una metodología para localizar los elementos de protección. Tiene en cuenta el costo de la disponibilidad del servicio, los costos de mantenimiento y la inversión del sistema. De manera similar, se construye como un modelo de programación no lineal de números enteros [1]. En 2009 Tippachon, W., Rerkpreedapong, D. [2] realizan una investigación que toma por nombre "Ubicación óptima multiobjetivo de interruptores y dispositivos de protección en sistemas de distribución de energía eléctrica mediante la optimización de colonias de hormigas", en este trabajo se realizó una trabajo de optimización multiobjetivo para localizar elementos como interruptores y dispositivos de protección en los sistemas, por lo cual, se basaron en la optimización multiobjetivo de colonias de hormigas, con el fin minimizar el costo total y al mismo tiempo minimizar dos índices de confiabilidad (SAIFI y SAIDI) [2]. En 2010 S. A. M. Javadian and M. -Haghifam, publicaron un trabajo de investigación titulado " Ubicación óptima de dispositivos de protección en redes de distribución basada en análisis de riesgo ", Este trabajo presentó una metodología para identificar los elementos de protección de los sistemas de distribución local

que brindan generación de energía descentralizada. Se centra en dividir el diagrama de red en varias áreas. La división se realiza teniendo en cuenta la capacidad de la fuente de energía distribuida y la carga en su ubicación y región. Los límites del sitio se determinan utilizando una estrategia basada en dicho análisis de riesgo [3].

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar una metodología para la ubicación de reconectores en sistemas de distribución de Centrales Eléctricas de Norte de Santander (CENS).

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Determinar las estrategias metodológicas para la ubicación de reconectores en redes de distribución de MT.
2. Seleccionar los métodos de ubicación de reconectores basados sus requerimientos y en la incidencia en la red de distribución.
3. Simular los efectos de la ubicación de los reconectores en redes de distribución de MT en CENS.
4. Desarrollar una guía con los métodos seleccionados para la ubicación de reconectores en MT para CENS.

### **3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN**

El sistema de distribución se encarga de suministrar energía a los usuarios del sistema eléctrico, asegurando estándares de calidad, confiabilidad y continuidad al menor costo posible [4]. La operación de un sistema de distribución se expone a diferentes dificultades como variaciones de frecuencia, perturbaciones de voltaje y corriente, cortocircuitos, así mismo, elementos del sistema. “La ubicación de los reconectores es un tema que está teniendo buen posicionamiento en el sector eléctrico, en especial para los operadores de red, haciendo de esta temática un área de investigación en desarrollo, que aún falta por explorar y que, además, presenta una gran cantidad de investigaciones y proyectos orientados a mejorar o solucionar este problema” [4].

Los operadores de red tienen información y mayor control del estado operativo del sistema continuamente, por cual disminuyen los tiempos y así mejorar la calidad de los servicios eléctricos mediante la reparación del sistema y el tiempo de recuperación. La introducción de estos dispositivos de protección en los sistemas de energía son uno de los primeros pasos en la transición a una red inteligente. Los reconectores permiten de manera automática junto a otros reconectores ya instalados, la restauración de usuarios mediante operaciones de cierre/apertura de sus contactos, para la disminución de la energía no servida luego de la presencia de una falla. Un problema que se presenta es que debido que la longitud de los circuitos, la gran cantidad de ramas y la variedad de la demanda, la ubicación del reconector es considerada un problema de optimización combinatoria ya que presentan diversas alternativas de solución “[5].

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1 BASES CONCEPTUALES

En esta sección se presentan diferentes conceptos básicos que se consideraron necesarios para el desarrollo de la metodología, así mismo, no se profundizan en estos conceptos, debido a que, no es el objetivo de este estudio.

#### 4.1.1 RECONECTADORES

Según la definición dada por la norma IEEE Std C37.100-1992 (R 2001). *IEEE Standard Definitions for Power Switchgear*, para un reconectador: *“Dispositivo autocontrolado para la interrupción y reconexión automáticas de un circuito de corriente alterna, con una secuencia predeterminada de apertura y reconexión seguida de una operación de reposición, mantenimiento de cierre o bloqueo”* [6].

En la distribución de energía eléctrica el reconectador automático es un equipo que, al detectar una condición anormal en la red, es decir, una posible sobrecorriente momentánea causada por diversos factores que pueden influir en él, procede a interrumpir el flujo, y una vez, que ha transcurrido un tiempo determinado cierra sus contactos nuevamente, por lo cual, el circuito se energiza de nuevo. En caso de que la condición de falla transitoria persista, el equipo reitera la secuencia de cierre-apertura en un número de veces, esta secuencia está dada por máximo cuatro iteraciones. Después de la cuarta operación, los contactos del equipo quedan abiertos definitivamente [7].



Figura 1. Reconectador. [8].

#### 4.1.2 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Los sistemas de distribución hacen parte fundamental de los sistemas eléctricos de potencia, que toda la potencia generada se debe distribuir entre los usuarios que hacen uso de este importante servicio, que además de estos se encuentran distribuidos en grandes territorios con cargas de diferentes magnitudes. Así mismo, en los sistemas de distribución se concentra una mayor carga económica, debido a que, la potencia generada representa costos altos por la cantidad de usuarios en las que se divide [9].

Ramírez (2004), argumenta que un sistema de distribución de energía eléctrica como “el conjunto de elementos asociados al sistema que permiten energizar de forma segura y fiable un número determinado de cargas en distintos niveles de tensión, que se ubican en diferentes zonas y de igual manera en diferentes configuraciones que depende de las características de las cargas, la energía involucrada del sistema, así como también las condiciones de fiabilidad y seguridad a las que deben operar. Los sistemas de distribución se catalogan en: industriales, comerciales, urbanos, y rurales [7].”

Citando a la norma *IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices* [10], define a un sistema de distribución como “un sistema eléctrico que entrega la energía eléctrica desde los lugares de transformación en el sistema de transmisión hasta el cliente, sin embargo, el sistema de distribución se considera generalmente como cualquier equipo comenzando en la subestación de distribución hasta el medidor del usuario final.”

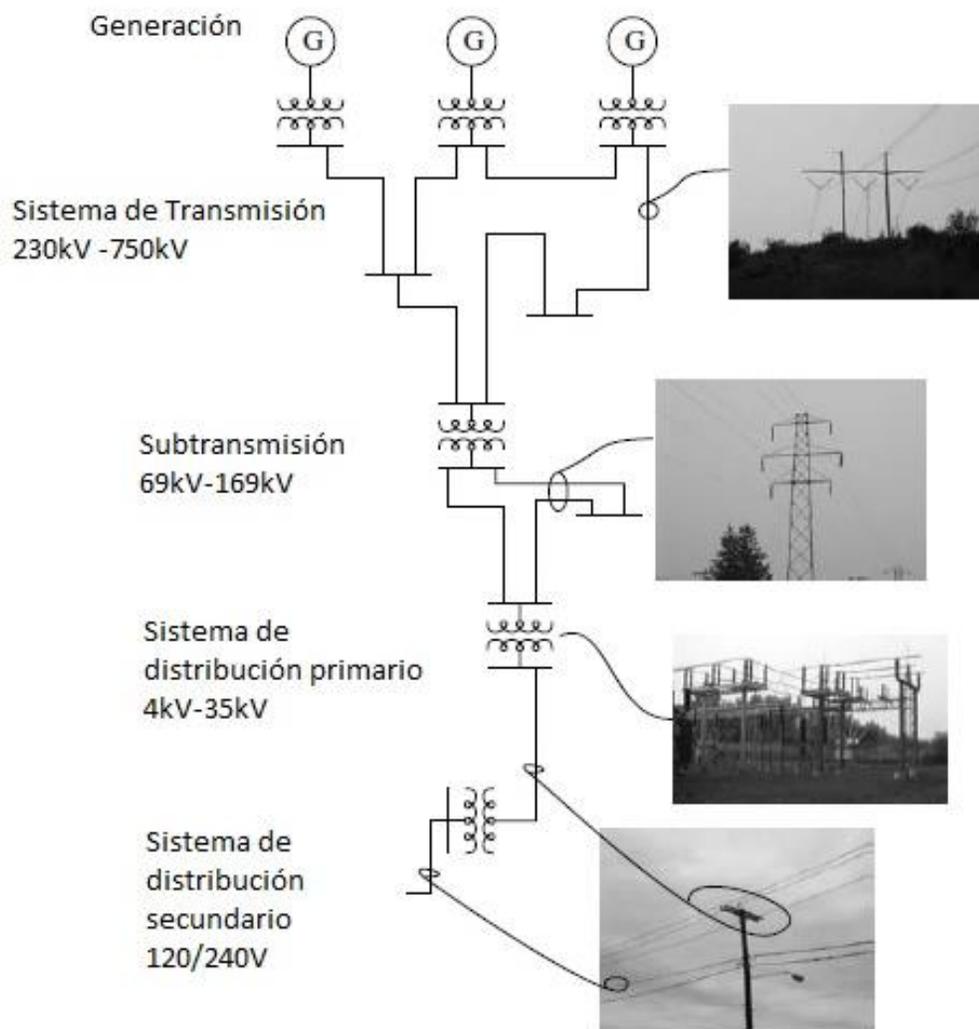


Figura 2. Descripción general de la infraestructura del sistema eléctrico.[11]

Según [10], mediante la tabla se describe como está conformado un sistema de distribución de energía eléctrica. Para la evaluación de la metodología se profundiza en circuitos primarios, el cual cuenta con niveles de tensión en el rango de media tensión, que para circuitos de CENS trabajan a nivel de operación de 13.8kV.

<b>NOMBRE</b>	<b>NIVEL DE TENSIÓN DE OPERACIÓN</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>Subestaciones receptoras secundarias</b>	115kV, 34,5kV	Transformación de niveles de tensión provenientes de líneas de subtransmisión.
<b>Circuitos primarios</b>	13.2 kV, 11.4 kV, 7620 V	Proporciona potencia a los transformadores de distribución.
<b>Transformadores de distribución</b>	Transformadores de distribución	Suministra potencia a los usuarios o abonados conectados al circuito secundario.
<b>Circuito secundario</b>	120/208 - 120/240 V y en general voltajes hasta 600 V.	Distribución de energía a usuarios.

