

**UBICACIÓN ÓPTIMA DE ELEMENTOS DE PROTECCIÓN EN SISTEMAS DE
DISTRIBUCIÓN CONSIDERANDO TRANSFERENCIA DE CARGA PARA
MEJORAR INDICADORES DE CONFIABILIDAD**

**ESTEFANÍA ALZATE GIRALDO
MARÍA PAULINA SÁNCHEZ LONDOÑO**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
PEREIRA, 2017**

**UBICACIÓN ÓPTIMA DE ELEMENTOS DE PROTECCIÓN EN SISTEMAS DE
DISTRIBUCIÓN CONSIDERANDO TRANSFERENCIA DE CARGA PARA
MEJORAR INDICADORES DE CONFIABILIDAD**

ESTEFANÍA ALZATE GIRALDO

MARÍA PAULINA SÁNCHEZ LONDOÑO

Proyecto de grado
Para optar por el título de ingenieras electricistas

Director: M.Sc. RICARDO ALBERTO HINCAPIÉ ISAZA

Co-Director: M.Sc. OSCAR DANILO MONTOYA GIRALDO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PEREIRA, 2017

RESUMEN

En este trabajo se presenta una metodología para seleccionar la ubicación óptima de elementos de protección en sistemas de distribución de energía. Para representar matemáticamente este problema se emplea un modelo de programación no lineal binario, donde se minimizan los indicadores de la frecuencia media de las interrupciones (SAIFI) y del indicador de duración media de las interrupciones (SAIDI), causados por la presencia de fallas permanentes y temporales en sistemas radiales de distribución. Como restricciones son consideradas diversas condiciones técnicas y económicas relacionadas con la coordinación de protecciones y los costos de inversión en elementos de protección. El modelo matemático empleado en este trabajo está basado en la formulación presentada en [1], y para su solución se emplea el *solver* de programación no lineal DICOPT disponible en el software de optimización comercial GAMS. Para validar el desempeño de la metodología se tienen en cuenta dos sistemas de prueba disponibles en la literatura especializada, donde los resultados obtenidos respaldan la metodología propuesta.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. ESTADO DEL ARTE	10
1.2. PRESENTACIÓN DEL DOCUMENTO.....	12
2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	14
2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
2.2. MODELO MATEMÁTICO.....	15
2.2.1. Conjuntos.....	16
2.2.2. Consideraciones para la descripción de la función objetivo.....	18
2.2.3. Función objetivo SAIDI	18
2.2.4. Restricciones.....	22
2.2.5. Función objetivo SAIFI.....	25
3. METODOLOGÍA PROPUESTA	26
3.1. PASOS UTILIZADOS PARA LA METODOLOGÍA	26
3.2. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA	27
3.2.1. Minimización del índice SAIFI	27
3.2.2. Minimización del índice SAIDI	29
4. APLICACIONES Y RESULTADOS	32
4.1. SISTEMA DE PRUEBA 1	33
4.1.1. Índice SAIFI	33
4.1.2. Índice SAIDI	35
4.2. SISTEMA DE PRUEBA 2.....	36
4.2.1. Índice SAIFI	40
4.2.2. Índice SAIDI	41

5. CONCLUSIONES	43
6. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	44
7. BIBLIOGRAFIA	45

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 Datos para el ejemplo [10]	28
Tabla 4.1 Costos de adquisición, reubicación y operación de dispositivos de protección [1] ...	33
Tabla 4.2 Resultados del SAIFI para el sistema de prueba 1	34
Tabla 4.3 Resultados del SAIDI para el sistema de prueba 1.....	36
Tabla 4.4 Datos del sistema de prueba 2 [13].....	37
Tabla 4.6 Resultados del SAIFI para el sistema de prueba 2	40
Tabla 4.8 Resultados del SAIDI para el sistema de prueba 2.....	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Sistema de distribución [10]	16
Figura 3.1 Diagrama unifilar del ejemplo [10].....	27
Figura 4.1 Convenciones utilizadas.....	32
Figura 4.2 Diagrama del sistema de prueba [10].....	33
Figura 4.3 Resultados obtenidos del sistema de prueba 1	34
Figura 4.4 Caso base - Sistema de prueba 2 [1]	39
Figura 4.5 Mejor solución obtenida en el sistema de prueba dos.....	39

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de distribución de energía eléctrica son los encargados del suministro de energía a los usuarios finales del servicio. Debido a esto, los entes reguladores del sector energético y particularmente del sector de electricidad, a través de las políticas de mejora continua del servicio, exigen a los operadores de la red un nivel mínimo de calidad. En este contexto, es responsabilidad de las empresas de distribución generar planes de acción que garanticen el cumplimiento de dichas políticas.

Generalmente los sistemas de distribución al estar en constante crecimiento requieren de estrategias eficientes de expansión y operación. Los proyectos de expansión básicamente tienen un enfoque a largo plazo, por lo que pretenden atender crecimientos de la demanda en un horizonte de tiempo específico. Por otro lado, en la operación de los sistemas de distribución se tienen periodos de análisis cortos, en el cual se pretende corregir prácticas operativas deficientes y garantizar que la red opere bajo las condiciones regulatorias vigentes.

Al tratar el problema de mejora de los indicadores de calidad en el servicio de electricidad, se está buscando mejorar condiciones actuales de operación que han presentado deficiencias y que han sido evaluadas a través del análisis del comportamiento del sistema con base en datos históricos.

La información histórica sobre el comportamiento de un sistema de distribución se torna de vital importancia a la hora de generar estrategias de mejora en la calidad del servicio, puesto que permite realizar medidas correctivas en problemas ya evidenciados; además permite inferir con alto grado de certeza lo que sucederá en el futuro próximo.

La calidad del servicio de un sistema eléctrico está estrechamente relacionada con las prácticas operativas del operador de red y de las políticas regulatorias actuales. Aunque los entes reguladores definen la ruta que debe seguir el sistema eléctrico en temáticas relacionadas con la calidad y la continuidad del servicio, no define cual o cuales son los

indicadores de confiabilidad que deben ser utilizados, ya que dependen de la realidad operativa de cada empresa y de sus metas de mejoramiento.

En este sentido el término calidad del servicio es bastante general, por lo que este puede ser trabajado desde el punto de vista de la forma de las señales eléctricas o del impacto que tiene sobre los usuarios finales los eventos externos de falla. Sin embargo de manera general, la calidad del servicio puede ser determinada a través de los indicadores de confiabilidad del servicio, que de una u otra manera están enfocados a la continuidad y disponibilidad en el suministro de energía.

Dadas las características operativas de los sistemas de distribución es imposible definir una función de confiabilidad global para el servicio, puesto que al sistema están conectados diferentes tipos de usuarios y por tanto, estos observan comportamientos diferentes en la funcionalidad y operatividad de la red. Adicionalmente según su ubicación geográfica en el sistema de distribución, se producen percepciones diferentes en la calidad y continuidad del servicio para cada usuario, lo que hace imposible determinar una función global de confiabilidad que tome en cuenta los aspectos ya mencionados.

Con el fin de solucionar alteraciones producidas por eventos de falla además de problemas relacionados con pérdida excesiva de carga, violación de límites operativos, deterioro de la vida útil de todos los elementos de la red y la deficiencia en los indicadores de confiabilidad, es necesario que las empresas distribuidoras cuenten con estrategias de aislamiento de fallas y transferencia de carga lo cual se puede lograr a través de la selección óptima de puntos de corte y puntos de transferencia con reconectores o fusibles, dando así una mayor flexibilidad a la operación del sistema ante fenómenos externos, obteniendo como beneficios el cumplimiento de estándares normativos y el mejoramiento de la calidad de servicio.

La mejora de la confiabilidad mediante la ubicación de dispositivos de protección en los sistemas de distribución ha sido fuente de grandes investigaciones en los últimos años. La mayoría de las investigaciones aborda el problema mediante la formulación de modelos

implícitos de índices de confiabilidad o minimización de costos. Al resolver estos modelos por lo general se requiere de búsquedas estocásticas que lleguen a una convergencia, lo cual requiere uso de algoritmos inteligentes que den una óptima ubicación. Lo que se propone en este documento es un enfoque analítico para la confiabilidad de los sistemas de distribución.

1.1. ESTADO DEL ARTE

La ubicación óptima de elementos de protección es un tema de gran interés en el sector eléctrico, haciendo de esta temática un área de investigación en desarrollo, que aún falta por explorar y además presenta una gran cantidad de investigaciones y proyectos orientados a mejorar o solucionar este problema. En general, el impacto que tiene en los usuarios la ubicación óptima de los diferentes dispositivos de protección está relacionado con el mejoramiento de los índices que corresponden a la frecuencia y la duración de las interrupciones. A continuación se presentan los trabajos más relevantes relacionados con el estudio de esta temática.

En 1997 Kagan *et al.* [2], presentan una metodología para minimizar la cantidad de energía no servida en redes de distribución primaria, a través de la sustitución e inserción de dispositivos de protección. La metodología propuesta considera algunos aspectos como la reconfiguración de la red, representación de la red por zonas de carga y análisis del costo/beneficio de la instalación de estos dispositivos.

Silva en 2002 [3], plantea una formulación matemática para el problema de ubicación de dispositivos de protección, que considera la posibilidad de adicionarlos en lugares estratégicos buscando mejorar el índice de confiabilidad de la red. El modelo matemático propuesto corresponde a un problema de programación no lineal con variables de tipo binario, el cual considera una función objetivo no lineal con un conjunto de restricciones lineales. En la solución del problema se emplea un algoritmo evolutivo.

