

**METODOLOGÍA DE BÚSQUEDA HEURÍSTICA PARA DETERMINAR LA
CANTIDAD Y UBICACIÓN DE DISPOSITIVOS DE CONMUTACIÓN EN REDES
DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA MEJORAR ÍNDICES DE
CONFIABILIDAD DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN**

JUAN RAFAEL CAMACHO MARTÍNEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
MAESTRÍA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA
BUCARAMANGA
2018**

**METODOLOGÍA DE BÚSQUEDA HEURÍSTICA PARA DETERMINAR LA
CANTIDAD Y UBICACIÓN DE DISPOSITIVOS DE CONMUTACIÓN EN REDES
DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA MEJORAR ÍNDICES DE
CONFIABILIDAD DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN**

JUAN RAFAEL CAMACHO MARTÍNEZ

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN
SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

DIRECTOR

CÉSAR ANTONIO DUARTE GUALDRÓN

PhD. IN ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS

**ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES**

BUCARAMANGA

2018

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. OBJETIVOS	20
1.1 OBJETIVO GENERAL	20
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2. CALIDAD DEL SERVICIO DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN COLOMBIA	22
2.1 INDICADORES DE CALIDAD MEDIA	22
2.2 INDICADORES DE CALIDAD INDIVIDUAL	23
2.3 LA RECONFIGURACIÓN COMO HERRAMIENTA PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL SERVICIO	25
3. SÍNTESIS DE LA LITERATURA SOBRE LOS MÉTODOS DE UBICACIÓN DE DISPOSITIVOS DE CONMUTACIÓN PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL SERVICIO EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN LOCAL	33
4. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA UBICACIÓN DE DISPOSITIVOS DE CONMUTACIÓN CON EL FIN DE MEJORAR LA CALIDAD DEL SERVICIO EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	41
4.1 EVALUACIÓN DE LA REGULACIÓN DE TENSIÓN Y ANÁLISIS TOPOLÓGICO DEL SISTEMA	45

4.1.1 Evaluación de la regulación de tensión.	46
4.1.2 Análisis topológico del sistema	48
4.2 UBICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE CONMUTACIÓN QUE PERMITEN OBTENER LA CONFIGURACIÓN RADIAL BASE DEL SISTEMA	54
4.2.1 Ajuste de la ubicación de los dispositivos de conmutación requeridos para obtener la configuración base	72
4.3 CÁLCULO DE LOS INDICADORES DE CALIDAD DEL SERVICIO	74
4.3.1 Barras afectadas por eventos cuando solo se tienen los dispositivos requeridos para la configuración base	75
4.3.2 Barras afectadas por eventos cuando existe posibilidad de reconfiguración	77
4.3.3 Simulación de Montecarlo	79
4.3.4 Evaluación de la calidad del servicio con criterio $n - 1$	82
4.4 UBICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE CONMUTACIÓN PARA CUMPLIR EL CRITERIO DE BÚSQUEDA	83
4.4.1 Algoritmo de búsqueda voraz	84
4.4.2 Algoritmo propuesto de búsqueda profunda	87
5. PRUEBAS, RESULTADOS Y COMPARACIÓN CON OTRAS METODOLOGÍAS	91
5.1 SISTEMA DE PRUEBA SIN GENERACIÓN DISTRIBUIDA Y CONSTRUCCIÓN POCO MALLADA, TOMADO DE BIN LIU 2006	91
5.2 SISTEMA DE PRUEBA CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA Y CONSTRUCCIÓN RADIAL, TOMADO DE HAMID FALAGHI 2009	99
5.2.1 Sistema de prueba construido radialmente sin generación distribuida	102
5.2.2 Sistema de prueba construido radialmente con generación distribuida	104

5.3 SISTEMA DE PRUEBA SIN GENERACIÓN DISTRIBUIDA Y CONSTRUCCIÓN BASTANTE MALLADA, TOMADO DE MESUT 1989	108
5.3.1 Ubicación de los dispositivos de conmutación y calidad del servicio en función de la restricción de regulación de tensión	111
5.3.1.1 La metodología propuesta como herramienta para minimizar pérdidas y regulación de tensión	114
5.3.2 Ubicación de los dispositivos de conmutación y la calidad del servicio en función del indicador de calidad seleccionado como referencia	116
6. CONCLUSIONES	120
7. RECOMENDACIONES	122
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123
BIBLIOGRAFÍA	126

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. SDL con construcción mallada y dispositivos de conmutación.	26
Figura 2. Sistema de distribución con generación distribuida	28
Figura 3. Ejemplo de reubicación de un dispositivo de conmutación	30
Figura 4. Objetivos y restricciones de la ubicación de DDC en un SDL	31
Figura 5. Algoritmo general de la metodología implementada	43
Figura 6. Ejemplo de SDL con diez barras y once líneas	45
Figura 7. Algoritmo para evaluar el flujo de carga	47
Figura 8. Algoritmo para codificar la conectividad del SDL	50
Figura 9. Algoritmo para ubicar los DDC para obtener la configuración radial base	58
Figura 10. Algoritmo para ubicar los primeros DDC, cumpliendo %R.V.	62
Figura 11. Evolución de la topología del sistema de distribución de ejemplo.	68
Figura 12. Barras afectadas por fallas en cada línea, con solo N_{ddc} DDC	76
Figura 13. Algoritmo para la reconfiguración y efecto de eventos	78
Figura 14. Traslapo de tiempos de reparación	80
Figura 15. Algoritmo para realizar la simulación de Montecarlo	81
Figura 16. Algoritmo para la ubicación de n DDC, con $n > N_{ddc}$	85
Figura 17. Primer sistema de prueba	92
Figura 18. Resultados de indicadores de calidad para el primer sistema de prueba	98
Figura 19. Segundo sistema de prueba	99
Figura 20. Resultados de indicadores de calidad para el segundo sistema de prueba sin generación distribuida	103

Figura 21. Resultados de indicadores de calidad para el segundo sistema de prueba con generación distribuida	105
Figura 22. Tercer sistema de prueba	109
Figura 23. Configuraciones base para el tercer sistema de prueba con distintos %R.V. de referencia, las líneas a trazos son aquellas inhabilitadas por algún DDC	113

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Síntesis de los principales aspectos de las metodologías revisadas	39
Cuadro 2. Datos de entrada de la metodología	41
Cuadro 3. Hitos de la metodología implementada	44
Cuadro 4. Ejemplo de codificación de la conectividad de un SDL	51
Cuadro 5. Impedancia, λ , r y U para las líneas del SDL de ejemplo.	65
Cuadro 6. Demandas de P y Q en las barras del SDL de ejemplo.	66
Cuadro 7. Trayectoria a la que pertenecen las líneas y posibilidad de instalación de DDC para cada línea.	67
Cuadro 8. Descripción del proceso de búsqueda para cumplir el límite de regulación de tensión.	70
Cuadro 9. Resultados de la ubicación de los DDC con la búsqueda voraz en el sistema de ejemplo	88
Cuadro 10. Información del primer sistema de prueba tomada de [5], [17] y [18]	93
Cuadro 11. Ajuste del indicador SAIDI para el primer sistema de prueba	95
Cuadro 12. Información del segundo sistema de prueba	101
Cuadro 13. Resultados para varios casos de estudio publicados en [8]	107
Cuadro 14. Información del tercer sistema de prueba	110
Cuadro 15. Repercusión de la restricción de regulación de tensión	112
Cuadro 16. Comparación de resultados en búsqueda de mejor eficiencia y regulación de tensión	115
Cuadro 17. Resultados para el primer sistema de prueba en función del indicador de referencia seleccionado	118
Cuadro 18. Resultados para el segundo sistema de prueba en función del indicador de referencia seleccionado	118

Cuadro 19. Resultados para el tercer sistema de prueba en función del indicador de referencia seleccionado 119

LISTA DE ANEXOS

(Ver anexos adjuntos en el CD, pueden visualizarse en la base de datos de la Biblioteca UIS).

ANEXO 1. MANUAL DE USUARIO DEL SOFTWARE DESARROLLADO

ANEXO 2. Eval_Confi_SDL

ANEXO 3. EVALUACIÓN DE LA REGULACIÓN DE TENSIÓN

ANEXO 4. flujos

ANEXO 5. ANÁLISIS TOPOLÓGICO DEL SISTEMA

ANEXO 6. topología

ANEXO 7. UBICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE CONMUTACIÓN QUE PERMITEN OBTENER LA CONFIGURACIÓN RADIAL BASE DEL SISTEMA

ANEXO 8. ubicacion1_1

ANEXO 9. ubicacion1

ANEXO 10. local_ddc

ANEXO 11. Refi_Ubi1

ANEXO 12. Ubi_ext1

ANEXO 13. GD_ddc

ANEXO 14. Incluir_GD

ANEXO 15. BARRAS AFECTADAS POR EVENTOS CUANDO SOLO SE TIENEN LOS DISPOSITIVOS REQUERIDOS PARA LA CONFIGURACIÓN BASE

ANEXO 16. Falla_Lin_Nddc

ANEXO 17. BARRAS AFECTADAS POR EVENTOS CUANDO EXISTE POSIBILIDAD DE RECONFIGURACIÓN

ANEXO 18. Falla_Lin_ddc

ANEXO 19. Refi_ddc_Rec

ANEXO 20. Refi_ddc_Rec1

ANEXO 21. Refi_ddc_Rec2

ANEXO 22. Falla_Lin_ddc1

ANEXO 23. combinatoria
ANEXO 24. GD_Rec
ANEXO 25. Simulación de Montecarlo
ANEXO 26. SMC_SDL
ANEXO 27. G_tf
ANEXO 28. G_tr
ANEXO 29. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL SERVICIO CON CRITERIO N-1
ANEXO 30. BFD_SDL
ANEXO 31. Bus_Ubi
ANEXO 32. Refi_Bus_Ubi
ANEXO 33. Demanda1
ANEXO 34. Lineas1
ANEXO 35. Demanda2
ANEXO 36. Lineas2
ANEXO 37. GD2
ANEXO 38. Demandas3
ANEXO 39. Lineas3
ANEXO 40. Demandas3 – b
ANEXO 41. Lineas3 - b

RESUMEN

TÍTULO: METODOLOGÍA DE BÚSQUEDA HEURÍSTICA PARA DETERMINAR LA CANTIDAD Y UBICACIÓN DE DISPOSITIVOS DE CONMUTACIÓN EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA MEJORAR ÍNDICES DE CONFIABILIDAD DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN¹

AUTOR: JUAN RAFAEL CAMACHO MARTÍNEZ²

PALABRAS CLAVE: CALIDAD DEL SERVICIO DE ENERGÍA ELÉCTRICA, UBICACIÓN DE DISPOSITIVOS DE CONMUTACIÓN, RECONFIGURACIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN, GENERACIÓN DISTRIBUIDA.

DESCRIPCIÓN:

Este trabajo de aplicación propone un algoritmo híbrido de búsqueda voraz complementado con búsqueda profunda para determinar un conjunto con mejores opciones, para la ubicación de dispositivos de conmutación (DDC) en sistemas de distribución de energía eléctrica, con el fin de mejorar la calidad del servicio (confiabilidad). Se evalúan los indicadores de calidad: SAIDI (System Average Interruption Duration Index), SAIFI (System Average Interruption Frequency Index), Duración total de Interrupciones para cada Usuario (DIU), Frecuencia total de Interrupciones para cada Usuario (FIU) y EENS (Electrical Energy Not Supplied). La herramienta desarrollada puede ser utilizada de dos modos: 1) Determinar la ubicación del menor número de DDC para llevar alguno de los indicadores por debajo de un valor de referencia o 2) Identificar la mejor ubicación de una cantidad determinada de DDC minimizando alguno de los indicadores. La búsqueda inicia con la ubicación del mínimo número de DDC que garanticen que las redes con construcción mallada operen de modo radial. Después, si es necesario, se agregan DDC, uno a la vez, probando todas las opciones de ubicación para escoger la mejor (búsqueda voraz). Este proceso iterativo continúa hasta satisfacer el criterio del modo de uso seleccionado. Finalmente, es posible realizar pruebas combinando las mejores opciones encontradas en cada iteración, para seleccionar la mejor (búsqueda profunda). Se consideran las siguientes restricciones: operación radial, garantizar un valor máximo en la regulación de tensión y evitar sobrecarga de los generadores distribuidos, en caso de que el sistema los tenga. La metodología propuesta se prueba en tres sistemas de distribución, y los resultados se comparan con los reportados en la literatura para otros métodos, obteniendo los mismos en sistemas con pocas opciones de restauración del servicio y reducciones hasta del 5,7% en los indicadores de calidad para sistemas con varias opciones de restauración.