*Tabla 1. Descripción de conformación de un sistema de distribución [10].*

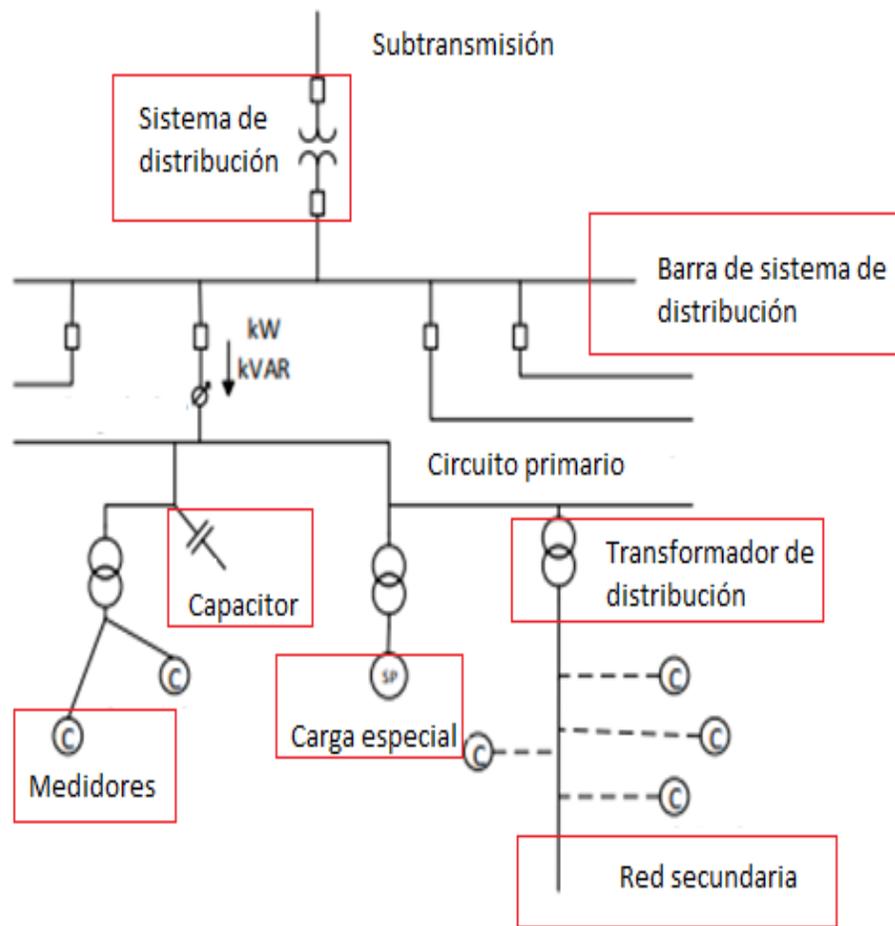


Figura 3. Descripción general de la infraestructura del sistema eléctrico. [11]

#### 4.1.3 CIRCUITOS PRIMARIOS DE DISTRIBUCIÓN

Los circuitos primarios surgen de las subestaciones de distribución y atraviesan grandes áreas para llevar el suministro del servicio de energía a los circuitos secundarios y ahí poder alimentar a los usuarios, de esta manera las redes de energía eléctrica alcanzan en su mayoría longitudes de gran tamaño con diferentes tipos de configuraciones. A continuación, mediante la imagen se describen cada uno de los componentes.

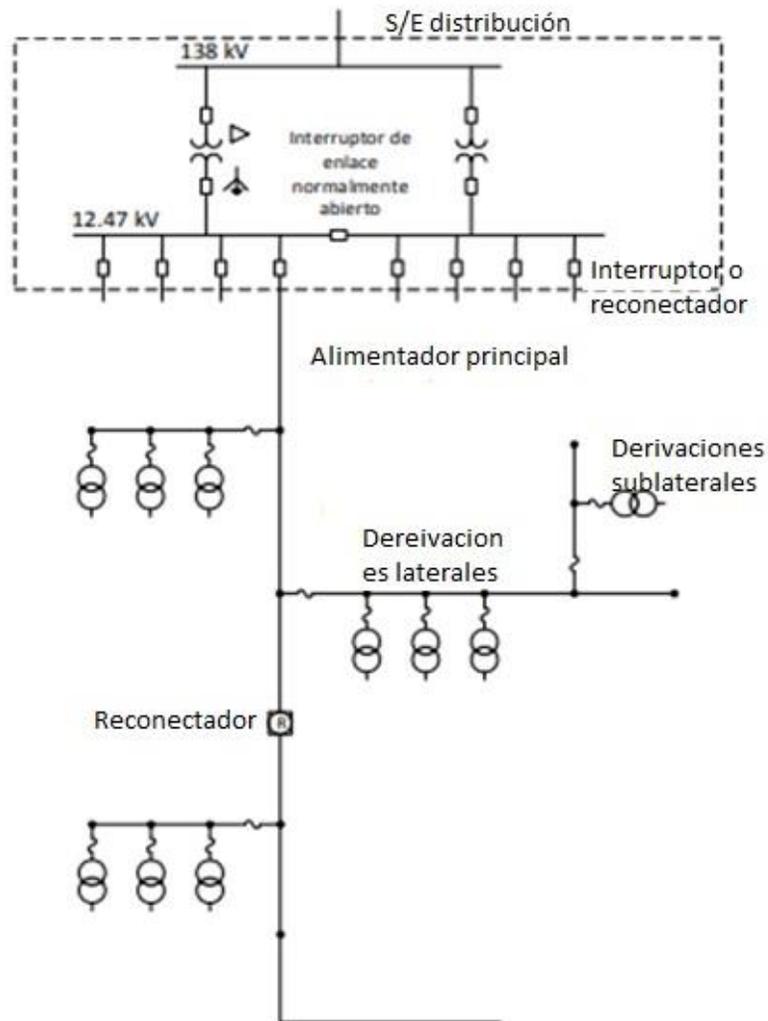


Figura 4. Ejemplo de circuito primario en un sistema de distribución.[11]

#### 4.1.4 FIABILIDAD

La fiabilidad tiene que ver con las interrupciones eléctricas totales, es decir, con la pérdida completa de tensión, no sólo con las deformaciones de la onda sinusoidal eléctrica. La fiabilidad no incluye las caídas, las subidas, los impulsos o los armónicos. Los índices de fiabilidad suelen tener en cuenta criterios como el número de cliente, la carga suministrada, el tiempo de la interrupción medida en

segundos, minutos, horas o días, así como también, la cantidad de energía (kVA) interrumpida; y la frecuencia de las interrupciones. [12]

#### **4.1.5 PARÁMETROS DE CONFIABILIDAD**

Según [13], para analizar la confiabilidad del sistema necesitamos información para cada uno de los componentes de la red de distribución, y se clasifican: la tasa de falla y los tiempos de reparación.

#### **4.1.6 TASA DE FALLA**

Se define como el número de fallas de un componente por año causado por una salida permanente. Estas fallas pueden ser causadas por mal funcionamiento, y ocasionadas por agentes externos como: descargas atmosféricas, animales, cortocircuito, árboles, sobrecargas, fallas de aislamiento, entre otras [13].

$$\lambda = \frac{Fa}{N * T}$$

*Ecuación 1. Ecuación de tasa de fallo [13].*

Donde:

Fa: cantidad de fallas observadas para cierto tipo de componente

N: cantidad de componentes expuestos a falla.

T: periodo de observación, años.

#### **4.1.6 TIEMPOS DE REPARACIÓN:**

El tiempo de reparación hace referencia a la acción de cambio del componente motivo de la interrupción en el servicio, y además se refiere al tiempo que tarda el componente en volver a energizarse después de una ruptura del circuito. Se expresa como el tiempo promedio en el cual dura una falla de suministro, en horas;

es decir el rango de tiempo en volver a energizar el circuito y depende del tipo de protección, así como también del trabajo que se tenga realizar para despejar la falla y restablecer el servicio de energía por ejemplo maniobras de transferencia, reparaciones, limpieza, entre otras [13].

#### 4.1.7 ÍNDICES DE CONFIABILIDAD

Los índices de confiabilidad utilizados para redes eléctricas cuantifican la calidad del servicio de energía eléctrica prestado por el operador de red que presenta el sistema en cualquier punto de consumo [13]. Estos índices se pueden calcular para todo el sistema o también para puntos de carga con un nivel mayor de importancia, es decir, zonas con prioridad como áreas industriales. [13]. Los indicadores se dividen en tres grupos:

- Índices por frecuencia.
- Índices por duración.
- Índices por interrupciones momentáneas.

Los índices de confiabilidad que se estudiaron en este proyecto se mencionan en los apartados 4.1.8 y 4.1.9.

#### 4.1.8 SAIDI

Según, la CREG 015 de 2018, define al iSAIDI como: “ la duración total en horas de los eventos que en el promedio percibe cada usuario del Sistema del Distribución Local (SDL) de un operador de red (OR), sin importar si hayan sido afectadas o no por un evento, en un periodo anual” [14].

$$SAIDI_{j,t} = \sum_{m=1}^{12} \frac{\sum_{i=1}^n (D_{i,u,m} * NU_{i,u,m})}{UT_{j,m}} / 60$$

*Ecuación 2. Ecuación indicadora de calidad SAIDI.*

Donde [14]:

- $SAID_{j,t}$ : Indicador de duración promedio por usuario de los eventos sucedidos en el SDL del OR j, durante el año t, medido en horas al año.
- $D_{i,u,m}$ : Duración en minutos del evento i, sucedido durante el mes m, que afectó al activo u perteneciente al SDL del OR j.
- $NU_{i,u,m}$ : Número de usuarios que fueron afectados por el evento i sucedido durante el mes m, conectados al activo u.
- $UT_{j,m}$ : Número total de usuarios conectados al SDL del OR j en el mes m.
- m: Mes del año t con enero=1, ..., diciembre =12.

#### 4.1.9 SAIFI

Según, la CREG 015 de 2018, define al SAIFI como: “ la cantidad total de los eventos que en el promedio perciben todos los usuarios del SDL de un OR, sin importar si hayan sido afectadas o no por un evento, en un periodo anual” [14].

$$SAIFI_{j,t} = \sum_{m=1}^{12} \frac{\sum_{i=1}^n NU_{i,u,m}}{UT_{j,m}}$$

*Ecuación 3. Ecuación indicadora de calidad SAIFI.*

Donde:

- $SAIFI_{j,t}$ : Indicador de frecuencia promedio por usuario de los eventos sucedidos en el SDL del OR j, durante el año t, medido en horas al año.
- $NU_{i,u,m}$ : Número de usuarios que fueron afectados por el evento i sucedido durante el mes m, conectados al activo u.
- $UT_{j,m}$ : Número total de usuarios conectados al SDL del OR j en el mes m.
- m: Mes del año t con enero=1, ..., diciembre =12
-

## **5. ESTRATEGIAS METODOLÓGICAS PARA LA UBICACIÓN DE RECONECTADORES EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE MT.**

En este capítulo se observó las estrategias que se han aplicado en la ubicación de reconectores donde se hizo un diagnóstico de la síntesis directa, para definir los métodos que permitan la construcción de la metodología, y así, determinar el proceso correcto para solucionar el planteamiento del problema ya descrito.

### **5.1 UBICACIÓN ÓPTIMA DE DISPOSITIVOS DE CONMUTACIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN RADIAL.**

Este trabajo hace una contribución a este tema con una metodología para la ubicación de elementos de protección, en donde, se tuvo en cuenta criterios como los costos de indisponibilidad del servicio, así como también el mantenimiento e inversión del sistema. Se solucionó mediante un método de programación no lineal entero, que tiene como propósito determinar el número de interruptores de seccionamiento y la ubicación de los interruptores [1].

### **5.2 UBICACIÓN ÓPTIMA DE DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN EN REDES DE DISTRIBUCIÓN BASADA EN ANÁLISIS DE RIESGOS**

Este trabajo presentó una metodología para ubicar elementos de protección en sistemas de distribución con generación distribuida, este trabajo se basó en dividir el esquema del sistema de distribución en varias áreas. La zonificación se realizó teniendo en cuenta la capacidad y localización de los generadores distribuidos y las demanda por áreas. De igual manera, se determinaron los límites de las áreas y se estructuró la ubicación de dispositivos de protección, empleando una estrategia basada en análisis de riesgo [3].

### **5.3 PLANIFICACIÓN Y OPERACIÓN ÓPTIMAS DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN TENIENDO EN CUENTA LOS RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUIDOS Y LOS RECONECTADORES AUTOMÁTICOS.**

Grisales, Montoya, Grajales, Hincapié y Granada, en 2018, este trabajo expuso una metodología integrada para la planificación y operación de sistemas de distribución en un entorno de redes inteligentes. La metodología consta de tres etapas, en la primera se realizó un algoritmo genético especializado para la localización de dispositivos, y así mismo, en la segunda etapa se desarrolló un algoritmo de optimización de enjambre de partículas para el diseño de los elementos, en el cual también se usa un algoritmo genético de ordenación no dominante para resolver el problema multiobjetivo que se asocia a la ubicación de reconectores RNA y RNC en la red de distribución.