Kagan en 2005 [4], propone un modelo de programación no lineal entera mixta, con el fin de resolver la ubicación de seccionalizadores y dispositivos de protección en redes de distribución. Esta propuesta tiene como objetivo reducir el tiempo de desconexión de la red debido a fallas temporales y minimizar el número de consumidores afectados, garantizando confiabilidad y bajos costos, logrando de esta manera un aumento en las utilidades de las empresas de distribución y el cumplimiento riguroso de la reglamentación establecida por parte de los organismos de control.

Moreti en 2007 [5], presenta una metodología para ubicar dispositivos de protección en sistemas de distribución primaria considerando generación distribuida. El modelo matemático considera la minimización de la energía no servida sujeto a un conjunto de restricciones técnicas y operativas, y en su solución se emplea una técnica heurística.

Kim *et al.* en 2010 [6], presenta el análisis para la ubicación y coordinación óptima de fusibles y reconectores en sistemas de distribución empleando una técnica heurística. Para verificar el comportamiento de las protecciones después de haber sido ajustados, los autores emplean sistemas de prueba reales usando el software PSCAD/EMTDC.

Toro en 2011 [7], propone un modelo matemático de tipo binario para la ubicación de elementos de protección a partir de una técnica que consiste en dividir el circuito de distribución en una sección principal y ramales laterales. En este trabajo se busca mejorar los índices de confiabilidad SAIFI y ASIFI. El modelo es resuelto utilizando el software de optimización GAMS.

Bretas y Ferreira en 2012 [8], presentan un nuevo modelo con una representación no lineal de tipo binaria, cuyo objetivo es minimizar los índices SAIFI y ASIFI en un alimentador de distribución radial. El modelo mostrado no requiere decisiones heurísticas sobre la división del alimentador y clasificación de las ramas. Para resolver el modelo propuesto se usa una técnica de optimización basada en el algoritmo de *Branch and Bound*.

Peñuela en 2012 [9], propone un modelo matemático para determinar el impacto de fuentes de generación distribuida en sistemas de distribución de energía en el planeamiento de

sistemas de distribución, considerando cuatro tipos de dispositivos de protección (reconectadores, seccionalizadores, fusibles y relés). El modelo es resuelto mediante la técnica de optimización multi-objetivo NSGA II y se valida en diferentes sistemas de prueba de la literatura especializada. También en este año Tio *et al.* en [10], presentan un modelo de programación no lineal binaria para los indicadores SAIFI y MAIFI en función de la ubicación de reconectadores y fusibles en un sistema de distribución de energía con características radiales. Además en el modelo es tenido en cuenta el comportamiento del sistema cuando existe esquema de salvamento de fusibles y cuando este no se considera. El modelo es resuelto a través de un paquete de optimización comercial y es construido un frente óptimo de Pareto con una metodología de ponderación en las funciones objetivo.

Darabi *et al.* en 2013 [11], plantean una metodología basada en el análisis costo/beneficio para la ubicación óptima de reconectadores y seccionalizadores cuya función objetivo considera la minimización de los costos de la confiabilidad de los sistemas de distribución. Además presentan un método híbrido basado en enjambre de partículas y usando simulación de Monte Carlo para solucionar el algoritmo.

Gallego en 2014 [12], propone una metodología que permita ubicar en forma óptima reconectadores y fusibles en sistemas de distribución para mejorar los indicadores de confiabilidad SAIFI y MAIFI, elaborando una metodología que permite resolver este problema de ubicación de estos elementos por medio de dos estrategias; una en donde se utiliza un software de programación y otra por un algoritmo genético

1.2. PRESENTACIÓN DEL DOCUMENTO

Este trabajo es organizado de la siguiente manera. En el capítulo 2 se describe la formulación y descripción del problema, además del modelo matemático con su función objetivo y sus respectivas restricciones. En el capítulo 3 se describe la metodología de solución con sus principales características. En el capítulo 4 se presenta la metodología propuesta para solucionar el problema y un ejemplo de aplicación en un sistema de nueve

tramos de red. En el capítulo 5 se encuentra las conclusiones derivadas de este proyecto, y posteriormente la bibliografía empleada.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En este capítulo se presenta la formulación general del problema de localización óptima de reconectadores, fusibles y seccionalizadores en sistemas de distribución, a través de un modelo de programación no lineal binario, el cual se describe detalladamente a continuación.

2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con el fin de solucionar el problema de la localización óptima de dispositivos de protección en sistemas de distribución para mejorar indicadores de confiabilidad, se presenta en este proyecto una metodología que considera la posibilidad de reubicar y adicionar fusibles, reconectadores y seccionalizadores en sistemas de distribución, considerando transferencia de carga en lugares estratégicos, con el fin de reducir el valor de los índices de confiabilidad de la red.

En este planteamiento se involucra la minimización del índice SAIFI o frecuencia de interrupción media del sistema (*System Average Interruption Frequency Index*), y el índice SAIDI o duración media de interrupción del sistema (*System Average Interruption Duration Index*).

El problema es formulado como un problema de programación no lineal binario mixto, el cual considera una función objetivo no lineal y un conjunto de restricciones lineales. El modelo está basado en la formulación matemática presentada en [1]. Para solucionar el modelo matemático se emplea el software Matlab y el paquete de optimización GAMS. En forma general el modelo está dado por:

Minimizar	<i>SAIFI o SAIDI</i>
Restricciones	<p><i>Límite de elementos máximos obligatorios en un tramo de red.</i></p> <p><i>Límite de elementos máximos de protección que pueden ser instalados en el sistema.</i></p> <p><i>Límite de elementos máximos que pueden ser instalados en cascada.</i></p> <p><i>Coordinación de elementos de protección.</i></p> <p><i>Aguas abajo de un fusible no puede haber un reconectador.</i></p> <p><i>Costos (adquisición, reubicación y operación de los elementos de protección)</i></p>

Para garantizar un buen modelo para el problema de ubicación de dispositivo de protección, se deben tener en cuenta varios factores como la localización, tipo de dispositivo y características de la red. Como se ha dicho anteriormente, el objetivo de este trabajo es encontrar una ubicación adecuada y un elemento apropiado para poder mejorar los índices SAIFI y SAIDI, los cuales tienen en cuenta la confiabilidad desde el punto del usuario.

2.2. MODELO MATEMÁTICO

Con el fin de ilustrar algunos aspectos claves para la formulación del modelo, se emplea el sistema de distribución de la Figura 2.1 [10], el cual está compuesto por un alimentador primario identificado como F-1. Al lado del sistema se pueden observar las convenciones consideradas, las cuales se van a emplear a lo largo de este documento.

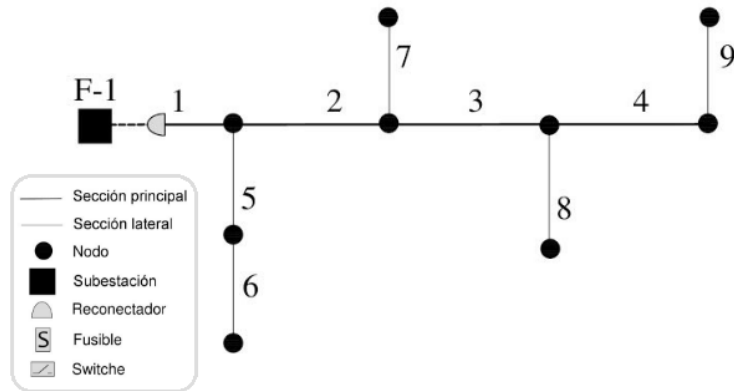


Figura 2.1. Sistema de distribución [10]

2.2.1. Conjuntos

Con el fin de plantear el modelo matemático, primero deben ser definidos una serie de conjuntos, los cuales se describen a continuación.

G : Es el conjunto que retorna todos los tramos de red en el camino desde la subestación al tramo de red i del sistema de distribución, incluyendo el tramo justo después de la subestación. Por lo tanto:

$$G = \{1, 2, \dots, 7, 8, 9\} \quad (2.1)$$

$U(i, j)$: Es la función que retorna el tramo de red inmediatamente aguas abajo $p(i)$ del tramo de red j en la trayectoria del tramo de red i .

$$U_i = \{i, p(i), p(p(i)), p(p(p(i))), \dots, 1\}, \forall i \in G \quad (2.2)$$

Por lo tanto:

$$\begin{aligned}U_1 &= \{1\} \\U_2 &= \{2,1\} \\U_3 &= \{3,2,1\} \\U_4 &= \{4,3,2,1\} \\U_5 &= \{5,1\} \\U_6 &= \{6,5,1\} \\U_7 &= \{7,2,1\} \\U_8 &= \{8,3,2,1\} \\U_9 &= \{9,4,3,2,1\}\end{aligned}$$

M : Es el conjunto de la sección principal del alimentador compuesta por la sección del alimentador aguas arriba más cerca hasta la subestación. Es la función que define la trayectoria principal del circuito del alimentador.

$$M = \bigcup_{i \in TP} U_i \quad (2.3)$$

Donde TP es el punto de conexión de la red de distribución con otros alimentadores. Por lo tanto:

$$M = \{1,2,3,4\}$$

$L(i, j)$: Es la función que retorna el conjunto de secciones laterales del alimentador principal, compuesto por el conjunto G y excluyendo las secciones que pertenecen al conjunto M .

$$L = G - M \quad (2.4)$$

$G - M$, denota el complemento de G en M , y el resultado es un conjunto de elementos de G que no son elementos de M . Por lo tanto:

$$L = \{5, 6, 7, 8, 9\}$$

2.2.2. Consideraciones para la descripción de la función objetivo

Los índices de confiabilidad SAIFI y SAIDI son formulados como una función no lineal indicando la instalación de elementos de protección en algunas secciones del sistema.