¹ Trabajo de grado

² UIS, Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Maestría en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica. Director: PhD. César Antonio Duarte Gualdrón.

ABSTRACT

TITLE: HEURISTIC SEARCH METHODOLOGY TO DETERMINE AMOUNT AND LOCATION OF SWITCHING DEVICES IN ELECTRICAL ENERGY DISTRIBUTION SYSTEM IN ORDER TO IMPROVE RELIABILITY INDICES³

AUTHOR: JUAN RAFAEL CAMACHO MARTÍNEZ⁴

KEYWORDS: QUALITY OF THE ELECTRIC ENERGY SERVICE, RELIABILITY, LOCATION OF SWITCHING DEVICES, RECONFIGURATION OF DISTRIBUTION SYSTEMS, DISTRIBUTED GENERATION.

DESCRIPCIÓN:

In this application work we propose a hybrid algorithm of voracious search complemented by deep search to determine a set with better options, for the location of switching devices (SD) in electric power distribution systems, in order to improve service reliability. The following indices are considered: System Average Interruption Duration Index (SAIDI), System Average Interruption Frequency Index (SAIFI), DIU (Interruption time for each user), FIU (Interruption number for each user) and Electrical Energy Not Supplied (EENS). The developed tool can be used in two different ways: 1) To determine the location of the least number of SDs to make any of the quality indices below a reference value or 2) To identify the best location of a certain amount of SDs by minimizing some of the indices. The search begins with the location of the minimum number of SDs that guarantees that networks with mesh construction operate radially. Then, if necessary, a SD is added, one at a time, testing all the location options to choose the best one (voracious search). This iterative process continues until the criterion of the selected mode of use is met. Finally, it is possible to perform tests combining the best options found in each iteration, to select the one that offers the best result (deep search). These constraints are considered: radial operation, to guarantee a maximum voltage regulation and avoid overload of distributed generators, when they exist. The proposed methodology is tested in three distribution systems, and the results are compared with those reported in the literature for other methods, obtaining the same results in systems with few service restoration options and reductions up to 5.7% in quality indices for systems with several restoration options.

³ Degree work

⁴ UIS, Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronics Engineering and of Telecommunications. Master's Degree in Electric Power Distribution Systems. Director: PhD. César Antonio Duarte Gualdrón.

INTRODUCCIÓN

En el mercado competitivo de hoy es importante procurar la mayor continuidad posible en el suministro de energía eléctrica. La rapidez en el restablecimiento del suministro eléctrico de los usuarios, después de una falla, es esencial en la calidad del servicio que se presta. Teniendo en cuenta que la mayoría de las interrupciones del servicio se deben a fallas en los sistemas de distribución local (SDL), las investigaciones encaminadas a mejorar la confiabilidad de los SDL son muy importantes porque permiten incrementar la productividad de los sectores industrial y comercial, y la calidad de vida de los usuarios en general.

En Colombia, la comisión de regulación de energía y gas (CREG), en la metodología para la remuneración de la actividad de distribución, tiene en cuenta la calidad del servicio, la cual se relaciona con la duración y frecuencia de las interrupciones del suministro. En el país, la calidad del servicio ha sido regulada desde el año 2008 mediante un esquema de incentivos simétricos, para la calidad media, y un esquema de compensaciones para la calidad individual. La regulación vigente, aunque realiza ajustes en la aplicación de estos esquemas, da continuidad a las políticas generales de incentivos simétricos y compensaciones [1] [2]. Por lo anterior, el tema central del presente trabajo, mejoramiento en la calidad del servicio mediante la ubicación de dispositivos de conmutación (DDC) en los SDL, es de especial interés para los operadores de red (OR).

Una de las formas de mejorar la confiabilidad de los sistemas de distribución es cambiar su configuración en caso de falla, aislando los elementos que ocasionan el problema y manteniendo el suministro de energía eléctrica a la mayor cantidad de usuarios posible. Para lograr esto se requiere una construcción mallada de los SDL, incluyendo elementos de conmutación que permitan la operación radial del sistema. La ubicación de estos dispositivos es crucial para maximizar las posibles configuraciones del sistema que minimicen la duración de las interrupciones del servicio con la menor cantidad de elementos de conmutación, para reducir la

inversión realizada. Adicionalmente, el uso de los recursos energéticos distribuidos amplía las posibilidades de suministro de energía en los puntos de carga, incluyendo a su vez las limitaciones propias de la capacidad de generación energética de estas fuentes y de transporte de energía de la red disponible.

El problema de optimización de que trata el presente trabajo es de carácter no lineal y discreto, características que han llevado al empleo de técnicas de optimización de tipo heurísticas para su solución. En este trabajo se propone abordar el problema ubicando los dispositivos de conmutación que permiten obtener la configuración base lo más cerca posible a los elementos con mayor impacto negativo en la calidad del servicio, estos DDC permiten que, en condiciones normales de todos los elementos del sistema, la red con construcción mallada opere de modo radial; la búsqueda de la ubicación de los siguientes dispositivos se realiza, uno a uno, hasta obtener una calidad del servicio establecida o haber ubicado un número máximo de dispositivos. Este proceso se realiza mediante un algoritmo de búsqueda voraz. Finalmente, se utiliza la búsqueda profunda para definir la ubicación, probando las mejores opciones encontradas en cada una de las iteraciones de la etapa anterior. La operación radial, un límite de regulación de tensión y la capacidad de las fuentes de energía distribuidas, si las hay, se establecen como restricciones operativas.

Este documento se divide en siete capítulos que abordan los siguientes temas:

En el primer capítulo se presentan el objetivo general y los específicos del trabajo realizado. En el segundo capítulo se presentan los indicadores que se usaron en este trabajo para evaluar la calidad del servicio de los sistemas de distribución. Estos indicadores incluyen los cuatro establecidos por la regulación colombiana, como instrumentos de evaluación de calidad del servicio que prestan los operadores de red, y uno más, que permite medir algunas características adicionales. En esta parte del documento también se muestra que la reconfiguración de los sistemas de distribución de energía eléctrica puede ayudar a mejorar la calidad del servicio y cómo la ubicación de los dispositivos de conmutación influye en el beneficio que otorga la posibilidad de cambiar la configuración de los SDL para maximizar la

cantidad de usuarios a los que se entrega suministro, cuando se ha presentado falla de alguno de los elementos del sistema.

El tercer capítulo es una síntesis de las publicaciones sobre métodos para la ubicación de dispositivos de conmutación en sistemas de distribución de energía eléctrica, con el fin de mejorar la calidad del servicio. En esta parte se analizan las características de las metodologías reportadas y los aspectos de los SDL que han tenido en cuenta, por ejemplo: restricciones de capacidad o niveles de tensión en las barras, presencia de fuentes de energía distribuidas, construcción mallada del sistema y ubicación de los DDC que permiten tener la configuración base.

En el cuarto capítulo se exponen cada una de las etapas de la metodología propuesta. Se inicia con el análisis de flujo de cargas como la herramienta usada para verificar el cumplimiento de la restricción de regulación de tensión; seguidamente, se presenta el análisis topológico del sistema, este análisis es requerido por todas las demás fases de la metodología, ya que permite determinar los caminos que pueden tomar los flujos de potencia, para las distintas configuraciones y garantizar el cumplimiento de la restricción de operación radial. Posteriormente, se presenta el algoritmo usado para determinar la ubicación de los dispositivos de conmutación que permiten la operación radial del sistema, es decir, los DDC que al estar en estado abierto inhabilitan las líneas suficientes para obtener la configuración base de operación radial. La siguiente parte de esta sección trata sobre la evaluación de los indicadores de calidad, para una cantidad y ubicación de DDC dada. Para esto se requiere determinar las barras afectadas por las fallas de las líneas del sistema, para lo cual, es necesario considerar la falla de cada una de ellas, reconfigurar el sistema y verificar el cumplimiento de las restricciones operativas. Se presentan dos métodos para el cálculo de los indicadores de calidad, uno de ellos es la simulación de Monte Carlo, el cual permite realizar el estudio sin criterio $n - 1$, pero requiere mucho tiempo para obtener resultados confiables; el otro método se basa en el análisis por bloques de frecuencia y duración, que al ser determinista, no emplea demasiado tiempo de cálculo, pero implica considerar que

las fallas de los componentes son excluyentes. Finalmente, se expone el algoritmo para encontrar la cantidad y ubicación de los dispositivos de conmutación que permiten obtener algún valor máximo en los indicadores de calidad estipulados por el usuario de la metodología.

En el quinto capítulo se presentan algunos sistemas de prueba, se aplica la metodología y se comparan los resultados con los reportados en algunas publicaciones, de las presentadas en la segunda sección. Adicionalmente, se evalúan el efecto de algunos aspectos de la búsqueda de la cantidad y ubicación de los DDC, estos aspectos son los siguientes: el impacto de complementar el algoritmo voraz con la búsqueda profunda, las consecuencias de incluir generación distribuida, el efecto de la restricción de regulación de tensión y el efecto del indicador seleccionado como referencia para realizar la búsqueda. Finalmente, en los capítulos seis y siete se presentan las conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos.

1. OBJETIVOS

En este trabajo de aplicación se desarrolla una metodología que permite determinar la cantidad y ubicación de dispositivos de conmutación en redes de distribución de energía eléctrica, con el fin de mejorar los índices de confiabilidad de los sistemas de distribución. Los algoritmos de la metodología propuesta se presentan en una herramienta informática que se basada en las frecuencias de fallas y tiempos medios de reparación de los componentes para determinar la ubicación de cada DDC, los eventos de falla se concentran en las líneas del sistema. El desempeño de la metodología propuesta se compara con el que presentan otros métodos publicados en la literatura especializada.

Los objetivos de este trabajo de aplicación son los siguientes.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar y evaluar el desempeño de una metodología basada en las características del sistema para determinar la cantidad y ubicación óptima de dispositivos de conmutación en redes de distribución de energía eléctrica para mejorar la confiabilidad del sistema.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar una síntesis comparativa de la literatura identificada sobre métodos para la ubicación de dispositivos de conmutación en sistemas de distribución de energía eléctrica que incluyan generación distribuida.
- Desarrollar una herramienta computacional para implementar una metodología basada en las características del sistema para determinar la cantidad y ubicación de dispositivos de conmutación instalados en los sistemas de distribución que incluyen generación distribuida para mejorar su confiabilidad.

- Comparar y discutir el desempeño de la metodología basada en las características del sistema con el desempeño presentado en las publicaciones sobre las técnicas identificadas en la síntesis comparativa de la literatura.

2. CALIDAD DEL SERVICIO DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN COLOMBIA

En Colombia, según lo estipulado en la resolución 015 del 29 de enero del 2018, para los SDL la calidad del servicio prestado por un OR se regula en función de las mejoras o desmejoras en la calidad media del servicio que cada OR brinda a sus usuarios, y puede obtener un aumento o disminución de sus ingresos. Además, en términos de la calidad individual, el OR correspondiente debe compensar a aquellos usuarios a los que no entregue una calidad mínima. Los indicadores de calidad media e individual deben ser calculados para un periodo anual y se exponen a continuación.