La metodología consistió en conectar secuencialmente tres etapas que involucraron el concepto de redes inteligentes, comúnmente conocidas como Smart Grids, estas redes utilizan elementos como los generadores distribuidos (GD), elementos almacenadores de energía (AE), y dispositivos de protección (DP), debido a las ventajas que tienen en el aislamiento de fallas y la transferencia de carga bajo diversos estados operativos. Para la ubicación de los DP, fue resuelto mediante la solución a un modelo matemático que se basa en la minimización del Nivel de Energía No Servida (NENS), y así mismo, la confiabilidad de las líneas y la regulación de tensión, por lo cual es empleado una técnica de optimización multiobjetivo NSGA II [4].

### **5.4 UBICACIÓN ÓPTIMA DE RECONECTADORES NORMALMENTE ABIERTOS PARA TRANSFERENCIA DE CARGA.**

En este trabajo se desarrolló una metodología de optimización para la ubicación de reconectores normalmente abiertos (RNA), y reconectores normalmente

cerrados (RNC), con ello se mejoraron los índices de confiabilidad del servicio en los circuitos alimentadores primarios, para dar solución al problema se realizó un algoritmo de búsqueda global para mejorar el proceso de ubicación de los RNAs para transferencia de carga [15].

### Características de los datos de la metodología

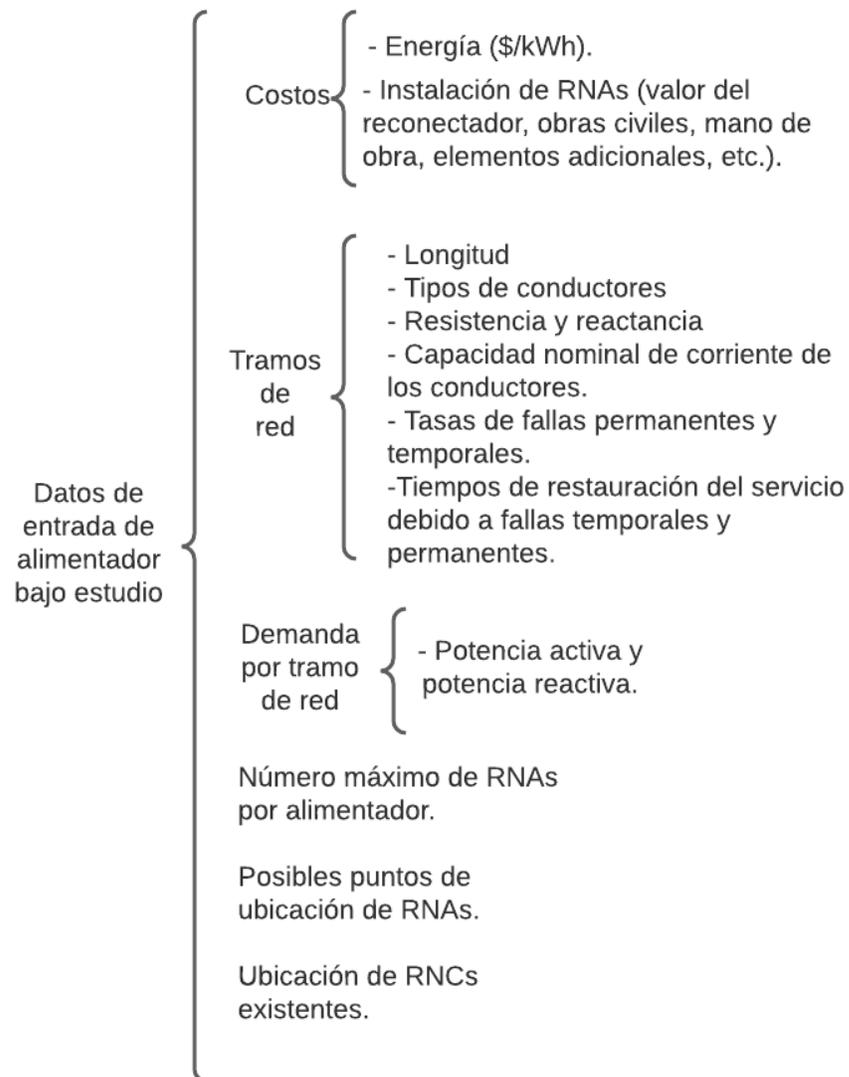
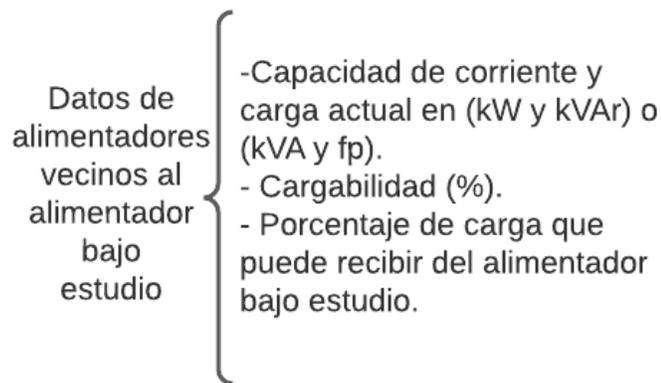


Figura 5. Datos de entrada del alimentador bajo estudio. Fuente: Elaboración propia.



*Figura 6. Datos de entrada de alimentadores vecinos bajo estudio. Fuente: Elaboración propia*

## **5.5 UBICACIÓN ÓPTIMA DE RECONECTADORES EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN PARA MINIMIZAR LA FRECUENCIA MEDIA DE INTERRUPCIÓN.**

En 2009, la revista chilena de ingeniería publicó una metodología que precisó como objetivo minimizar la frecuencia de fallas en Sistemas de Distribución radiales considerando una carga uniformemente distribuida. Se utilizó una aproximación lineal para la ubicación de reconectadores. Este trabajo se desarrolló basándose en criterios de la minimización del índice de Frecuencia Media de Interrupción por Potencia instalada [15].

## **5.6 UBICACIÓN ÓPTIMA MULTIOBJETIVO DE INTERRUPTORES Y DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE LA OPTIMIZACIÓN DE COLONIAS DE HORMIGAS.**

Los autores de este trabajo realizaron un estudio donde se evidenció un trabajo que se basa en una metodología de optimización multiobjetivo para la localización de

componente como interruptores y demás dispositivos de protección en las redes de distribución. Por lo cual, se basaron en la optimización multiobjetivo de colonias de hormigas, con el fin minimizar el costo total y al mismo tiempo, minimizar los índices de desempeño (SAIFI y SAIDI) [2].

### **5.7 UBICACIÓN ÓPTIMA DE ELEMENTOS DE PROTECCIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.**

En este artículo se presentó una metodología para solucionar el problema de la ubicación óptima de fusibles y reconectores en sistemas de distribución, con el fin de mejorar el índice de confiabilidad SAIFI. Dicha metodología formuló un modelo de programación no lineal entero, considerando una función objetivo no lineal y un conjunto de restricciones lineales, y así mismo se incluyeron criterios técnicos y económicos [4].

### **5.8 IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTRATEGIA PARA LA UBICACIÓN DE PROTECCIONES DE SOBRECORRIENTE EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN EMPLEANDO UN ALGORITMO GENÉTICO.**

En este trabajo se realizó una metodología para la ubicación de protecciones en la cual se hace una evaluación de las diferentes técnicas aplicadas y se implementó modelo matemático para la solución del algoritmo genético con el fin de ubicar la mejor ubicación para el elemento de protección. Así mismo, la metodología propuso un análisis de estudio de corto circuito con el fin de implementarlo en el sistema IEEE-13 nodos y posteriormente realizar una optimización de coordinaciones asegurando los tiempos de respaldo de la protección en este caso el del reconector [16].

## **5.9 UTILIZACIÓN DE ALGORITMOS GENÉTICOS PARA LA UBICACIÓN ÓPTIMA DE RECONECTADORES EN REDES RADIALES DE DISTRIBUCIÓN – APLICACIÓN A LA EMPRESA ELÉCTRICA QUITO.**

En el presente trabajo se desarrolló una herramienta computacional, a través de una interfaz gráfica de MATLAB, que permitió determinar la ubicación óptima de reconectadores en sistemas de distribución con topología radial, con el fin de reducir los índices de confiabilidad, se realizó una metodología basada en la construcción de una matriz de estados operativos, considerando la presencia de una falla en cada uno de los tramos del sistema de distribución, analizando el comportamiento del sistema ante el evento, el problema fue solucionado mediante la formulación de un modelo de tipo mono-objetivo no lineal binaria, y se resolvió a partir de los algoritmos genéticos (AG) como método de optimización [17].

## **6. MÉTODOS DE UBICACIÓN DE RECONECTADORES BASADOS SUS REQUERIMIENTOS Y EN LA INCIDENCIA EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN.**

Este capítulo se realizó un cuadro comparativo para identificar las características de cada uno de los métodos, basándose en los requerimientos, es decir, la complejidad que tiene cada uno de ellos, así mismo la incidencia debido a que, se evalúa el impacto que tiene al momento de aplicarse. A partir de ello, se seleccionó un método el cual cumpla con lo dicho anteriormente.

El primer método que se observa en la tabla 1, es el algoritmo genético. Es un método adaptativo que se usan para solucionar problemas de optimización y búsqueda, para los cuales no existen una técnica especializada utilizando una analogía directa con el comportamiento natural y así seleccionar bajo un criterio el punto ideal de solución, teniendo la capacidad de ir creando soluciones y evolucionando en cada generación llegando a un valor óptimo, es decir, el AG realiza una comparación entre la población y los individuos que presenten un mejor rendimiento y eficiencia que esté acorde a la necesidad planteada.

Según [5], un algoritmo genético básico comienza con el uso de un conjunto que consta de un gran número de respuestas codificadas y representadas como cadenas con un número de elementos igual al número de variables de decisión. La solución final que aporta GA no depende de la definición de esta situación, pero la población inicial se genera de forma aleatoria. Los estudios han demostrado que el uso de una población viable al principio del proceso garantiza una convergencia suficiente para proporcionar mejores soluciones a los problemas y, al mismo tiempo, reducir el tiempo de cálculo.

La población también debe tener un buen indicador de diversidad entre instancias para que el algoritmo pueda comenzar de esta manera y explorar diferentes áreas del espacio de búsqueda [5].

El algoritmo genético utiliza un conjunto de individuos, que en los problemas combinatoriales representa un grupo de configuraciones, para resolver un problema de optimización complejo [5]. El algoritmo genético debe tener criterios como:

- Representar adecuadamente una configuración del problema.
- Se debe encontrar una forma adecuada para evaluar la función objetivo o su equivalente (fitness).
- Debe haber una estrategia de selección de las configuraciones.
- Debe existir un mecanismo que permita implementar el operador genético de recombinación.
- Debe existir un mecanismo que permita implementar el operador genético de mutación. Mutación es generalmente considerado un operador genético secundario en el AG.

Para la realización de este algoritmo hay que especificar el tamaño de la población, es decir, determinar el número de miembros de cada generación.

Una vez que se han identificado todos los aspectos anteriores, se utiliza un algoritmo genético básico para resolver el problema propuesto.

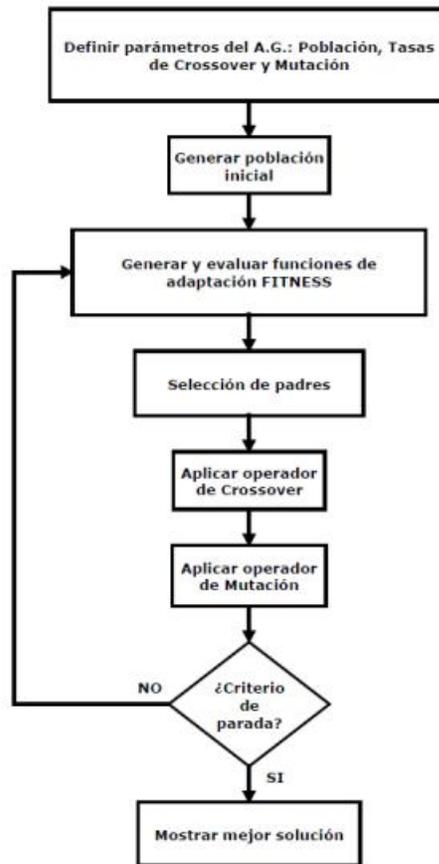


Figura 7. Diagrama de flujo de un Algoritmo Genético básico.