Para el modelo planteado se tienen las siguientes consideraciones previas:

- Los dispositivos están en perfecto estado.
- Los dispositivos de protección están ubicados en las tres fases.
- Las fallas son mutuamente excluyentes e independientes.
- La topología del sistema es siempre radial e invariante.

Las variables binarias de decisión son:

$$x_j = \begin{cases} 0, & \text{Si un reconectador es instalado en la sección } j \\ 1, & \text{En caso contrario} \end{cases} \quad \forall i \in G \quad (2.5)$$

$$y_j = \begin{cases} 0, & \text{Si un fusible es instalado en la sección } j \\ 1, & \text{En caso contrario} \end{cases} \quad \forall i \in L \quad (2.6)$$

$$z_j = \begin{cases} 0, & \text{Si un seccionalizador es instalado en la sección } j \\ 1, & \text{En caso contrario} \end{cases} \quad \forall i \in M \quad (2.7)$$

2.2.3. Función objetivo SAIDI

El indicador SAIDI mide el tiempo de duración de la interrupción, y se relaciona con la ubicación e intensidad de la falla además de los recursos disponibles que se tengan para solucionar el problema. Para el modelo SAIDI obtenido de [1], se tiene en cuenta la duración prevista de interrupciones de cada conjunto de los consumidores. La contribución

de la falla en una sección i al índice SAIDI de un alimentador, puede ser expresado de la siguiente manera:

$$SAIDI_i = \frac{1}{N_T} \left[(N_i^I - N_i^{II}) t_S + (N_i^{II} - N_i^{III}) r_i + N_i^{III} (t_S + t_S^{NO}) \right] \quad (2.8)$$

Donde,

- N_T : Es el número total de consumidores.
- N_i^I : Número de clientes aguas abajo del reconector.
- N_i^{II} : Número de clientes aguas abajo del interruptor.
- N_i^{III} : Número de clientes restaurados.
- T_S : Duración de la interrupción.
- T_S^{NO} : Tiempo requerido para cerrar el interruptor normalmente abierto.
- r_i : Tiempo esperado para la reparación.

Pasando a términos de N_i^I , N_i^{II} , N_i^{III} obtenemos:

$$SAIDI_i = \frac{1}{N_T} \left[N_i^I t_S + N_i^{II} (r_i - t_S) + N_i^{III} (t_S + t_S^{NO} - r_i) \right] \quad (2.9)$$

El índice SAIDI evaluado en todo el alimentador es obtenido como la sumatoria individual de contribuciones a fallas en cada sección del alimentador [1]. Por lo tanto:

$$SAIDI_i = \frac{1}{N_T} (N_I + N_{II} + N_{III}) \quad (2.10)$$

Donde N_i^I , N_i^{II} , N_i^{III} representan el impacto de la respuesta del sistema de protección, restauración de secciones con indisponibilidad, teniendo en cuenta las variables de decisión y el número esperado de fallos en cada sección del alimentador. Esto se expresa como:

$$\begin{aligned}
N_I = & \sum_{i \in G} \lambda_i t_s \sum_{j \in (U_i - L)} N_j \overline{x_j} \prod_{k \in (U_i - U_j)} x_k y_k + \sum_{i \in L} \lambda_i r_i \sum_{j \in (U_i - M)} N_j \overline{x_j y_j} \prod_{k \in (U_i - U_j)} x_k y_k \\
& + \sum_{i \in L} \gamma_i r_i \sum_{j \in (U_i - M)} N_j \overline{x_j} \prod_{k \in (U_i - U_j)} x_k y_k
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Donde,

λ_i : Tasas de fallos permanentes en la sección i .

γ_i : Tasas de fallos temporales en la sección i .

N_j : Número total de clientes aguas debajo de la sección j incluyendo los de la misma sección.

El primer término de (2.11) representa en el índice SAIDI las fallas permanentes en la sección i , cuando se instala un reconectador en una sección del circuito principal j (aguas arriba de la sección i) y no hay un reconectador o fusible instalado en la sección k (secciones entre i y j). El segundo término de (2.11) corresponde a la contribución de fallos permanentes en una sección i cuando un fusible o cuando un reconectador está en una sección lateral j . El tercer término evalúa las fallas temporales en las secciones laterales cuando son desconectados por fusibles.

El término N_{II} viene dado por la siguiente expresión:

$$N_{II} = \sum_{i \in G} \lambda_i (r_i - t_s) \sum_{j \in (U_i - L)} N_j \overline{x_j y_i z_i} \prod_{k \in (U_i - U_j)} x_k y_k z_k \tag{2.12}$$

La ecuación (2.12) representa el impacto de la restauración en el alimentador y es similar al primer término de (2.11). Al modelar el impacto de la restauración aguas abajo del alimentador se debe tener en cuenta que para la confiabilidad hay múltiples conjuntos de conmutación que se pueden utilizar para restablecer el servicio a varios conjuntos de clientes. Para el caso de aguas arriba se tiene:

$$N_{III} = \sum_{i \in G} \lambda_i (t_S - t_S^{NO} - r_i) \sum_{j \in (M-U_i)} N_j \overline{x_j z_i} \prod_{k \in ((U_j-j)-U_i)} x_k y_k \prod_{l \in (U_i-U_j)} x_l y_l z_l \quad (2.13)$$

La ecuación (2.13) representa el impacto de las fallas permanentes de la sección i , cuando se instala un dispositivo de conmutación ya sea un reconector, un seccionalizador o un fusible en la sección j que pertenece a todos las secciones del alimentador principal, excluyendo los tramos de aguas arriba de la sección i . Las productorias aseguran que el dispositivo de la sección j sea el primero en conmutar aguas abajo de la sección fallada i , el cual, debe ser abierto para restablecer el servicio al mayor número de consumidores.

Para eliminar las variables de decisiones complementarias y sus productos complementarios en (2.11) y (2.12), se utilizan las siguientes relaciones:

$$\overline{x_j} = 1 - x_j \quad (2.14)$$

$$\overline{y_j} = 1 - y_j \quad (2.15)$$

$$\overline{x_j y_j} = 2 - x_j - y_j \quad (2.16)$$

$$\overline{x_j z_j} = 2 - x_j - z_j \quad (2.17)$$

Usando estas relaciones y reemplazando en (2.11) a (2.13), se tiene la forma final de la función objetivo SAIDI (Ecuación 2.18). Esta evalúa la duración media anual esperada de interrupciones sostenidas de un alimentador, en función de los parámetros básicos de confiabilidad y la localización de dispositivos de protección e interrupciones.

$$\begin{aligned}
SAIDI = & \frac{1}{N} \left\{ \sum_{i \in G} \sum_{j \in (U_i - L)} \lambda_i N_j \left[t_S (1 - x_j) + (r_i - t_S) (2 - x_j - z_j) \prod_{k \in (U_i - U_j)} z_k \right] \right. \\
& \times \prod_{k \in (U_i - U_j)} x_k y_k + \sum_{i \in L} \sum_{j \in (U_i - M)} r_i N_j \left[\lambda_i (1 - x_j) + (\lambda_i - \gamma_j) (1 - y_j) \right] \\
& \times \prod_{k \in (U_i - U_j)} x_k y_k \sum_{i \in G} \sum_{j \in (M - U_i)} \lambda_i (t_S + t_S^{NO} - r_i) N_j (2 - x_j - z_j) \\
& \left. \times \prod_{k \in (U_j - j) - U_i} x_k y_k \prod_{l \in (U_i - U_j)} x_l y_l z_l \right\} \tag{2.18}
\end{aligned}$$

2.2.4. Restricciones

Las restricciones del modelo propuesto son de naturaleza técnica y económica, y están dadas por las ecuaciones (2.19)-(2.24). Las restricciones técnicas están relacionadas con la topología del sistema y la coordinación de los elementos de protección.

La ecuación (2.19) impone que en un tramo sólo puede existir un reconector o una transferencia para el ramal principal, es decir:

$$x_i + z_i \geq 1 \quad \forall i \in M \tag{2.19}$$

La ecuación (2.20) indica si un reconector o un fusible es requerido en un tramo de red i , es decir, sólo puede existir un dispositivo en los laterales existentes:

$$x_i + y_i \geq 1 \quad \forall i \in L \tag{2.20}$$

La ecuación (2.21) garantiza que no existan fusibles en la sección o secciones principales:

$$y_i \geq 1 \quad \forall i \in M \tag{2.21}$$

La ecuación (2.22) garantiza que no existan seccionalizadores en los laterales:

$$z_i \geq 1 \quad \forall i \in L \quad (2.22)$$

Las ecuaciones (2.23) y (2.24) corresponden a la cantidad de elementos de la misma naturaleza que puede existir en serie. Para los reconectores se tiene que:

$$\sum_{j \in U_i} x_j \geq |U_i| - 3 \quad \forall i \in G \quad (2.23)$$

Para los fusibles se tiene que:

$$\sum_{j \in (U_i - M)} y_j \geq |U_i - M| - 3 \quad \forall i \in L \quad (2.24)$$

Donde el valor absoluto de (2.23)-(2.24) denotan la cardinalidad (número de elementos) de los conjuntos.

