

**ESTUDIO DE UBICACIÓN ÓPTIMA DEL SEGUNDO ELEMENTO DE PROTECCIÓN,
SECCIONAMIENTO Y TELEMEDIDA PARA DETECCIÓN DE AUSENCIA / PRESENCIA
DE TENSIÓN Y SEGUIMIENTO DE VARIABLES ELÉCTRICAS EN LOS CIRCUITOS DE
NIVELES 2 Y 3 DE ESSA ESP.**

**GUILLERMO ANDRÉS BELTRAN MANTILLA - 2139102
JOSE DEL CARMEN MOTTA ESTUPIÑÁN - 968809**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA
BUCARAMANGA
2015**

**ESTUDIO DE UBICACIÓN ÓPTIMA DEL SEGUNDO ELEMENTO DE PROTECCIÓN,
SECCIONAMIENTO Y TELEMEDIDA PARA DETECCIÓN DE AUSENCIA / PRESENCIA DE
TENSIÓN Y SEGUIMIENTO DE VARIABLES ELÉCTRICAS EN LOS CIRCUITOS DE
NIVELES 2 Y 3 DE ESSA ESP.**

**GUILLERMO ANDRÉS BELTRAN MANTILLA
JOSE DEL CARMEN MOTTA ESTUPIÑÁN**

Monografía presentada como requisito para optar al título de
Especialista en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica

Director

Ing. JOHANN FARIT PETIT SUÁREZ

Evaluador

Ing. GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA
BUCARAMANGA
2015**

DEDICATORIA

- Primeramente a Dios fuente de todo poder,

- A mis mayores por sus enseñanzas, consejos, apoyo y fortaleza que siempre me brindaron y transmitieron,

- A mi esposa por siempre estar a mi lado en la construcción y fortalecimiento de nuestra bella familia.

- A mis tres hijos Dianita, Daniel y Nathica por ser los bellos seres que Dios me prestó para darles la vida, criar, formar y hacerme sentir tan orgulloso de ellos en cada uno de sus logros,

- A mi amada alma mater, la gloriosa UIS, en la cual me formé como Ingeniero y hoy me permite conseguir esta nueva formación académica,

- A los queridos profesores, director y evaluador. Algunos de ellos presentes en la formación básica de Ingeniero y en la presente,

- A ESSA y sus directivos por el apoyo brindado,

JOSÉ MOTTA ESTUPIÑÁN

DEDICATORIA

✚ *Primeramente a Dios por permitirme llegar a este punto de mi vida aprendiendo y compartiendo cada día con más intensidad.*

✚ *A mi amada esposa Andrea por su sacrificio a nuestra reciente vida matrimonial, de quien recibí apoyo incondicional y quien creyó en mí en cada paso de este importante recorrido.*

✚ *A mis padres quienes con emoción y orgullo son partícipes de cada logro obtenido.*

✚ *A los compañeros y a la empresa Electrificadora de Santander - ESSA, por esta invaluable oportunidad de compartir creciendo como persona y profesional, y de retribuir tanto a ella misma como a la región con la aplicación de los conocimientos adquiridos.*

✚ *A la gloriosa Universidad Industrial de Santander, de la cual me siento orgulloso por ser el inicio de mi formación profesional y en donde espero seguir aprendiendo y contribuyendo desde mis labores diarias para ser cada día mejor...*

...y a todo lo que queda por venir...

Guillermo Andrés Beltrán Mantilla

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	14
1. ALCANCE	15
2. OBJETIVO GENERAL	16
3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
4. ANTECEDENTES Y MARCO CONCEPTUAL	18
4.1 ESTADO DEL ARTE PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA.....	19
4.2 DESCRIPCIÓN DE ALGUNAS METODOLOGÍAS DE LÓGICA Y OPTIMIZACIÓN	21
5. INFORMACIÓN DE LOS CIRCUITOS DE NIVEL 3	22
6. CLASIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE LOS CIRCUITOS DE NIVEL 2 POR TIPO DE CARGA.....	23
7. EQUIPOS A UTILIZAR COMO SEGUNDO ELEMENTO EN LOS CIRCUITOS DE NIVEL 2.....	28
7.1 EQUIPO 1: SISTEMA DE GESTIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN	28
7.2 EQUIPO 2: RECONECTADOR Y ELEMENTOS ASOCIADOS	33
8. PRESUPUESTO DE INSTALACIÓN DE SEGUNDO ELEMENTO.....	37
8.1 PRESUPUESTO SISTEMA GESTIÓN DE REDES EN NIVEL DE TENSIÓN 2	37
8.2 PRESUPUESTO RECONECTADOR EN NIVEL DE TENSIÓN 3	37
8.3 PRESUPUESTO RECONECTADOR EN NIVEL DE TENSION 2	38
9. APLICACIÓN DE LA LÓGICA DIFUSA	39
9.1 VARIABLES DE ENTRADA	39
9.1.1 Trazado de la troncal principal del circuito	39
9.1.2 Porcentaje de la distancia de protección (DP)	39

9.1.3	Porcentaje de la potencia de protección (PP)	40
9.1.4	Tipo de carga (TC)	42
9.2	VARIABLE DE SALIDA.....	43
9.3	CONTROLADOR DIFUSO	44
10.	UBICACIÓN ÓPTIMA DEL SEGUNDO RECONECTADOR EN LOS CIRCUITOS SELECCIONADOS	45
10.1	CIRCUITO 28506.....	45
10.2	CIRCUITO 24503.....	48
10.3	CIRCUITO 09502.....	52
10.4	CIRCUITO 20506.....	53
11.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL SISTEMA DE LÓGICA DIFUSA	55
11.1	ANÁLISIS DP Vs PP	55
11.2	ANÁLISIS DP Vs TC	56
11.3	ANÁLISIS PP Vs TC	57
12.	CONCLUSIONES.....	59
13.	RECOMENDACIONES	60
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Niveles de tensión en Colombia.	19
Tabla 2. Circuitos de niveles 3 en AMB.	22
Tabla 3. Clasificación de los circuitos nivel 2 del AMB de ESSA ESP.	23
Tabla 4. Características equipo de Gestión de Redes.	29
Tabla 5. Condiciones ambientales de operabilidad.	34
Tabla 6. Peso total aproximado de cada uno de los tipos de reconectador.	34
Tabla 7. Puertos de programación y comunicación del relé.	34
Tabla 8. Protocolos de comunicación nativos.	35
Tabla 9. Características generales del interruptor.	35
Tabla 10. Características técnicas mínimas garantizadas del equipo.	36
Tabla 11. Presupuesto de instalación sistema de gestión de redes nivel 2.	37
Tabla 12. Presupuesto de instalación del reconectador en nivel 3.	37
Tabla 13. Presupuesto de instalación del reconectador en nivel 2.	38
Tabla 14. Funciones de membresía variable DP.	40
Tabla 15. Funciones de membresía variable PP.	41
Tabla 16. Funciones de membresía variable TC.	42
Tabla 17. Funciones de membresía variable NR.	43
Tabla 18. Reglas del controlador difuso.	44
Tabla 19. Conjuntos de variables de entrada circuito 28506.	46
Tabla 20. Ubicación del rango óptimo circuito 28506.	47
Tabla 21. Conjuntos de variables de entrada circuito 24503.	49
Tabla 22. Ubicación del rango óptimo circuito 24503.	50
Tabla 23. Ubicación del rango óptimo circuito 09502.	52
Tabla 24. Ubicación del rango óptimo circuito 20506.	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área cubierta por el circuito 24503	24
Figura 2. Área cubierta por el circuito 28506	25
Figura 3. Área cubierta por el circuito 20506	26
Figura 4. Área cubierta por el circuito 09502	27
Figura 5. Indicador de falla FCI-2.....	28
Figura 6. Concentrador FWT200.	28
Figura 7. Diagrama instalación SGR-2.....	29
Figura 8. Representación gráfica de las funciones de membresía variable DP	40
Figura 9. Representación gráfica de las funciones de membresía variable PP.....	41
Figura 10. Representación gráfica de las funciones de membresía variable TC	42
Figura 11. Representación gráfica de las funciones de membresía variable NR.....	43
Figura 12. Troncal principal del circuito 28506.	45
Figura 13. Sistema lógico difuso circuito 28506.....	47
Figura 14. Troncal principal del circuito 24503.	48
Figura 15. Troncal principal del circuito 09502.	52
Figura 16. Análisis de sensibilidad DP vs PP.	55
Figura 17. Análisis de sensibilidad DP vs TC.	56
Figura 18. Análisis de sensibilidad PP vs TC.	57

Título: ESTUDIO DE UBICACIÓN ÓPTIMA DEL SEGUNDO ELEMENTO DE PROTECCIÓN, SECCIONAMIENTO Y TELEMEDIDA PARA DETECCIÓN DE AUSENCIA / PRESENCIA DE TENSIÓN Y SEGUIMIENTO DE VARIABLES ELÉCTRICAS EN LOS CIRCUITOS DE NIVELES 2 Y 3 DE ESSA ESP*

Autores: GUILLERMO BELTRAN

JOSE MOTTA**

Palabras clave: Lógica difusa, lógica borrosa, segundo elemento de protección, seguimiento y telemetria, detección de ausencia / presencia de tensión.

Descripción

En cumplimiento de la resolución CREG 097 de 2008, con modificaciones establecidas por la resolución CREG 043 de 2010, y por la resolución 091 de 2012 (en su artículo 6°), estipula los plazos correspondientes a los operadores de red en Colombia, para la instalación de un segundo elemento de telemetria para detección de ausencia / presencia de tensión por lo menos en el 90% de los circuitos de niveles 2 y 3 de sus sistemas de distribución locales. Por tanto, con miras a cumplir con lo establecido en el marco regulatorio se hace necesario el desarrollo e implementación en ESSA de una metodología basada en algoritmos de inteligencia artificial que permitan la ubicación del mencionado elemento de forma óptima bajo criterios de ubicación y criticidad de cargas asociadas sobre la red y el mínimo impacto en la prestación del servicio para todos los usuarios de la misma.

Según lo planteado, y no únicamente con el objetivo de cumplir regulatoriamente con lo estipulado en la Resolución CREG 043 de 2010, modificada por la Resolución CREG 091 de 2012, se realiza el presente estudio para identificar, basado en la lógica difusa, la ubicación óptima de un segundo elemento que tenga las funciones de protección, seccionamiento y telemetria de las variables eléctricas de la red en los niveles 2 y 3 de ESSA, que permitan generar mayor flexibilidad y maniobrabilidad operativa ante contingencias o actividades de mantenimiento con la menor desatención posible de la demanda.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Ing. Johann Farith Petit Suárez.

ABSTRACT

Title: OPTIMA LOCATION STUDY OF SECOND ELEMENT OF PROTECTION, AND BUCKING TELEMETRY FOR DETECTION OF ABSENCE / PRESENCE OF VOLTAGE AND MONITORING OF VARIABLES IN ELECTRICAL CIRCUITS LEVELS 2 AND 3 ESSA ESP*

Authors: GUILLERMO BELTRAN

JOSE MOTTA**

Keywords: Fuzzy Logic, Second element of protection, monitoring and telemetry, detection of absence / presence of voltage.

Description

In compliance with resolution CREG 097 of 2008, as amended established by resolution CREG 043 of 2010, and by resolution 091 of 2012 (article 6th) stipulates the deadlines for network operators in Colombia, for installation of a second element of telemetry for detecting absence / presence of voltage at least 90% of the circuits of levels 2 and 3 of the Local Distribution Systems. Therefore, in order to comply with the provisions of the regulatory framework for the development and implementation in ESSA of a methodology based on artificial intelligence algorithms that allow the location of said element optimally under siting criteria and critical loads is necessary partners on the network and minimal impact on service delivery for all users thereof.

As stated, not only in order to comply with the legally stipulated in CREG Resolution 043 of 2010, as amended by CREG Resolution 091 of 2012, this study was performed to identify based on fuzzy logic, the optimal location of a second element having the protection functions, switching and telemetry of electrical network variables in levels 2 and 3 of ESSA, in order to generate greater operational flexibility and maneuverability to contingencies or maintenance activities with the least possible neglect of demand.

* Degree Draft

** Facultad de Ingenierías Físicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Ing. Johann Farith Petit Suárez.

INTRODUCCIÓN

La resolución CREG 097 de 2008, con las modificaciones establecidas por la resolución CREG 043 de 2010, y por la resolución 091 de 2012 (en su artículo 6°), estipula los plazos correspondientes a los operadores de red en Colombia, para la instalación de un segundo elemento de telemedida para detección de ausencia / presencia de tensión por lo menos en el 90% de los circuitos de niveles 2 y 3 de sus Sistemas de Distribución Locales. Por tanto, con miras a cumplir con lo establecido en el marco regulatorio, se hace necesario el desarrollo e implementación en la Empresa Electrificadora de Santander E.S.P. (ESSA) de una metodología basada en algoritmos de inteligencia artificial que permitan la ubicación del mencionado elemento de forma óptima bajo criterios de ubicación y criticidad de cargas asociadas sobre la red, operatividad, selectividad y el mínimo impacto en la prestación del servicio para todos los usuarios de la misma ante eventos programados y no programados.

Además, para efectos de planeación, operación y monitorización del sistema eléctrico es importante que adicional a la detección de ausencia/presencia de tensión para dar cumplimiento estricto y mínimo a la regulación, se instale un equipo con funciones de protección, seccionamiento de la red y medición de los parámetros de las variables eléctricas tensión, corriente y potencia con un grado aceptable de incertidumbre, con el fin de realizar control y tomar acciones de mejora con base en los datos obtenidos en tiempo real.

Actualmente, ESSA aplica el esquema de calidad del servicio de acuerdo a la Resolución CREG 070 de 1998, mediante el cálculo de los indicadores de Duración Equivalente del Servicio - DES - y Frecuencia Equivalente del Servicio - FES - realizando compensaciones a los usuarios peor servidos. Con la vigencia e ingreso al nuevo esquema de calidad más exigente y bajo las condiciones vigentes del sistema, se estiman de acuerdo con experiencias de otros operadores de red dentro y fuera del grupo empresarial EPM que ya han adoptado el nuevo esquema planteado, pagos de compensaciones a los usuarios por el orden de 3 a 4 veces lo actual, por tal razón son necesarios y urgentes esfuerzos encaminados en el seguimiento y reducción de la energía no suministrada -ENS- y la confiabilidad del sistema.

1. ALCANCE

Según lo planteado y con el objetivo de cumplir regulatoriamente con lo estipulado en la Resolución CREG 043 de 2010, modificada por la Resolución CREG 091 de 2012, se propone realizar el presente estudio para identificar la ubicación óptima de un segundo elemento que tenga las funciones de protección, seccionamiento y telemedición de las variables eléctricas de la red en los niveles 2 y 3 de ESSA, seleccionados a través de criterios a establecer por ESSA ESP, que permitan generar mayor flexibilidad y maniobrabilidad operativa ante contingencias o actividades de mantenimiento con la menor desatención posible de demanda.

2. OBJETIVO GENERAL

Hacer un estudio que permita ubicar de forma óptima el segundo elemento de protección, seccionamiento y teledistancia para detección de ausencia / presencia de tensión y seguimiento de variables eléctricas en los circuitos de niveles 2 y 3 de propiedad de ESSA ESP, con el fin de dar cumplimiento del requisito regulatorio contemplado en el artículo 6 de la Resolución CREG 043 de 2010 y modificado según Resolución CREG 091 de 2012.