El Algoritmo Multiobjetivo NSGA II es un método evolutivo que se deriva a partir de un algoritmo genético, estos dos procedimientos se diferencian en la operación de selección, y eso hace que el NSGA II tenga una mayor velocidad de convergencia y así mismo se obtengan soluciones de buena calidad.

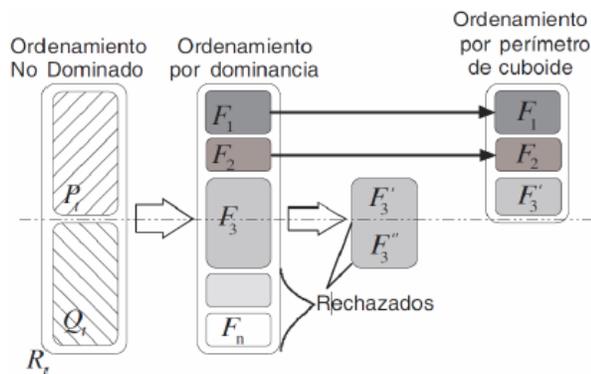


Figura 8. Diagrama de esquemático del Algoritmo Multiobjetivo NSGA II [5].

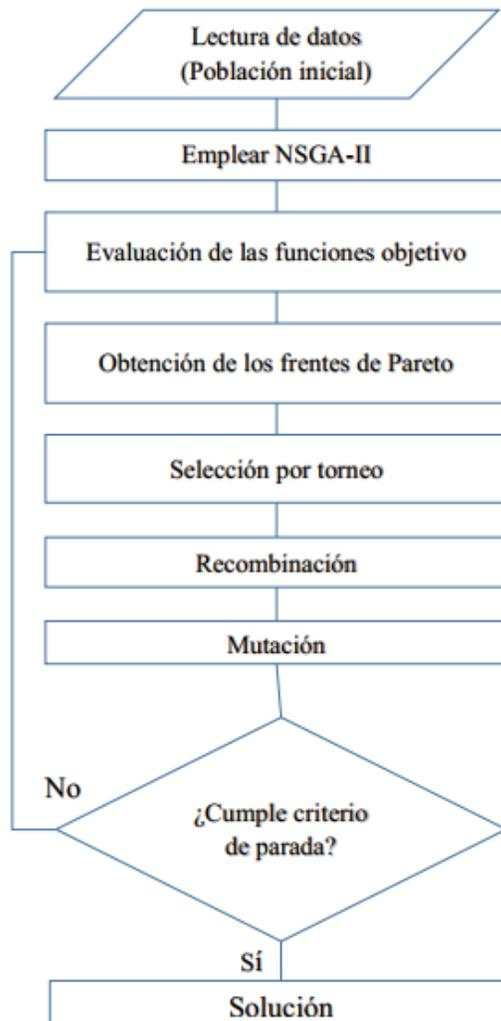


Figura 9. Diagrama de flujo del Algoritmo Multiobjetivo NSGA II [5]

La Optimización Multiobjetivo De Colonia De Hormigas es una técnica basada en la inteligencia de enjambres, que presenta más organización y a su vez permite construir un procedimiento que tiene como finalidad la búsqueda de los mejores caminos y así conllevar a mejores resultados.

Para la implementación de una metodología a partir de los métodos seleccionados es importante considerar los criterios de índices de confiabilidad, ya que estos métodos se derivan a partir de funciones y relaciones matemáticas que se pueden solucionar para obtener la función objetivo en términos de SAIFI y SAIDI pues es a

donde se quiere llegar. Para plantear lo anterior se debe haber un conjunto de restricciones que se deriva del sistema a tener en cuenta, como por ejemplo obtener las características más representativas del circuito, es decir, el unifilar, la longitud del sistema de distribución, la energía consumida, la carga conectada, y uno muy importante la cantidad de usuarios que se están energizando, debido a que los índices pueden variar con estos criterios. Para validar todo lo anterior es importante evaluar la tasa de fallas que se están presentando y definir si es de tipo permanentes o temporales.

Así mismo, emplear uno de estos métodos seleccionados dependerá de las necesidades que se requieran, obteniendo un conjunto de diferentes soluciones u o alternativas permitiendo al consumidor, es decir el operador de red, inclinarse a una solución que se acomode a lo que requiera.

En la tabla 1 se observa la definición, requerimientos e incidencia de los algoritmos más representativos, estos son: Algoritmo Genético, Algoritmo Multiobjetivo NSGA II y Optimización Multiobjetivo De Colonia De Hormigas, esto permite realizar un comparativo cualitativo de las características, y así tener un paralelo entre éstas.

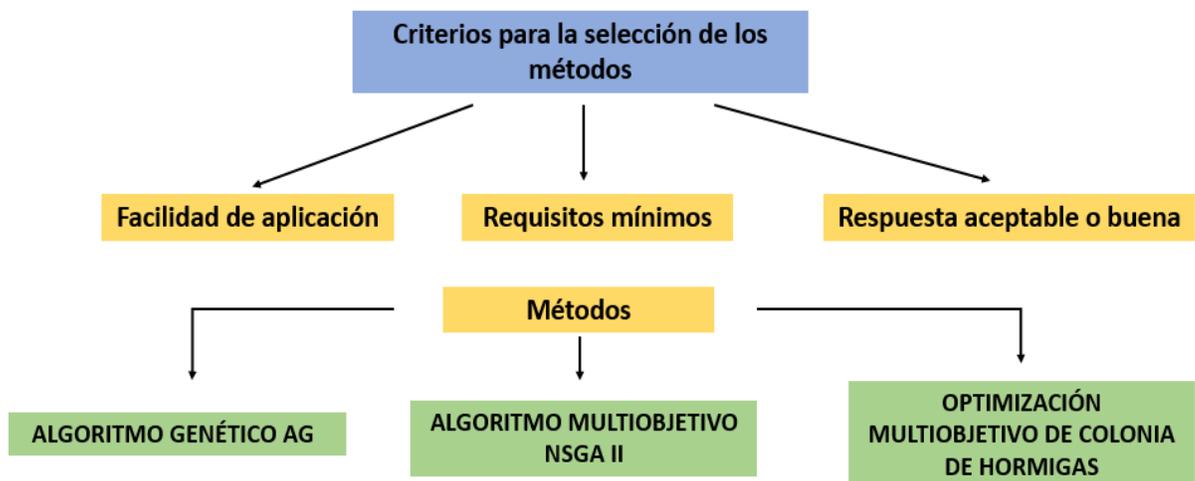


Figura 10. Criterios para la selección de los métodos.

<b>MÉTODOS</b>		
<b>ALGORITMO GENÉTICO (AG)</b>	<b>ALGORITMO MULTI OBJETIVO NSGA II</b>	<b>OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO DE COLONIA DE HORMIGAS</b>
<b>CONCEPTO</b>		
<p>El AG es utilizado para la solución de problemas donde se tienen diferentes tipos de escenarios, y a su vez se enfoca en que dicha solución tenga como característica un mayor rendimiento y eficiencia.</p> <p>Los métodos de cálculo que usa el algoritmo se basa ejecución de una función objetivo.</p>	<p>El algoritmo NSGA II es un algoritmo genético multiobjetivo que se basa en el concepto de dominancia (Pareto), es decir, clasifica a la población en frentes de acuerdo con su grado de dominancia y tienen la característica de ser evolutivos, y generar soluciones a problemas de la vida real. La solución a este algoritmo se da mediante un conjunto de pasos y fórmulas matemáticas que van orientadas a las funciones objetivo que se toman para la solución al problema.</p>	<p>La optimización basada en colonias de hormigas es un proceso de investigación que calcula y simula el comportamiento de las hormigas naturales, y también traza el camino desde el nido hasta el alimento. Los métodos de cálculo se dan en fórmulas y pseudocódigos.</p>
<b>REQUERIMIENTOS</b>		
<p>Consume gran cantidad de procesamiento y recursos asociados cuando se trata de un problema donde se tienen datos reales.</p> <p>Por lo cual se puede tornar compleja, ya que implica costos en términos de tiempo y recursos.</p> <p>No necesitan de información específica sobre el problema, lo que indica que para las soluciones posibles proporcionadas por los AG se ejecutan cambios aleatorios, posteriormente se evalúa a partir de la función objetivo, si existe o no un aumento en la respuesta.</p> <p>La respuesta del algoritmo dependerá de la dispersión de los datos, debido a que si se tienen muchos valores en el</p>	<p>Al igual que el algoritmo genético, tienden a consumir una cantidad grande de procesamiento si la población a estudiar es extensa, por ende, se requiere de una buena máquina computacional que disponga de procesamiento, y potencia, por tanto, resulta complejo para implementarlo.</p>	<p>La optimización basada en colonia de hormigas requiere de un buen equipo de cómputo debido a que, cuanto mayor sea el número de hormigas, aumentará la capacidad del algoritmo de explorar un espacio mayor de soluciones. De igual manera se requiere conocer de forma detallada y minuciosa el problema a solucionar.</p>

<p>rango de máximos/mínimos se van a requerir más iteraciones. Y, además si la función a optimizar contiene varios puntos que se acercan al valor ideal, solo se asegura que se encontrará uno de ellos, y no necesariamente el óptimo. Una representación genética del dominio de la solución. Por último, requiere de una función de aptitud para evaluar el dominio de la solución.</p>		
<b>INCIDENCIA</b>		
<p>Los algoritmos genéticos no se ajustan bien a la complejidad, es decir, cuando el número de elementos que se exponen es muy grande se aumenta exponencialmente el tamaño de la zona de búsqueda. El algoritmo genético no garantiza que encuentre la solución óptima al problema que se plantee, sin embargo, existe evidencia empírica que puede encontrar soluciones en un nivel aceptable. Para problemas específicos de optimización e instancias problemáticas, otros algoritmos de optimización pueden ser más eficientes que los algoritmos genéticos en términos de velocidad de convergencia.</p>	<p>El algoritmo multiobjetivo NSGA II garantiza la diversidad durante el proceso de solución y considera las mejores respuestas encontradas durante el proceso de búsqueda, ya que, tiene una rápida aproximación para disminuir la complejidad, por ello, se pueden encontrar soluciones de excelente calidad.</p>	<p>La optimización basada en colonia de hormigas son una herramienta bien definida con un buen rendimiento, cuando se tienen problemas complejos, y así mismo, a aplicarse a diversas áreas. En comparación con los AG, son algoritmos alternativos debido a que incluyen estrategias de evolución.</p>

*Tabla 2. Comparación de los métodos seleccionados. Elaboración propia.*

## 7. SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE LA UBICACIÓN DE LOS RECONECTADORES EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE MT EN CENS.

En este capítulo se estudiaron los efectos de la ubicación de reconectadores, se seleccionó un circuito de distribución radial en MT de CENS. Así mismo, se utilizó el software DlgSILENT Power Factory, realizándose el cálculo de confiabilidad evaluando solamente los índices SAIFI/SAIDI a partir del modelo de red en el cual se va a trabajar, para hacer dichos cálculos se tomaron en cuenta parámetros como la tasa de fallos y tiempos de reparación en las líneas. Posteriormente se plantearon tres escenarios donde se ubicaron reconectadores en diferentes disposiciones de la red y así registrar el desempeño de los valores SAIFI/SAIDI. En la figura 8, se muestra el esquema de las actividades que se abarcaron en la red de media tensión.