Las restricciones económicas pueden ser agregadas como un límite de costos por utilidad para mejorar confiabilidad. La mayor parte de los elementos de protección son instalados sobre el alimentador en la fase de planeamiento, pero ellos pueden ser reubicados debido a cambios en el crecimiento de la carga, en los perfiles de carga o en la topología del sistema. Con el fin de tener en cuenta estas posibilidades, se propone una restricción económica que considera la posible existencia de elementos de protección previamente instalados en la red de alimentación. De esta manera los costos requeridos para el mejoramiento de confiabilidad es la suma de costos por la operación, reubicación y adquisición de elementos. En el caso de los reconectores, matemáticamente es expresado como se muestra en la ecuación (2.25):

$$C_{op}^r \left(\sum_{j \in G} \bar{x}_j \right) + C_{rel}^r \left(|X| - \sum_{j \in X} \bar{x}_j \right) + C_{aq}^r \left(\sum_{j \in G} \bar{x}_j - |X| \right) = 0 \quad (2.25)$$

Donde,

C_{op}^r : Costo de operación de reconectores.

C_{rel}^r : Costo de reubicación de reconectores.

C_{aq}^r : Costo de adquisición de reconectores.

Siendo X el conjunto de secciones de alimentación donde están instalados los reconectores existentes.

El primer término de (2.25) corresponde al costo total de funcionamiento de los reconectores, el cual es la multiplicación del costo unitario de la operación por el número total de reconectores instalados en el sistema. El segundo término pertenece al número de reconectores reubicados; esta operación consiste en el número de dispositivos disponibles para la reubicación, excluyendo el número de reconectores que permanecen en sus ubicaciones originales (no se reubican). El tercer término es el número de reconectores adquiridos, el cual consiste en el número total de reconectores en el sistema excluyendo el número de reconectores disponibles para la ubicación.

Para simplificar la ecuación (2.25) se tienen las siguientes relaciones:

$$\sum_{j \in G} \bar{x}_j = |G| - \sum_{j \in G} x_j \quad (2.26)$$

$$\sum_{j \in X} \bar{x}_j = |X| - \sum_{j \in X} x_j \quad (2.27)$$

Para la operación, reubicación y adquisición de fusibles y seccionalizadores se pueden desarrollar expresiones similares de (2.25)-(2.27). Por lo tanto, la suma de estos costos debe ser igual o menor al costo de confiabilidad, que es el presupuesto límite que se tiene que

mejorar o mantener en un sistema. En resumen, matemáticamente se expresa en la ecuación (2.28).

$$\begin{aligned}
& -\left(C_{aq}^r + C_{op}^r\right) \sum_{j \in G} x_j + C_{rel}^r \sum_{j \in X} x_j - \left(C_{aq}^f + C_{op}^f\right) \sum_{j \in L} y_j + C_{rel}^f \sum_{j \in Y} y_j \\
& -\left(C_{aq}^s + C_{op}^s\right) \sum_{j \in M} z_j + C_{rel}^s \sum_{j \in Z} z_j \leq CUT - \left(C_{aq}^r + C_{op}^r\right) |G| + C_{aq}^r |X| \\
& -\left(C_{aq}^f + C_{op}^f\right) |L| + C_{aq}^f |Y| - \left(C_{aq}^s + C_{op}^s\right) |M| + C_{aq}^s |Z|
\end{aligned} \tag{2.28}$$

Donde C_{op}^f, C_{rel}^r y C_{aq}^f son los costos unitarios de operación, reubicación y adquisición, respectivamente en fusibles. C_{op}^s, C_{rel}^s y C_{aq}^s son los costos unitarios de la operación, la reubicación y la adquisición respectivamente en los seccionadores. El costo CUT es asociado a la confiabilidad.

2.2.5. Función objetivo SAIFI

El indicador SAIFI mide frecuencia de ocurrencia de las interrupciones en los sistemas eléctricos, ante la falla en los componentes, maniobras e indisponibilidad que los afectan. Para el modelo SAIFI obtenido de [1], no se tiene en cuenta la instalación de seccionadores, ya que este no tiene ningún efecto. Su función objetivo se considera únicamente como la respuesta de protección que tiene el sistema ante una falla, la cual se deriva de (2.11) eliminando la duración esperada de las interrupciones. Agrupando las ecuaciones (2.14)-(2.16) la función objetivo SAIFI (2.19) es expresada de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
SAIFI = \frac{1}{N_T} & \left\{ \sum_{i \in G} \sum_{j \in (U_i - L)} \lambda_i N_j (1 - x_j) \prod_{k \in (U_i - U_j)} z_k \right. \\
& \left. + \sum_{i \in L} \sum_{j \in (U_i - M)} N_j \left[\lambda_i (1 - x_j) + (\lambda_i - \gamma_j) (1 - y_j) \right] \prod_{k \in (U_i - U_j)} x_k y_k \right\}
\end{aligned} \tag{2.29}$$

s.a. Ecuaciones (2.19)-(2.28)

3. METODOLOGÍA PROPUESTA

En este capítulo describe la metodología propuesta para el problema de ubicación óptima de reconectores, fusibles y seccionadores en los sistemas de distribución para el mejoramiento de los índices de confiabilidad SAIFI y SAIDI.

3.1. PASOS UTILIZADOS PARA LA METODOLOGÍA

- Determinar las características más representativas del circuito.
 - Diagrama unifilar.
 - Número de usuarios.
 - Nodos del sistema.
 - Tramos de red del sistema.

- Obtener la información relacionada con cada tramo de red que hace parte del sistema.
 - Nombrar tramo de red.
 - Nodo de envío.
 - Nodo de recibo.
 - Tasas de falla permanentes de cada tramo de red.
 - Tasas de falla temporales de cada tramo de red.
 - Número de usuarios por tramo de red.

- Construir la función objetivo del modelo matemático como se muestra en el capítulo dos en función de las tasa de falla, número de clientes aguas abajo de cada tramo de red y las variables asociadas a los dispositivos de protección.

- Definir el conjunto de restricciones del modelo matemático para el sistema, según los criterios dados en el capítulo dos.

- Solucionar el modelo matemático propuesto en el paso anterior, para obtener la ubicación óptima de los dispositivos de protección. La respuesta del modelo es de tipo

binario, es decir, donde hay un “0” indica que un elemento debe ser instalado en dicho tramo de red y un “1” indica lo contrario.

3.2. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

A continuación se muestra un ejemplo de aplicación de las ecuaciones planteadas para obtener el modelo matemático que describe el problema.

3.2.1. Minimización del índice SAIFI

Inicialmente se obtienen las características más representativas del circuito. El sistema bajo estudio es el que se muestra en la Figura 3.1 [10]:

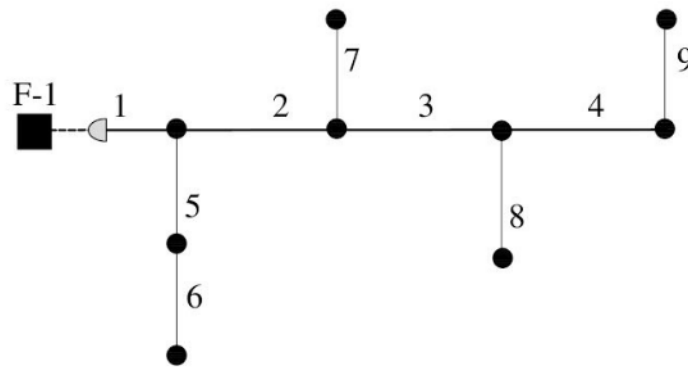


Figura 3.1 Diagrama unifilar del ejemplo [10]

En la Tabla 3.1 se observa la información correspondiente a cada tramo de red que hace parte del sistema.