3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar y agrupar los circuitos de nivel 2 de ESSA ESP dentro del área metropolitana de Bucaramanga, de acuerdo con la composición según el tipo de carga (industrial, residencial, comercial y oficial) en ubicación urbana, para determinar circuitos tipo que se usaran como piloto para el presente trabajo. Ante la dificultad de caracterizar de esta manera los circuitos de nivel 3, todos se incluyen en un grupo específico.
- Definir características técnicas y costos de inversión de los equipos requeridos como segundo elemento de protección, seccionamiento y teled medida para detección de ausencia/presencia de tensión y seguimiento de variables eléctricas por cada grupo de circuito.
- Identificar mediante análisis de algoritmos de inteligencia artificial, la ubicación óptima del segundo elemento de protección, seccionamiento y teled medida para detección de ausencia/presencia de tensión y seguimiento de variables eléctricas para los circuitos de niveles 2 y 3, asumiendo su selección bajo criterios a establecer por ESSA ESP, con el objetivo de minimizar la frecuencia media de interrupciones por kVA instalado de los circuitos seleccionados.
- Estimar el presupuesto y el cronograma de ejecución de la instalación del segundo elemento de teled medida para detección de ausencia/presencia de tensión y seguimiento de variables eléctricas para los circuitos de niveles 2 y 3 de propiedad de ESSA ESP dentro del área metropolitana de Bucaramanga que permitan cumplir con lo exigido mínimamente por la regulación ó que incorpore además las funciones de protección y seccionamiento.

4. ANTECEDENTES Y MARCO CONCEPTUAL

Desde hace varios años, ESSA a través del área de operación y calidad está adelantando esfuerzos en el cumplimiento de los requisitos regulatorios estipulados por la CREG para el ingreso al esquema de calidad, para lo cual, puntualmente en la orientación de la presente propuesta de trabajo, se encuentra en la fase de instalación del primer elemento de protección, seccionamiento y teled medida para detección de ausencia/presencia de tensión y seguimiento de variables eléctricas para los circuitos de niveles 2 y 3 e integrarlo al sistema de teled medicación SCADA, esperando llevar a feliz término a mediados del año 2015. La Tabla 1 presenta los niveles de tensión considerados en Colombia.

A continuación se presenta una descripción de términos técnicos relacionados con esta monografía.

Definiciones y Acrónimos:

CREG: Comisión de Regulación de Energía y Gas

Teled medida: El sistema de teled medida, también llamado telemetría, permite ingresar y extraer datos del medidor electrónico de energía previamente instalado.

Circuito nivel 3: Red eléctrica de tensión nominal 34,5kV de propiedad de ESSA

Circuito nivel 2: Red eléctrica de tensión nominal 13,8; 13,2 o 11,4kV de propiedad de ESSA.

Resolución CREG 043 de 2010, modificada por la CREG 091 de 2012: Artículo 6. Teled medicación adicional. Tres años después de que el operador de red (OR) haya iniciado la aplicación del esquema de incentivos y compensaciones, deberá tener instalados, en cada circuito de su red, mínimo dos elementos teled medidos de detección de ausencia/presencia de tensión. Estos equipos deberán ser ubicados en cada circuito a partir de la aplicación de criterios de carga y/o longitud que determine el OR.

Parágrafo 1. El OR deberá garantizar que en todo momento este requerimiento de teled medicación adicional se mantenga operativo por lo menos en el 90% de sus circuitos.

Sistema de Distribución Local (SDL). Sistema de transmisión de energía eléctrica compuesto por redes de distribución municipales o distritales; conformado por el conjunto de líneas y subestaciones, con sus equipos asociados, que operan a tensiones menores de 220 kV que no pertenecen a un sistema de transmisión regional por estar dedicadas al servicio de un sistema de distribución municipal, distrital o local.

Tabla 1. Niveles de tensión en Colombia.

NIVELES DE TENSIÓN	
NIVEL	RANGO
1	< 1kV
2	Entre 1 y 30kV
3	Entre 30 y 62kV
4	> 62kV

Fuente: RETIE

4.1 ESTADO DEL ARTE PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA.

Conforme a la literatura actual, a continuación se mencionan algunos trabajos y publicaciones de bases de datos que han abordado el tema de la ubicación óptima de elementos de protección con el fin de cumplir una o varias funciones objetivo en los sistemas de distribución de energía eléctrica.

- UBICACIÓN ÓPTIMA DE RECONECTADORES EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN PARA MINIMIZAR LA FRECUENCIA MEDIA DE INTERRUPCIÓN [1]. En este trabajo se presenta una metodología para minimizar la frecuencia de fallas en sistemas de distribución radiales considerando una carga uniformemente distribuida. Se utiliza una aproximación lineal para la ubicación de reconectadores. Este trabajo basa su estudio en la minimización del índice de frecuencia media de interrupción por potencia instalada, el cual es utilizado como parámetro de regulación y clasificación de las compañías distribuidoras chilenas, según la reglamentación eléctrica vigente. Se introduce además el concepto de factor de distancia entre línea principal y arranque, el cual puede ser utilizado como herramienta de discriminación para acotar el número de reconectadores a instalar en la línea principal. Además, permite discriminar en base a los datos históricos de la línea, si un arranque cualquiera debe ser evaluado económicamente, como un nuevo alimentador, de forma tal que el índice frecuencia media de interrupción por potencia instalada sea minimizado.
- LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE SWITCHES EN MEDIA TENSIÓN DE RED A TRAVÉS DE LA MINIMIZACIÓN DE ENERGÍA NO SUMINISTRADA. [5] Esta metodología se basa en la minimización de la Energía No Suministrada (ENS) para el conjunto sistema eléctrico, teniendo en cuenta la posible ubicación de interruptores (*switches*) normalmente cerrados (NC) en cada alimentador. Esta metodología considera también los interruptores instalados previamente NC en la red de MT, así como los interruptores

normalmente abiertos (NO) y las fuentes independientes. Los datos de fiabilidad relativos a las líneas de energía y fuentes independientes son necesarios. El costo ENS para cada cliente o la carga es también considerado. Por último, la metodología propuesta puede ayudar a un operador del sistema para evaluar el impacto económico de los nuevos interruptores NC en un sistema de distribución dado.

- PLANEACIÓN ÓPTIMA DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN CONSIDERANDO RECONECTADORES AUTOMÁTICOS PARA AISLAMIENTO DE FALLAS Y TRANSFERENCIA DE CARGA [6]. En este trabajo se presenta una metodología para resolver el problema de planeamiento de sistemas de distribución primarios en conjunto con la ubicación óptima de reconectadores automáticos para aislamiento de fallas y transferencia de carga. Para solucionar el problema del planeamiento se formula un modelo mono-objetivo de tipo no lineal entero mixto, el cual tiene como objetivo la minimización de los costos de inversión y operación sujeto a un conjunto de restricciones técnicas y operativas; para solucionarlo se emplea el algoritmo Búsqueda Tabú (BT). Para el problema de la ubicación de reconectadores se plantea un modelo multi-objetivo de tipo no lineal entero mixto, el cual tiene como objetivos la minimización de los costos de inversión y la minimización del nivel de energía no servida; para solucionarlo se emplea el Algoritmo Genético de Ordenamiento no dominado (NSGA II, por sus siglas en inglés). Para darle solución al problema de la planeación de sistemas de distribución considerando reconectadores, en este trabajo se proponen dos enfoques: el primero emplea una metodología en cascada y el segundo una metodología integrada.
- DISEÑO ÓPTIMO DE PROTECCIÓN DE DISTRIBUCIÓN CONSIDERANDO ÍNDICES DE CONFIABILIDAD MOMENTÁNEOS Y SOSTENIDOS. [7] Este trabajo considera la fiabilidad como todos los aspectos de las interrupciones de los clientes, incluyendo las interrupciones momentáneas. Se propone una metodología para la optimización multi-objetivo para minimizar SAIFI, SAIDI y los índices MAIFI simultáneamente. Este objetivo se logra teniendo en cuenta tanto la asignación óptima de los dispositivos de protección e interruptores, así como la definición del esquema de protección a emplear en los reconectadores e interruptor de la subestación, el ahorro de fusible o fusible de soplado. Las restricciones consideradas incluyen limitaciones técnicas y económicas. En la búsqueda de las mejores soluciones se emplea el Algoritmo Genético No Dominado de Clasificación - II. La metodología fue probada en un sistema de distribución real con 51 buses, y los resultados se compararon con la configuración actual del sistema de protección.
- ÓPTIMOS ÍNDICES DE FIABILIDAD DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA UTILIZANDO LA PROGRAMACIÓN BINARIA [8]. En este trabajo, se presenta una técnica de optimización para minimizar el costo total, incluyendo el costo de falla, la LCC (Costo del ciclo de vida) del equipo y el costo de la inversión. Se identifican los índices SAIFI y SAIDI óptimos y posteriormente se determinan asignaciones de dispositivos de interruptores, reconectadores, seccionadores y su costo asociado en el sistema de distribución.

4.2 DESCRIPCIÓN DE ALGUNAS METODOLOGÍAS DE LÓGICA Y OPTIMIZACIÓN

La **lógica difusa** [9] se desarrolló como una tecnología clave para el desarrollo del conocimiento de sistemas de la ingeniería de control para incorporar conocimientos prácticos para el diseño de controladores. Pero gradualmente progresó como una poderosa técnica para otros campos también. La lógica difusa intenta equilibrar la cuestión de precisión. La pregunta que la lógica difusa trata de resolver es, si una respuesta práctica aspira ser más eficaz que complejo la precisión. Lotfi Zadeh, considerado como el creador de la lógica difusa, comentó al respecto: "A medida que la complejidad aumenta, las declaraciones precisas pierden significado y significa perder precisión. "El objetivo de control de lógica difusa es modelar la experiencia humana y el comportamiento de toma de decisiones humana".

Las **máquinas de soporte vectorial (SVM)** [10] es uno de los modelos de clasificación basados en el conocimiento (MCBC), que utiliza características significativas o patrones para determinar la solución del problema de localización de fallas. Éstas fueron desarrolladas por Vladimir Vapnik usando herramientas estadísticas, de optimización y de las máquinas de aprendizaje.

Las SVM son una consecuencia práctica de la teoría de aprendizaje y su estudio es útil por características como la ausencia de mínimos locales, la alta capacidad de generalización y el control y uso de funciones de núcleo o *kernel*. Las SVM, a diferencia de otros métodos de clasificación, tienen la ventaja de no requerir ningún tipo de hipótesis sobre la densidad de probabilidad de los rasgos, y de ser convenientes en términos de la dimensionalidad del problema, entre otros.

La arquitectura de las SVM sólo depende de un parámetro de penalización denotado como C y la función kernel (incluyendo sus parámetros). En el caso de la función de base radial (RBF), existe sólo un parámetro a configurar denotado como σ . De esta manera se evitan requerimientos sobre parámetros exclusivos de arquitectura, tales como número de nodos, capas y tipo de conexión entre capas.

5. INFORMACIÓN DE LOS CIRCUITOS DE NIVEL 3

En el caso de los circuitos de nivel 3, que corresponden a líneas de sub-transmisión existentes en el área metropolitana de Bucaramanga, se presenta la información relevante de cada una de ellas, sin embargo el análisis correspondiente al método presentado en esta monografía, sólo se aplica a los circuitos seleccionados en nivel 2, teniendo en cuenta que la caracterización por tipos de carga aplicados a dichos circuitos no es posible hacerla tan claramente para éstos, dada la complejidad de las cargas que atienden las diferentes subestaciones por ellos alimentadas.

Bajo ese parámetro, y dada la importancia de cada uno de ellos, se establece el criterio que para todos los circuitos de nivel 3 del área metropolitana de Bucaramanga el segundo elemento a instalar corresponde a un reconectador con funciones de protección y seccionamiento adicionales a las exigidas regulatoriamente. La Tabla 2 contiene el listado de los circuitos de nivel 3 pertenecientes a la ESSA en el área metropolitana de Bucaramanga.

Tabla 2. Circuitos de niveles 3 en AMB.

CIRCUITO		SUBESTACIÓN		GRUPO DE CALIDAD	REGIÓN	SUBREGIÓN	DISTANCIA (km)
CÓDIGO	NOMBRE	CÓDIGO	NOMBRE				
401	BUCARAMANGA - CONUCO	06	BUCARAMANGA	4	ESTE	FLORIDABLANCA	10,03
402	FLORIDA - CONUCO	42	FLORIDA	4	ESTE	FLORIDABLANCA	8,67
403	CONUCO - PRINCIPAL	10	CONUCO	1	NORTE	BUCARAMANGA NORTE	7,93
404	CONUCO - SUR	10	CONUCO	1	NORTE	BUCARAMANGA NORTE	2,17
405	PALENQUE - MINAS	24	PALENQUE	1	NORTE	BUCARAMANGA NORTE	4,77
406	PALENQUE - SUR	24	PALENQUE	1	NORTE	BUCARAMANGA NORTE	6,24
407	PALENQUE - PRINCIPAL	24	PALENQUE	1	NORTE	BUCARAMANGA NORTE	11,82
408	PALENQUE - AEROPUERTO	24	PALENQUE	1	NORTE	BUCARAMANGA NORTE	6,20
409	PALENQUE - TREFILCO	24	PALENQUE	1	NORTE	BUCARAMANGA NORTE	15,73
410	PALENQUE - ZAPATOCA	24	PALENQUE	1	NORTE	BUCARAMANGA NORTE	41,35
411	SUR - NORTE	28	SUR	1	NORTE	BUCARAMANGA NORTE	5,08
412	PRINCIPAL - NORTE	26	PRINCIPAL	1	NORTE	BUCARAMANGA NORTE	1,47
413	PRINCIPAL - PALMAS I	26	PRINCIPAL	1	NORTE	BUCARAMANGA NORTE	15,02
414	PRINCIPAL - PALMAS II	26	PRINCIPAL	1	NORTE	BUCARAMANGA NORTE	15,02
415	PALOS - PRINCIPAL	22	PALOS	4	NORTE	BUCARAMANGA NORTE	3,11
416	PALOS - MATANZA	22	PALOS	4	NORTE	BUCARAMANGA NORTE	24,68
417	PALOS - RIONEGRO	22	PALOS	4	NORTE	BUCARAMANGA NORTE	36,09
418	PALOS - BAVARIA	22	PALOS	4	NORTE	BUCARAMANGA NORTE	2,00
419	ZAPATOCA - SAN VICENTE	50	ZAPATOCA	3	ESTE	PIEDECUESTA	19,36
420	MINAS - CONUCO	09	REAL DE MINAS	1	NORTE	BUCARAMANGA NORTE	4,61
421	FLORIDA - PIEDECUESTA -LA MESA	42	FLORIDA	4	ESTE	FLORIDABLANCA	41,24
422	FLORIDA - ICP	42	FLORIDA	4	ESTE	FLORIDABLANCA	13,95
423	BUCARAMANGA - BUCARICA	06	BUCARAMANGA	4	ESTE	FLORIDABLANCA	10,35
424	MINAS - SUR	09	REAL DE MINAS	1	NORTE	BUCARAMANGA NORTE	3,02
425	MATANZA - CALIFORNIA	27	MATANZA	3	ESTE	FLORIDABLANCA	8,78
426	MINAS - CODIESEL - CONUCOS II	09	REAL DE MINAS	1	NORTE	BUCARAMANGA NORTE	9,67
427	SUR - ÉXITO	28	SUR	1	NORTE	BUCARAMANGA NORTE	0,37
428	PALENQUE - LEBRIJA	24	PALENQUE	1	NORTE	BUCARAMANGA NORTE	6,35
429	SUR - HOME CENTER	28	SUR	1	NORTE	BUCARAMANGA NORTE	0,12
436	LEBRIJA - PIMPOLLO	39	LEBRIJA	3	NORTE	BUCARAMANGA NORTE	1,13
474	LIZAMA - ECOPELROL I - EL CARMEN	61	LIZAMA	4	NORTE	GIRÓN	76,59
475	LIZAMA - ECOPELROL II	61	LIZAMA	4	NORTE	GIRÓN	0,00
477	LIZAMA - HIDROSOGAMOSO	61	LIZAMA	4	NORTE	GIRÓN	16,01

Fuente ESSA ESP.

6. CLASIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE LOS CIRCUITOS DE NIVEL 2 POR TIPO DE CARGA

De acuerdo con la información disponible en bases de datos de inventarios y comerciales como insumos del estudio de proyección espacial de la demanda del Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB) realizado en ESSA [13], se identifica y selecciona para efecto del presente estudio del total de 97 circuitos que cubren dicha área, aquellos que con mayores aportes según la clasificación por tipo de carga (industrial, comercial, oficial y residencial) según lo estipulado en el contrato de condiciones uniformes de inscripción de usuarios de ESSA, resumiendo brevemente sus características más importantes. La Tabla 3 presenta la clasificación de los cuatro circuitos de la ESSA en el AMB seleccionados para este estudio, acuerdo al tipo de carga instalada en cada uno de ellos.

Tabla 3. Clasificación de los circuitos nivel 2 del AMB de ESSA ESP.

% de Participación en consumos por tipo de cliente ESSA				
Circuito Nivel 2	Industrial	Comercial	Oficial	Residencial
24503	65,8%	28,0%	0,0%	6,1%
28506	2,2%	95,6%	1,3%	0,8%
20506	6,5%	31,7%	32,9%	28,9%
09502	0,5%	2,8%	1,1%	95,6%

Fuente: ESSA ESP.

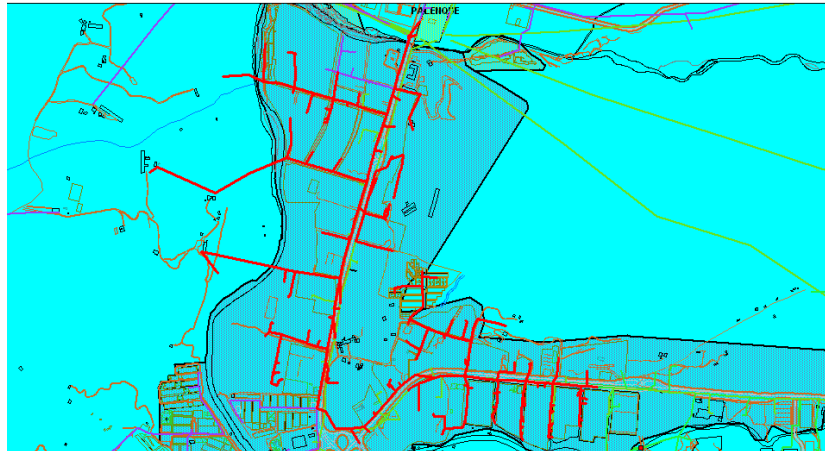
6.1 CIRCUITO 24503 TERCERO PALENQUE

Perteneciente a la subregión Girón de ESSA, con un aporte mayor al 80% de carga tipo industrial alimentado gran parte de la zona de Chimitá y sobre la autopista Girón - Bucaramanga. Sus datos principales son:

- Subregión Girón
- Subestación: Palenque
- Longitud MT: 20,713km
- Longitud BT: 24,194km
- Cantidad de transformadores: 128
- Cantidad de usuarios: 991
- Cargabilidad: 123% (Bajo el criterio de cargabilidad máxima del circuito, capacidad térmica del conductor hasta 8 MVA)

La Figura 1 muestra el área cubierta por este circuito.

Figura 1. Área cubierta por el circuito 24503



Fuente: ESSA

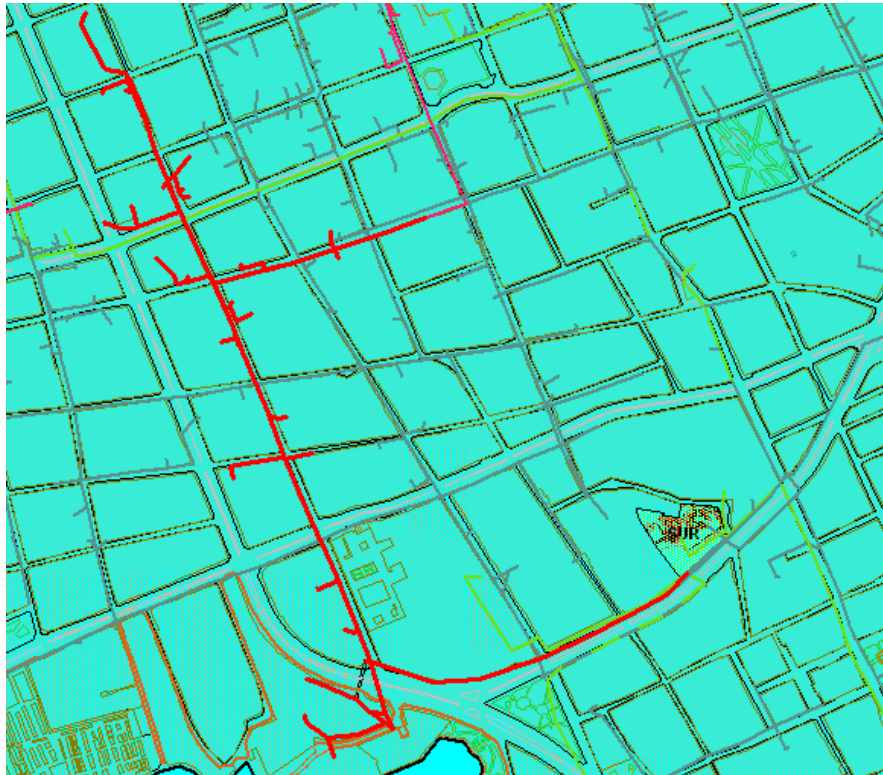
6.2 CIRCUITO 28506 SEXTO SUR

El circuito urbano sexto Sur, perteneciente a la Región Bucaramanga de la Zona de Distribución Norte, con tipo de carga predominantemente comercial, es alimentado desde la Subestación Sur de ESSA, ubicada en la Avenida la Rosita con carrera 20, prestando el servicio en el sector céntrico de la ciudad por la carrera 17 desde la Avenida la Rosita hasta la calle 34 aproximadamente. La Figura 2 muestra el área cubierta por este circuito.

A continuación se resumen los datos más importantes de este circuito, así como su recorrido identificando la subestación origen:

- Subregión Bucaramanga
- Subestación: Sur
- Longitud MT: 3,019km
- Longitud BT: 20,69km
- Cantidad transformadores: 40
- Cantidad de usuarios: 2582
- Cargabilidad: 51%

Figura 2. Área cubierta por el circuito 28506



Fuente: ESSA

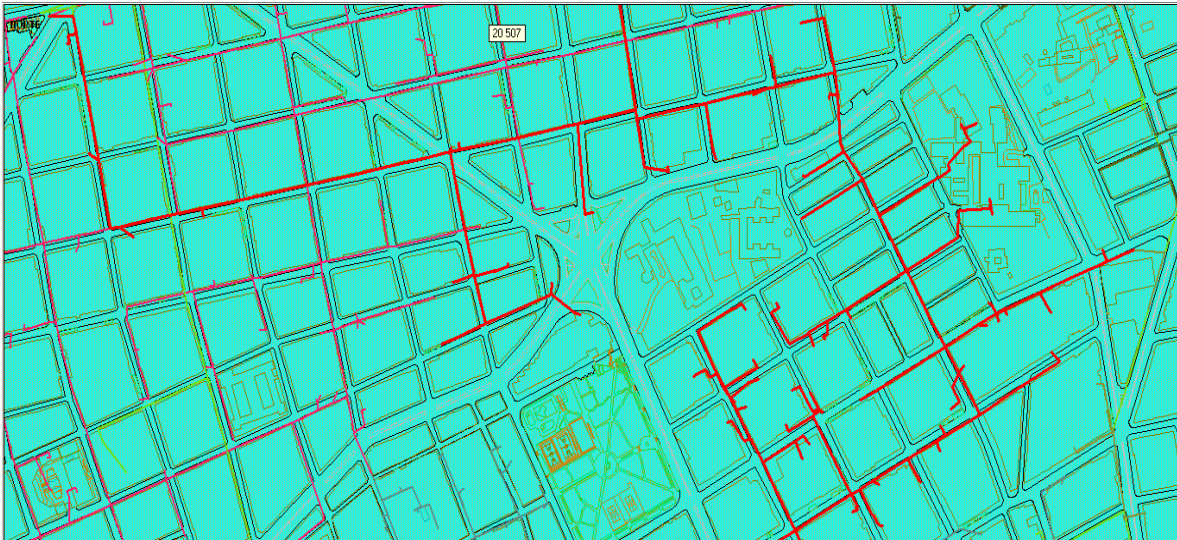
6.3 CIRCUITO 20506 SEXTO NORTE

Con una participación mayormente oficial, el circuito 20506 se alimenta desde la subestación Norte dentro de la subregión Bucaramanga, cubre un área bastante importante sobre el sector de los barrios Comuneros y San Francisco, la Figura 3 muestra el área cubierta por este circuito.

Los datos resumidos del circuito se muestran a continuación:

- Subregión Bucaramanga
- Subestación: Norte
- Longitud MT: 14,696km
- Longitud BT: 31,026km
- Cantidad transformadores: 148
- Cantidad de usuarios: 4652
- Cargabilidad: 72%

Figura 3. Área cubierta por el circuito 20506



Fuente: ESSA

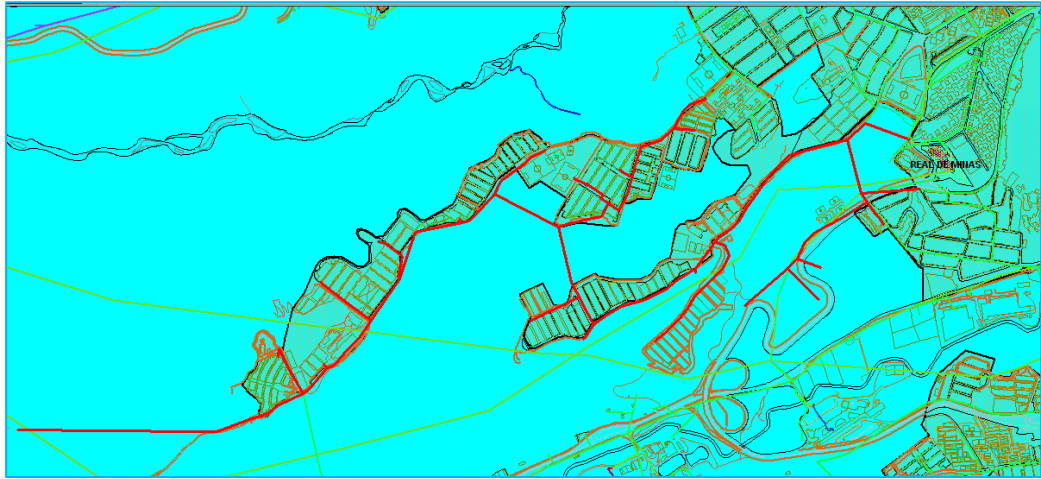
6.4 CIRCUITO 09502 SEGUNDO MINAS

Circuito alimentado desde la subestación Real de Minas de ESSA ubicado dentro de la subregión Bucaramanga cuya carga residencial representa aproximadamente el 95% del total, razón por la cual se constituye en uno de los circuitos de nivel de tensión 2 con mayor densidad de clientes por kilómetro de la ESSA, su área de influencia incluye los barrios de Monterredondo, Manzanares y Los Estoraques. Sus principales datos son:

- Subregión Bucaramanga
- Subestación: Real de Minas
- Longitud MT: 7,261km
- Longitud BT: 32,814km
- Cantidad Transformadores: 43
- Cantidad de usuarios: 4292
- Cargabilidad: 105% (Bajo el criterio de cargabilidad máxima del circuito, capacidad térmica del conductor hasta 8 MVA)

La Figura 4 muestra el área cubierta por este circuito.

Figura 4. Área cubierta por el circuito 09502



Fuente: ESSA

7. EQUIPOS A UTILIZAR COMO SEGUNDO ELEMENTO EN LOS CIRCUITOS DE NIVEL 2

Acorde con el desarrollo de la metodología planteada en el presente trabajo, se opta por dos diferentes opciones a la hora de hacer la escogencia del segundo elemento a instalar en los circuitos de nivel 2 del área metropolitana de Bucaramanga.

7.1 EQUIPO 1: SISTEMA DE GESTIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN

DESCRIPCIÓN: El sistema de gestión de redes de distribución SGR-2 es una solución integral que le permite a los operadores de redes de distribución de energía mejorar sus tiempos de respuesta y sus indicadores de gestión, para de esta forma cumplir con regulaciones y aumentar la confiabilidad de su sistema.

FUNCIONALIDAD: Los indicadores de falla FCI-2 se fijan a las líneas de distribución y se indican con cadencias luminosas las fallas detectadas y las envían al concentrador FWT200 vía RF. El concentrador a su vez, reenvía estas fallas al sistema SCADA por medio de la red GPRS radio, usando el protocolo IEC 60870.5-104.

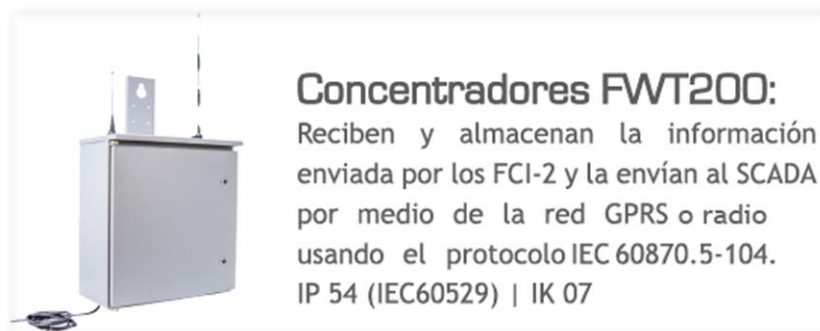
COMPONENTES: En las figuras 5 a 7 se muestran los componentes principales del sistema de gestión de redes de distribución SGR-2, descrito previamente.

Figura 5. Indicador de falla FCI-2.



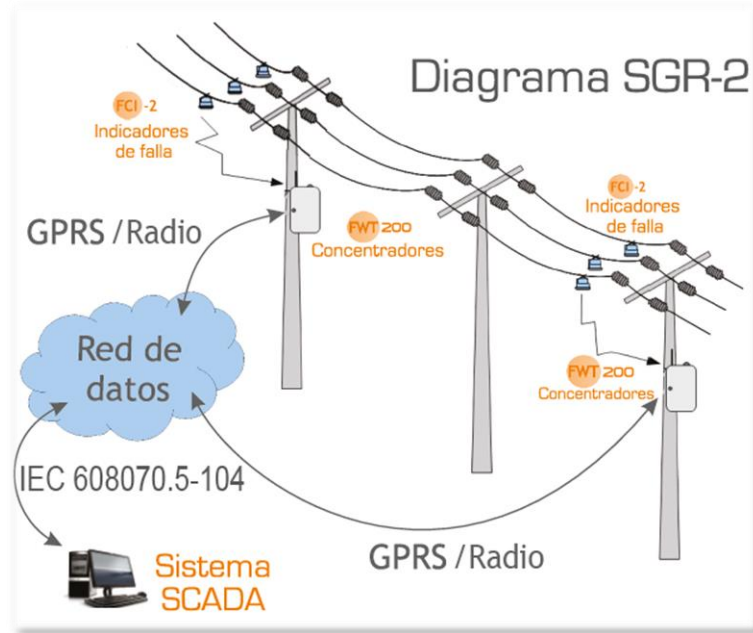
Fuente: catálogos CELSA

Figura 6. Concentrador FWT200.