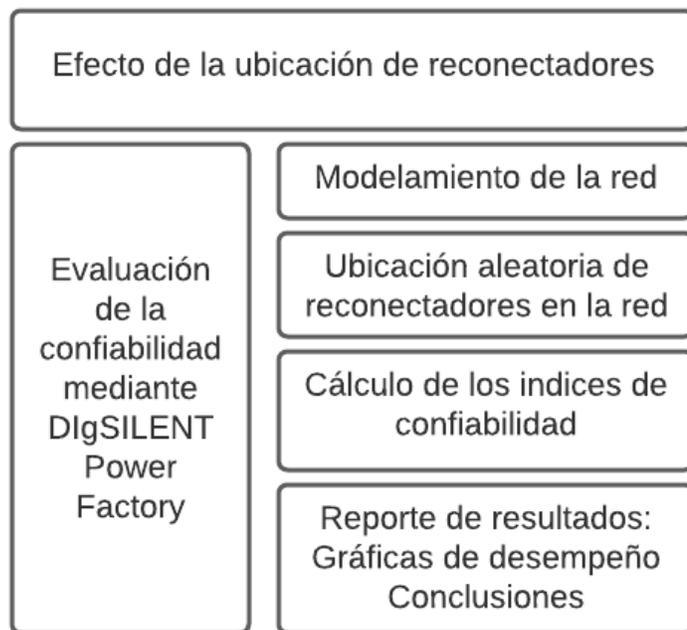


Figura 11. Diagrama general para el estudio de confiabilidad. Fuente: elaboración propia.

## 7.1 DESCRIPCIÓN DE DIGSILENT POWER FACTORY

El software de cálculo DIgSILENT Power Factory es una herramienta para el análisis de sistema de potencia como pueden ser industriales, comerciales y del uso de empresas eléctricas [17]. Ha sido estructurado como un avanzado e integrado paquete informático interactivo dedicado al análisis de los sistemas eléctricos de potencia, ya que son una estructura de gran importancia en el área de la ingeniería eléctrica debido a que, está formada por miles de elementos que en su estudio tienen una naturaleza compleja. Cada día se está reflejando más demanda energética en el país y en el mundo, es por eso, que se cuenta con softwares que realizan estudios, análisis y operaciones que estos sistemas requieren. En este sentido DIgSILENT es un software que se basa en los análisis de sistemas de potencia (generación, transmisión y distribución industrial), por lo que cuenta con el manejo de datos que hacen posible al usuario un modelamiento de estos mismos. Power Factory es una herramienta fácil de usar y eficiente en grandes proyectos que conllevan el análisis de sistemas eléctricos de potencia. Así mismo, es un software que también incluye aplicaciones nuevas que se están realizando ahora como lo son las tecnologías de energías renovables (sola, eólica...). Realiza análisis como flujos de potencia y estudios de corto circuito, entre otros con la finalidad de lograr los principales objetivos de planificación y optimización de operación. Para la realización de este capítulo se hizo uso de las funciones de flujo de potencia y así mismo del paquete de análisis de confiabilidad con el fin de evaluar los índices SAIFI/SAIDI a partir del circuito de MT que se describirá a continuación.

## 7.2 DESCRIPCIÓN DEL CIRCUITO EN MT.

A continuación, se describen las características generales MT del circuito SANC43 alimentado en 13.8kV el cual es el objeto de este estudio.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Nombre	SANC43
Nivel de tensión	13.8kV
Alimentador	Subestación SAN MATEO
Transformador	TR-09-SAN MATEO 115kV/13.8kV

Tabla 3. Especificaciones circuito SANC43.



Figura 12. Circuito SANC43. Elaboración propia.

En la figura 11, se evidencia el sector de MT que se seleccionó para la realización de los cálculos de confiabilidad a partir de la ubicación de reconectores en diferentes puntos. A continuación, se describe las características generales de la sección de estudio.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Nombre	SANC43
Nivel de tensión	13.8kV
Alimentador	Subestación SAN MATEO
Transformador	TR-09-SAN MATEO 115kV/13.8kV
Número de tramos	50
Número de nodos	50
Número de cargas	25

Tabla 4. Especificaciones de sección del circuito de estudio SANC43.

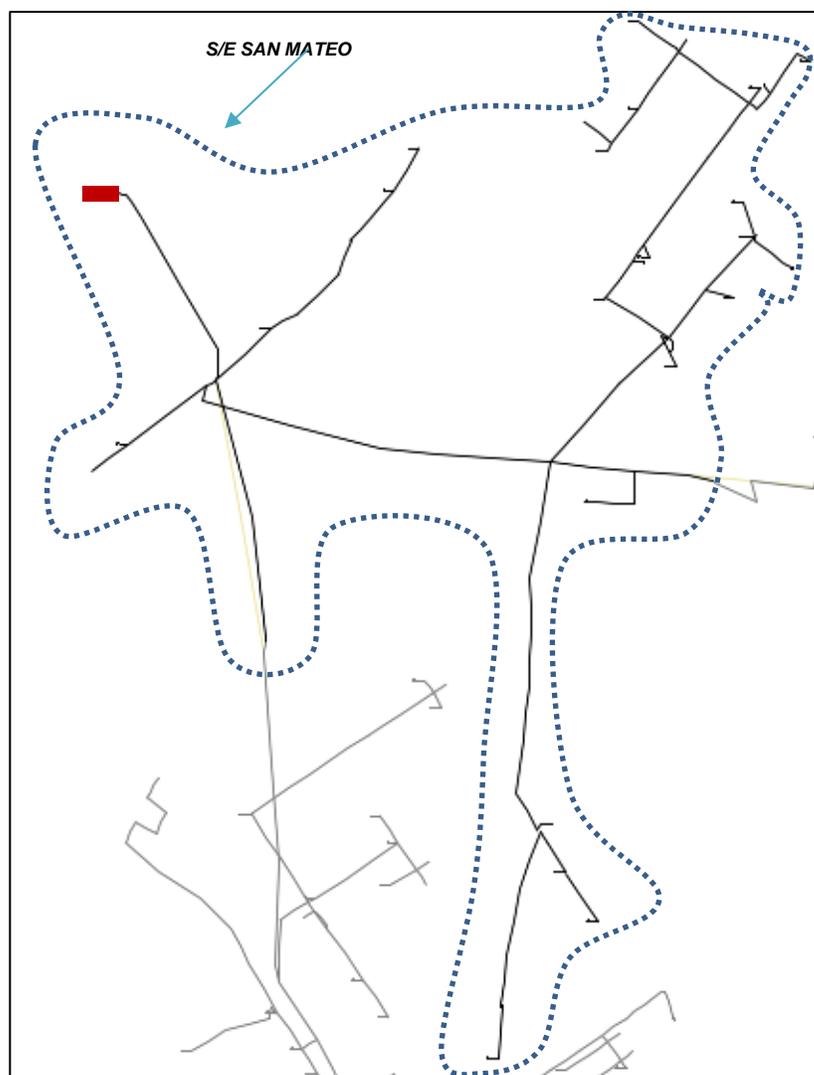


Figura 13. Sección de estudio. Elaboración propia.

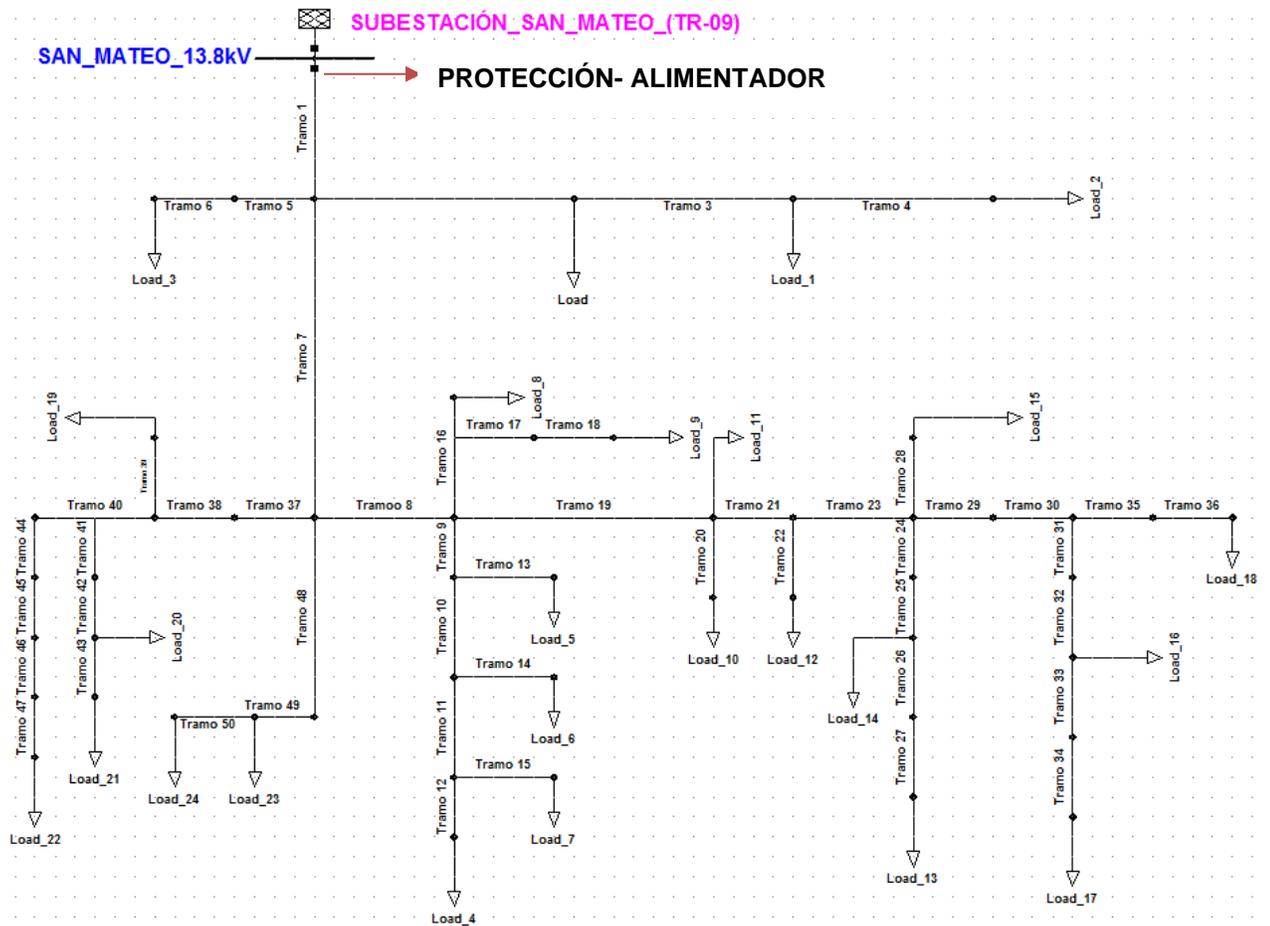


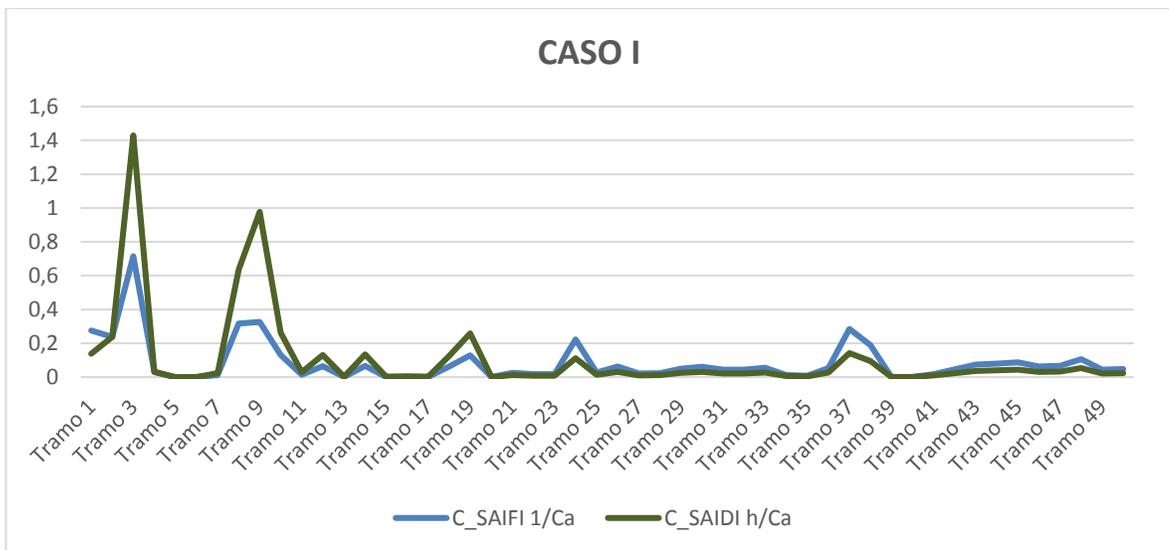
Figura 14. Sección de estudio en DlgSILENT Power Factory sin reconectores.  
Fuente: Elaboración propia.