2.1 INDICADORES DE CALIDAD MEDIA

Los indicadores de calidad media miden el promedio de la duración y de la cantidad de los eventos que afectan a todos los usuarios conectados a los SDL de un OR.

“El indicador SAIDI representa la duración total en horas de los eventos que en promedio percibe cada usuario del SDL de un OR, hayan sido o no afectados por un evento, en un periodo anual” [1]:

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

Donde:

$SAIDI_{j,t}$: Indicador de duración promedio por usuario, de los eventos sucedidos en el SDL del OR j , durante el año t , medido en horas al año.

$D_{i,u,m}$: Duración en minutos del evento i , sucedido durante el mes m , que afectó al activo u perteneciente al SDL del OR j .

$NU_{i,u,m}$: Número de usuarios que fueron afectados por el evento i sucedido durante el mes m , conectados al activo u .

$UT_{j,m}$: Número total de usuarios conectados al SDL del OR j en el mes m .

m : Mes del año t , siendo enero el 1 y diciembre el 12.

“El indicador SAIFI representa la cantidad total de los eventos que en promedio perciben todos los usuarios del SDL de un OR, hayan sido o no afectados por un evento, en un periodo anual” [1]:

$$SAIFI_{j,t} = \sum_{m=1}^{12} \frac{\sum_{i=1}^n NU_{i,u,m}}{UT_{j,m}} \quad (2)$$

Donde:

$SAIFI_{j,t}$: Indicador de frecuencia promedio por usuario, de los eventos sucedidos en el SDL del OR j , durante el año t , medido en cantidad al año.

$NU_{i,u,m}$: Número de usuarios que fueron afectados por el evento i sucedido durante el mes m , por encontrarse conectados al activo u .

$UT_{j,m}$: Número total de usuarios conectados al SDL del OR j en el mes m .

m : Mes del año t , siendo enero el 1 y diciembre el 12.

2.2 INDICADORES DE CALIDAD INDIVIDUAL

Los indicadores de calidad individual miden, para cada usuario de los SDL de un OR, la calidad del servicio utilizando dos indicadores.

“El indicador DIU representa la duración total de los eventos que percibe cada usuario del SDL de un OR en un período anual” [1]:

$$DIU_{u,n,q,m} = \sum_{ma=m-11}^m DIUM_{u,n,q,ma} \quad (3)$$

$$DIUM_{u,n,q,m} = \sum_{i=1}^{IT} D_{i,u,n,q,m}$$

Donde:

$DIU_{u,n,q,m}$: Duración total acumulada en horas de los eventos percibidos por el usuario u , conectado al nivel de tensión n y que pertenece al grupo de calidad q , en un periodo de doce meses que terminan en el mes m de evaluación.

$DIUM_{u,n,q,m}$: Duración en horas de todos los eventos percibidos por el usuario u , conectado al nivel de tensión n y que pertenece al grupo de calidad q , durante el mes m de evaluación.

$D_{i,u,n,q,m}$: Duración en horas del evento i que afectó al usuario u conectado al nivel de tensión n que pertenece al grupo de calidad q durante el mes m .

IT : Número total de eventos percibidos por el usuario u , conectado al nivel de tensión n y que pertenece al grupo de calidad q , durante el mes m de evaluación.

“El indicador FIU representa la cantidad total de eventos que percibe cada usuario del SDL de un OR en un período anual” [1]:

$$FIU_{u,n,q,m} = \sum_{ma=m-11}^m FIUM_{u,n,q,ma} \quad (4)$$

$$FIUM_{u,n,q,m} = \sum_{i=1}^{IT} F_{i,u,n,q,m}$$

Donde:

$FIU_{u,n,q,m}$: Número total acumulado de eventos percibidos por el usuario u , conectado al nivel de tensión n y que pertenece al grupo de calidad q , en un periodo de doce meses que terminan en el mes m de evaluación.

$FIUM_{u,n,q,m}$: Número total de eventos percibidos por el usuario u , conectado al nivel de tensión n y que pertenece al grupo de calidad q , durante el mes m de evaluación.

$F_{i,u,n,q,m}$: Evento i que afectó al usuario u conectado al nivel de tensión n que pertenece al grupo de calidad q durante el mes m .

IT : Número total de eventos percibidos por el usuario u , conectado al nivel de tensión n y que pertenece al grupo de calidad q , durante el mes m de evaluación.

Debido a que los indicadores SAIDI, SAIFI, DIU y FIU son los contemplados en la actual regulación colombiana, todos ellos son incluidos para que el usuario de la herramienta desarrollada en este trabajo tenga la opción de seleccionarlos como criterios de parada de la búsqueda de la cantidad y ubicación de los dispositivos de conmutación. Es decir, que el usuario deberá ingresar el valor máximo que desea obtener para por lo menos uno de esos indicadores. Sin embargo, debido a que ninguno de esos cuatro indicadores tiene en cuenta la potencia demandada en los puntos de carga, se agrega el indicador de energía no servida (ENS) a las opciones de búsqueda:

$$ENS = \sum_{i=1}^{barras} P_i D_i \quad (5)$$

Donde:

ENS: Energía no servida.

barras: Número de barras que tiene el sistema.

P_i : Estimación de la potencia promedio demandada en la barra i durante las interrupciones.

D_i : Tiempo que dura sin suministro eléctrico la barra i durante el período de análisis, a causa de fallas en los componentes del SDL.

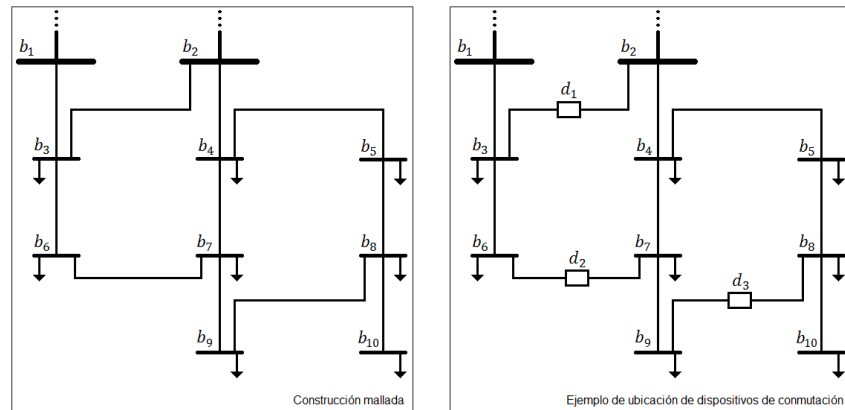
2.3 LA RECONFIGURACIÓN COMO HERRAMIENTA PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL SERVICIO

Una de las formas de mejorar los indicadores de calidad del servicio es reconfigurar la red cuando se encuentre en condiciones de falla, para lograr el suministro de energía a la mayor cantidad de usuarios posible. Esta reconfiguración requiere una construcción mallada del sistema de distribución, como se muestra en un pequeño sistema de ejemplo presentado en la parte izquierda de la Figura 1; en esta red las

barras b_1 y b_2 son puntos de conexión a subestaciones de distribución y las barras b_3 a b_{10} corresponden a puntos donde puede haber o no usuarios conectados.

Para facilitar la coordinación de las protecciones eléctricas los sistemas de distribución operan de forma radial, lo que se consigue instalando dispositivos de conmutación en la red. Dado que la operación radial del sistema requiere solo una línea de llegada a cada barra de carga o de paso de energía, la mínima cantidad de dispositivos de conmutación necesaria para garantizar la operación radial corresponde a la diferencia entre el número de secciones de línea y de barras de carga o paso de potencia en el sistema. Por ejemplo, en el sistema de la Figura 1 se tienen once tramos de línea y ocho barras de carga o paso de energía por lo cual se requieren mínimo tres ($11 - 8$) dispositivos de conmutación para asegurar la operación radial. En la parte derecha de la Figura 1 se muestra un ejemplo de ubicación de esos tres dispositivos de conmutación.

Figura 1. SDL con construcción mallada y dispositivos de conmutación.

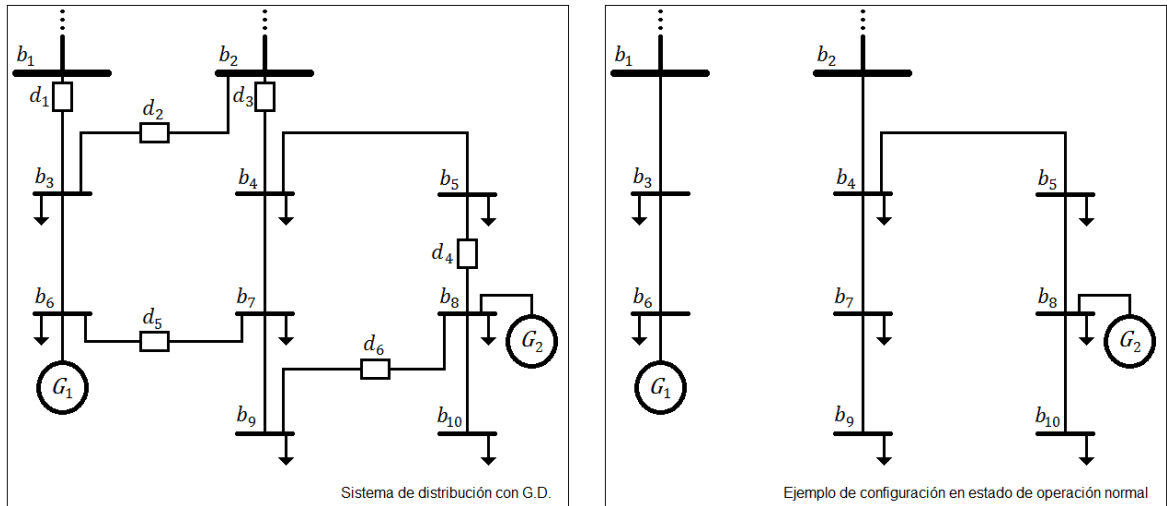


Contar con solo la cantidad de dispositivos de conmutación para asegurar la operación radial no permite reconfiguraciones del sistema, ya que la totalidad de estos dispositivos deberán permanecer en estado abierto cuando todos los componentes de la red se encuentren en operación normal, y en condiciones anómalas no es posible cambiar la configuración para suministrar energía a los usuarios afectados porque no se puede aislar el elemento en falla. Por ejemplo, en el sistema de la Figura 1, si se presenta una falla en la línea que une la barra b_1 con

la b_3 no está permitido cerrar el dispositivo d_1 para brindar suministro a las barras b_3 y b_6 ya que adicionalmente se debe garantizar el aislamiento del elemento comprometido en la falla, para lo cual se requiere un dispositivo de conmutación adicional. Por las razones descritas anteriormente se requiere instalar estratégicamente la cantidad óptima de dispositivos de conmutación en la red.

En los sistemas de distribución tradicionales la energía eléctrica proviene exclusivamente del sistema de transmisión, sin embargo, factores como el gran interés mundial en el uso de fuentes de energía renovables, tal como lo promueve en Colombia la ley 1715 de 2014, incentivan la implementación de generación distribuida (GD), creando posibilidades adicionales de suministro para las cargas en el sistema, lo que incrementa las opciones de configuración para mejorar los índices de calidad del servicio. Por ejemplo, en la parte izquierda de la Figura 2 se muestra la red anterior incluyendo GD y seis dispositivos de conmutación para lograr las reconfiguraciones, en este sistema se pueden lograr diversos arreglos en la operación normal de todos sus componentes, usualmente se busca la configuración más eficiente, como ejemplo a la derecha de la Figura 2 se presenta la configuración del sistema si se abren los dispositivos d_2 , d_5 y d_6 y se cierran d_1 , d_3 y d_4 .