Fuente: catálogos CELSA

Figura 7. Diagrama instalación SGR-2.



Fuente: catálogos CELSA

Este tipo de equipo se usará en aquellos circuitos de nivel 2 a los que una vez aplicada la metodología propuesta en el presente trabajo, a partir de las características de cada uno de ellos, den como resultado que no sea necesario el uso de reconectores. En estos casos se asegura exclusivamente el cumplimiento regulatorio expresado en las normas descritas a lo largo del mismo.

7.1.1 Características del equipo sistema de gestión de redes

En la Tabla 4 se listan las características del sistema de gestión de redes SGR-2.

Tabla 4. Características equipo de Gestión de Redes.

No.	CARACTERÍSTICA TÉCNICA	VALOR EXIGIDO EPM	VALOR GARANTIZADO
	SENSORES AÉREOS Y CONCENTRADOR		
1	Fabricante	Indicar	
2	Referencia de fabricación	Indicar	SGR-2

3	El sistema está conformado por tres sensores monofásicos y un concentrador de señales y medio de comunicaciones	SI	SI(X)-NO()
4	El sistema cumple con la norma de fabricación y ensayos ANSI/IEEE 495 o norma equivalente	SI	SI(X)-NO()
5	Los sensores son del tipo monofásico aéreo	SI	SI(X)-NO()
6	Los parámetros eléctricos entregados por los sensores son ajustables en campo	SI	SI(X)-NO()
7	Los sensores permiten el ajuste de parámetros mediante software	SI	SI(X)-NO()
8	El principio de funcionamiento de los sensores es por variación del campo magnético	SI	SI(X)-NO()
9	Posee un sensor de campo magnético para la medida de los parámetros de corriente	SI	SI(X)-NO()
10	Permite su uso en intemperie sobre cables desnudos y cubiertos	SI	SI(X)-NO()
11	El Rango mínimo de tensión de operación es de 7,62 kV a 44 kV	SI	SI(X)-NO()
12	La frecuencia nominal es de 60 Hz	SI	SI(X)-NO()
13	Tiene protección anti-inrush programable en tiempo y corriente	SI	SI(X)-NO()
14	Permite monitorizar la corriente instantánea de línea	SI	SI(X)-NO()
15	Permite la detección de presencia y ausencia de tensión con estampa de tiempo	SI	SI(X)-NO()
16	El mecanismo de fijación de los sensores al cable es con pinza o grapa, y mediante pértiga	SI	SI(X)-NO()
17	El grado de protección hermeticidad e impacto es igual o mejor que IP54 e IK7	SI	SI(X)-NO()
18	El diámetro de los conductores sobre los cuales se instalan los sensores puede variar de 7,41 a 25,4 mm	SI	SI(X)-NO()
19	Permite reposición por tensión para fallas permanentes (programable)	SI	SI(X)-NO()
20	Permite reposición por tiempo para fallas permanentes (programable)	SI	SI(X)-NO()
21	Permite reposición por tiempo de fallas transitorias	SI	SI(X)-NO()

	(programable)		
22	El sensor Incluye radio para comunicación local con el concentrador	SI	SI(X)-NO()
23	La vida útil mínima es de 5 años para la fuente de alimentación o baterías (en condiciones de almacenamiento)	SI	SI(X)-NO()
24	El concentrador permite instalación en poste	SI	SI(X)-NO()
25	El concentrador tiene memoria circular para recolección y almacenamiento de eventos (fallas permanentes y temporales)	SI	SI(X)-NO()
26	El concentrador permite la comunicación vía radio desde el (los) sensor(es) aledaño(s) a 90 metros del concentrador máximo	SI	SI(X)-NO()
27	El concentrador permite la comunicación con un número mínimo de 3 sensores	SI	SI(X)-NO()
28	El concentrador incluye radio receptor para la comunicación con cada uno de los sensores	SI	SI(X)-NO()
29	El concentrador incluye batería (reemplazable) o fuente para alimentar el radio receptor, el equipo de comunicación y demás elementos incluidos en el concentrador.	SI	SI(X)-NO()
30	El concentrador soporta protocolos de comunicación IEC 60870-5-104 o DNP3.0 LAN	SI	SI(X)-NO()
31	El concentrador tiene un puerto de salida con terminal RJ45 y un puerto serial con el fin de conectar con los módems celular o los radios de comunicación desde el (CRC) Centro Regional de Control de EPM.	SI	SI(X)-NO()
32	La tarjeta de comunicaciones del concentrador es modular, independiente de la electrónica del concentrador y fácilmente reemplazable.	SI	SI(X)-NO()
33	El modem de comunicaciones se conecta al concentrador a través de los puertos de comunicaciones exigidos en el numeral 30.	SI	SI(X)-NO()
	SISTEMA DE COMUNICACIÓN (MÓDEM CELULAR)		
1	Fabricante	Indicar	VIOLA SYSTEMS LTD
2	Referencia del fabricante	Indicar	ARTIC 3G GATEWAY 2622

3	El rango del tensión de alimentación es: 9 hasta 26 V DC o 120 V AC	SI	SI(X)-NO()
4	Tiene cable con adaptador para conexión directa	SI	SI(X)-NO()
5	La frecuencia es de 60 Hz	SI	SI(X)-NO()
6	Cumple el rango mínimo de temperatura en el que garantiza una correcta operación: 0 a 60 °C	SI	SI(X)-NO()
7	Cumple el rango mínimo de humedad en el que garantiza una correcta operación: 20 a 85%	SI	SI(X)-NO()
8	El módem es de grado industrial	SI	SI(X)-NO()
9	Permite el montaje tipo riel y se suministra con los elementos necesarios para su correcto montaje	SI	SI(X)-NO()
10	Soporta tecnología GPRS/EDGE/UMTS/HSDPA	SI	SI(X)-NO()
11	Opera en las bandas 850/900/1800/1900 MHz	SI	SI(X)-NO()
12	Permite la inserción de, como mínimo, una sim card	SI	SI(X)-NO()
13	La velocidad mínima de Downlink es de 1500kbps	SI	SI(X)-NO()
14	Es Mobile Station B	SI	SI(X)-NO()
15	Tiene modulación y esquema de codificación CS 1-9	SI	SI(X)-NO()
16	Soporta PBCCH	SI	SI(X)-NO()
17	La antena es Quad Band 850/900/1800/1900 Mhz	SI	SI(X)-NO()
18	La ganancia mínima es de 5db	SI	SI(X)-NO()
19	La antena de fijación es de tipo magnética	SI	SI(X)-NO()
20	La longitud mínima del cable de la antena es 5 metros	SI	SI(X)-NO()
21	Tiene conector female 50 Ω	SI	SI(X)-NO()
22	Cumple protocolo Ethernet IEEE 802.3-802.2	SI	SI(X)-NO()
23	Tiene conector RJ-45	SI	SI(X)-NO()
24	El protocolo de capa física es 10/100 Base T	SI	SI(X)-NO()
25	Full Dúplex	SI	SI(X)-NO()
26	Tiene puerto serial RS232 de consola	SI	SI(X)-NO()
27	Tiene puerto serial para datos	SI	SI(X)-NO()

28	Tiene puerto serial para datos configurable RS232/485	SI	SI(X)-NO()
29	La conexión de puertos seriales es DB9	SI	SI(X)-NO()
30	El Baud Rate mínimo está entre 1200 a 115200 bps	SI	SI(X)-NO()
31	Tiene control de flujo	SI	SI(X)-NO()
32	Permite configuración y gestión Local	SI	SI(X)-NO()
33	Tiene puertos de configuración y gestión local RS232 y Ethernet	SI	SI(X)-NO()
34	Permite configuración y gestión remota	SI	SI(X)-NO()
35	Cumple enrutamiento estático, Port Forwarding (Min 50), Proxy ARP, IP Enmascarado (NAT)	SI	SI(X)-NO()
36	Posee Firewall	SI	SI(X)-NO()
37	Soporta los operadores de red Tigo, Comcel, movistar, UFF	SI	SI(X)-NO()

Fuente: Proceso de contratación ESSA.

7.2 EQUIPO 2: RECONECTADOR Y ELEMENTOS ASOCIADOS

DESCRIPCION: Reconectador con capacidad de interrupción de 630 A, operación a 60 Hz, nivel básico de aislamiento de 110 kV (para 15 kV) y 170 kV (para 36 kV), número mínimo de operaciones de 10000 y posibilidad de comunicación para envío de información y operación remotas.

El uso de reconectores aplica en todos los circuitos de nivel 3 y en aquellos circuitos de nivel 2 en los cuales a partir de la metodología propuesta en el presente trabajo, a partir de las características propias de cada uno de ellos, se hace necesario además del cumplimiento regulatorio expresado en las normas descritas, tener funciones de protección y seccionamiento.

7.2.1 Características del equipo reconector

Las tablas 5 a 9 contienen las características del sistema de reconexión a utilizar. La Tabla 10 por otra parte, establece las características técnicas mínimas que deben ser garantizadas por el sistema de reconexión.

Tabla 5. Condiciones ambientales de operabilidad.

CARACTERISTICA	VALOR
Altura sobre el nivel del mar	Entre 100 y 3.000 m
Ambiente	Tropical
Humedad relativa máxima	99%
Temperatura ambiente máxima	40 °C
Temperatura ambiente mínima	-2 °C
Temperatura ambiente promedio	21 °C

Fuente: Proceso de contratación ESSA.

Tabla 6. Peso total aproximado de cada uno de los tipos de reconector.

Grupo	Descripción	Peso Kg
1	Reconectores trifásicos de 36 kV	370
2	Reconectores trifásicos de 15 kV	300

Fuente: Proceso de contratación ESSA.

Tabla 7. Puertos de programación y comunicación del relé.

Ítem	Descripción	Mínimo requerido
1	Puerto RS232 para programación, supervisión y ajustes en sitio	1
2	Puerto RJ45 Ethernet 10/100 Base T para comunicación y control	1

Fuente: Proceso de contratación ESSA.

Tabla 8. Protocolos de comunicación nativos.

Ítem	Descripción	Detalle
1	DNP 3.0. Ethernet (TCP-IP)	Requerido
2	IEC 60870-5-104	Opcional

Fuente: Proceso de contratación ESSA.

Tabla 9. Características generales del interruptor.

Ítem	Descripción	15kV	36kV
1	Corriente nominal	630A	630A
2	Frecuencia nominal	60Hz	60Hz
3	Tensión nominal	15kV	36kV
4	Nivel básico de aislamiento	110 kV	170 kV
5	Corriente de cortocircuito durante 3 segundos	12.5 kA	12.5 kA
6	Número de operaciones mínimas a corriente nominal	10000	10000
7	Transformadores de corriente embebidos	3	3
8	Sensores de tensión embebidos, lado de fuente	3	3
9	Sensores de tensión embebidos, lado de carga	3	3

Fuente: Proceso de contratación ESSA.

Tabla 10. Características técnicas mínimas garantizadas del equipo.

CARACTERISTICA	SOLICITADO	OFERTADO	PAGINA / NUMERAL DE UBICACIÓN
Ajuste de sobrecorriente temporizado de fases y de tierra	Desde 10 A hasta 1200 A, paso de 1A. Rango de ajuste del dial para las funciones de tiempo inverso desde 0,05 hasta 2, paso de 0,01		
Ajuste de sobrecorriente instantáneo de fases y de tierra	Desde 50 A. hasta 6000 A. con paso de 10, tiempo de retardo programable con rango de ajuste desde 0 s hasta 2 s, con un paso de 0.01 s.		
Otras funciones de protección.	Direccional (Código ANSI 67 y 67N), recierres (Código ANSI 79), subfrecuencia (Código ANSI 81S) y subtensión (Código ANSI 27)		
Grado de protección IP del gabinete de control	≥ 54 o su global equivalente		
Grado de protección IP del tanque	≥ 65		

Fuente: ESSA.

8. PRESUPUESTO DE INSTALACIÓN DE SEGUNDO ELEMENTO

En este capítulo se detalla el presupuesto requerido para la instalación del segundo elemento en las redes de niveles 2 y 3 de la ESSA.

8.1 PRESUPUESTO SISTEMA GESTIÓN DE REDES EN NIVEL DE TENSIÓN 2

Se contempla este presupuesto para aquellos circuitos que de acuerdo a la metodología no necesitan la instalación de reconectador. En el ítem de adecuación estructura se incluyen unas cajas de repetición a fin de que se encargue de la protección y seccionamiento aguas abajo del elemento propuesto. La Tabla 11 resume el presupuesto requerido para la instalación del sistema de gestión de redes de distribución en el nivel 2.

Tabla 11. Presupuesto de instalación sistema de gestión de redes nivel 2.

DESCRIPCION	CANT.	UNITARIO	SUBTOTAL
SUMINISTRO SISTEMA GESTION DE REDES	1	\$ 10.000.000,00	\$ 10.000.000,00
ADECUACION ESTRUCTURA PARA MONTAJE DE EQUIPOS	1	\$ 2.500.000,00	\$ 2.500.000,00
MONTAJE DE SISTEMA DE GESTION DE REDES	1	\$ 557.000,00	\$ 557.000,00
COMPONENTE DE SCADA Y GPRS	1	\$ 1.207.000,00	\$ 1.207.000,00
TOTAL			\$ 14.264.000,00

8.2 PRESUPUESTO RECONECTADOR EN NIVEL DE TENSIÓN 3

Se contempla aquí el suministro del reconectador, su montaje y puesta en servicio, partiendo del hecho que la estructura correspondiente no requiere cambio. Simplemente se hace la adecuación correspondiente. La Tabla 12 resume el presupuesto requerido para la instalación del sistema de reconexión en el nivel de tensión 3.

Tabla 12. Presupuesto de instalación del reconectador en nivel 3.

DESCRIPCION	CANT.	UNITARIO	SUBTOTAL
SUMINISTRO RECONECTADOR 36 kV	1	\$ 52.000.000,00	\$ 52.000.000,00
ADECUACION ESTRUCTURA PARA MONTAJE DE EQUIPOS	1	\$ 12.500.000,00	\$ 12.500.000,00
MONTAJE DE RECLOSER	1	\$ 857.000,00	\$ 857.000,00
CIERRE DE PUENTES POR MEDIA TENSION POR 34.5 KV	1	\$ 707.000,00	\$ 707.000,00
SUBTOTAL			\$ 66.064.000,00
DEMANDA NO ATENDIDA POR TRABAJOS ESTRUCTURA	GBL		\$ 2.118.236,13
TOTAL			\$ 68.182.236,13

8.3 PRESUPUESTO RECONECTADOR EN NIVEL DE TENSION 2

Se contempla aquí el suministro del reconectador para 15 kV, su montaje y puesta en servicio, partiendo del hecho que la estructura correspondiente no requiere cambio. Simplemente se hace la adecuación correspondiente. La Tabla 13 resume el presupuesto requerido para la instalación del sistema de reconexión en el nivel de tensión 2.