## 7.2 CASO I

En el primer caso se tiene la disposición mostrada en la figura 13, donde se tiene únicamente el equipo de protección que se encuentra en la salida del alimentador. En la gráfica 1, se evidencia que sin reconectores los índices de confiabilidad se elevan, debido a que, al ocurrir una falla en cualquier tramo de la red, el elemento de protección que actúa es la que se ubica a la salida del alimentador (SAN\_MATEO\_13.8kV), y esto indica que se dejara de suministrar energía en todo el sistema.

ÍNDICES DE CONFIABILIDAD DE LA RED	
System Average Interruption Frequency Index: SAIFI =	4,243213 1/Ca
System Average Interruption Duration Index: SAIDI =	5,350 h/Ca

Tabla 5. Especificaciones de índices de confiabilidad de la red sin reconectores.



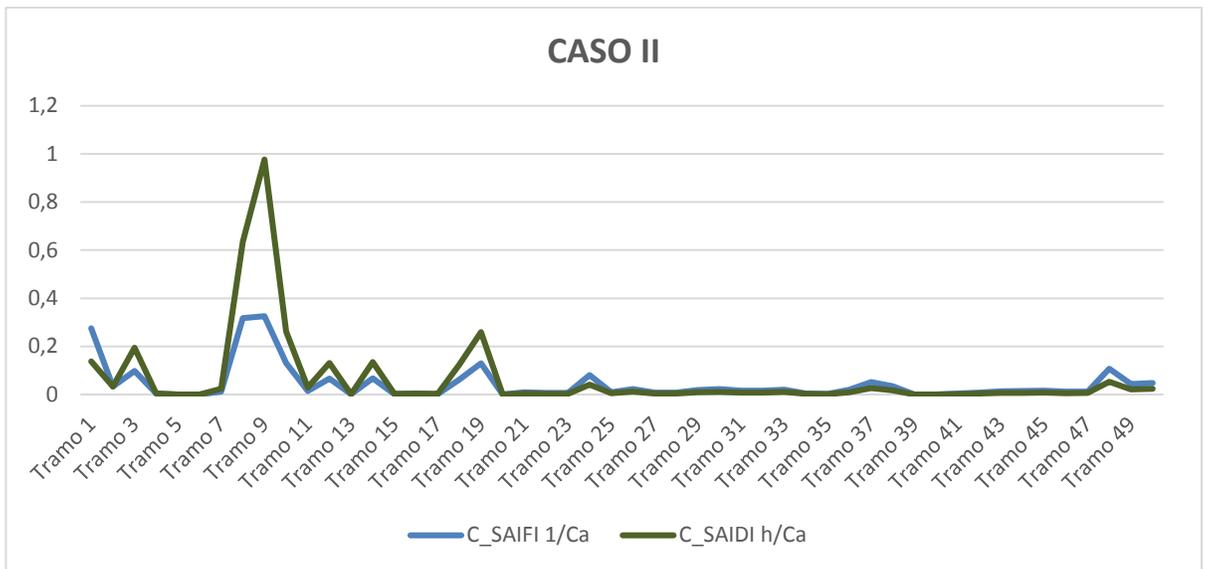
Gráfica 1. Índices de confiabilidad sin reconectores en los tramos de la red.

### 7.3 CASO II

En el segundo caso se ingresaron tres reconectores como se muestra en la figura 14, y se evidencia que con los tres elementos de protección los índices de confiabilidad tienen a mejorar, es decir, la ubicación de reconectores afecta directamente estos indicadores. En la gráfica 2, se observa la disminución de estos indicadores.

ÍNDICES DE CONFIABILIDAD DE LA RED	
System Average Interruption Frequency Index: SAIFI =	2,175518 1/Ca
System Average Interruption Duration Index: SAIDI =	3,274 h/Ca

Tabla 6. Especificaciones de índices de confiabilidad de la red con tres reconectores.



Gráfica 2. Índices confiabilidad con tres reconectores en los tramos de la red.

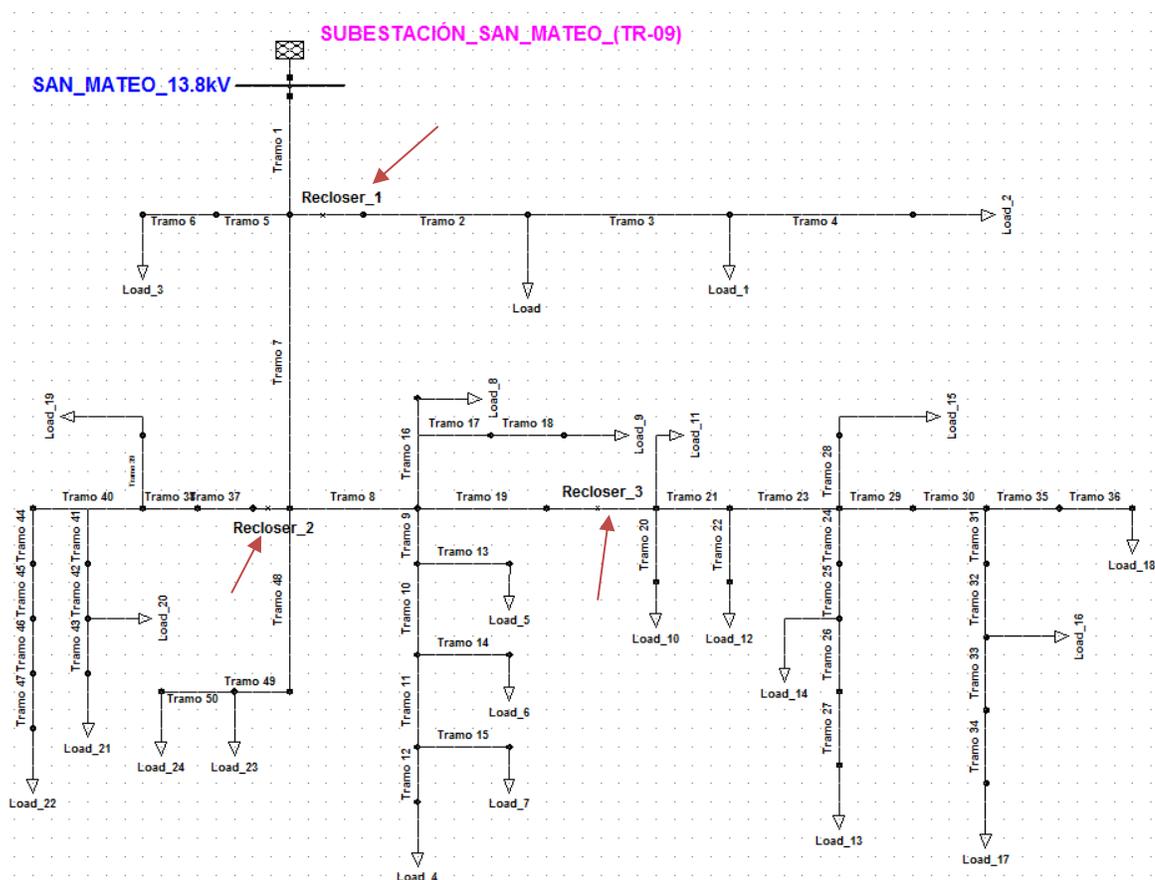


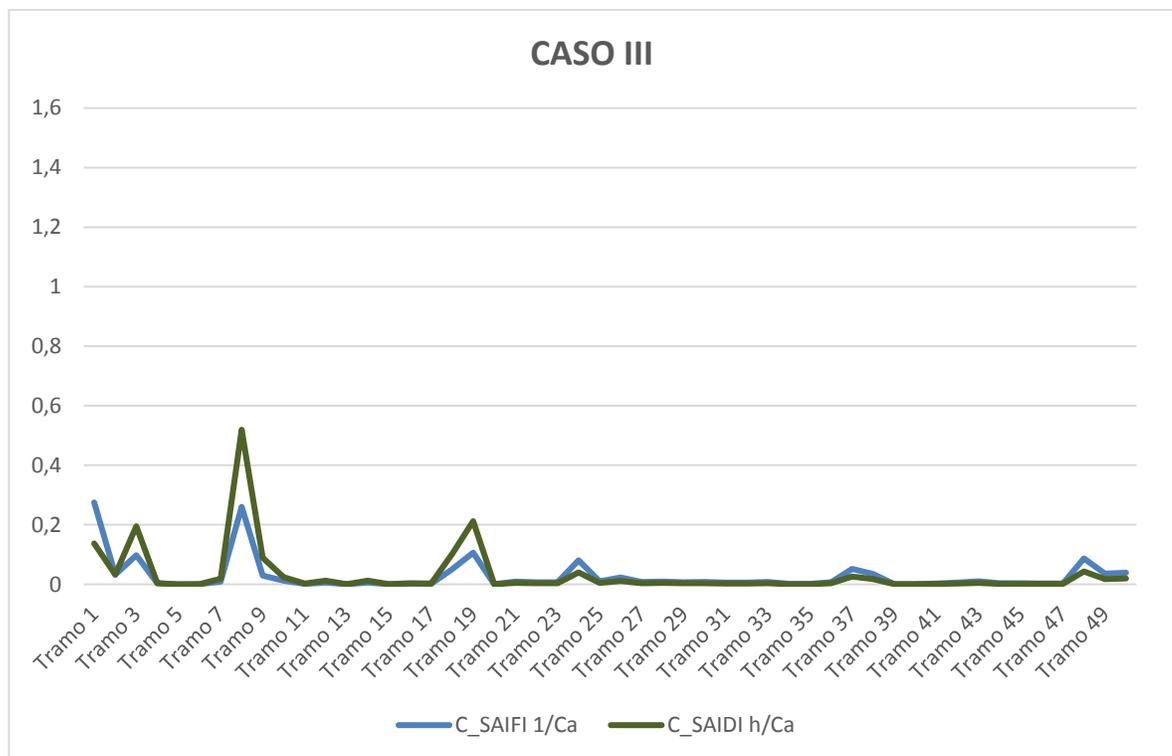
Figura 15. Sección de estudio en DigSILENT Power Factory ingresando tres reconectores en la red. Fuente: Elaboración propia.

### 7.4 CASO III

En el tercer caso se ingresaron ocho reconectores como se muestra en la figura 15, y se evidencia el grado de incidencia que tienen los elementos de protección ya que se logró bajar significativamente los índices de confiabilidad, en la gráfica 3, se observa la tendencia de estos parámetros.