Figura 2. Sistema de distribución con generación distribuida



Cuando se presente una falla en la línea que conecta las barras b_4 y b_5 , el sistema puede ser reconfigurado como se muestra en la parte superior izquierda de la *Figura 3* en donde se han abierto los dispositivos d_2 , d_3 , d_4 , d_5 y d_6 , dejando cerrado solo a d_1 , logrando aislar el punto de falla y alimentar la mayor cantidad de puntos de consumo posible. Con la ubicación de los dispositivos de conmutación dada, cabe resaltar la operación en isla del generador G_2 lo que requiere que esta fuente sea gestionable, controlada y con la capacidad suficiente para alimentar las cargas en las barras b_8 y b_{10} . Con esta configuración se ha logrado aislar el punto de falla, pero también se ha dejado sin suministro las barras b_4 , b_7 y b_9 . Para disminuir los puntos de carga afectados por esta falla y, por lo tanto, mejorar los indicadores de calidad se puede cambiar la ubicación de los dispositivos de conmutación, por ejemplo, de las siguientes maneras:

- Ubicar el dispositivo d_6 entre las barras b_7 y b_9 , lo que permitiría alimentar la carga en la barra b_9 desde G_2 con los mismos estados de los DDC descritos anteriormente, obteniendo la configuración mostrada en la parte superior derecha de la *Figura 3*. Esta configuración requiere que G_2 tenga la capacidad suficiente para alimentar aisladamente las cargas en b_8 , b_9 y b_{10} ,

lo cual se contempla dentro de los datos del sistema que se deben proporcionar para realizar el análisis.

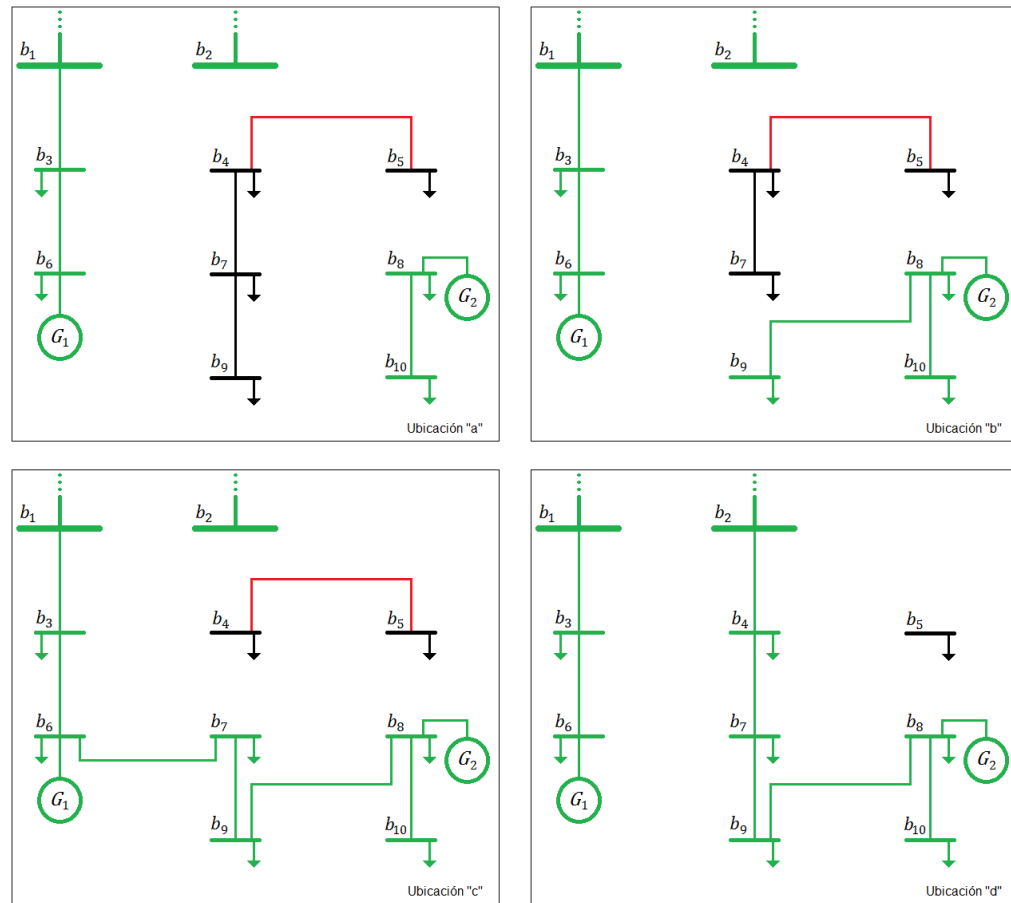
- Ubicar el dispositivo d_6 entre las barras b_4 y b_7 , lo que permitiría alimentar las cargas en las barras b_9 y b_7 desde G_2 en forma aislada con los mismos estados en los dispositivos de conmutación descritos anteriormente; o adicionalmente cerrar el dispositivo d_5 y obtener la configuración mostrada en la parte inferior izquierda de la *Figura 3*, que reduce la exigencia a G_2 .
- Ubicar el dispositivo d_6 entre las barras b_4 y b_5 , lo que hace posible un mayor número de configuraciones para la condición de falla descrita, por ejemplo la mostrada en la parte inferior derecha de la *Figura 3*. En donde se ha aislado, en solitario, el punto de falla y se han usado las dos conexiones al STR disponibles. Esta ubicación de los dispositivos de conmutación parece ser la mejor para la falla contemplada en este análisis, sin embargo, cuando se presenten fallas en otros puntos del sistema no se comporta de la misma manera.

Es importante tener en cuenta que la capacidad de operación en isla de los generadores distribuidos depende de diversos aspectos, como: el tipo de recurso energético que se utilice y el tipo de dispositivo de transformación de energía que se emplee. Por ejemplo, si se trata de energía solar, es necesario tener en cuenta los ciclos solares y si se cuenta o no con baterías; además, si la transformación de energía se realiza con una máquina de inducción no se tiene la capacidad de gestión de reactivos que se tiene con una máquina síncrona. Adicionalmente, en Colombia, la resolución CREG 030 de 2018 establece 0,1MW como el límite de potencia para la generación distribuida, propiamente dicha. Sin embargo, la misma resolución y la resolución CREG 024 de 2015 establecen la posibilidad de conexión de autogeneradores con capacidad hasta de 5MW.

En este trabajo de aplicación tanto la capacidad de potencia como la información de si los generadores distribuidos pueden o no operar en isla son datos que el usuario

de la metodología propuesta y la herramienta informática desarrollada debe suministrar.

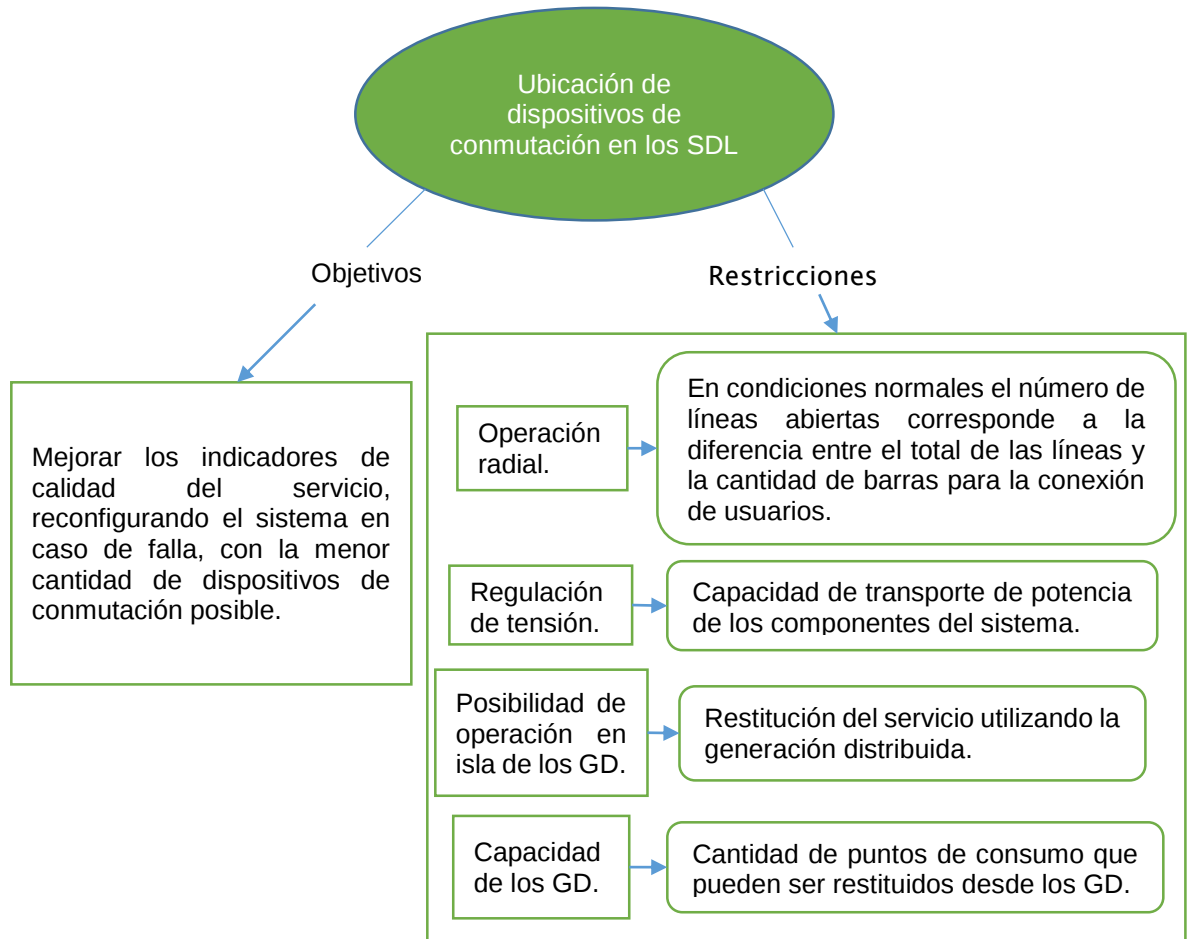
Figura 3. Ejemplo de reubicación de un dispositivo de conmutación



Las opciones de ubicación de los dispositivos de conmutación presentadas anteriormente se producen cambiando la posición de solo uno de seis elementos, lo que deja ver que las posibilidades son bastante numerosas ya que hay que determinar la cantidad óptima de unidades de conmutación necesarias y la ubicación de cada una de ellas. Además, en este sencillo ejemplo no se ha tenido en cuenta el extremo de las líneas sobre el que se ubican los DDC.

La *Figura 4* muestra los objetivos y restricciones de la ubicación de dispositivos de conmutación en los SDL, indicando las implicaciones de las restricciones.

Figura 4. Objetivos y restricciones de la ubicación de DDC en un SDL



Es importante tener en cuenta que, según lo estipulado por la CREG, entre los criterios para la exclusión de eventos en el cálculo de los indicadores de calidad, tanto promedio como individual, se incluyen aquellos eventos cuya duración sea menor o igual a tres minutos. Por lo tanto, para aquellos usuarios a los que el servicio les sea restituido en un tiempo menor o igual a tres minutos, después de la ocurrencia de una falla, el evento que ocasione la desconexión temporal no es tenido en cuenta para el cálculo de los indicadores. Lo anterior es de mucha importancia ya que la restitución del servicio a los usuarios por reconfiguración de la red, con DDC automáticos, hará que el evento sea percibido por dichos usuarios con una duración inferior a tres minutos, por lo cual se concluye que la metodología

planteada en este trabajo puede reducir tanto los indicadores de duración como los de frecuencia.

Finalmente, en la búsqueda de la cantidad y ubicación de los dispositivos de conmutación, en este trabajo, se incluyen cinco indicadores para que el usuario de la herramienta seleccione, los cuales son: SAIDI, SAIFI, FIU, DIU y ENS.

Para que la reconfiguración del sistema no se limite al aislamiento de la falla es necesario que el SDL esté construido de forma mallada (es decir con suplencias), de este modo es posible suministrar energía a los usuarios que, en la configuración base, se encuentran ubicados aguas abajo del punto en el que se produce la falla.