Tabla 3.1 Datos para el ejemplo [10]

Sección	Nodo de envío	Nodo de Recibo	Tasa de fallas permanentes [falla-año/km]	Tasa de fallas temporales [falla-año/km]	Cantidad de carga por sección [kW]	Número de consumidores por sección
1	1	2	0.8	1.2	800	1500
2	2	3	0.8	1.4	1200	700
3	2	4	0.9	1.6	800	600
4	4	9	0.7	1	600	350
5	2	5	0.9	2	500	2250
6	5	6	0.7	1.7	300	350
7	3	7	0.8	2.8	400	300
8	4	8	1	3.2	200	1000
9	9	10	0.5	0.7	200	450

Luego se construye la función objetivo del modelo matemático y se define el un conjunto de restricciones para el sistema.

$$\begin{aligned}
 x_i + z_i &\geq 1 && \forall i \in M \\
 x_i + y_i &\geq 1 && \forall i \in L \\
 y_i &\geq 1 && \forall i \in M \\
 z_i &\geq 1 && \forall i \in L \\
 \sum_{j \in U_i} x_j &\geq |U_i| - 3 && \forall i \in G \\
 \sum_{j \in (U_i - M)} y_j &\geq |U_i - M| - 3 && \forall i \in L \\
 C_{op}^r \left(\sum_{j \in G} \bar{x}_j \right) + C_{rel}^r \left(|X| - \sum_{j \in X} \bar{x}_j \right) + C_{aq}^r \left(\sum_{j \in G} \bar{x}_j - |X| \right) &= 0
 \end{aligned}$$

Finalmente con los conjuntos terminados y con los datos obtenidos en los pasos anteriores, se procede a reemplazarlos en la ecuación (2.29). Para el SAIFI se tiene que:

$$\begin{aligned}
\text{SAIFI} = & 3.202 - 0.544 x_2 - 0.324 x_3 - 0.112 x_4 - 0.144 x_5 - 0.042 x_6 - 0.064 x_7 \\
& - 0.04 x_8 - 0.02 x_9 - 0.464 y_5 - 0.144 y_6 - 0.288 y_7 - 0.168 y_8 - 0.048 y_9 \\
& - 0.0002 x_2 y_2 (4000.0 x_1 - 4000.0) - 0.0002 x_3 y_3 (3060.0 x_2 - 3060.0) \\
& - 0.0002 x_4 y_4 (1260.0 x_3 - 1260.0) - 0.0002 x_5 y_5 (4500.0 x_1 - 4500.0) \\
& 4500.0) - 0.0002 x_7 y_7 (2720.0 x_2 - 2720.0) - 0.0002 x_9 y_9 (400.0 x_4 - \\
& 400.0) - 0.0002 x_8 y_8 (1800.0 x_3 - 1800.0) - 0.0002 x_6 y_6 (560.0 x_5 + \\
& 1920.0 y_5 - 2480.0) - 0.0002 x_2 x_3 y_2 y_3 (4500.0 x_1 - 4500.0) - \\
& 0.0002 x_3 x_4 y_3 y_4 (2380.0 x_2 - 2380.0) - 0.0002 x_2 x_7 y_2 y_7 (4000.0 x_1 - \\
& 4000.0) - 0.0002 x_5 x_6 y_5 y_6 (3500.0 x_1 - 3500.0) - 0.0002 x_3 x_8 y_3 y_8 (3400.0 x_2 \\
& - 3400.0) - 0.0002 x_4 x_9 y_4 y_9 (900.0 x_3 - 900.0) - 0.0002 x_2 x_3 x_4 y_2 y_3 y_4 (3500.0 x_1 \\
& - 3500.0) - 0.0002 x_2 x_3 x_8 y_2 y_3 y_8 (5000.0 x_1 - 5000.0) - 0.0002 x_3 x_4 x_9 y_3 y_4 y_9 (1700.0 x_2 \\
& - 1700.0) - 0.0002 x_2 x_3 x_4 x_9 y_2 y_3 y_4 y_9 (2500.0 x_1 - 2500.0) - 0.8 x_1
\end{aligned}$$

3.2.2. Minimización del índice SAIDI

Para el caso de minimización del índice SAIDI, los primeros dos pasos son exactamente iguales que en el caso de minimización del índice SAIFI; la diferencia radica en el término que corresponde a Z , el cual es la representación de la transferencia de carga. Adicionalmente para el caso del SAIDI, se tienen los mismos conjuntos que en el SAIFI, y por lo tanto, el mismo conjunto de restricciones. Finalmente con los datos obtenidos en los pasos anteriores, se obtiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
\text{SAIDI} = & 3.202 - 0.544 x_2 - 0.324 x_3 - 0.112 x_4 - 0.144 x_5 - 0.042 x_6 - 0.064 x_7 \\
& - 0.04 x_8 - 0.02 x_9 - 0.464 y_5 - 0.144 y_6 - 0.288 y_7 - 0.168 y_8 - 0.048 y_9 \\
& - 0.0002 x_2 y_2 (4000.0 x_1 - 4000.0) - 0.0002 x_3 y_3 (3060.0 x_2 - 3060.0) \\
& - 0.0002 x_4 y_4 (1260.0 x_3 - 1260.0) - 0.0002 x_5 y_5 (4500.0 x_1 - 4500.0) \\
& 4500.0) - 0.0002 x_7 y_7 (2720.0 x_2 - 2720.0) - 0.0002 x_9 y_9 (400.0 x_4 - \\
& 400.0) - 0.0002 x_8 y_8 (1800.0 x_3 - 1800.0) - 0.0002 x_6 y_6 (560.0 x_5 + \\
& 1920.0 y_5 - 2480.0) - 0.0002 x_2 x_3 y_2 y_3 (4500.0 x_1 - 4500.0) - \\
& 0.0002 x_3 x_4 y_3 y_4 (2380.0 x_2 - 2380.0) - 0.0002 x_2 x_7 y_2 y_7 (4000.0 x_1 - \\
& 4000.0) - 0.0002 x_5 x_6 y_5 y_6 (3500.0 x_1 - 3500.0) - 0.0002 x_3 x_8 y_3 y_8 (3400.0 x_2 \\
& - 3400.0) - 0.0002 x_4 x_9 y_4 y_9 (900.0 x_3 - 900.0) - 0.0002 x_2 x_3 x_4 y_2 y_3 y_4 (3500.0 x_1 \\
& - 3500.0) - 0.0002 x_2 x_3 x_8 y_2 y_3 y_8 (5000.0 x_1 - 5000.0) - 0.0002 x_3 x_4 x_9 y_3 y_4 y_9 (1700.0 x_2 \\
& - 1700.0) - 0.0002 x_2 x_3 x_4 x_9 y_2 y_3 y_4 y_9 (2500.0 x_1 - 2500.0) - 0.8 x_1 - \\
& 0.0002 x_2 y_2 (2000.0 x_2 + 4000.0 z_2 (1.5 x_1 + 1.5 z_1 - 3.0) - 2000.0) + \\
& 0.0002 x_3 z_3 (800.0 x_4 + 800.0 z_4 - 1600.0) - 0.0002 x_6 y_6 (1120.0 x_5 + 3840.0 y_5 - 4960.0) + \\
& 0.0002 x_2 z_2 (1800.0 x_3 + 1800.0 z_3 - 3600.0) + 0.0002 x_7 y_7 z_7 (1800.0 x_3 + 1800.0 z_3 - 3600.0) + \\
& 0.0002 x_5 y_5 z_5 (3825.0 x_2 + 3825.0 z_2 - 7650.0) + 0.0002 x_8 y_8 z_8 (1000.0 x_4 + 1000.0 z_4 - 2000.0)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -0.0002 x_2 x_3 y_2 y_3 \left(2250.0 x_1 + 4500.0 z_2 z_3 (1.5 x_1 + 1.5 z_1 - 3.0) - 2250.0 \right) \\
& -0.0002 x_3 x_4 y_3 y_4 \left(1190.0 x_2 + 2380.0 z_3 z_4 (1.5 x_2 + 1.5 z_2 - 3.0) - 1190.0 \right) \\
& -0.0002 x_3 x_8 y_3 y_8 \left(1700.0 x_2 + 3400.0 z_3 z_8 (1.5 x_2 + 1.5 z_2 - 3.0) - 1700.0 \right) \\
& -0.0002 x_5 x_6 y_5 y_6 \left(1750.0 x_1 + 3500.0 z_5 z_6 (1.5 x_1 + 1.5 z_1 - 3.0) - 1750.0 \right) \\
& -0.0002 x_4 x_9 y_4 y_9 \left(450.0 x_3 + 900.0 z_4 z_9 (1.5 x_3 + 1.5 z_3 - 3.0) - 450.0 \right) \\
& + 0.0002 x_2 x_3 z_2 z_3 \left(800.0 x_4 + 800.0 z_4 - 1600.0 \right) - 0.0002 x_2 x_7 y_2 y_7 - \\
& 0.0002 x_3 x_7 y_7 z_3 z_7 \left(2000.0 x_1 + 4000.0 z_2 z_7 (1.5 x_1 + 1.5 z_1 - 3.0) - 2000.0 \right) \\
& + \left(800.0 x_4 + 800.0 z_4 - 1600.0 \right) + 0.0002 x_2 x_5 y_5 z_2 z_5 \left(2025.0 x_3 + \right. \\
& \left. 2025.0 z_3 - 4050.0 \right) - 0.0002 x_3 x_4 x_9 y_3 y_4 y_9 \left(850.0 x_2 + \right. \\
& \left. 1700.0 z_3 z_4 z_9 (1.5 x_2 + 1.5 z_2 - 3.0) - 850.0 \right) - 0.0002 x_2 x_3 x_4 y_2 y_3 y_4 \\
& \left(1750.0 x_1 + 3500.0 z_2 z_3 z_4 (1.5 x_1 + 1.5 z_1 - 3.0) - 1750.0 \right) + \\
& 0.0002 x_5 x_6 y_5 y_6 z_5 z_6 \left(2975.0 x_2 + 2975.0 z_2 - 5950.0 \right) - \\
& 0.0002 x_2 x_3 x_8 y_2 y_3 y_8 \left(2500.0 x_1 + 5000.0 z_2 z_3 z_8 (1.5 x_1 + 1.5 z_1 - 3.0) - 2500.0 \right) \\
& + 0.0002 x_2 x_3 x_5^2 y_5^2 z_2 z_3 z_5^2 \left(900.0 x_4 + 900.0 z_4 - 1800.0 \right) \\
& - 0.0002 x_2 x_3 x_4 x_9 y_2 y_3 y_4 y_9 \left(1250.0 x_1 + 2500.0 z_2 z_3 z_4 z_9 (1.5 x_1 + 1.5 z_1 - 3.0) - 1250.0 \right) \\
& + 0.0002 x_2 x_5 x_6 y_5 y_6 z_2 z_5 z_6 \left(1575.0 x_3 + 1575.0 z_3 - 3150.0 \right) \\
& + 0.0002 x_2^2 x_3^2 x_5^2 x_6^2 y_5^2 y_6^2 z_2^2 z_3^2 z_5^2 z_6^2 \left(700.0 x_4 + 700.0 z_4 - 1400.0 \right) + 6.634;
\end{aligned}$$

4. APLICACIONES Y RESULTADOS

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos a través de la implementación computacional de la metodología propuesta en dos sistemas de distribución bajo estudio, para verificar su validez y aplicabilidad.