Tabla 13. Presupuesto de instalación del reconectador en nivel 2.

DESCRIPCION	CANT.	UNITARIO	SUBTOTAL
SUMINISTRO RECONECTADOR 15 kV	1	\$ 36.000.000,00	\$ 36.000.000,00
ADECUACION ESTRUCTURA PARA MONTAJE DE EQUIPOS	1	\$ 8.500.000,00	\$ 8.500.000,00
MONTAJE DE RECLOSER	1	\$ 857.000,00	\$ 857.000,00
CIERRE DE PUENTES POR MEDIA TENSION POR 13.2 KV	1	\$ 602.000,00	\$ 602.000,00
SUBTOTAL			\$ 45.959.000,00
DEMANDA NO ATENDIDA POR TRABAJOS ESTRUCTURA	GBL		\$ 1.218.236,12
TOTAL			\$ 47.177.236,12

9. APLICACIÓN DE LA LÓGICA DIFUSA

Teniendo en cuenta la facilidad en el manejo y la interrelación de las variables de entrada y salida, para abordar el presente trabajo desde el campo de las técnicas de inteligencia artificial revisadas e incluidas en el estado del arte, se aplicará la lógica difusa como metodología de estimación del rango óptimo de ubicación de un equipo reconectador sobre la troncal principal de los circuitos de distribución, partiendo de una clasificación realizada previamente bajo el criterio de conveniencia técnica y económica para la instalación de este tipo de equipos en los circuitos de nivel de tensión 2 de ESSA ESP.

9.1 VARIABLES DE ENTRADA

Con base en la información disponible en las distintas bases de datos de inventarios, topologías y flujos de carga en la herramienta informática EnerGIS de ESSA, se aplica el método que se describe a continuación, para la obtención de las variables de entrada identificadas que inciden directamente en la solución del problema planteado en el sistema de lógica difusa.

9.1.1 TRAZADO DE LA TRONCAL PRINCIPAL DEL CIRCUITO

Analizando la topología, flujos de potencia, datos de los calibres de conductores, ubicación de las protecciones secundarias del circuito; se identifica la troncal principal donde se ubicará el reconectador. Esto con el fin de aprovechar las distintas ventajas de facilidad en el acceso que generalmente es mayor sobre la troncal permitiendo una mejor atención del mantenimiento de equipos y redes, así como la operatividad ante contingencias tanto en la troncal como en los ramales aguas abajo y la selectividad de atención de la demanda por eventos programados y no programados en caso de tener suplencias con otros circuitos.

9.1.2 PORCENTAJE DE LA DISTANCIA DE PROTECCIÓN (DP)

Es el porcentaje de la distancia sobre la troncal principal que será objeto de protección en relación a la longitud total de la misma y es medida entre el punto final del circuito en [m] y el punto óptimo donde se ubicará el reconectador sobre la troncal y está dado por la siguiente ecuación:

$$DP = \frac{\text{Distancia protegida sobre la troncal [m]}}{\text{Distancia total de la troncal [m]}} \times 100\%$$

Ecuación 1. Porcentaje de la distancia sobre la troncal principal

Además de la relación entre las distancias mostrada en la ecuación anterior, ante la ausencia de datos detallados de tasas de falla por tramos del circuito, la variable de entrada DP está intrínseca y directamente ligada a la calidad y continuidad de la prestación del servicio de energía, dado que a mayor distancia existe mayor cantidad de componentes y por tanto más probabilidad de falla por eventos no programados.

Las funciones de membresía definidas para la variable DP en los rangos lingüísticos Muy Baja, Baja, Media y Alta en un universo difuso entre 0 y 70%, se especifican en la Tabla 14.

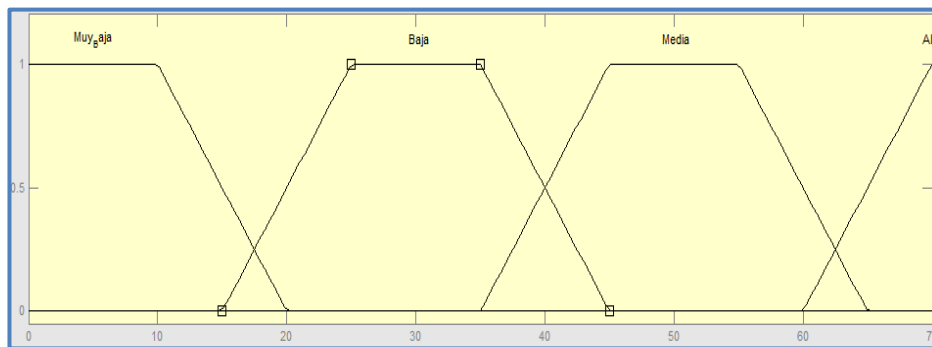
Tabla 14. Funciones de membresía variable DP.

<i>NOMBRE</i>	<i>RANGO</i>	<i>VALOR</i>
Distancia de Protección	Muy Baja	10%
	Baja	30%
	Media	50%
	Alta	70%

Cabe anotar que para la variable DP, se considera un rango de valores nominales de máximo el 70%, dado a que desde el punto de vista de dicha variable, un valor mayor restaría margen de operatividad de la protección ubicada en la salida de cada circuito previamente instalada, lo cual indicaría la inviabilidad en la instalación del segundo elemento de protección en el mismo, lo que sugiere la ubicación de un equipo seccionalizador con las funciones de detección de ausencia y presencia de tensión como lo exige la regulación.

En la herramienta MATLAB, se grafican las funciones de membresía para la variable DP, siendo representadas de forma trapezoidal de acuerdo a criterio de conveniencia de los autores, como se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Representación gráfica de las funciones de membresía variable DP



9.1.3 PORCENTAJE DE LA POTENCIA DE PROTECCIÓN (PP)

Está definida como la relación porcentual entre el flujo de potencia en el punto probable de ubicación del reconectador sobre la troncal principal y el total del circuito medido desde la subestación que lo alimenta en [kVA], de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$PP = \frac{\text{Flujo de Potencia en un punto sobre la troncal [kVA]}}{\text{Demanda de potencia total del circuito [kVA]}} \times 100\%$$

Ecuación 2. Porcentaje de la potencia de protección.

En el caso de la variable PP, se puede considerar un reflejo de la importancia del tramo a proteger por el reconectador en términos de cantidad de clientes, altos consumos y capacidad instalada de los ramales asociados aguas abajo.

Las funciones de membresía de la variable PP en los rangos lingüísticos Muy Baja, Baja, Media y Alta en un universo difuso entre 0 y 60%, los valores nominales se definen en la Tabla 15.

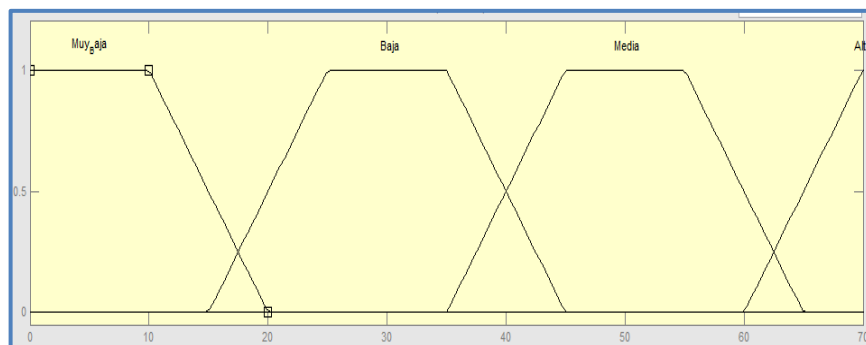
Tabla 15. Funciones de membresía variable PP.

NOMBRE	RANGO	VALOR
Potencia de Protección	Muy Baja	10%
	Baja	20%
	Media	40%
	Alta	60%

De manera similar a la variable anterior, en términos de potencia el rango medio respecto a la total, se considera un valor adecuado con el fin de que exista una distribución equitativa entre el primer reconectador de la salida y el segundo en la troncal principal del circuito. Es decir, como mínimo el reconectador ubicado en la salida del circuito asumirá el 40% de la demanda de potencia total del mismo.

En la herramienta MATLAB, se grafican las funciones de membresía para la variable DP, siendo representadas de forma trapezoidal como se muestra en la Figura 9.

Figura 9. Representación gráfica de las funciones de membresía variable PP



9.1.4 TIPO DE CARGA (TC)

Es el peso en porcentaje que se le asigna a la predominancia de la carga del circuito clasificada según el tipo de uso (industrial, comercial, oficial y residencial), en caso de contingencia, necesidad de deslastre y esquemas de restablecimiento del servicio de acuerdo a los parámetros y criterios de estabilidad del sistema consignados en el Manual de Operación de ESSA ESP [12].

Traducidas al lenguaje característico de la lógica difusa, las funciones de membresía de la variable TC en los rangos lingüísticos Baja, Media, Alta y Muy Alta en un universo difuso entre 0 y 80%, los valores nominales se definen de como se muestra en la Tabla 16.

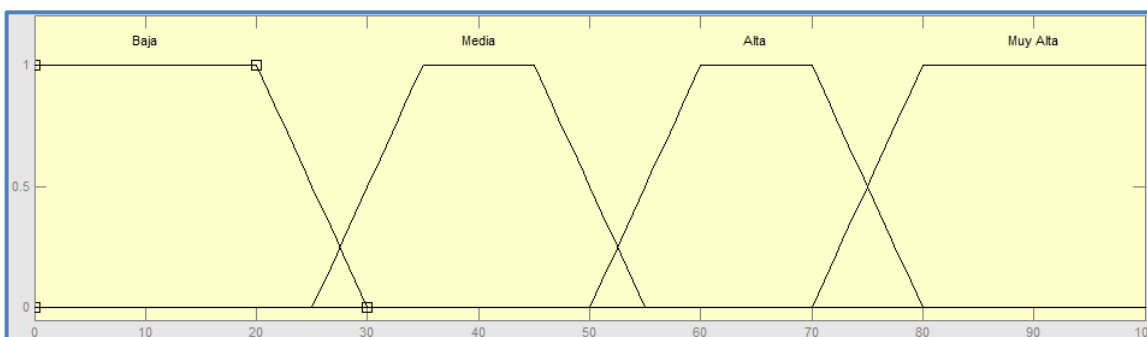
Tabla 16. Funciones de membresía variable TC.

<i>NOMBRE</i>	<i>RANGO</i>	<i>VALOR</i>
Tipo de Carga	Baja	20%
	Media	40%
	Alta	60%
	Muy Alta	80%

De acuerdo a la clasificación por tipo de carga, la variable lingüística Baja corresponde a un circuito con demanda predominantemente residencial, Media para Oficial, Alta para el sector Comercial y Muy Alta para los circuitos mayormente Industriales.

En la herramienta MATLAB, se grafican las funciones de membresía para la variable TC, siendo representadas de forma trapezoidal como se muestra en la Figura 10.

Figura 10. Representación gráfica de las funciones de membresía variable TC



9.2 VARIABLE DE SALIDA

La variable de salida se define como el PORCENTAJE DE NECESIDAD DEL RECONECTADOR (NR) y corresponde a una medida porcentual de la viabilidad de la instalación del equipo de protección en el punto analizado de acuerdo a los parámetros definidos en las variables de entrada del sistema lógico.

En el lenguaje característico de la lógica difusa, las funciones de membresía de la variable NR en los rangos lingüísticos Muy Baja, Baja, Media, Alta y Muy Alta en un universo difuso entre 0 y 100%, los valores nominales se definen en la Tabla 17.

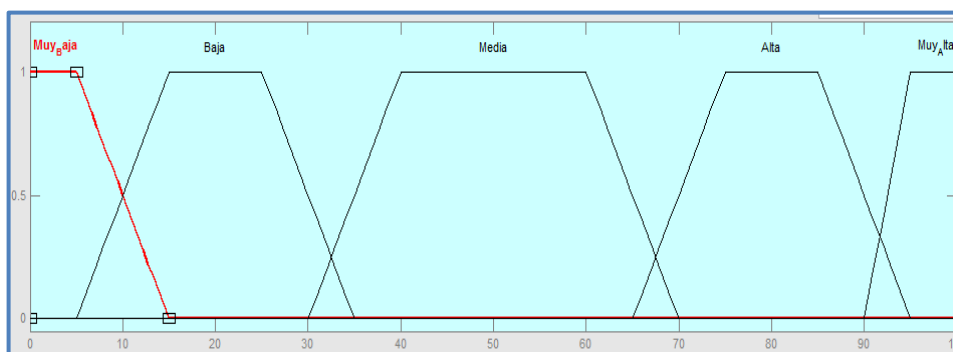
Tabla 17. Funciones de membresía variable NR.

NOMBRE	RANGO	VALOR
Necesidad del Reconectador	Muy Baja	10%
	Baja	30%
	Media	50%
	Alta	70%
	Muy Alta	90%

El rango óptimo de ubicación del segundo elemento reconectador del circuito comprende desde el primer apoyo sobre la troncal principal cuyo conjunto de variables de entrada al sistema difuso obtengan como resultado el mayor valor absoluto de NC y que pertenezca a la función de membresía “Muy Alta”; hasta aquel, avanzando en sentido de la salida de dicho circuito, en donde por lo menos una de las entradas superen los valores definidos en sus universos difusos respectivos.

La representación gráfica de las funciones de membresía en la herramienta MATLAB se muestran en la Figura 11.

Figura 11. Representación gráfica de las funciones de membresía variable NR.



9.3 CONTROLADOR DIFUSO

Las reglas de inferencia del sistema difuso se construyeron de la interrelación en términos lingüísticos entre las distintas variables de entrada y salida bajo el método Mamdani (Mamdani 1976, 1977), o conocido también como el método MAX-MIN. La cantidad de reglas necesarias para este caso con cuatro (4) variables (3 de entrada y 1 de salida), con la unión “y” o “and”, lo cual resulta en un total de 64 reglas de inferencia difusa como se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18. Reglas del controlador difuso.