En el siguiente capítulo se presenta una síntesis de métodos para la ubicación de DDC con el fin de mejorar la calidad del servicio en sistemas de distribución, estos métodos han sido encontrados en la literatura especializada. En ese capítulo se mencionan las técnicas empleadas por los autores para la solución del problema y se describen los principales aspectos que se deben tener en cuenta para realizar adecuadamente el análisis que incluya las restricciones operativas y obtenga todos los beneficios de la reconfiguración en la mejora de la calidad del servicio.

3. SÍNTESIS DE LA LITERATURA SOBRE LOS MÉTODOS DE UBICACIÓN DE DISPOSITIVOS DE CONMUTACIÓN PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL SERVICIO EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN LOCAL

El problema de la ubicación de dispositivos de conmutación en los SDL para mejorar la calidad del servicio es discreto y no lineal, características que han motivado la aplicación de técnicas heurísticas para su solución, con los cuales se obtienen resultados que no necesariamente corresponden al óptimo global.

Tradicionalmente, este problema ha sido abordado considerando como función objetivo el costo total de la confiabilidad, en el cual se incluyen varios factores como: los costos que implican las fallas, esto puede ser medido mediante indicadores de calidad o mediante los incentivos establecidos regulatoriamente y los costos de los DDC, que pueden incluir costos de inversión inicial con gastos de mantenimiento.

En este capítulo se presentan las características de algunas metodologías publicadas en la literatura especializada. La búsqueda se realizó en las bases de datos de IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) y web of science (acceso referencial a información científica internacional, editadas por el Intitute for Scientific Information - ISI). Para la búsqueda, se utilizaron los siguientes términos: location of switches in distribution systems, placement of switching devices in distribution systems y switching devices for reconfiguration of distribution systems. A continuación se presentan las características de doce metodologías propuestas, encontradas en igual número de publicaciones realizadas entre el año 2005 y 2018, de las cuales dos son actas de conferencias y diez son artículos.

En el trabajo titulado “A Decomposition Approach to Optimal Remote Controlled Switch Allocation in Distribution Systems”, publicado en 2005, se busca la ubicación de DDC, en una red radial, maximizando la relación entre el beneficio que se obtiene al instalar cada dispositivo y su costo [3]. En este trabajo, Carvalho, Ferreira y Cerejo realizan la ubicación seccionando el espacio de búsqueda, sin embargo, no es claro

cómo implementar tal estrategia, además, se omite la información necesaria para el cálculo del flujo de carga o los indicadores de calidad del servicio.

En el 2005 fue publicado el trabajo “Placement of distributed generators and reclosers for distribution network security and reliability”, en el cual Popovic´, Greatbanks, Begovic´ y Pregelj utilizan algoritmos genéticos para encontrar la ubicación de DDC que maximicen la confiabilidad del sistema de distribución, incluyendo la ubicación y dimensionamiento previo de generadores distribuidos para mejorar el perfil de tensión en la red [4]. En este trabajo consideran la construcción mallada del sistema, pero, no se incluye la operación radial del SDL como una restricción y no hay claridad sobre los datos del sistema de prueba utilizado.

En el trabajo “Optimal Feeder Switches Location Scheme for High Reliability and Least Costs in Distribution System”, publicado en 2006, Bin, Shiyan, Jiyang, Xiongying y Xiang utilizan programación binaria con algoritmos genéticos para determinar la cantidad y ubicación de DDC que minimicen el costo de confiabilidad del sistema, incluyendo las siguientes restricciones: límite en tensión eléctrica en los nodos, valores de indicadores de calidad, capacidad de los alimentadores y la operación radial del sistema [5]. En este trabajo no se contempla la posibilidad de que exista generación distribuida y tampoco considera los dos extremos de cada línea como posibles puntos de ubicación de los DDC.

En el trabajo titulado “Optimised placement of control and protective devices in electric distribution systems through reactive tabu search algorithm”, publicado en el 2008, Wiesz da Silva, Fernandes, Rivier y Sanches proponen un algoritmo de búsqueda tabú reactiva para determinar la ubicación de los DDC para minimizar el costo de confiabilidad en los sistemas de distribución [6]. Esta propuesta discrimina entre dispositivos de protección y dispositivos de control, además, diferencia las fallas temporales de las permanentes. En esta publicación el análisis considera que los DDC que establecen la configuración radial base ya se encuentran ubicados, no considera restricciones de niveles de tensión o capacidad de los alimentadores y no contempla la posibilidad de GD.

En la publicación titulada “Multiobjective optimal placement of switches and protective devices in electric power distribution systems using ant colony optimization”, publicada en 2009, Tippachon y Rerkpreedapong utilizan el algoritmo de colonia de hormigas para ubicar los DDC en redes de distribución con el objetivo de minimizar el costo de confiabilidad, reduciendo el valor de indicadores de calidad y diferenciando entre tipos de dispositivos y fallas temporales y permanentes [7]. En este trabajo no se establecen restricciones de tensión o capacidad de los alimentadores, además, la búsqueda inicia con los DDC que, en condiciones normales, permiten la operación radial ya ubicados. Tampoco considera la GD.

La propuesta presentada en 2009 en el trabajo titulado “Ant Colony Optimization-Based Method for Placement of Sectionalizing Switches in Distribution Networks Using a Fuzzy Multiobjective Approach”, de Falaghi, Mahmood-Reza y Singh, combina colonia de hormigas con lógica difusa para minimizar cantidad de DDC y la energía no suministrada, en sistemas de distribución radiales con o sin generación distribuida, incluye restricciones por nivel de tensión y capacidad de corriente de las líneas [8]. En este trabajo no consideran la construcción mallada del sistema, por lo cual, sin la presencia de la GD, el análisis se limita al aislamiento de la falla.

En el trabajo titulado “Optimized switch allocation to improve the restoration energy in distribution systems”, publicado en el 2012, Dezaki, Abyaneh, Agheli y Mazlumi utilizan algoritmos genéticos para optimizar un indicador de restauración en sistemas de distribución radiales [9]. En este trabajo no consideran la construcción mallada del sistema ni restricciones de tensión o capacidad, tampoco contemplan GD.

En la publicación titulada “Optimal recloser and autosectionalizer allocation in distribution networks using IPSO– Monte Carlo approach”, del año 2014, Abdi, Afshar, Ahmadi, Bigdeli y Abdi proponen un algoritmo basado en enjambre de partículas para minimizar el costo de confiabilidad en sistemas de distribución radiales [10]. En esta propuesta no incluyen restricciones de nivel de tensión

eléctrica o capacidad del alimentador, tampoco consideran la construcción mallada del sistema.

En el trabajo titulado “Multiobjective Switching Devices Placement Considering Environmental Constrains in Distribution Networks with Distributed Energy Resources”, publicado en el 2015, Vieira, Fernão y Murta-Pina utilizan algoritmos genéticos para minimizar la emisión de gases de efecto invernadero, la energía no suministrada y la inversión en DDC [11]. En esta propuesta no consideran la construcción mallada del sistema, tampoco establecen restricciones de tensión o capacidad y, aunque considera la generación distribuida, no contempla la posibilidad de operación en isla de la GD.

En el trabajo titulado “Considerations of Sectionalizing Switches in Distribution Networks With Distributed Generation”, publicado en el 2015, Alireza, Vassilios y Mohsen emplean programación lineal entera mixta para minimizar el costo de obtener un nivel de fiabilidad dado [12]. En este trabajo no consideran restricciones de capacidad de la red, tampoco la construcción mallada, pero, si consideran la posibilidad de que la generación distribuida opere en isla.

En el trabajo titulado “Optimal placement of switches in a radial distribution network for reliability improvement”, publicado en el 2016, Saheli, aniruddha y Subhadeep emplean algoritmo de búsqueda diferencial para minimizar el costo de confiabilidad en sistemas de distribución radiales [13]. En este trabajo no consideran la construcción mallada del sistema, no imponen restricciones de nivel de tensión o capacidad de las líneas y no consideran la generación distribuida.

En el artículo “Optimal reliability improvement strategy in radial distribution networks with island operation of distributed generation”, publicado en el 2018, Željko, Stanko y Branislav utilizan la programación lineal entera mixta para minimizar el costo total de confiabilidad, incluyendo generación distribuida con capacidad de operar en isla y restricciones por nivel de tensión [14]. En este artículo no consideran la construcción mallada del sistema.

Teniendo en cuenta que la presencia de dispositivos de conmutación en sistemas de distribución pretende reconfigurar el sistema cuando se presentan eventos para aislar la falla y restituir el servicio a la mayor cantidad de usuarios posible, los principales aspectos, de acuerdo con la literatura revisada, que se deben considerar al realizar el análisis de la ubicación de DDC para mejorar la calidad del servicio de sistemas de distribución que mantengan operación radial, son los siguientes:

- Restringir las configuraciones a aquellas que sean técnicamente viables, es decir, que no superen los límites de capacidad de los alimentadores o presenten tensiones por fuera de rangos permitidos.
- Considerar la posible construcción mallada del SDL, este aspecto es especialmente importante cuando se busca alimentar a los usuarios que quedan sin suministro después de aislar la falla. Si en el análisis no se contempla la existencia de suplencias, el efecto de la reconfiguración, cuando se presentan fallas, se limita al aislamiento de la falla lo cual solo beneficia a los usuarios ubicados aguas arriba del punto de origen del evento, dejando sin suministro a aquellos usuarios que a pesar de haber sido separados de la zona fallada se encuentren ubicados aguas abajo de dicha zona.
- Mantener la operación radial del sistema. Esta restricción facilita la coordinación de protecciones.
- Ubicar los DDC que permiten la operación radial del sistema cuando todos sus elementos se encuentran en estado normal, es decir, los dispositivos que, aunque el sistema presente una construcción mallada, brindan la configuración base de operación radial. Esta ubicación es clave en los beneficios que se obtendrán con los DDC posteriormente emplazados, ya que si se dejan en la cola del sistema los elementos con mayor impacto negativo en la calidad del servicio, será más fácil aislarlos cuando fallen.
- Considerar la ubicación exacta del DDC en la respectiva línea. Este aspecto es importante ya que el lado en el que no se encuentre DDC en alguna línea seguirá siendo afectado por las fallas que ella presente. Por lo anterior se deben

considerar, por cada tramo de línea, dos posibles puntos de ubicación para los DDC.

- Considerar la posible presencia de generación distribuida en el sistema. Esta consideración puede ayudar a brindar suministro a los usuarios cuando se ha aislado la falla.

En el Cuadro 1 se indica si los aspectos descritos anteriormente son, o no, incluidos en la metodología presentada en cada una de las publicaciones revisadas.

Cuadro 1. Síntesis de los principales aspectos de las metodologías revisadas

Referencia Aspecto	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]
Restricción por nivel de tensión o capacidad.	SI	No	SI	No	No	SI	No	No	No	No	No	SI
Consideración de construcción mallada.	SI	SI	SI	SI	SI	No	No	No	No	No	No	No
Restricción de operación radial.	SI	No	SI	SI	SI	N.A. ⁵	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Ubicación de DDC requeridos para lograr la operación radial en condiciones normales.	No	No	No ⁶	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Consideración de los dos extremos de cada línea como posibles puntos de ubicación de DDC.	No	No	No	SI	No	SI	No	No	No	No	No	SI
Consideración de generación distribuida.	No	SI	No	No	No	SI	No	No	SI	SI	No	SI

⁵ N.A: No aplica. Desde el punto de vista del algoritmo implementado para la solución del problema, la restricción de operación radial no tiene sentido en redes que no tengan construcción mallada, debido a que este tipo de sistemas, sin importar el estado o la ubicación de sus DDC, mantienen siempre una disposición topológica radial.