Para los dos sistemas de prueba, la implementación de la metodología y su aplicación se realiza en el software MATLAB y el paquete de optimización comercial GAMS.

Las convenciones empleadas en ambos sistemas de prueba, son las mostradas en la Figura 4.1:

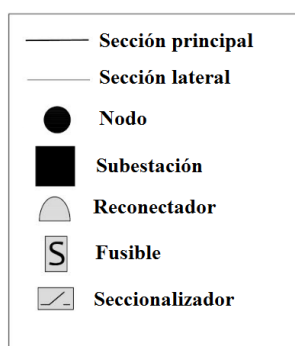


Figura 4.1 Convenciones utilizadas

Además con el fin de establecer un límite al realizar las pruebas, es necesario que las restricciones económicas tengan establecidos unos precios constantes definidos, que considera la reubicación, adquisición y operación de los dispositivos a utilizar en el sistema de distribución; en este caso se utilizaron los precios presentados en [1]. Estos precios se muestran en la Tabla 4.1. Los costos por reubicación de re conectadores fueron estimados como el 5% del costo de adquisición de los mismos, y para la reubicación de fusibles y seccionalizadores como el 20% de su costo de adquisición. Los costos por operación fueron calculados como los costos anuales de operación equivalentes a los costos de reubicación, con una proyección de vida de 5 años y una tasa de interés del 5%.

Tabla 4.1 Costos de adquisición, reubicación y operación de dispositivos de protección [1]

Dispositivo	Adquisición Costo [US\$]	Reubicación Costo [US\$]	Operación Costo [US\$]
Reconectores	25000	1250	5412
Fusibles	1500	300	1299
Seccionalizadores	2500	500	2165

4.1. SISTEMA DE PRUEBA 1

Para el primer sistema de prueba, el cual corresponde al ejemplo mostrado en la Figura 4.2 [10], se permite un máximo de cuatro reconectores a instalar en el sistema. Los datos de este sistema fueron mostrados en el capítulo 3. Este sistema es compuesto por nueve tramos de red y diez nodos incluyendo la subestación, la cual alimenta un total de 5000 usuarios.

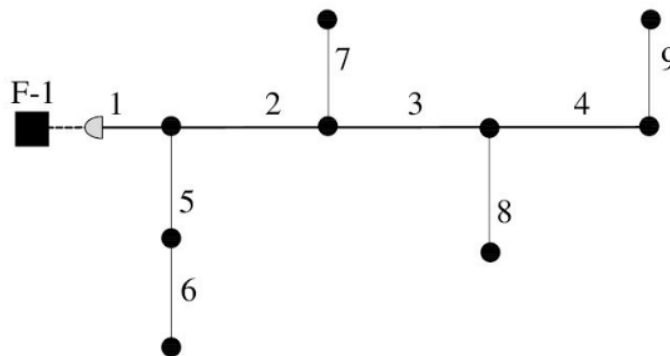


Figura 4.2 Diagrama del sistema de prueba [10]

4.1.1. Índice SAIFI

En la Figura 4.3(a) se muestra el caso base, el cual está operando con la ubicación de 1 reconector, 4 fusibles y 3 seccionalizadores. En la Figura 4.3(b) se encuentra la configuración óptima entregada por el paquete de optimización GAMS.

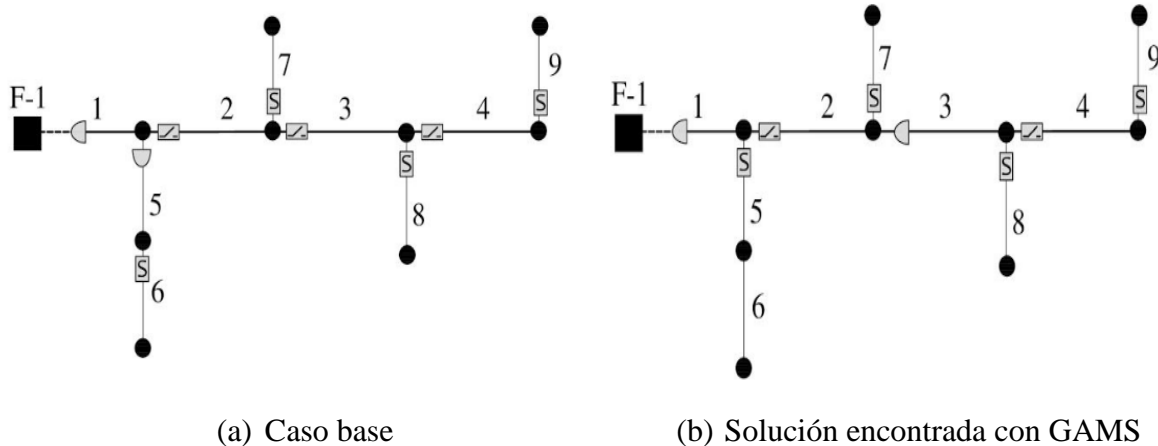


Figura 4.3 Resultados obtenidos del sistema de prueba 1

Con el fin de realizar una comparación de los resultados obtenidos, se hicieron diferentes escenarios de prueba. El caso 0 está asociado al caso en que no existen elementos de protección en el sistema. El caso base corresponde al escenario inicial, es decir, con los elementos de protección existentes. Los siguientes casos son evaluados con diferentes límites de costos de confiabilidad, los cuales pueden ser impuestos por el operador de red. En este proyecto, los demás casos tienen como límites 20.000, 40000 y 45.000 USD. Las soluciones óptimas mostradas en la Tabla 4.2 para cada escenario, permiten identificar que impacta más en el indicador de confiabilidad la reubicación de los elementos existentes que la instalación de elementos nuevos.

Tabla 4.2 Resultados del SAIFI para el sistema de prueba 1

Caso	Ubicación de elementos de protección		Costos [US\$]	Minimización de indicadores
	Reconectores	Fusibles		SAIFI
0	0	0	0	7.100
Base	5	6,7,8,9	17103	3.992
1	3	5,7,8,9	15924	3.528
2	3,5	6,7,8,9	39185	2.968
3	3,5	7,8,9	36686	2.936
4	3,5	6,7,8,9	43350	2.968

Para el caso 0 el valor del indicador SAIFI es muy grande en comparación a los demás casos, lo cual permite evidenciar la profunda incidencia de un solo elemento de protección en cualquier sistema de distribución eléctrico. Para el caso base se cuenta con un reconectador en la sección 5 y cuatro fusibles en las secciones 6, 7, 8 y 9, además de tres seccionadores en las secciones 2, 3 y 4, con un costo asociado de US\$ 17103 correspondiente a la operación de estos elementos sin tener en cuenta su adquisición (ya existían en la red). En las soluciones encontradas en los casos 2 y 4, se observa que el indicador de confiabilidad es igual, pero el valor del costo de confiabilidad es menor en el caso 2, lo cual se debe a la adquisición de seccionadores, lo cual incrementa su costo.

4.1.2. Índice SAIDI

Para el índice SAIDI fueron realizadas las mismas pruebas que en indicador anterior. Para esta función objetivo se tiene en cuenta la transferencia de carga con la ubicación de seccionadores en la sección principal del alimentador. De la misma forma se muestra el Caso 0, con el fin de examinar el máximo valor del indicador sin ningún elemento de protección, alcanzando un valor de 14.2, el cual es un valor muy elevado debido a la naturaleza del SAIDI cuyo objetivo es evaluar la duración de una falla del sistema en cualquier momento; por tal razón un sistema sin esquema de protecciones tendrá siempre fallos de alta duración con grandes cantidades de energía no servida a muchos usuarios. Para el caso base (con elementos de protección existentes), se tiene un índice SAIDI de 4.634.

Los resultados obtenidos son presentados en la Tabla 4.3, en la cual se observa como a medida que se instalan nuevos elementos y se reubican existentes, este indicador es mejorado. El mejor valor encontrado para el índice SAIDI se obtiene en el caso 4, cuyo valor es 4.122; este valor se obtiene con la adquisición de un reconectador y retirando del servicio un seccionador. Sin embargo es el caso que posee el mayor costo de confiabilidad, con una reducción muy baja con respecto al caso base. Se observa que en los

casos 1, 2 y 3 poseen mayores valores del indicador. Esto se debe a que en sistemas pequeños como este, no se aprecia ampliamente la incidencia de los elementos de protección. Sin embargo, se decidió usar este sistema porque permite aclarar aspectos importantes asociados a la metodología.