CLASIFICADOR				CLASIFICADOR				CLASIFICADOR				CLASIFICADOR			
ENTRADAS		SALIDA		ENTRADAS		SALIDA		ENTRADAS		SALIDA		ENTRADAS		SALIDA	
DP	PP	ITC	NR	DP	PP	ITC	NR	DP	PP	ITC	NR	DP	PP	ITC	NR
MB	MB	B	MB	MB	MB	B	MB	M	MB	B	M	A	MB	B	A
		M	MB			M	B			M	A			M	A
		A	MB			A	M			A	MA			A	MA
		MA	B			MA	A			MA	MA			MA	MA
	B	B	MB	B	B	B	M	M	B	B	A	A	B	B	A
		M	B			M	M			M	A			M	MA
		A	M			A	A			A	MA			A	MA
		MA	A			MA	MA			MA	MA			MA	MA
	M	B	A	M	M	B	A	M	M	B	MA	A	M	B	MA
		M	A			M	MA			M	MA			M	MA
		A	MA			A	MA			A	MA			A	MA
		MA	MA			MA	MA			MA	MA			MA	MA
	A	B	MA	A	A	B	MA	A	A	B	MA	A	A	B	MA
		M	MA			M	MA			M	MA			M	MA
		A	MA			A	MA			A	MA			A	MA
		MA	MA			MA	MA			MA	MA			MA	MA

10. UBICACIÓN ÓPTIMA DEL SEGUNDO RECONECTADOR EN LOS CIRCUITOS SELECCIONADOS

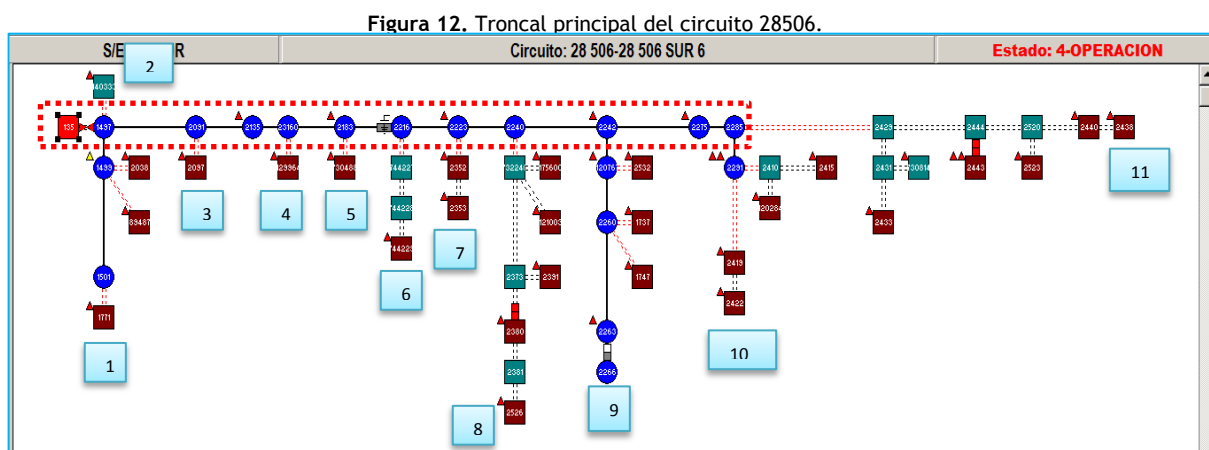
Tal como se mencionó en el capítulo anterior, se procede a aplicar la metodología propuesta mediante la lógica difusa a los circuitos seleccionados a partir de la clasificación por tipo de carga y asumiendo que bajo el criterio a adoptar por parte de ESSA, se requiere de un segundo elemento reconectador sobre la troncal del circuito de distribución.

10.1 CIRCUITO 28506

Aplicando la metodología mencionada anteriormente, se procede de forma resumida a hallar el rango óptimo de ubicación del segundo elemento reconectador sobre la troncal principal del circuito 24503.

10.1.1 Trazado de la troncal principal del circuito 28506

De acuerdo a la metodología, con base en la información disponible en el software EnerGIS se procede a identificar en primera medida, la troncal principal del circuito 28506 bajo los criterios mencionados anteriormente, se halla entre el apoyo de salida (Nodo 135) y el apoyo Nodo 2285 según numeración interna de apoyos de ESSA y se encierra en el rectángulo punteado en color rojo, así mismo, se enumeran (numeración encerrada en los rectángulos) los ramales tal como se muestra en el diagrama topológico del activo de 13,2 kV, nivel 2 de la Figura 12.



10.1.2 Variables de entrada circuito 28506

Posteriormente, se hallan las variables de entrada del sistema lógico difuso según la información del inventario y comercial disponible en ESSA, obteniéndose la Tabla 19, para el circuito 28506, para una potencia total de 2662,77 kVA y tipo de carga predominantemente comercial, es decir un TC= 60%.

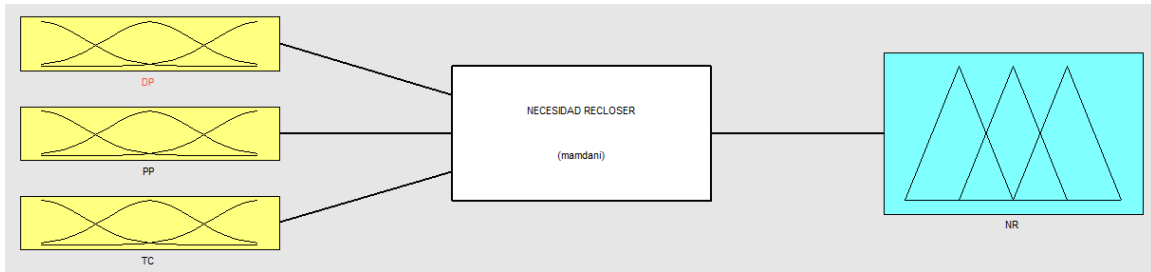
Tabla 19. Conjuntos de variables de entrada circuito 28506.

CIRCUITO 28506						
RAMAL	No. APOYO ARRANQUE	DISTANCIA (m)	%DP	FLUJO POTENCIA (kVA)		
				POR TRAMO	ACUMULADA	% PP
1	1038273	100	89%	24,28	2622,765	100%
2	1038273	100	89%	318,361	2598,485	99%
3	1038516	200	78%	24,276	2280,124	87%
4	1288512	276	70%	71,774	2255,848	86%
5	1040715	457	51%	71,774	2184,074	83%
6	1040723	557	40%	48,118	2112,3	81%
7	1040731	695	25%	172,105	2064,182	79%
8	1040740	795	14%	299,612	1892,077	72%
9	1040758	877	5%	403,876	1592,465	61%
10	1040511	924	0%	593,743	1188,589	45%
11	1040511	924	0%	594,846	594,846	23%

10.1.3 Sistema lógico difuso para el circuito 28506

Como insumo al sistema lógico difuso para ubicar el rango óptimo de ubicación del segundo reconectador para el circuito 28506, se ingresan las variables de entrada: TC que para todo caso según se mencionó es igual al 60%, mientras que para DP y PP se registran por parejas teniendo en cuenta el punto sobre la troncal principal que se desee analizar, por ejemplo, para realizar en el sistema difuso la prueba de Necesidad de Reconectador como variable de salida NC con las variables de entrada asociadas al punto de apoyo del ramal No. 11 que se ubica al final de la troncal principal, por tanto su DP=0%, con una carga que representa el 23% de la carga acumulada de potencia hasta ese punto, de tal forma que su PP=23% resulta para el conjunto de variables de entrada [0, 23, 60], una variable de salida de NC=50%, es decir una necesidad que corresponde al valor nominal de la función de Membresía Media según lo definido previamente, lo cual indica que no existe una necesidad apremiante de la ubicación del reconectador en ese punto en particular. La Figura 13 muestra el sistema lógico difuso implementado en el circuito 28506.

Figura 13. Sistema lógico difuso circuito 28506.



Los resultados de las pruebas con los demás conjuntos de variables de entrada se resumen en la Tabla 20.

Tabla 20. Ubicación del rango óptimo circuito 28506.

SISTEMA LÓGICO DIFUSO CTO 28506			
ENTRADAS			SALIDA
DP	PP	TC	NC
89%	100%	60%	96,4%
89%	99%		96,4%
78%	87%		96,4%
70%	86%		96,4%
51%	83%		96,4%
40%	81%		95,9%
25%	79%		96,4%
14%	72%		96,4%
5%	61%		96,4%
0%	45%		96,4%
0%	23%		50,0%

10.1.4 Ubicación óptima segundo reconfigurador circuito 28506

De acuerdo a los resultados de la Tabla 19, teniendo en cuenta los límites superiores definidos en los universos difusos de las variables de entrada y el criterio de aceptación para la variable de salida, se puede determinar que el rango entre los apoyos con código físico 1040758 y 1040511 ubicados sobre la troncal principal del circuito 28506, es viable la ubicación del segundo elemento reconfigurador con funciones de detección de ausencia/presencia de tensión y protección ante fallas de tipo temporal.

El resultado obtenido para el circuito 28506 es interesante en la medida que contrario a lo que normalmente se pensaría en la práctica, la lógica difusa sugiere la ubicación del segundo reconectador al final de la troncal y no sobre la mitad. Situación que obedece a la distribución no uniforme de la demanda de potencia y la concentración de la carga del circuito en los ramales conectados en ese punto.

Como era de esperarse, en la medida que se analizan los apoyos que se encuentran más cercanos a la subestación, el valor de la variable de salida NC supera el criterio de aceptación, sin embargo, solo se tiene en cuenta el rango comprendido entre el primer apoyo en alcanzar dicho criterio hasta donde se supere el límite superior impuesto a alguna de las variables de entrada en su respectivo universo difuso, que para el presente caso, en el conjunto de variables de entrada [14, 72, 60], la variable PP supera ampliamente el valor máximo del 60% y por lo tanto, el apoyo 1040740 no se incluye dentro del rango óptimo.

Siguiendo con la misma metodología, a continuación se muestran los pasos aplicados en el circuito 28506 para los demás circuitos seleccionados en el análisis.

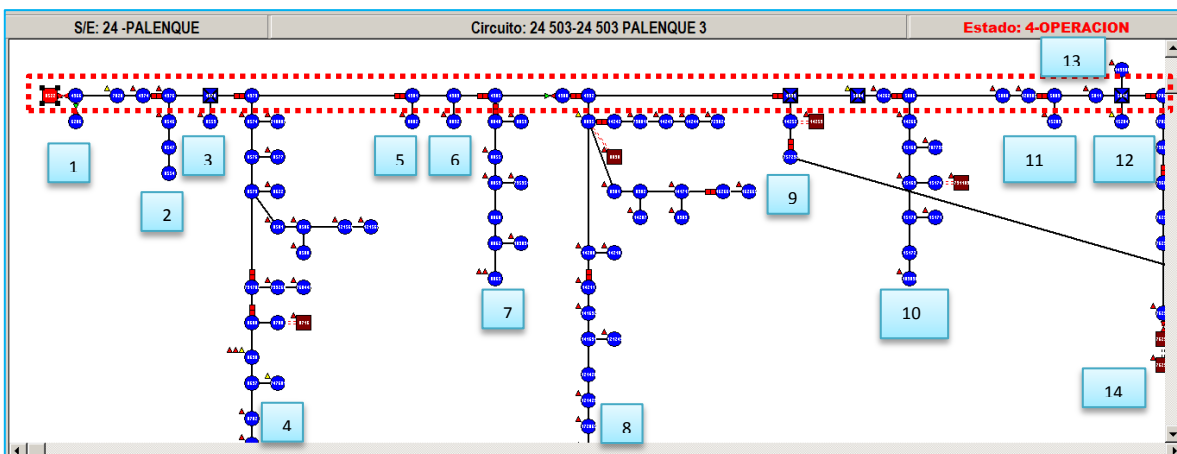
10.2 CIRCUITO 24503

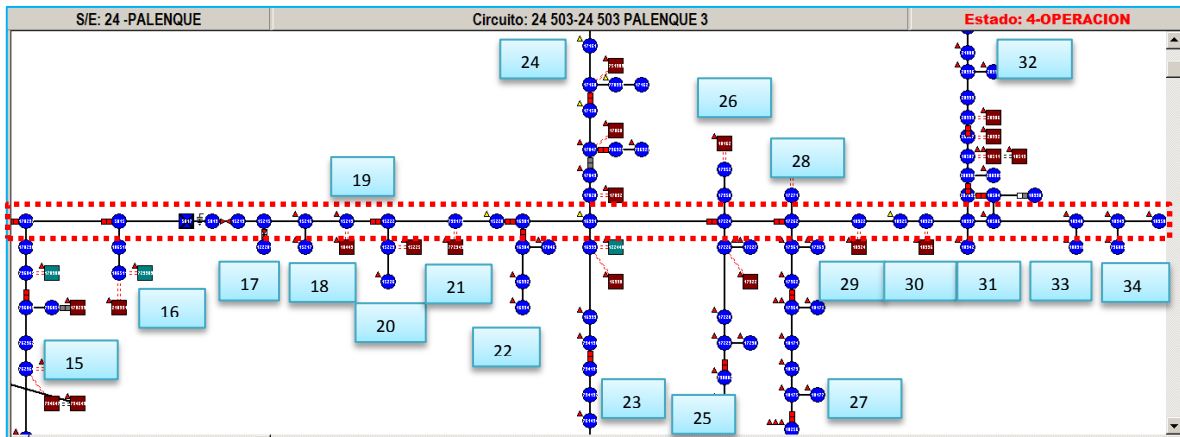
Aplicando la metodología mencionada anteriormente, se procede de forma resumida a hallar el rango óptimo de ubicación del segundo elemento reconectador sobre la troncal principal del circuito 24503.

10.2.1 Trazado de la troncal principal del circuito 24503

Debido a la extensión de la topología del circuito 24503, se hace necesario ilustrar la troncal principal en dos partes como se muestra en la Figura 14.

Figura 14. Troncal principal del circuito 24503.





Fuente: ESSA

10.2.2 Variables de entrada circuito 24503

De forma similar al caso anterior, las variables de entrada del sistema lógico difuso corresponden a la expuesta en la Tabla 21, la cual muestra el conjunto de variables para el circuito 24503, para una potencia total de 6179,1 kVA y tipo de carga predominantemente Industrial, es decir un TC= 80%.

Tabla 21. Conjuntos de variables de entrada circuito 24503.

CIRCUITO 24503						
RAMAL	No. APOYO ARRANQUE	DISTANCIA (m)	%DP	FLUJO POTENCIA (kVA)		
				POR TRAMO	ACUMULADA	% PP
1	1034430	352	89%	48,117	6179,118	100%
2	1034448	380	88%	24,276	6131,001	99%
3	1034456	458	86%	654,51	6106,725	99%
4	1034472	506	84%	48,12	5452,215	88%
5	1034481	607	81%	4,98	5404,095	87%
6	1034502	702	78%	240,03	5399,115	87%
7	1034545	842	74%	502,07	5159,085	83%
8	1034588	965	70%	95,712	4657,015	75%
9	1089412	1132	65%	177,11	4561,303	74%
10	1089439	1358	58%	36,144	4384,197	71%
11	1089455	1397	57%	3,214	4348,053	70%

12	2837846	1497	54%	597,8	4344,839	70%
13	1089480	1622	50%	254,69	3747,038	61%
14	1222643	2193	32%	48,117	3492,348	57%
15	1222678	2253	30%	63,822	3444,231	56%
16	1222716	2381	26%	99,21	3380,409	55%
17	4133374	2382	26%	71,774	3281,199	53%
18	1222899	2564	21%	96,67	3209,425	52%
19	1223232	2684	17%	800,89	3112,755	50%
20	1223232	2684	17%	187,75	2311,866	37%
21	1223674	2816	13%	48,118	2124,113	34%
22	1223674	2816	13%	199,01	2075,995	34%
23	1223909	2929	10%	48,118	1876,984	30%
24	1223909	2929	10%	792,77	1828,866	30%
25	1224255	2930	9%	36,144	1036,095	17%
26	1224646	3010	7%	36,144	999,951	16%
27	1224689	3042	6%	533,09	963,807	16%
28	1224689	3042	6%	48,117	430,72	7%
29	1297058	3045	6%	48,119	382,603	6%
30	1224727	3134	3%	36,144	334,484	5%
31	1224735	3171	2%	48,117	298,34	5%
32	1224786	3237	0%	24,27	250,223	4%
33	1224786	3237	0%	57,927	225,953	4%
34	1224786	3237	0%	168,03	168,026	3%

10.2.3 Ubicación del segundo reconector circuito 24503

Los resultados de las pruebas con las de variables de entrada para la ubicación del segundo reconector del circuito 24503, se resumen en la Tabla 22.

Tabla 22. Ubicación del rango óptimo circuito 24503.