⁶ A pesar de que incluye la construcción mallada del sistema y la restricción de operación radial, no aclara la forma en la que se toma la decisión de ubicar los dispositivos que permiten establecer la configuración radial base. Adicionalmente, el sistema de pruebas utilizado tiene una débil construcción mallada, que requiere solo un DDC para obtener la configuración base, y no se explica de qué manera se decide la ubicación exacta de dicho dispositivo.

Con la síntesis presentada en este capítulo se concluye que ninguno de los trabajos encontrados se ocupa del problema de la ubicación de los DDC que ofrecen la configuración operativa base del SDL, dejando por fuera del análisis lo que, tal vez, determina primordialmente la ubicación de DDC en sistemas de distribución para mejorar la calidad del servicio, ya que es esa configuración base la que establece la ubicación relativa de los puntos más críticos del sistema y determina el grado de complejidad que tiene su aislamiento cuando fallan. Además, gran parte de estos trabajos no considera la construcción mallada del sistema, por lo cual la reconfiguración se torna trivial y no es posible acceder a todos los beneficios que puede brindar.

Es importante mencionar que todos los trabajos encontrados realizan el análisis de confiabilidad con criterio $n - 1$, en otras palabras, ninguno de estos trabajos considera la posibilidad de que existan dos elementos del sistema fallados de manera simultánea.

Con base en los resultados del análisis realizado sobre las metodologías presentadas se decidieron los componentes de la propuesta realizada en este trabajo de aplicación, la cual se presenta en el siguiente capítulo, incluyendo el análisis topológico del sistema para determinar la ubicación de los DDC que permiten la operación radial base del SDL, si es que este tiene una construcción mallada. También se considera la posibilidad de que exista generación distribuida y se evalúan los índices de calidad del servicio considerando que se presenten fallas en algún elemento aun habiendo otra(s) falla(s) presente(s).

4. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA UBICACIÓN DE DISPOSITIVOS DE CONMUTACIÓN CON EL FIN DE MEJORAR LA CALIDAD DEL SERVICIO EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

El objetivo de la metodología implementada es mejorar la confiabilidad de los sistemas de distribución, mediante la ubicación de dispositivos de conmutación. La colocación de los DDC se realiza minimizando los indicadores SAIDI, SAIFI, DIU, FIU y/o ENS. La herramienta desarrollada puede ser utilizada de dos modos: 1) Determinar la ubicación del menor número de DDC para llevar alguno de los indicadores por debajo de un valor de referencia o 2) Identificar la mejor ubicación de una cantidad determinada de DDC minimizando alguno de los indicadores. Se consideran las siguientes restricciones: operación radial, garantizar un valor máximo en la regulación de tensión y evitar sobrecarga de los generadores distribuidos, en caso de que el sistema los tenga. Teniendo en cuenta lo anterior, la metodología implementada requiere la información descrita en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Datos de entrada de la metodología

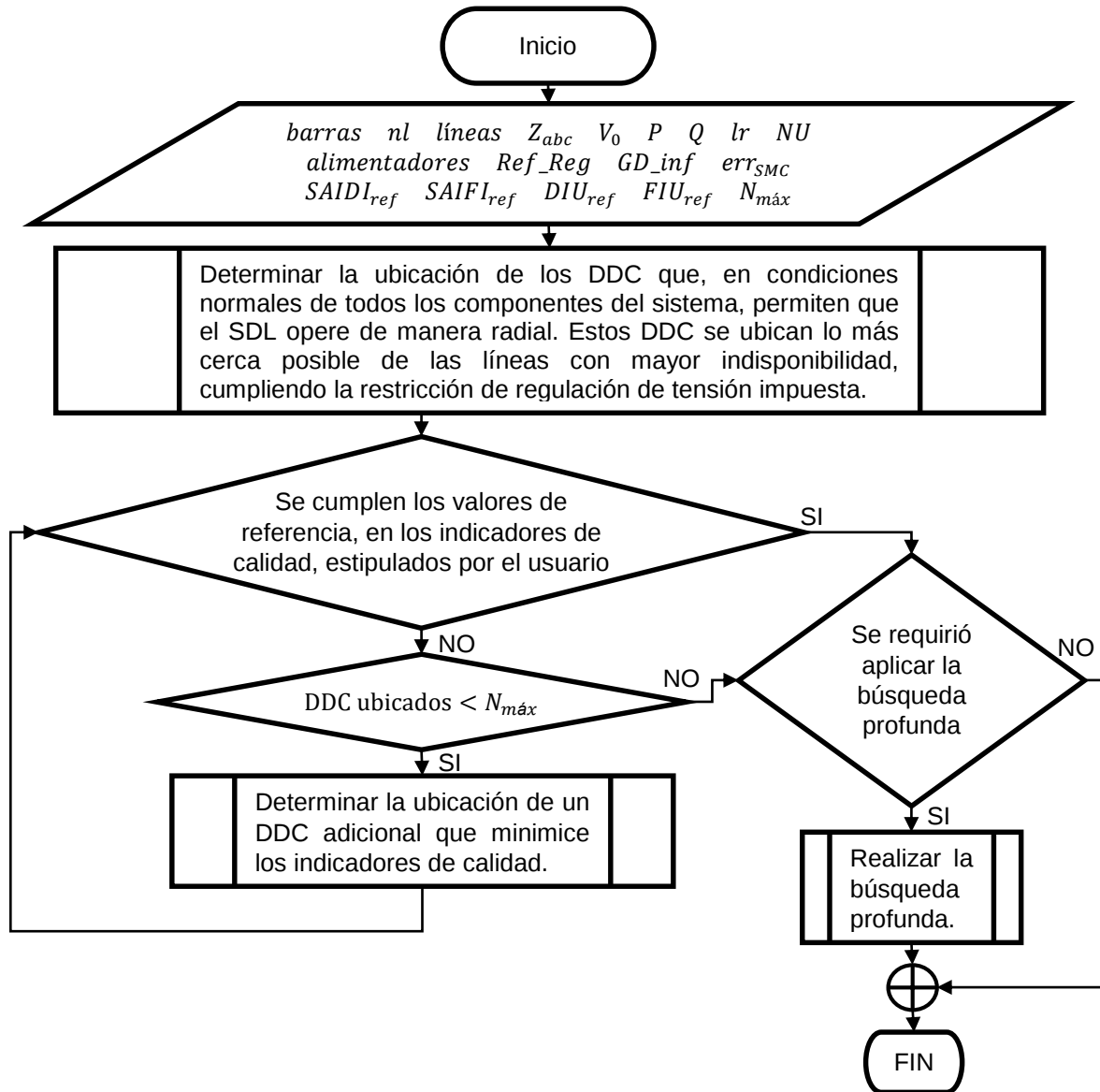
Información requerida	Variables utilizadas dentro de la implementación
Descripción de la topología de la red, es decir, las barras que se ubican a cada uno de los extremos de cada tramo de línea, las barras que sirven de conexión a subestaciones de distribución, las impedancias de cada tramo de línea y las barras en las que se tiene GD con su respectiva capacidad.	<i>barras</i>: Escalar en el que se indica la cantidad de barras con que cuenta el sistema. <i>nl</i>: Escalar en el que se indica la cantidad de líneas con que cuenta el sistema. <i>lineas</i>: Matriz de dos columnas en la que se indican las barras ubicadas a cada extremo de las líneas. <i>alimentadores</i>: Vector en el que se incluyen los números que identifican a las barras de conexión al STR. Z_{abc}: Arreglo de celdas con los parámetros de impedancia de cada tramo de líneas. GD_{inf}: Matriz de dos columnas en la que se indican las barras que cuentan con GD y sus capacidades.

Cuadro 2. (Continuación)

Información requerida	Variables utilizadas dentro de la implementación
Demandas promedio en cada una de las barras del sistema, número de usuarios conectados a cada barra y el nivel de tensión eléctrica presente en las barras de conexión al STR.	P y Q: Vectores con las demandas promedio de potencia activa y reactiva, respectivamente, en cada barra. NU: Vector en el que se indica la cantidad de usuarios conectados a cada una de las barras. V_0: Escalar en el que se indica el nivel de tensión presente en las barras de conexión al STR.
La frecuencia y duración media de las fallas de los componentes del sistema, esta información se recibe concentrada en las líneas del SDL. Adicionalmente, los valores máximos que se desea obtener para los indicadores de calidad, el %R.V. máximo permitido y el porcentaje de error permitido para la simulación de Montecarlo.	lr: Matriz de dos columnas en la que se indica la frecuencia y duración de las fallas de cada una de las líneas del sistema. $SAIDI_{ref}$: Escalar con el valor deseado para el indicador SAIDI. $SAIFI_{ref}$: Escalar con el valor deseado para el indicador SAIFI. DIU_{ref}: Escalar con el valor deseado para el indicador DIU. FIU_{ref}: Escalar con el valor deseado para el indicador FIU. ENS_{ref}: Escalar con el valor deseado para el indicador ENS. Ref_Reg: Escalar en el que se indica el %R.V. máximo permitido. err_{SMC}: Escalar en el que se indica el porcentaje de error máximo permitido para la simulación de Montecarlo. $N_{m\acute{a}x}$: Cantidad máxima de DDC que se desea ubicar.

En términos generales, el algoritmo de la metodología desarrollada se presenta en la Figura 5. Este algoritmo se ejecuta en la función “Eval_Confi_SDL”, cuyo código, en el lenguaje de programación de Matlab, se incluye en el anexo 2.

Figura 5. Algoritmo general de la metodología implementada



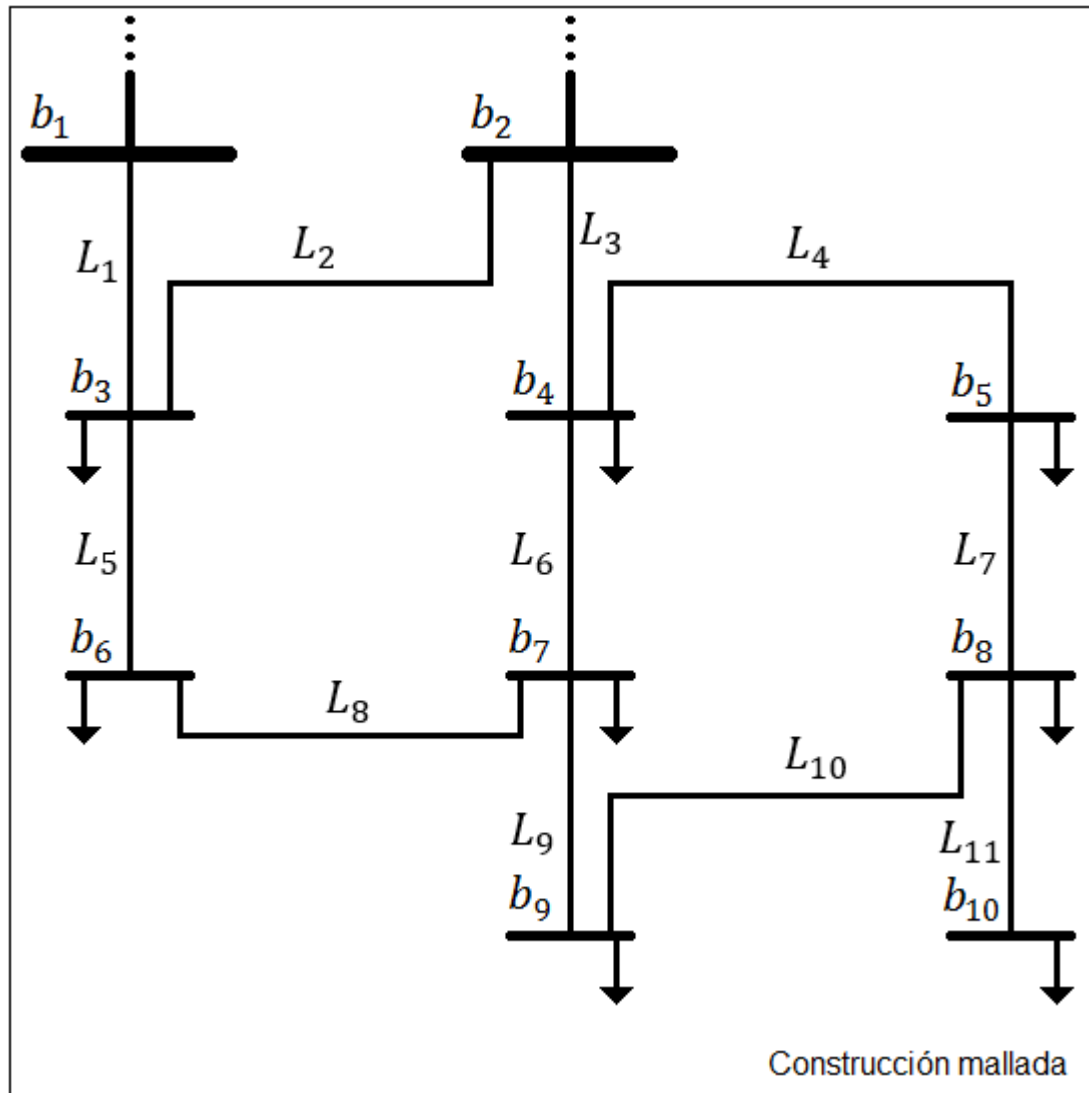
En las siguientes secciones del presente capítulo se describen los algoritmos desarrollados para cada una de las etapas de la metodología implementada. En el Cuadro 3 se describen los procesos y se indican las secciones donde se presentan los detalles de cada uno de ellos.