ÍNDICES DE CONFIABILIDAD DE LA RED
System Average Interruption Frequency Index: SAIFI = 1,371535 1/Ca
System Average Interruption Duration Index: SAIDI= 1,606 h/Ca

*Tabla 7. Especificaciones de índices de confiabilidad de la red con ocho reconectores.*



*Gráfica 3. Índices confiabilidad con ocho reconectores en los tramos de la red.*

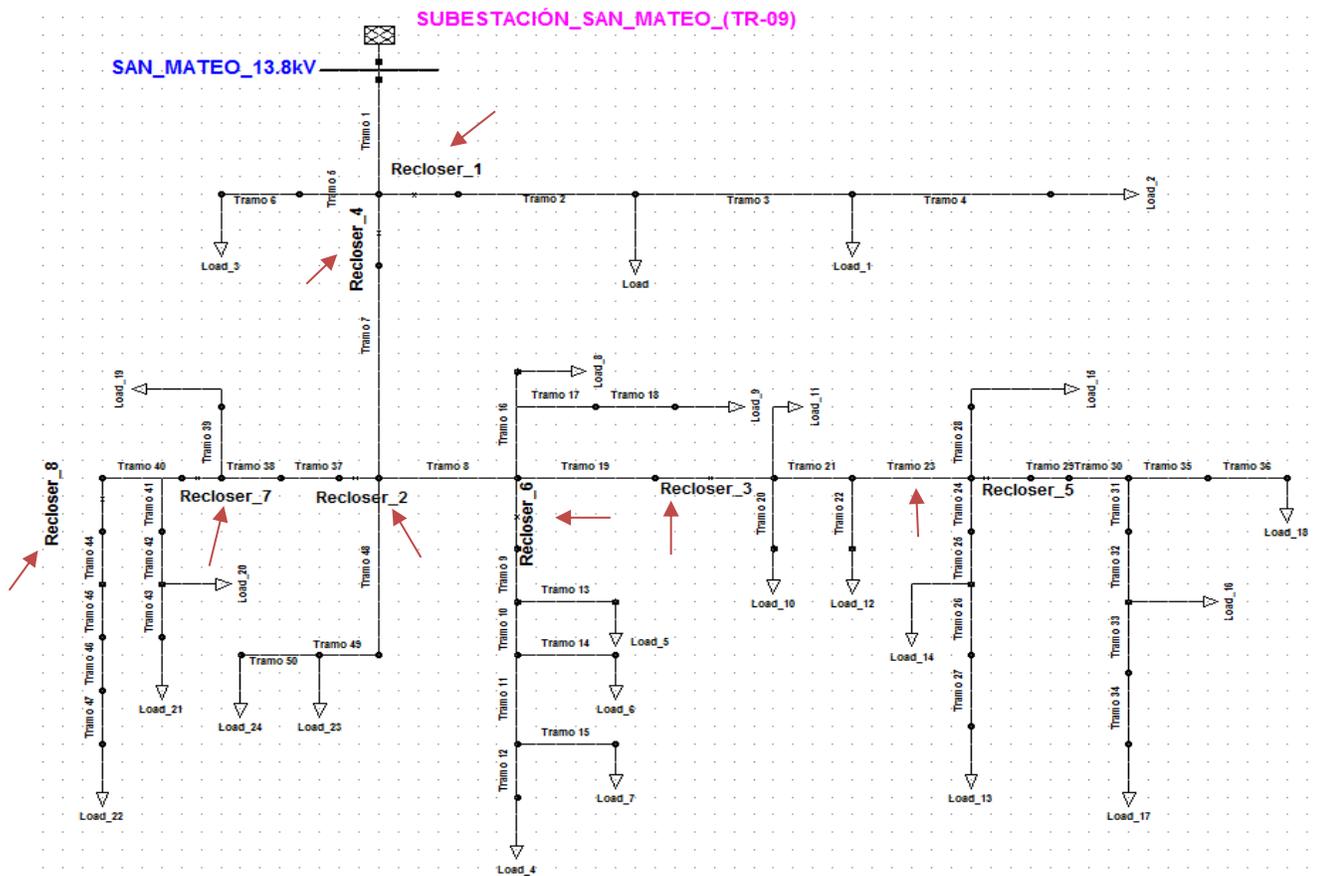
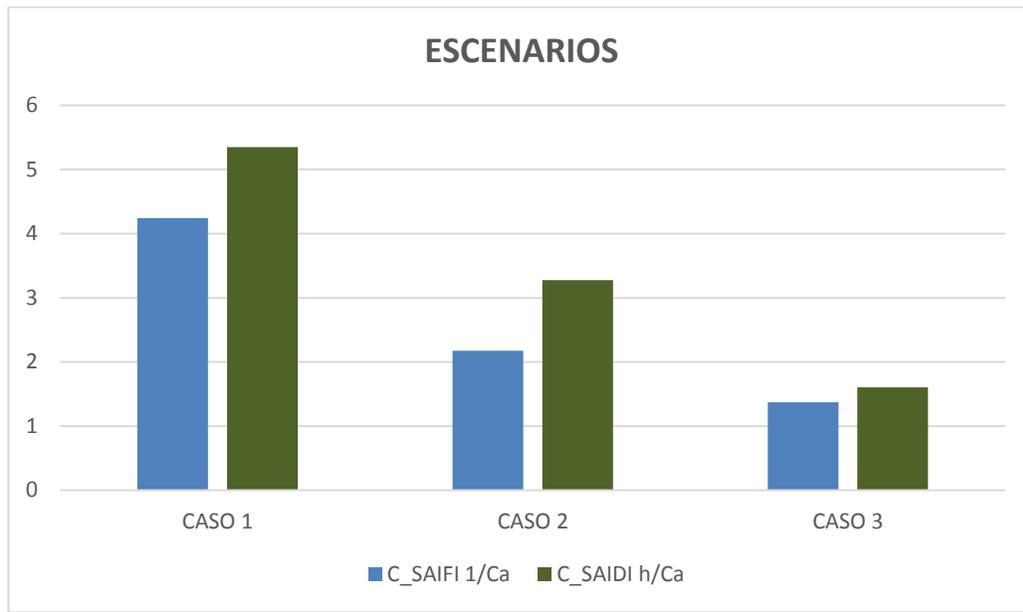


Figura 16. Sección de estudio en DlgSILENT Power Factory ingresando ocho reancladores en la red. Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 4, se observa como a medida que se agregaron reancladores en la red los índices de confiabilidad SAIFI/SAIDI bajaron, se muestra la importancia de las primeras ubicaciones comprobando la disminución de los parámetros debido a que tiene los valores más altos. Con estos datos se puede tener una noción y un criterio para evaluar una posible ubicación de un reanclador teniendo en cuenta el impacto que tienen sobre la confiabilidad. El caso I con respecto al caso II el índice SAIFI se tiene una reducción del 51% aproximadamente y para el caso II con el caso III la reducción de confiabilidad es un poco más baja del 40%. Al comparar el caso I con el caso III se evidencia que la reducción se da casi en un 70%. De igual manera se comporta el índice SAIDI para los tres casos, en la primera comparación se muestra que se tiene una reducción del 39%, así mismo se observa

que en la segunda comparación se hace más significativa la disminución del índice estando cerca al 50%, de igual modo referente al caso I con el caso II, el SAIDI cae a un 70%.



Gráfica 4. Comparación de Índices de confiabilidad en los tres escenarios planteados.

PORCENTAJE DE COMPARACIÓN								
CASO I CON CASO II			CASO II CON CASO III			CASO I CON CASO III		
<b>SAIFI</b>	4,243213	51,2705 %	<b>SAIFI</b>	2,175518	63,0440 %	<b>SAIFI</b>	4,243213	32,3230 %
	2,175518			1,371535			1,371535	
<b>SAIDI</b>	5,35	61,1962 %	<b>SAIDI</b>	3,274	49,0531 %	<b>SAIDI</b>	5,35	30,0186 %
	3,274			1,606			1,606	

Tabla 7. Comparación de índices de confiabilidad en los tres escenarios planteados.

## 8. GUÍA CON LOS MÉTODOS SELECCIONADOS PARA LA UBICACIÓN DE RECONECTADORES EN MT PARA CENS.

### 8.1 OBJETO

Establecer el procedimiento para la ubicación de reconectadores en MT estableciendo criterios adecuados para Centrales Eléctricas de Norte de Santander.

### 8.2 ALCANCE

En esta sección del documento presenta los criterios que deben ser tenidos en cuenta en la definición del punto donde será instalado un reconector las redes de distribución de media tensión (13.8 kV).

### 8.3 DEFINICIONES

**Reconector:** el reconector es un equipo o dispositivo para protección eléctrica que se encarga de interrumpir el flujo de corriente en un circuito al censar condiciones anormales en este [6].

**Sistema de distribución:** Un sistema de distribución de energía eléctrica es el conjunto de equipos que permiten energizar en forma segura y fiable un número determinado de cargas, en distintos niveles de tensión, ubicados generalmente en diferentes lugares [7].

**Fiabilidad:** probabilidad de que un sistema, aparato o dispositivo cumpla una determinada función bajo ciertas condiciones durante un tiempo determinado [12].

**SAIDI:** indicador que mide la duración promedio de las interrupciones percibidas por un usuario conectado a un sistema de energía eléctrica, normalmente se mide en minutos o en horas [10].

$$SAIDI_{j,t} = \sum_{m=1}^{12} \frac{\sum_{i=1}^n (D_{i,u,m} * NU_{i,u,m})}{UT_{j,m}} / 60$$

*Ecuación 4. Ecuación SAIDI.*

**SAIFI:** Indicador que mide la cantidad de veces promedio que se presenta una interrupción para un usuario conectado a un sistema de energía eléctrica [10].

$$SAIFI_{j,t} = \sum_{m=1}^{12} \frac{\sum_{i=1}^n NU_{i,u,m}}{UT_{j,m}}$$

*Ecuación 4. Ecuación SAIFI.*

**Tasa de falla:** número de fallas observadas en un tiempo de operación.

## **8.4 CRITERIOS GENERALES PARA LA UBICACIÓN DE RECONECTADORES**

A continuación, se describen los criterios generales que se deben tener en cuenta al momento de definir la ubicación de reconector en las redes del sistema eléctrico de MT de CENS.

### **8.4.1 PARÁMETROS REGULATORIOS**

Los entes reguladores del sector energético publican resoluciones que buscan la instalación de equipos con el fin de obtener mejoras en la calidad del servicio prestado a los usuarios y así mismo, se realizan auditorias de su cumplimiento periódicamente. Resoluciones a tener en cuenta: CREG043 de 2010 y CREG 015 de 2018.

### **8.4.2 TIPO DE CARGAS AGUAS ABAJO DEL EQUIPO**

Es relevante identificar cargas industriales y clientes especiales (Hospitales o Centros de salud relevantes, etc.) que pueden incidir para realizar una correcta ubicación del reconector.

### **8.4.3 EVALUACIÓN DE INDICADORES DE CALIDAD DEL SERVICIO**

Para la correcta ubicación de este equipo se recomienda tener en cuenta los tramos de circuito con mayor incidencia de fallas y cargas significativas dadas las posibles compensaciones, ya que pueden ser un punto óptimo de conexión.

### **8.4.4 LONGITUD DEL CIRCUITO, TOPOLOGÍA Y DISTRIBUCIÓN DE LA CARGA.**

Los circuitos de gran extensión, tipo de topología por donde transita el circuito, como zonas de difícil acceso, (zonas rurales) y así mismo, cargas que se encuentren muy distanciadas unas de otras.

### **8.4.5 COORDINACIÓN DE PROTECCIONES.**

La instalación de un reconectador debe ser analizada buscando obtener un margen adecuado de coordinación de protecciones con equipos de protección como seccionadores o relés.

### **8.4.6 DISPONIBILIDAD DE MEDIO DE COMUNICACIÓN.**

En la instalación de un reconectador es importante contar con los equipos tele gestionados, ya que se buscan ubicaciones que permitan enlazarlos con el centro de control del operador de red en tiempo real y así dar más confiabilidad.

### **8.4.7 ACCESO AL PUNTO DE INSTALACIÓN.**

Es recomendable buscar un punto de instalación que permita el ingreso de vehículos o grúas, que faciliten no solo la instalación, sino también la futura inspección y mantenimiento que requiere este elemento.