SISTEMA LÓGICO DIFUSO CTO 24503			
ENTRADAS			SALIDA
DP	PP	TC	NC
89%	100%	80%	96,4%
88%	99%		96,4%
86%	99%		96,4%

84%	88%	96,4%
81%	87%	96,4%
78%	87%	96,4%
74%	83%	96,4%
70%	75%	96,4%
65%	74%	96,4%
58%	71%	96,4%
57%	70%	96,4%
54%	70%	96,4%
50%	61%	96,4%
32%	57%	96,4%
30%	56%	96,4%
26%	55%	96,4%
26%	53%	96,0%
21%	52%	95,7%
17%	50%	50,0%
17%	37%	95,1%
13%	34%	95,1%
13%	34%	96,1%
10%	30%	50,0%
10%	30%	80,0%
9%	17%	80,0%
7%	16%	80,0%
6%	16%	80,0%
6%	7%	20,0%
6%	6%	20,0%
3%	5%	20,0%
2%	5%	20,0%
0%	4%	20,0%
0%	4%	20,0%
0%	3%	20,0%

Para el caso del circuito 24503, el rango óptimo de ubicación del reconector comprende desde el nodo físico 1089480 y el 1222716, con el máximo valor de aceptación de la variable de salida NC sin que se superen los límites superiores del universo difuso de alguna de las variables de entrada. Se observa que para el conjunto de variables de entrada [13, 34, 80] el valor de NC se ubica dentro del criterio de aceptación sin que ello necesariamente implique que se deba instalar el reconector en ese punto. Esto obedece a las características y atributos dados a las funciones de membresía de las variables de

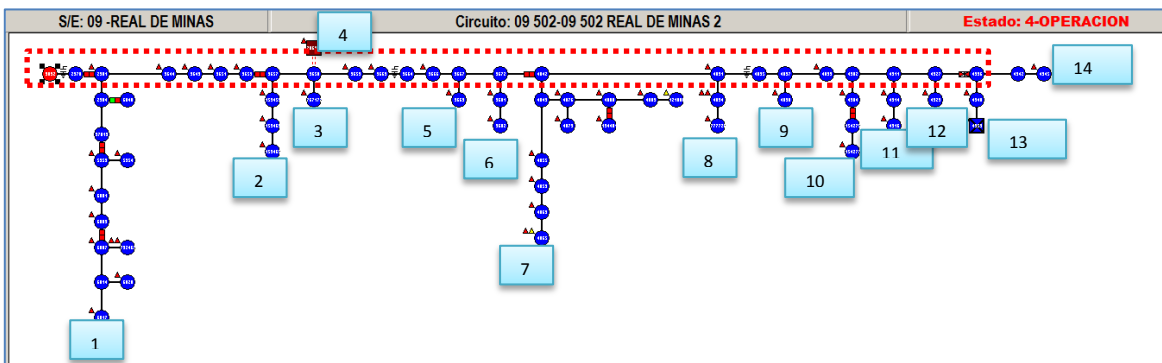
entrada mencionadas en el Capítulo 10, sumado al concepto mismo de membresía de los valores dentro de la lógica difusa.

Se observa que el rango obtenido se mueve entre un delta de DP del 24% mientras que la variación de la PP solo es del 5%, lo cual supondría un gran margen de incertidumbre dentro del mismo rango respecto a la distancia de ubicación del equipo reconector desde la subestación, no obstante el pequeño margen de la potencia a proteger garantiza un resultado satisfactorio en este caso.

10.3 CIRCUITO 09502

En la Figura 15 se identifica la troncal principal y ramales del circuito 09502.

Figura 15. Troncal principal del circuito 09502.



Fuente: ESSA

Los resultados de las pruebas con las de variables de entrada para la ubicación del segundo reconector del circuito 09502, se resumen en la Tabla 23.

Tabla 23. Ubicación del rango óptimo circuito 09502.

CIRCUITO 09502								
RAMAL	No. APOYO ARRANQUE	DISTANCIA (m)	%DP	FLUJO POTENCIA (kVA)		% PP	TC	NC
				POR TRAMO	ACUMULADA			
1	1057740	221	92%	1360,15	5049,100	100%	20%	96,4%
2	1073273	729	73%	335	3688,950	73%		96,4%
3	1073281	756	72%	236,5	3353,950	66%		96,4%
4	1073281	756	72%	78,5	3117,450	62%		96,4%
5	1073371	1244	54%	146,25	3038,950	60%		96,4%
6	1073419	1343	51%	258,75	2892,700	57%		96,4%
7	1073508	1397	49%	1192,5	2633,950	52%		95,7%

8	1073745	1799	34%	312,75	1441,450	29%	50,0%
9	1073842	1953	28%	112,5	1128,700	22%	41,0%
10	1073893	2241	18%	225	1016,200	20%	41,0%
11	1073923	2399	12%	382,5	791,200	16%	5,5%
12	1074041	2603	4%	146,25	408,700	8%	6,3%
13	1074091	2718	0%	112,5	262,450	5%	6,3%
14	1074091	2718	0%	149,95	149,950	3%	5,1%

El circuito 09502 presenta un comportamiento más uniforme de distribución de la carga, lo cual permite inferir tal como se observa en la práctica, el rango óptimo de instalación del segundo elemento reconectador debe estar ubicado en cercanías a la mitad de la troncal principal y protegiendo aproximadamente la mitad de la potencia total del circuito, situación que se ve reflejada en los resultados mostrados en la Tabla 23, sugiriendo la instalación entre los apoyos 1073371 y 1073419.

10.4 CIRCUITO 20506

De igual forma que para los ejemplos anteriormente expuestos se procede a identificar la troncal principal y ramales del circuito 20506, hallando posteriormente el rango óptimo de ubicación del segundo reconectador como se muestra en la Tabla 24.

Tabla 24. Ubicación del rango óptimo circuito 20506.

CIRCUITO 20506								
RAMAL	No. APOYO ARRANQUE	DISTANCIA (m)	%DP	FLUJO POTENCIA (kVA)		% PP	TC	NC
				POR TRAMO	ACUMULADA			
1	1064291	55	98%	24,276	3764,925	100%	40%	96,4%
2	1064339	211	91%	9,811	3740,649	99%		96,4%
3	1064436	422	81%	14,67	3730,838	99%		96,4%
4	1064533	771	66%	36,144	3716,168	99%		96,4%
5	1064533	771	66%	325,343	3680,024	98%		96,4%
6	1064703	804	65%	48,118	3354,681	89%		96,4%
7	1064746	929	59%	24,277	3306,563	88%		96,4%
8	1064771	1030	55%	14,67	3282,286	87%		96,4%
9	1064797	1042	54%	111,34	3267,616	87%		96,4%
10	1064886	1138	50%	36,145	3156,276	84%		96,4%
11	1310747	1208	47%	36,145	3120,131	83%		96,4%
12	1064924	1237	46%	48,522	3083,986	82%		96,4%
13	1064991	1319	42%	60,42	3035,464	81%		96,4%
14	1065033	1348	41%	36,145	2975,044	79%		96,4%

15	1065050	1416	38%	24,276	2938,899	78%	96,4%
16	1065084	1459	36%	14,67	2914,623	77%	96,4%
17	1065122	1507	34%	118,58	2899,953	77%	96,4%
18	1065173	1584	30%	515,036	2781,373	74%	96,4%
19	1065173	1584	30%	250,653	2266,337	60%	96,4%
20	1065319	1691	26%	418,966	2015,684	54%	96,2%
21	1065319	1691	26%	80,153	1596,718	42%	96,4%
22	1065416	1726	24%	84,262	1516,565	40%	96,3%
23	1065424	1785	21%	207,941	1432,303	38%	96,0%
24	1065483	1838	19%	48,118	1224,362	33%	88,7%
25	1065483	1838	19%	16,205	1176,244	31%	85,8%
26	1065505	1898	16%	9,811	1160,039	31%	81,7%
27	1065548	1959	14%	14,67	1150,228	31%	50,0%
28	1065556	1972	13%	45,954	1135,558	30%	50,0%
29	1065581	1985	13%	36,145	1089,604	29%	20,0%
30	1065581	1985	13%	174,04	1053,459	28%	20,0%
31	1065696	2075	9%	24,276	879,419	23%	20,0%
32	1065696	2075	9%	105,521	855,143	23%	20,0%
33	1065742	2167	5%	24,256	749,622	20%	20,0%
34	1065751	2203	3%	71,775	725,366	19%	20,0%
35	1065777	2259	1%	590,163	653,591	17%	20,0%
36	1065823	2272	0%	39,152	63,428	2%	5,1%
37	1065823	2272	0%	24,276	24,276	1%	5,1%

El rango óptimo de instalación del segundo reconector del circuito 20506 se encuentra entre los apoyos 1035173 y 1035319 sobre la troncal principal. Se observa una mayor concentración de cargas y ramales ocasionando que en el punto medio de la distancia de la troncal, es decir DP=50%, se tenga acumulada una potencia DP=84%, por tal razón para este caso, el rango óptimo se desplaza entre el 26% y 30% de la distancia total.

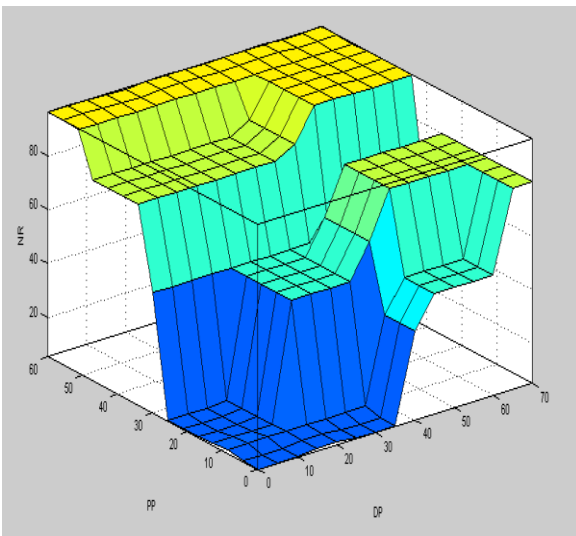
11. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL SISTEMA DE LÓGICA DIFUSA

Con el fin de observar la sensibilidad de las variables de entrada [DP, PP, TC] en el sistema de lógica difusa aplicado en el presente trabajo, se evaluarán en pares manteniendo la restante en los valores nominales de las funciones de membresía mencionadas en el Capítulo 10. Este análisis se efectúa mediante el uso de las funciones gráficas de MATLAB, como se muestra a continuación.

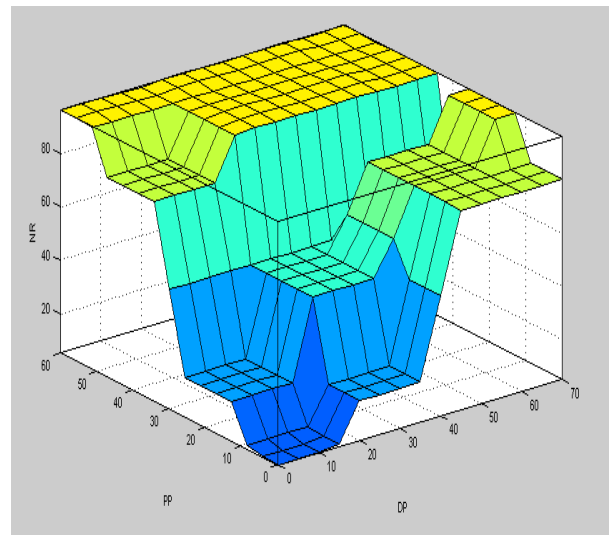
11.1 ANÁLISIS DP Vs PP

Figura 16. Análisis de sensibilidad DP vs PP.

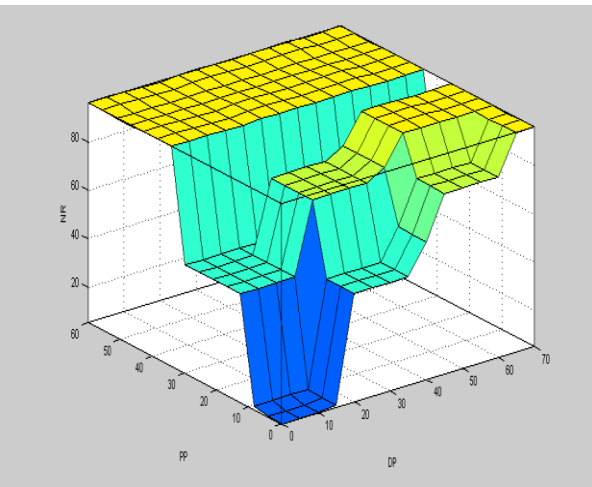
TC=20%



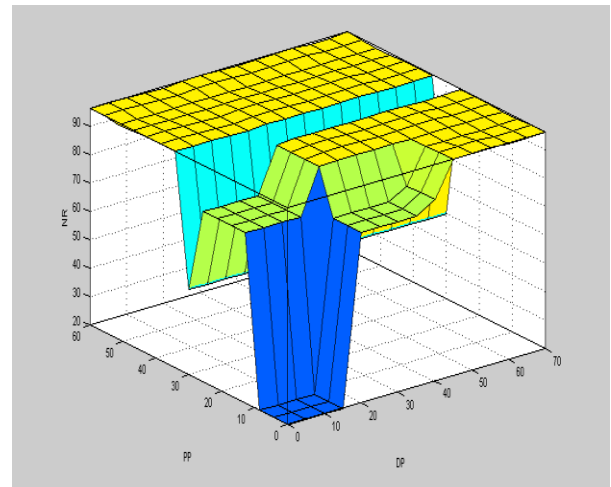
TC=40%



TC=60%



TC=80%

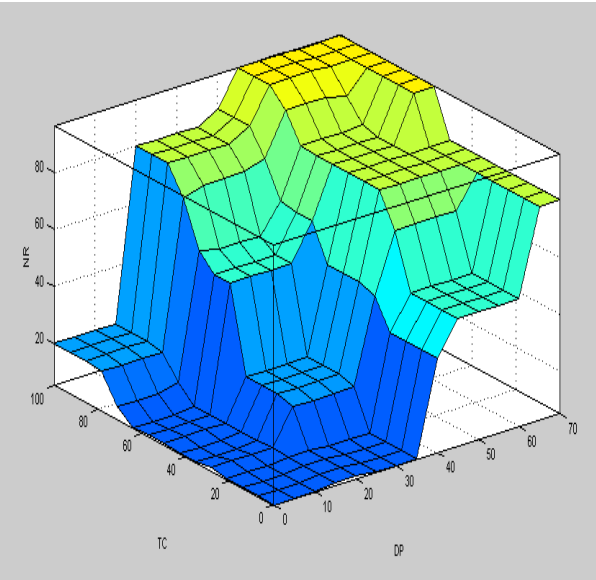


De acuerdo a las gráficas de análisis mostradas en la Figura 16, en general se observa que las variables de entrada DP y PP para todos los casos de TC, respecto a la variable de salida NC guardan una relación directa, ya que para valores pertenecientes a las funciones de membresía Muy Baja y Baja corresponde igualmente la variable de salida y viceversa. No obstante, la variable de salida muestra una mayor sensibilidad a las variaciones de la DP que la PP.