Cuadro 3. Hitos de la metodología implementada

Hito en la metodología implementada	Descripción y referencia
Ubicación de los DDC que, en condiciones normales de todos los componentes del sistema, permiten que el SDL opere de manera radial.	En este proceso se determina la configuración base del SDL. Los detalles de esta etapa de la metodología se presentan... en la sección 4.2...
Evaluación del cumplimiento del criterio de parada, es decir, obtención de los indicadores de calidad deseados.	Esta evaluación se realiza mediante la simulación de Montecarlo o análisis por bloques de frecuencia y duración. Para realizar la evaluación se requiere determinar las barras afectadas por las fallas en cada tramo de línea. La descripción de estos procesos se presentan en las siguientes secciones : • Simulación de Montecarlo: ...sección 4.3.3... • Bloques de frecuencia y duración: ...sección 4.3.4... • Barras afectadas: ...secciones 4.3.1 y 4.3.2...
Búsqueda de los DDC después de haber ubicado los que garantizan la operación radial del sistema.	Este proceso se describe...en la sección 4.4... y requiere el cálculo de los indicadores de calidad de una manera rápida, tal como se presenta...en la sección 4.3.4...
Procesos que se requieren en todas las etapas de la metodología.	La evaluación del flujo de carga del sistema para verificar el cumplimiento de la restricción por %R.V, es también un proceso transversal y se presenta...en la sección 4.1.1... Adicionalmente, el análisis de la topología del sistema sin DDC y a medida que se van ubicando los mismos es un proceso transversal, cuya descripción se presenta...en la sección 4.1.2...

A lo largo de la descripción de la metodología se usa el sistema de ejemplo mostrado en la Figura 6 para ilustrar los conceptos y algoritmos que se van desarrollando.

Figura 6. Ejemplo de SDL con diez barras y once líneas



4.1 EVALUACIÓN DE LA REGULACIÓN DE TENSIÓN Y ANÁLISIS TOPOLÓGICO DEL SISTEMA

En esta sección se describen los algoritmos usados para evaluar la topología de la red, dependiendo de los estados de los DDC presentes en el sistema, y el cumplimiento de la restricción de porcentaje de regulación de tensión, para lo cual

se requiere determinar el flujo de cargas. La ejecución de estos algoritmos es necesaria en todas las otras etapas de la metodología.

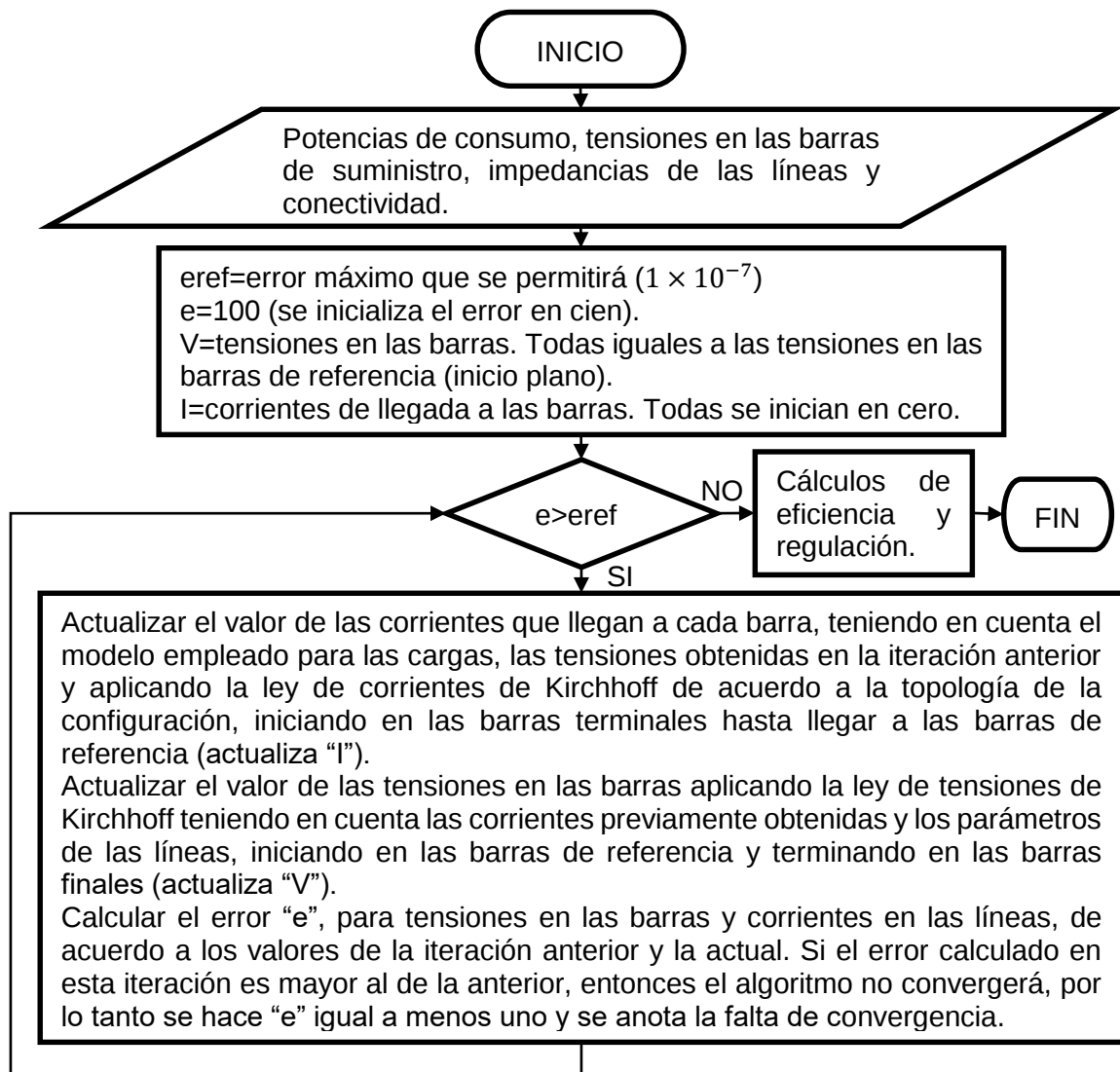
4.1.1 Evaluación de la regulación de tensión. Debido a que en la metodología propuesta en este trabajo de aplicación se contempla la regulación de tensión como una restricción, para incluir en el análisis la capacidad de transporte de potencia de los componentes del sistema, se hace necesario determinar este indicador para cada una de las configuraciones que se consideren.

Para realizar el cálculo de la regulación de tensión en todos los puntos de conexión de usuarios, es necesario conocer la tensión en cada una de las barras del sistema que se analice, para lo cual se aplica la técnica de flujo de carga. Para este cálculo, se requieren los siguientes datos del sistema:

- La potencia, activa y reactiva, consumida en cada una de las barras. En este trabajo de aplicación, se considera un modelo de consumo de potencia constante en los puntos de carga.
- La tensión eléctrica en los puntos de conexión a subestaciones de distribución.
- La impedancia de cada una de las líneas del sistema.
- La conectividad de las barras y líneas que representan los componentes del sistema analizado. Este aspecto determina la configuración que se desea analizar y cambia en función de los estados, abierto o cerrado, de los dispositivos de conmutación que se tengan.

El algoritmo implementado para realizar el cálculo del flujo de carga y conocer la barra en la que se presenta la mayor regulación de tensión y su valor se presentó en el trabajo de la referencia [15]. En la Figura 7 se muestra el diagrama de flujo de este algoritmo, algunos detalles adicionales y su código en el lenguaje de programación de Matlab se pueden encontrar en los anexos 3 y 4, respectivamente.

Figura 7. Algoritmo para evaluar el flujo de carga



Para la metodología propuesta en este trabajo de aplicación, el porcentaje de regulación de tensión permitido para la operación del sistema es estipulado por el usuario de la herramienta aquí desarrollada. Este valor asegura un nivel de tensión satisfactorio para la conexión de usuarios, limitando las posibles configuraciones con que pueda operar el sistema, ya que se descartan aquellas que presenten, en por lo menos una de sus barras, porcentaje de regulación de tensión superior al límite estipulado.

Para realizar el análisis de flujo de carga es necesario tener codificada la conectividad de los elementos del sistema, dicha conectividad la determinan la construcción de la red y las líneas que se inhabilitan a causa de los DDC. El algoritmo desarrollado para esta codificación se presenta en la siguiente sección.

4.1.2 Análisis topológico del sistema. En esta etapa se establece un algoritmo para codificar sistemáticamente la conectividad de los diferentes componentes de un SDL. Se parte desde una o varias barras de interés (por ejemplo las barras con capacidad de suministro de potencia o las barras adyacentes a una línea en condición de falla) y se tiene en cuenta la siguiente información: las barras ubicadas a cada uno de los extremos de las líneas, las barras de interés, la cantidad total de barras y la configuración que se desea analizar.

Este algoritmo es necesario para los siguientes aspectos:

- Cuando las barras de interés son las de conexión a subestaciones de distribución, este algoritmo permite determinar si la red opera de manera radial. Si la red no opera de manera radial, es necesario identificar las barras y líneas que, con la configuración analizada, pertenecen a una zona radial. Si la red opera de manera radial, se está cumpliendo una de las dos restricciones de la metodología aquí propuesta, y para verificar el cumplimiento del límite de regulación de tensión estipulada, este algoritmo codifica la conectividad de los elementos del sistema para realizar el análisis de flujo de carga, descrito en la sección anterior.
- Cuando las barras de interés son aquellas adyacentes a una línea en condición de falla, este algoritmo permite conocer las barras que se ven afectadas por dicha falla y las líneas cuyas fallas producen el mismo efecto.