Tabla 4.3 Resultados del SAIDI para el sistema de prueba 1

Caso	Ubicación de elementos de protección			Costos [US\$]	Minimización de indicadores
	Reconectores	Fusibles	Seccionalizadores		SAIDI
0	0	0	0	0	14.2
Base	5	6,7,8,9	2,3,4	17103	4.634
1	3	5,7,8,9	2,4	15924	5.242
2	3,5	6,7,8,9	4	39185	4.826
3	3,5	7,8,9	4	36686	4.762
4	3,5	6,7,8,9	2,4	43350	4.122

4.2. SISTEMA DE PRUEBA 2

Para el segundo sistema no existe un número máximo de fusibles, aunque existe la restricción de que no puede haber más de seis elementos en cascada para evitar complicaciones en su coordinación, con el fin de reducir los tiempos de operación. Por otro lado, los reconectores se limitan a una cantidad máxima de 4.

En este sistema se tiene una topología radial [1], el cual tiene 51 secciones, 4 puntos de unión con los alimentadores adyacentes y alimenta 3958 clientes. Las tasas de fallas permanentes y temporales (λ , γ) utilizadas fueron obtenidas de [13]. En la Figura 4.4 se muestra la topología del alimentador, donde el 85% de la carga es de naturaleza residencial y el 15% de naturaleza industrial.

En la Tabla 4.4 se muestra el número de clientes, y carga media de cada una de las secciones. El tiempo medio para aislar la falla, permitir la conmutación y toda la realización

de actividades necesarias para transferir carga a alimentadores vecinos es de 2 horas, con tiempos de conmutación de 0.5 horas y un tiempo requerido para que un interruptor normalmente abierto cierre en 0.25 horas [1].

Tabla 4.4 Datos del sistema de prueba 2 [13]

Nodo de envío	Nodo de Recibo	Tasa de fallas permanentes [falla-año/km]	Tasa de fallas temporales [falla-año/km]	Número de consumidores por tramo	Cantidad de carga por tramo [kW]
1	2	0.58	0.85	0	0
2	3	0.09	0.13	0	0
3	5	0.02	0.03	0	0
3	4	0.07	0.10	55	150
2	6	0.09	0.13	0	0
6	7	0.17	0.25	89	220
6	8	0.17	0.25	0	0
8	9	0.51	0.75	145	1250
9	11	0.09	0.13	85	90
9	10	0.05	0.08	1	90
11	14	0.20	0.30	200	445
11	12	0.17	0.25	2	720
12	13	0.17	0.25	55	30
8	15	0.05	0.08	0	0
15	16	0.49	0.73	55	150
16	17	0.51	0.75	57	50
16	18	0.29	0.43	105	60
18	19	0.22	0.33	243	310
18	20	0.34	0.50	147	340
20	21	0.24	0.35	47	30
20	22	0.17	0.25	107	2130
22	23	0.07	0.10	30	250
23	24	0.39	0.58	117	780
24	25	0.68	1.00	135	610
24	26	0.12	0.18	95	80
24	27	0.26	0.38	50	60
27	28	0.15	0.23	80	110
27	29	0.71	1.05	120	590
29	30	0.12	0.18	93	90
29	31	0.39	0.58	145	170

Nodo de envío	Nodo de Recibo	Tasa de fallas permanentes [falla-año/km]	Tasa de fallas temporales [falla-año/km]	Número de consumidores por tramo	Cantidad de carga por tramo [kW]
23	32	0.48	0.70	65	480
32	33	0.26	0.38	80	2400
33	34	0.22	0.33	102	210
34	35	0.10	0.15	20	50
34	36	0.09	0.13	30	100
32	37	0.02	0.03	0	0
37	38	0.43	0.63	65	100
37	39	0.54	0.80	50	480
39	40	0.14	0.20	1	500
40	41	0.51	0.75	220	450
40	42	0.46	0.68	95	150
42	43	0.51	0.75	125	110
39	44	1.58	2.33	167	60
44	45	0.60	0.88	141	150
44	46	0.20	0.30	21	50
46	47	0.34	0.50	93	140
46	48	0.15	0.23	106	36
48	49	0.22	0.33	90	60
48	50	0.22	0.33	17	30
50	51	0.85	1.25	145	160
50	52	0.34	0.50	67	1350

En la Figura 4.5 es mostrada la solución óptima encontrada por GAMS, caso en el que comparando la minimización obtenida en cada indicador, y equilibrándolo con los costos, representa la mejor solución para el sistema.

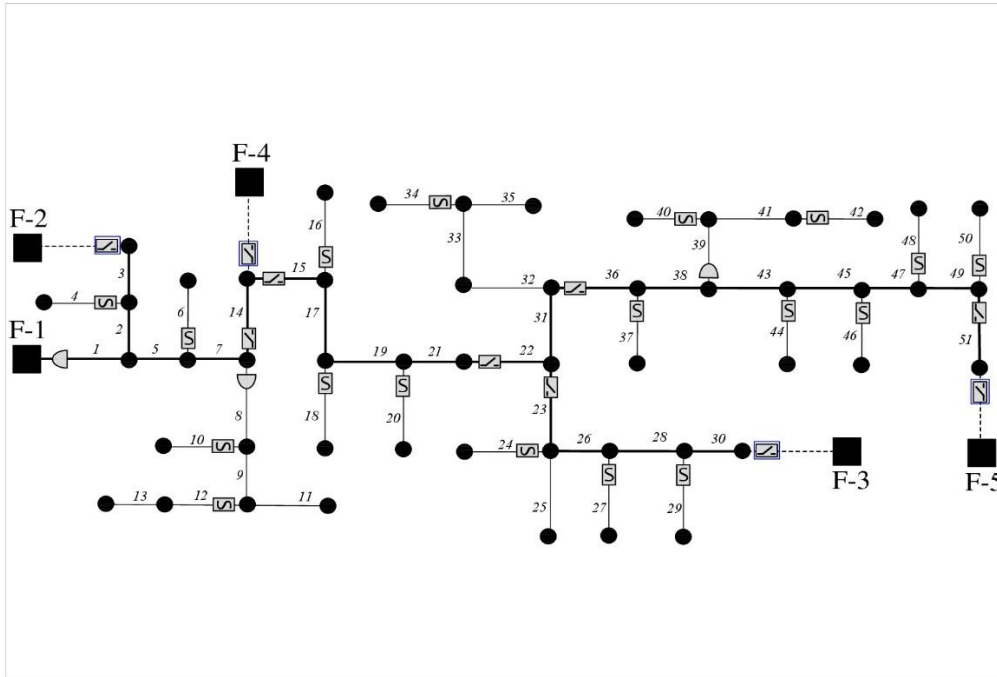


Figura 4.4 Caso base - Sistema de prueba 2 [1]

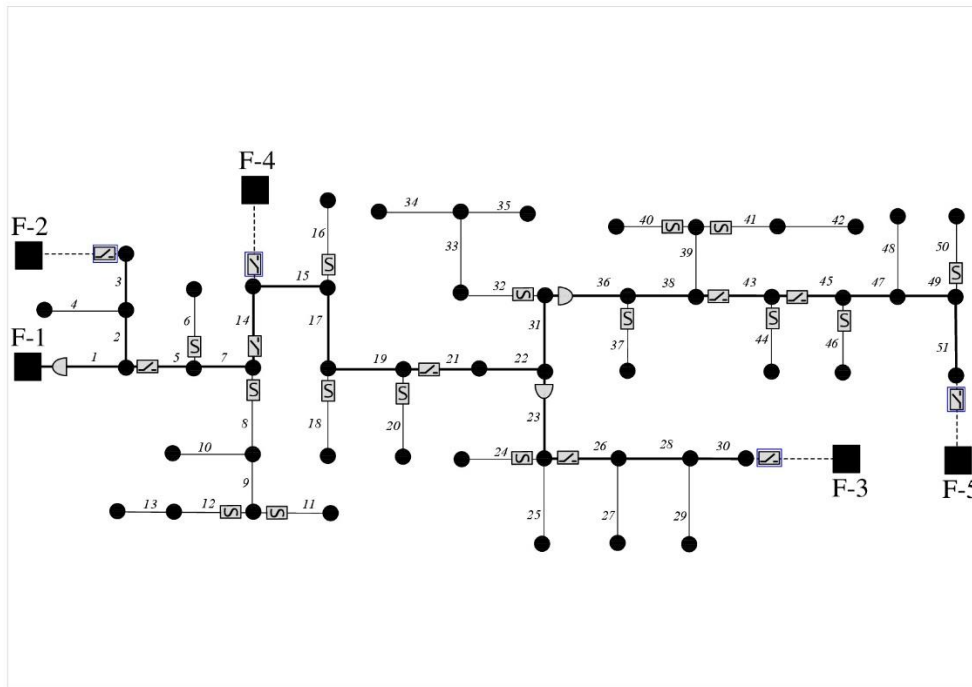


Figura 4.5 Mejor solución obtenida en el sistema de prueba dos

4.2.1. Índice SAIFI

Las pruebas realizadas en el sistema de la Figura 4.4, son iguales a las realizadas en el ejemplo de aplicación del sistema de prueba 1.

En la Tabla 4.6 se observan los resultados obtenidos al solucionar el modelo matemático cuya función objetivo es el indicador SAIFI. Se debe tener en cuenta que estas soluciones no consideran un esquema de salvamento de fusibles, sin embargo, el efecto de usar este esquema sobre índices SAIFI y SAIDI puede ser modelado haciendo $\gamma_i = 0$ para todos los i pertenecientes al conjunto L , en las ecuaciones (2.18) y (2.29).