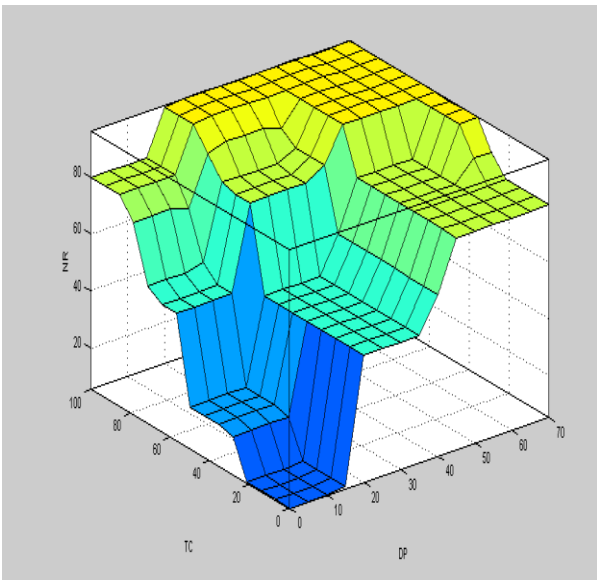
11.2 ANÁLISIS DP Vs TC

Figura 17. Análisis de sensibilidad DP vs TC.

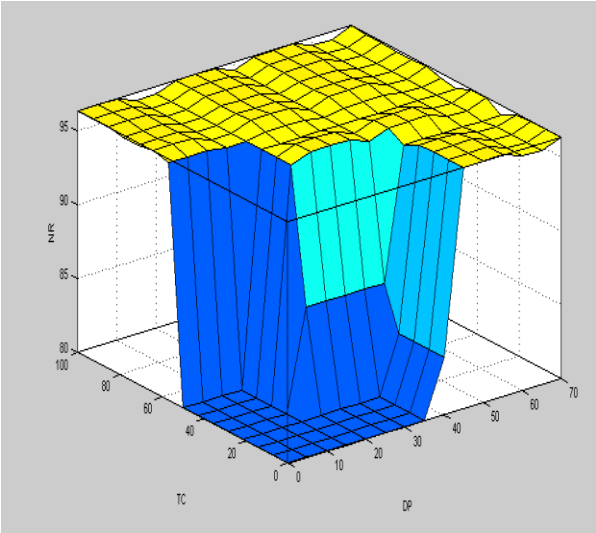
PP=5%



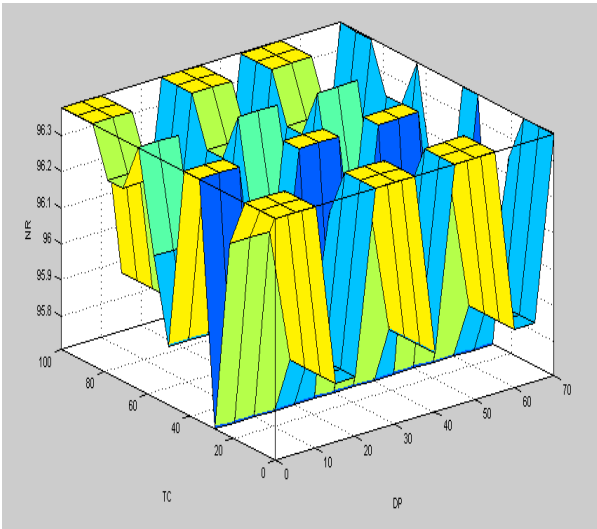
PP=20%



PP=40%



PP=60%

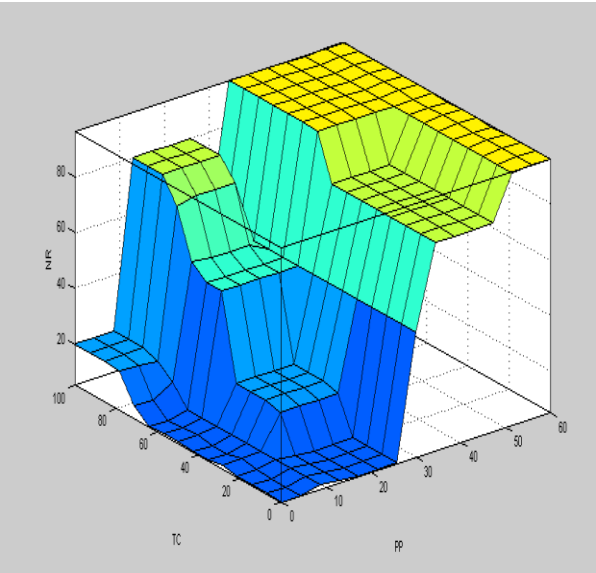


En la Figura 17 se observa que en la medida que aumenta el valor de la PP, variando DP y TC dentro del universo difuso de cada una, se va haciendo más evidente la NC. Sin embargo, para una PP del 60% se muestra cierta aleatoriedad en la relación de las otras dos variables que no permite inferir una relación lógica entre ellas respecto a la salida.

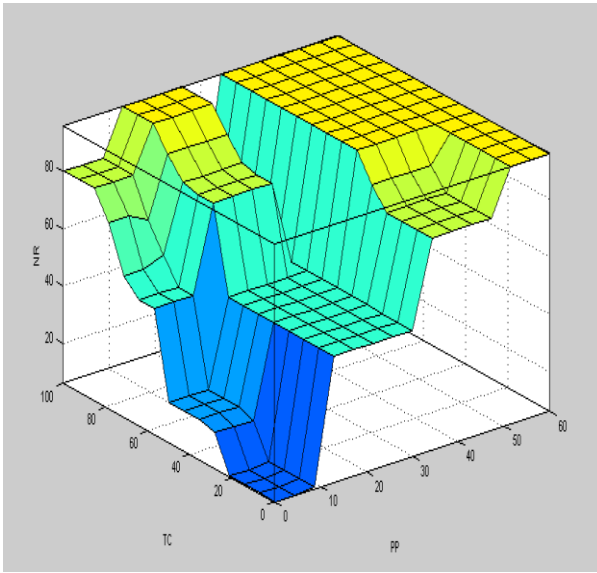
11.3 ANÁLISIS PP Vs TC

Figura 18. Análisis de sensibilidad PP vs TC.

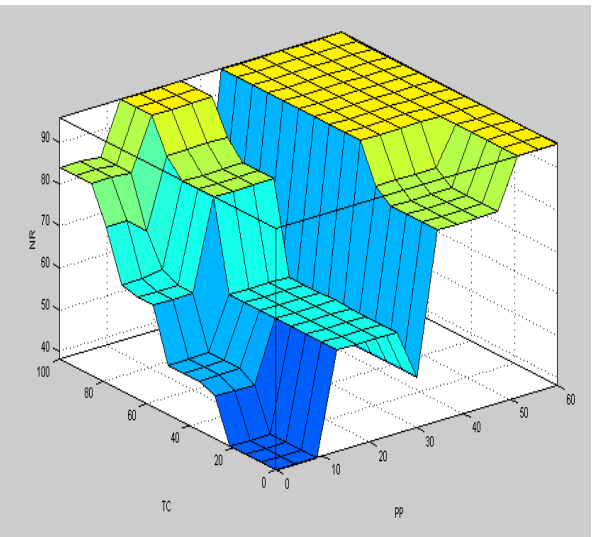
DP=10%



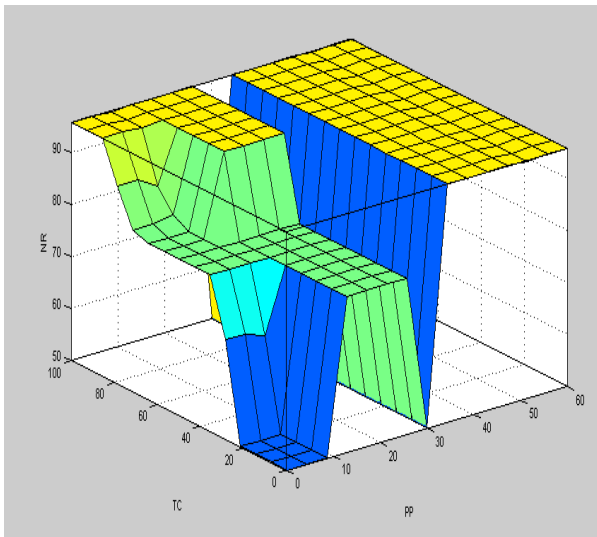
DP=20%



DP=40%



DP=60%



En el presente análisis se observa en la Figura 18 que independiente del valor de DP, el comportamiento de la variable de salida NC está sujeta en gran parte a la variación de PP, por tanto, entre éstas se presenta mayor sensibilidad.

Debido a que incluye ciertos niveles de incertidumbre y aleatoriedad en la relación frente a la variable de salida, se ve entonces que valdría la pena revisar la conveniencia en el análisis del sistema difuso la inclusión de la variable de entrada de Tipo de Carga (TC), o la modificación a criterio experto tanto de la forma como valores de las funciones de membresía de acuerdo, en este caso, de los datos disponibles en la ESSA o en su defecto la incorporación de variables de las cuales se cuenta con información suficiente y confiable como: Grupo de Calidad al que pertenece el circuito según la regulación vigente de calidad del servicio Resolución CREG 097 de 2008, Tasa de fallas del alimentador, Cantidad de reportes atendidos del alimentador, entre otras.

12. CONCLUSIONES

- Teniendo en cuenta la facilidad en el manejo y la interrelación de las variables de entrada y salida, para abordar el presente trabajo desde el campo de las técnicas de inteligencia artificial, se aplicará la lógica difusa como metodología de estimación del rango óptimo de ubicación de un equipo reconector sobre la troncal principal de los circuitos de distribución, partiendo de una clasificación realizada previamente bajo el criterio de conveniencia para la instalación de este tipo de equipos en los circuitos de nivel 2 de ESSA ESP.
- La lógica difusa resulta ser una técnica de optimización novedosa para este tipo de análisis en los cuales no es sencillo establecer una relación específica de las distintas variables de entrada y su interacción para obtener una salida satisfactoria; permitiendo introducir criterios de profesionales que con su experticia, conocimiento y constante retroalimentación de características y entornos de las redes eléctricas de ESSA, enriquezca el sistema lógico difuso y por tanto, la precisión de los resultados obtenidos.

13. RECOMENDACIONES

- Previo a la aplicación del presente análisis, es necesario establecer una metodología de selección bajo criterios de conveniencia técnica y económica con base en información disponible en bases de datos (inventarios, demandas, distancias, ubicación, etc.) y reportes de calidad del servicio (indicadores, salidas, compensaciones, etc.), de los circuitos en nivel 2 que ameriten la instalación del equipo de Gestión de Redes para dar cumplimiento mínimo a lo exigido regulatoriamente y aquellos que por sus características, justifique un equipo con funciones adicionales de protección y seccionamiento, partiendo de la sugerencia de la instalación de éste último para todos los circuitos de nivel 3.
- Debido a que incluye ciertos niveles de incertidumbre y aleatoriedad en la relación frente a la variable de salida, resulta importante revisar la conveniencia en el análisis del sistema lógico difuso de la inclusión de la variable de entrada de Tipo de Carga (TC), o la modificación a criterio del experto tanto de la forma como valores de las funciones de membresía de acuerdo, en este caso, de los datos disponibles en ESSA o en su defecto, la incorporación de variables de las cuales se cuenta con información como: Grupo de Calidad al que pertenece el circuito según la regulación vigente de calidad del servicio Resolución CREG 097 de 2008, Tasa de fallas del alimentador, Cantidad de reportes atendidos del alimentador, entre otras.
- Con el propósito de mejorar los resultados obtenidos para esta clase de análisis, se hace necesario en primer lugar incrementar la cantidad y confiabilidad de la información relacionada con las variables de entrada de la siguiente forma:
 - CALIDAD DE PRESTACIÓN DEL SERVICIO: Tasa de falla periódica por cada derivación y de la troncal principal de cada circuito clasificada por eventos programados y no programados. Energía No Suministrada anual por activo.
 - TIPO DE CARGA: Clasificación por Tipo de Carga en las derivaciones del circuito, que permitan establecer de manera particular la relevancia de cada una dentro de la carga total del activo.

Por otro lado, en la medida que un análisis más experto de las características de las redes eléctricas en los niveles 2 y 3 permitan establecer criterios más ajustados de las funciones de membresía de las distintas variables de entrada y salida, así como las reglas de interacción dentro del sistema lógico difuso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Reyes S. Jerson, Morales F. Mariano, García - S. Luis, Pezoa Jorge E., “Ubicación óptima de reconectores en sistemas de distribución para minimizar la frecuencia media de interrupción.”, *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 17 N° 2, 2009.
- [2] COLOMBIA. COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS. Resolución CREG 043 de 2010. Por la cual se aclaran disposiciones de la Resolución CREG 097 de 2008 relacionadas con la regulación de calidad del servicio en los Sistemas de Distribución Local y se adoptan disposiciones complementarias a dicha resolución. *Diario Oficial No. 47.655 de 18 de marzo de 2010*.
- [3] COLOMBIA. COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS. Resolución CREG 091 de 2012. Por la cual se ordena hacer público un proyecto de resolución de carácter general, mediante el cual se pretende modificar el plazo establecido en el artículo 6 de la Resolución CREG 043 de 2010 y adoptar otras disposiciones relacionadas con la calidad del servicio en el SDL.
- [4] COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución No. 90708 de agosto 30 de 2013. *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE*.
- [5] García L., Opazo H., López E., “Localización óptima de switches en media tensión de red a través de la minimización de energía no suministrada”. Universidad de Concepción, Chile. *Actas de la 16ª Conferencia Internacional IEEE sobre Electrónica, Comunicaciones y Computadoras (CONIELECOMP 2006)*.
- [6] Montoya G. Oscar D., “Planeación óptima de sistemas de distribución considerando reconectores automáticos para aislamiento de fallas y transferencia de carga”. Proyecto de Grado para optar al título de Magíster en Ingeniería Eléctrica, Línea de Planeamiento en Sistemas Eléctricos. Universidad Tecnológica de Pereira. Pareira, Risaralda. Febrero de 2014.
- [7] Dorneles F. Gustavo, Suman B. Arturo, Cardoso Jr. Ghendy. “Diseño óptimo de protección de distribución considerando índices de confiabilidad momentáneos y sostenidos”. *Modernos Sistemas Eléctricos de Potencia 2010*, Wroclaw, Polonia MEPS'10 - papel 03.2. Disponible en <http://www.meps10.pwr.wroc.pl>.
- [8] Bupasiri R., Wattanapongsakorn N., Hokierti J., Coit W. David, “Óptimos índices de fiabilidad del sistema de distribución de energía eléctrica utilizando la programación binaria.” *Procedimientos de confiabilidad y mantenibilidad. Simposio anual 2003*.
- [9] Ukil Abhisek. “Sistemas Inteligentes y Procesamiento de Señales en Ingeniería de Potencia”. ABB Corporate Research, ISBN 978-3-540-73169-6 Springer Berlin Heidelberg New York. 2007.
- [10] Mora F. Juan J. “Localización de faltas en sistemas de distribución de energía eléctrica usando métodos basados en el modelo y métodos de clasificación basados en el

conocimiento”. Tesis doctoral, Programa de Doctorado en Tecnologías de la Información. Universidad de Girona, España 2006.

[11] ELECTRIFICADORA DE SANTANDER S.A. E.S.P. Normas de construcción y diseño de redes de distribución de energía eléctrica. Bucaramanga, Santander, 2003.

[12] ELECTRIFICADORA DE SANTANDER S.A. E.S.P. Manual de Operación del sistema eléctrico de ESSA ESP, Código: MPSOS001, Versión: 2. Bucaramanga, Noviembre de 2014.

[13] ELECTRIFICADORA DE SANTANDER S.A. E.S.P. Estudio de proyección espacial de la demanda de potencia eléctrica para el área metropolitana de Bucaramanga. Bucaramanga, Noviembre de 2013.