#### **8.4.8 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL EQUIPO.**

Es recomendable tener en cuenta las condiciones del punto propuesto para instalar el equipo, tales como el nivel de cortocircuito del punto y la corriente en estado estable a la que se verá sometido (carga pico y en algunos casos transferencias), con el fin de validar sus especificaciones y evitar operaciones no deseadas o el daño del equipo.

#### **8.5 CRITERIOS TÉCNICOS DE UN RECONECTADOR.**

- Evaluar el nivel de cortocircuito del punto y validarlo con las especificaciones técnicas del equipo.
- Se deben instalar con el fin de prevenir la salida de todo el circuito, dividiendo el circuito en bloques de carga, seccionando alimentadores de gran longitud, o separando lo urbano de los ramales rurales.
  - a. Circuito urbano:
    - i. Seccionar en 2 bloques de carga (El seccionamiento actual con cuchillas es de tres por circuito, dependiendo el caso puntual, se podría en 3 bloques de carga con reconectador.).
    - ii. 1 reconectador de transferencia (En caso de se tenga más transferencias relevantes, se analizaría cada caso puntual).
    - iii. 1 reconectador en ramal relevante (Puede instalarse en derivaciones con alto nivel de carga y cortocircuito, donde un fusible no puede coordinarse).
  - b. Circuito rural:
    - i. Seccionar troncal en dos o tres segmentos, sin superar tres equipos en serie en la troncal del circuito, incluyendo transferencias; o más de tres en derivaciones de la troncal, teniendo en cuenta el análisis puntual del circuito.

Nota: en circuitos extensos se sugiere tramos > 10km.

- ii. Seccionar ramal principal si el punto evaluado cumple:  
 $kVA \text{ punto} / kVA \text{ cto} > 0,35$ .
  - iii. Instalar reconectador en ramales extensos (>12 km), protegidos directamente por el equipo de protección de la subestación (S/E).
- c. Circuito urbano-rural:
- i. 1 reconectador al inicio del ramal rural.
  - ii. De acuerdo con el tipo de segmento (Urbano / Rural) se pueden aplicar los criterios establecidos en los numerales 1. a. y 1. b.
- En puntos de alto índice de fallas, con el fin de aislarlo del resto del circuito.
  - En sitios remotos de difícil acceso, o en ramales extensos con limitada coordinación de fusibles.
  - Es recomendable instalarlos en fronteras comerciales donde se tenga cogeneración o algún tipo de generación distribuida relevante (> 1 MW). Igualmente, en clientes con gran capacidad de potencia instalada (> 1.8 MVA urbano o > 1 MVA rural), con el objetivo de no limitar la coordinación de protecciones.
  - Se pueden ubicar como elemento de transferencia entre circuitos, facilitando la rápida normalización del servicio en tramos no fallados y la implementación de esquemas de restablecimiento automáticos.
  - Se pueden instalar donde se presenten dificultades por maniobrabilidad debido a arcos eléctricos, ante transferencias.
  - Se pueden instalar en subestaciones reducidas como protección principal del transformador de potencia a nivel de 13.2 kV y 44 kV. De igual forma como protección en el alimentador del circuito.
  - Se puede instalar como elemento de corte y maniobra, es decir sin ajustes de protección.
  - Evitar en lo posible instalarlo aguas arriba de industrias con procesos sensibles, donde los recierres del equipo puedan afectar un proceso productivo.

## **8.6 METODOLOGÍA PARA LA UBICACIÓN DE RECONECTADORES**

### **8.6.1 METODOLOGÍA PROPUESTA:**

En esta sección se presenta la metodología propuesta a partir de los tres métodos escogidos mencionados anteriormente para dar solución al problema de ubicación de reconectores, se debe adquirir características significativas para el sistema de MT en el cual se hará dicho estudio.

### **8.6.2 CARACTERÍSTICAS**

Obtención de las características más significativas del circuito en MT como:

- Diagrama unifilar
- Número de usuarios
- Nodos del sistema
  - i. Demanda de potencia activa potencia reactiva
- Tramos de la red de distribución:
  - i. Seleccionar la longitud.
  - ii. Nombres de tramos de red
  - iii. Tipo de conductores.
  - iv. Resistencia y reactancia.
  - v. Capacidad nominal de corrientes de los conductores.

Obtención de información necesaria de la red de distribución tales como:

- Tasa de fallas
- Tiempos de restauración del servicio debido a fallas.

Así mismo, para la realización de la ubicación de reconectores se debe de tener un criterio importante y que impacta significativamente el proyecto que se requiere realizar el cual es el costo económico que este conlleva, es decir, el costo por instalación de un reconector, considerando aspectos como el valor comercial del equipo, las obras civiles, mano de obra, elementos adiciones entre otros.

## 8.6.2 PROCEDIMIENTO DE LA METODOLOGÍA

**Paso 1:** Definición de parámetros y lectura de datos de entrada.

Una vez teniendo las características descritas anteriormente, se puede empezar a emplear el método seleccionado por el usuario que va de acuerdo a la eficiencia y requerimientos que necesite.

**Paso 2:** Delimitación de las zonas

En el circuito de MT es necesario establecer zonas en las cuales se hará una ubicación de elementos como el interruptor principal, que se encuentra a la salida del ramal de la subestación.

**Paso 3:** Técnica de solución.

A partir de los datos se aplica el método e el cual se quiere trabajar y para la cual tienen como similitud la función objetivo que se tomara, es decir las ecuaciones SAIFI y SAIDI definidas en la ecuación 3 y 4 de esta sección del capítulo.

**Paso 4:** Análisis de resultados

De acuerdo al método aplicado se realiza un análisis de los resultados obtenidos, teniendo en cuenta que la solución dada por el método depende del criterio de selección adaptado al problema.

## 9. CONCLUSIONES

- Las estrategias metodológicas seleccionadas establecen diferentes parámetros que van orientados a la ubicación de reconectores aplicadas a sistemas de distribución radial donde se observan los métodos que se centran principalmente en la evaluación de la confiabilidad de la red.
- La información disponible de las estrategias metodológicas se centra en la determinación de puntos para la ubicación de reconectores basados principalmente en modelos matemáticos. La selección de los métodos para establecer una metodología está fundamentada en la complejidad, requerimientos y en la incidencia que tiene al aplicarse, donde se observan las características de cada uno de ellos.
- El Algoritmo Genético, aunque es un método que no se ajusta bien a la complejidad es un método que encuentra soluciones en un nivel aceptable por lo cual puede dar soluciones confiables y seguras.
- El Algoritmo Multiobjetivo NSGA II es un método que se adapta bien a los problemas de gran complejidad debido a la rápida velocidad de aproximación, que conlleva a encontrar soluciones de buena calidad.
- La Optimización Multiobjetivo De Colonia De Hormigas es un método evolutivo a partir de los algoritmos genéticos, la aplicación de esta técnica da resultados de buena calidad. De igual manera los tres métodos seleccionados tienen un requerimiento que se basa en el esfuerzo computacional para el procesamiento de datos, y para su aplicación se requiere de un buen equipo de cómputo.
- La realización de ubicación de reconectores de manera manual permite evaluar el comportamiento de los índices de calidad, y se observa que se ven directamente afectados por el número de reconectores implementados.

- De acuerdo a la simulación realizada en DIGSILENT, con la ubicación manual de los reconectores se observa que cuando se pasa de tres reconectores a ocho se aprecia que la mejora de los índices de confiabilidad ya no es tan permanente, de igual manera a partir de eso se logra obtener una referencia de la cantidad de elementos que necesariamente se debe priorizar para que los parámetros de SAIDI y SAIFI no se vea tan impactados y así teniendo una mejora en la red de distribución.
- Para la ubicación de reconectores es importante tener criterios que no solo están ligados a la búsqueda del mejor lugar, sino que también aspectos que se pueden ver directamente afectados como son criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales.
- La selección de la metodología establece los parámetros a tener en cuenta para la realización del estudio y a partir de esto el usuario define el modelo matemático que quiera implementar basado en tres aspectos: facilidad de aplicación, es decir, que la aplicación no sea tan compleja, que no tenga demasiados requisitos y por último que la respuesta sea aceptable o buena.
- El trabajo cumplió los objetivos debido a que se logró diseñar una metodología para la ubicación de reconectores para CENS partiendo de la determinación de las estrategias metodológicas y así mismo, de los métodos que han sido empleados, de igual manera se simuló el impacto que genera tener reconectores en diferentes posiciones que se vieron reflejados en la respuesta de los índices de confiabilidad, por último, se realizó la guía metodología para la aplicación a circuito de MT de los sistemas de distribución de CENS.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Billinton and S. Jonnavithula, "Optimal switching device placement in radial distribution systems," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 11, no. 3, pp. 1646–1651, 1996, doi: 10.1109/61.517529.
- [2] T. Wiwat y D. Rerkpreedapong, «Multiobjetive Optimal Placement Of Switches And Protective Devices In Eletric Power Distribution Systems Using Ant Colony Optimization,» *Science Direct*, p. 8, 2009.
- [3] M.-R. H. S.A.M. Javadian, «Optimal Placement of Protective Devices in Distribution Networks Based on Risk Analysis,» 2010 IEEE/PES
- [4] C. Giraldo, I. Hincapié y R. Gallego, «Ubicación Óptima De Elementos De Protección En Sistemas De Distribución De Energía Eléctrica,» *Scientia et Technica Año XVI*, p. 7, 2011.
- [5] A. Ríos Giraldo, Localización Óptima De Reconectores Normalmente Abiertos Para Transferencia De Carga, Pereira, 2016.
- [6] I. S. C37.100-1992, «IEEE Standard Definitions for Power Switchgear,» *IEEE Explore*, p. 82, 1992.
- [7] S. Ramirez Castaño, Redes de Distribución de Energía, Manizales, 2009.
- [8] «Schneider Electric,» [En línea]. Available: <https://www.se.com/co/es/product-range-download/63375-e-series/#/documents-tab>. [Último acceso: 25 Abril 2021].
- [9] J. Juarez Cervantes, Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica, México, 1995.
- [10] I. S. 1366™-2003, «IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices,» *IEEE*, p. 44, 2003.
- [11] T. Short, Electric Power Distribution handbook, Boca Raton London New York Washington, D.C., 2004.
- [12] J. D. K. a. B. J. Kirby, Measurement Practices For Reliability And Power Quality, June 2004.

- [13] Sayas y E. La Torre, «Ubicación Óptima de Equipos de Seccionamiento, Protección e Impacto de la Instalación de Indicadores de Fallas en los Índices de Confiabilidad,» *VII simposio internacional sobre calidad de la energía eléctrica.*, p. 7, 2013.
- [14] Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG, Ministerio de Minas y Energía, and Republica de Colombia, «Resolución CREG No. 015 de 2018,» *Resolución 015 de 2018.* p. 239, 2018, [Online].
- [15] J. Reyes, M. Morales, L. García y J. Pezoa, «Ubicación Óptima De Reconectores En Sistemas De Distribución Para Minimizar La Frecuencia Media De Interrupción,» *Revista chilena de ingeniería*, vol. 17, p. 9, 2009.
- [16] Á. A. T. Cabrera, «Implementación De Una Estrategia Para La Ubicación De Protecciones De Sobrecorriente En Sistemas De Distribución Empleando Un Algoritmo Genético,» Bogotá, 2019.
- [17] I. D. G. PILATÁSIG, «Utilización De Algoritmos Genéticos Para La Ubicación Óptima De Reconectores En Redes Radiales De Distribución – Aplicación A La Empresa Eléctrica Quito,» Quito, Julio 2018.
- [18] F. M. Gonzalez-Longatt, Manual de usuario de DIgSILENT PowerFactory 12.0 en Español, Agosto, 2004.