Para el caso base el costo por confiabilidad es US\$47196, el cual corresponde a los costos de operación por la existencia de 2 reconectadores, 18 fusibles y 6 seccionalizadores en el sistema.

Tabla 4.5 Resultados del SAIFI para el sistema de prueba 2

Caso evaluado	Ubicación de elementos de protección		Costos [US\$]	Minimización de indicadores
	Reconectadores	Fusibles		SAIFI
Base	8,39	4,6,10,12,16,18,20,24,27,29,34,37,40,42,44,46,48,50	47196	8.92
1	23,36	6,8,11,12,16,18,20,24,32,37,40,41,44,46,50	45899	5.533
2	23,36	4,6,8,11,12,16,18,20,24,32,33,37,40,41,42,44,46,48,50	74855	5.196
3	23,36	4,6,8,9,10,11,12,16,18,20,24,25,32,33,34,37,40,41,42,44,46,48,50	99446	5.146

Los casos 1, 2 y 3 tienen un límite del costo de confiabilidad de 50000, 75000 y 100000 USD, respectivamente.

El caso 1 presenta una reducción del 38.0% en este indicador, además de que los costos por confiabilidad se ven reducidos en 9.1% con respecto al caso base. Las pruebas realizadas bajo esta restricción son estrategias que se consideran con solo reubicación de los elementos existentes sin adquirir nuevo elementos.

Los otros dos casos (2 y 3), a pesar de que reducían el índice SAIFI, representaban una inversión económica mayor, lo cual no era atractivo desde el punto de vista beneficio/costo.

4.2.2. Índice SAIDI

En la Tabla 4.8 se muestran los mismos casos evaluados con el indicador SAIFI.

Tabla 4.6 Resultados del SAIDI para el sistema de prueba 2

Caso evaluado	Ubicación de elementos de protección			Costos [US\$]	Minimización de indicadores
	Reconectores	Fusibles	Seccionalizadores		SAIDI
Base	8,39	4,6,10,12,16,18,20,24,27,29,34,37,40,42,44,46,48,50	14,15,22,23,36,51	47196	8.670
1	23,36	6,8,11,12,16,18,20,24,32,37,40,41,44,46,50	5,14,21,26,43,45	45899	5.583
2	23,36	4,6,8,11,12,16,18,20,24,32,33,37,40,41,42,44,46,48,50	7,14,17,19,26,28,31,43,45,49	74855	5.356
3	23,36	4,6,8,9,10,11,12,16,18,20,24,25,32,33,34,37,40,41,42,44,46,48,50	5,7,15,17,19,21,26,28,30,31,43,45,49	99446	5.160

Lo que cabe resaltar en las muchas de las pruebas realizadas en este sistema con el indicador SAIDI, es que la incidencia de un seccionalizador y/o un reconector a lo largo de la sección principal del alimentador o la coordinación entre seccionalizador y reconector en laterales del circuito, permiten una reducción importante en la duración de

fallos permanentes, y una clarificación muy rápida de fallos temporales en laterales del circuito, lo cual permite una mejor respuesta del índice de confiabilidad obtenido.

Por ejemplo para el caso 1 se determinó la reubicación de 2 reconectores, 3 fusibles y 5 seccionalizadores. Adicional a esto, fueron removidos 3 fusibles existentes del alimentador, resultando como solución óptima una respuesta con un costo asociado de US\$45899, lo cual demuestra que es posible obtener una reducción del 31% del índice SAIDI en relación con el caso base, además de un ahorro de US\$1297 en costos por confiabilidad.

Las pruebas realizadas con costos mayores a US\$50000, no representan una importante minimización del indicador, con respecto al caso anterior.

5. CONCLUSIONES

Con el fin de solucionar el problema de ubicación óptima de elementos de protección con el único objetivo de minimizar índices de confiabilidad SAIFI y SAIDI en un sistema de distribución considerando transferencia de carga y costos finales de adquisición, operación, y reubicación de elementos, fue planteado un modelo de programación no lineal binario que minimiza la función objetivo sujeta de un conjunto de restricciones que involucran aspectos técnicos, operativos y financieros.

Fueron considerados elementos de protección existentes en el sistema de distribución, siendo este un caso mucho más real de cualquier empresa prestadora del servicio. Adicionalmente para la formulación de la función objetivo y las restricciones, se limitaron los elementos en cascada con el fin de evitar problemas de coordinación y tiempos en cada uno de los elementos instalados. De esta forma se demuestra la flexibilidad del modelo en alimentadores reales y da posibilidad de reubicar, adquirir o desinstalar algunos elementos, considerando la mayor minimización de los índices de confiabilidad y buscando el costo óptimo del proyecto.

El modelo no necesita de la división del sistema de distribución, reducción de ramales o algún tipo de clasificación de la carga, ya que la formulación solo tiene en cuenta como limitante la ubicación más adecuada según la utilidad y funcionamiento del elemento dentro de un esquema de protección (reconectores en cualquier parte del sistema de distribución, fusibles solo en ramales, y seccionadores solo en la sección principal del alimentador).

La eficiencia y precisión de los resultados del modelo, radica en la formulación de las limitantes que se plantearon para el desarrollo de la función objetivo con una restricción económica que no es tomada en cuenta en muchos de los modelos de la literatura, dándole una versatilidad más completa al modelo, donde se considera el efecto de elementos existentes en el alimentador directamente asociados a la reducción de costos pertinentes por reubicación comparados con los de adquisición. Finalmente el detallado y estricto conjunto de restricciones desarrolladas permitieron obtener un modelo que optimiza el problema de forma rápida y eficiente considerando datos significativos del sistema asociados a fallas permanentes y temporales.

6. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Desarrollar un modelo matemático para analizar la ubicación óptima de dispositivos de protección, donde sea considerado el estudio operativo de la red a través de la evaluación de flujos de carga.

Ubicar dispositivos de protección teniendo en cuenta una función multi-objetivo en la cual se consideren el análisis de costos asociados a los daños ocasionados a los clientes por interrupciones, o costo de las pérdidas por energía no servida.

Considerar una metodología que integre ambos índices (SAIFI y SAIDI), encontrando no solo una solución óptima de la ubicación de los dispositivos, sino también el punto de equilibrio donde ambos indicadores sean minimizados de la mejor forma posible.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Bretas, G., Ferreira, A. “A nonlinear binary programming model for electric distribution systems reliability optimization”, *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 43, pp. 384-392, 2012.
- [2] Kagan, N., Prieto, H., Barioni, C., Robba, J. “Otimização da Qualidade de Fornecimento pela Localização de Dispositivos de Proteção e Seccionamento em Redes de Distribuição”, *Anais do II Seminário Brasileiro Sobre Qualidade de Energia Elétrica* (Digital -CD), pp. 16-19 de Novembro de 1997, São Lourenço – MG.
- [3] Silva, L. “Alocação otimizada de dispositivos de proteção em sistemas de distribuição de energia elétrica. Dissertação (Mestrado)”, *Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira*, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2002.
- [4] Kagan, N., Oliveira, C. “Goal Planning and Risk Analysis for Distribution Reliability Indices”, *IEEE Conference Publication*, No. 482, June 2001.
- [5] Moreti, E. “Análises e estudos para alocação e ajustes de dispositivos de proteção em redes de média tensão de energia elétrica com geração Distribuída”, Dissertação (Mestrado) - *Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista*, Ilha Solteira, 2007.
- [6] Kim, M., Lim, S., Moon, J., Kim, J. “Method of Recloser-Fuse Coordination in a Power Distribution System With Superconducting Fault Current Limiter”, *Transactions on Power Delivery*, Marzo 2010.
- [7] Toro, C. “Ubicación Óptima de Dispositivos de Protección en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica”, *Universidad Tecnológica de Pereira*, Facultad de Ingenierías, Programa de Ingeniería Eléctrica, 2011.
- [8] Bretas, G., Ferreira, A. “Optimal Distribution Protection Desing Considering Momentary and Sustained Reliability Indices”, *Modern Electric Power System* 2010.
- [9] Peñuela, C. “Desenvolvimento de Técnicas e Modelos Matemáticos para Solução do Problema do Planejamento da Expansão e Operação de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica com Geradores Distribuídos”, Tese de Doutorado, *Universidade*

Estadua, Julio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia, Campus Ilha Solteira, 2012.

- [10] Tio, A., Cruz, I., Malquisto, B., del Mundo, R. “A Binary Programming Model for Reliability Optimization Considering Fuse-blow and Fuse-save Schemes”, *University of the Philippines, Electrical and Electronics Engineering Institute, Power System Simulation Laboratory*, 2012.
- [11] Darabi, F., Shooshtari, A., Babaei, E., Darabi, S. “Reliability Cost Allocation of Protective Devices Using Binary Programming”, *IEEE Symposium of Business*, 2011.
- [12] Gallego, J.P. “Ubicación óptima de reconectores y fusibles en sistemas de distribución de energía para el mejoramiento de índices de confiabilidad”, *Revista Iteckne*, Vol. 13, No. 2, pp. 113-126, 2016.
- [13] Tippachon, W., Rerkpreedapung, D. “Multiobjective optimal placement of switches and protective devices in electric power distribution systems using”, *Electr Power Syst Res*, vol. 79, pp. 1171-8, 2009.