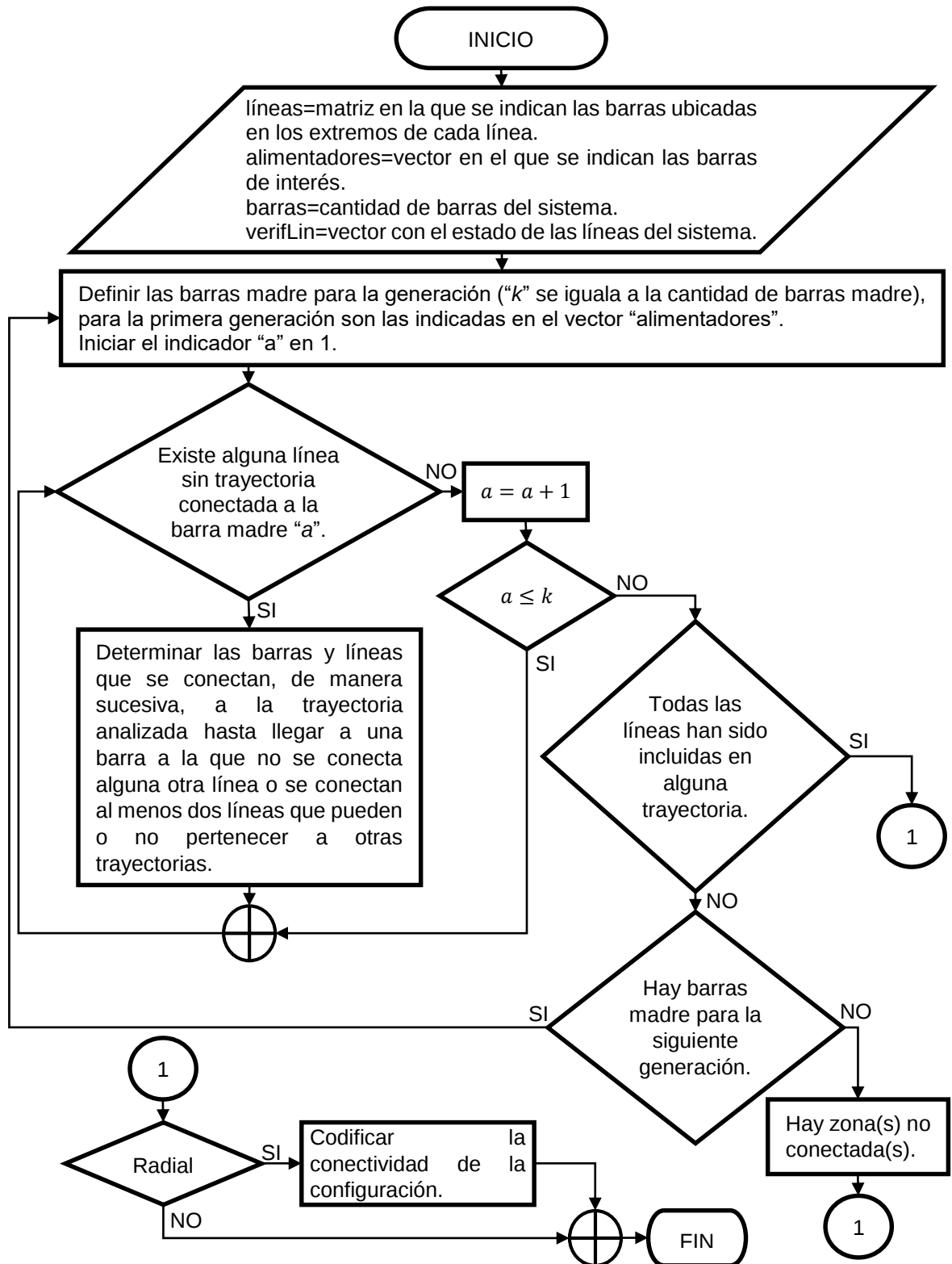
Para el desarrollo de este algoritmo se divide el SDL en generaciones, las cuales están compuestas por trayectorias o conjuntos de líneas y barras. Cada trayectoria se origina en una barra, denominada barra madre (que pertenece a la generación

anterior), iniciando con una línea que, sin pertenecer a otra trayectoria, se conecte a dicha barra. También, se agregan las barras y líneas que se conecten de manera sucesiva hasta llegar a una barra a la que no se conecta alguna otra línea o se conectan al menos dos líneas que pueden o no pertenecer a otras trayectorias. Después de identificar todas las trayectorias de una generación, las barras madre (para la siguiente generación) son aquellas a las que se conecta por lo menos una línea que no pertenezca a alguna de las trayectorias ya identificadas.

En la Figura 8 se encuentra el diagrama de flujo del algoritmo que permite realizar la codificación de la conectividad de los elementos de un sistema de distribución de energía eléctrica.

Adicionalmente, en el Cuadro 4 se realiza, paso a paso, la codificación para el sistema mostrado en la Figura 6, tomando b_1 y b_2 como las barras de interés y considerando que todas las líneas se encuentran habilitadas. En este ejemplo se obtienen tres generaciones, las cuales describen la conectividad de todas las barras y líneas de ese sistema. Algunos detalles adicionales sobre este algoritmo y su código, en el lenguaje de programación de Matlab, se pueden encontrar en los anexos 5 y 6, respectivamente.

Figura 8. Algoritmo para codificar la conectividad del SDL



Cuadro 4. Ejemplo de codificación de la conectividad de un SDL

Generación	Barras madre	Trayectorias
Primera	Para la primera generación, las barras madre corresponden a aquellas de particular interés, desde las cuales se inicia el análisis, en este ejemplo son: b_1 y b_2 .	Cada trayectoria inicia con una línea que, sin estar incluida previamente en alguna trayectoria, esté conectada a alguna de las barras madre. En este ejemplo, se tiene lo siguiente: Trayectoria originada desde b_1: debido a que esta barra únicamente tiene conectada la línea L_1, ella solo produce una trayectoria, constituida por las líneas y barras conectadas sucesivamente, quedando conformada del siguiente modo: <i>Líneas:</i> $[L_1]$ <i>Barras:</i> $[b_3]$ Ya que, además de L_1, a la barra b_3 se conectan más de una línea, en este caso L_2 y L_5, la trayectoria termina en dicha barra, convirtiéndose en candidata a barra madre para la siguiente generación. Trayectorias originadas desde b_2: debido a que a esta barra se conectan dos líneas que aún no se han incluido en alguna trayectoria, desde ella se producen dos trayectorias, conformadas de la siguiente manera: - Primera trayectoria: <i>Líneas:</i> $[L_2]$ <i>Barras:</i> $[b_3]$ - Segunda trayectoria: <i>Líneas:</i> $[L_3]$ <i>Barras:</i> $[b_4]$ En este caso, la primera trayectoria termina b_3, que ya es candidata a ser barra madre de la siguiente generación. La segunda trayectoria termina en b_4, debido a que, además de L_3, tiene conectadas más de una línea, L_4 y L_6, constituyéndose en la segunda candidata a barra madre para la siguiente generación.

Cuadro 4. (Continuación)

Generación	Barras madre	Trayectorias
Segunda	De la segunda generación en adelante, las barras madre son aquellas que, desde el análisis realizado en la generación anterior, hayan quedado como candidatas y, después de haberse determinado todas las trayectorias de dicha generación, tengan conectada al menos una línea que no se encuentre incluida en alguna trayectoria. En este caso, se tienen dos candidatas a barras madre, b_3 y b_4 . A la barra b_3 se conecta la línea L_5 , que no ha sido incluida en alguna de las trayectorias previamente definidas, por lo tanto, b_3 se constituye como barra madre. A la barra b_4 se conectan, sin haber sido incluidas en alguna trayectoria, las líneas L_4 y L_6 , por lo cual, b_4 también clasifica como barra madre. En conclusión, las barras madre para la segunda generación son: b_3 y b_4 .	Realizando un análisis similar al descrito para la generación anterior, se tienen las siguientes trayectorias: Trayectoria originada desde b_3: <i>Líneas:</i> $[L_5 \ L_8]$ <i>Barras:</i> $[b_6 \ b_7]$ Desde la barra b_3 solo se origina una trayectoria. Trayectorias originadas desde b_4: • Primera trayectoria: <i>Líneas:</i> $[L_6]$ <i>Barras:</i> $[b_7]$ • Segunda trayectoria: <i>Líneas:</i> $[L_4 \ L_7]$ <i>Barras:</i> $[b_5 \ b_8]$ Una vez establecidas todas las trayectorias de la segunda generación, se tienen b_7 y b_8 como candidatas a barras madre de la tercera generación.

Cuadro 4. (Continuación)

Generación	Barras madre	Trayectorias
Tercera	Debido a que tanto b_7 como b_8 tienen conectada al menos una línea que no pertenece a alguna de las trayectorias previamente definidas, las barras madre para esta generación son: b_7 y b_8 .	Aplicando los criterios descritos anteriormente, se tienen las siguientes trayectorias: Trayectoria originada desde b_7: <i>Líneas:</i> $[L_9 \ L_{10}]$ <i>Barras:</i> $[b_9 \ b_8]$ Desde la barra b_7 solo se origina una trayectoria. Trayectoria originada desde b_8: <i>Líneas:</i> $[L_{11}]$ <i>Barras:</i> $[b_{10}]$ Desde la barra b_8 solo se origina una trayectoria. Después de definir todas las trayectorias de esta generación, no se tienen candidatas a barra madre, por lo cual, la sistematización de la conectividad de esta red termina en la tercera generación.

Con la codificación realizada mediante el algoritmo desarrollado en esta parte de la metodología, es posible conocer los elementos que forman parte de zonas radiales. Esta información es útil para excluir puntos, del sistema analizado, de la posible ubicación de dispositivos de conmutación cuando se desea lograr su operación radial. Por ejemplo, en el sistema de la *Figura 6*, según la codificación presentada en el Cuadro 4, la única trayectoria originada desde la barra b_8 es una trayectoria radial, por lo cual, ubicar algún DDC sobre alguno de los extremos de la línea L_{11} , procurando la operación radial del sistema, no tiene ningún efecto ya que esta zona, sin dicho DDC, es radial.

4.2 UBICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE CONMUTACIÓN QUE PERMITEN OBTENER LA CONFIGURACIÓN RADIAL BASE DEL SISTEMA

En este trabajo se considera la posibilidad de que los sistemas de distribución que se analicen tengan construcción mallada. Por lo cual, en caso de que el SDL considerado esté construido de forma mallada, la primera etapa de la metodología propuesta consiste en determinar la ubicación de los dispositivos de conmutación con los que se obtiene la configuración base de operación radial, en función de la confiabilidad del sistema. Sin embargo, es posible que dicha ubicación se haya realizado previamente, teniendo en cuenta algún otro criterio, por ejemplo, la minimización de pérdidas.

Cuando un SDL está construido de manera mallada, para lograr su operación radial, en condiciones de operación normal de todos sus elementos, se debe cumplir que a cada una de las barras del sistema, con excepción de las barras de conexión a subestaciones de distribución, solo se conecte una línea activa aguas arriba. Para conseguir lo anterior, se deben inhabilitar tantas líneas como sea la diferencia entre el total de líneas del sistema y la cantidad de barras que no corresponden a puntos de conexión a subestaciones de distribución. Por lo tanto, la cantidad suficiente de dispositivos de conmutación para garantizar la operación radial del sistema se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$Nddc = nl - (barras - nalim) \quad (6)$$

En donde:

Nddc: corresponde a la cantidad de dispositivos de conmutación que se deben instalar, y mantener en estado abierto, para garantiza la operación radial del sistema.

nl: corresponde a la cantidad de líneas que tenga el SDL analizado.

barras: corresponde a la cantidad de barras con que cuenta el sistema, incluyendo barras de conexión a subestaciones de distribución.

nalim: corresponde a la cantidad de barras de conexión a subestaciones de distribución.

Pero, con tan solo ubicar los *Nddc* dispositivos de conmutación en el sistema no se garantiza que opere de manera radial, ya que la operación radial del sistema también depende de la localización de dichos dispositivos. Por lo cual, es necesario determinar la ubicación adecuada para cada uno de esos DDC. Para establecer la ubicación de los *Nddc* dispositivos de conmutación, uno a la vez, se consideran las siguientes restricciones:

- No se ubica en las líneas que pertenecen a trayectorias de la primera generación, a menos que alguna de esas trayectorias establezca una conexión entre subestaciones de distribución. El cumplimiento de esta restricción garantiza el uso de todas las barras de conexión a subestaciones de distribución.
- No se ubica en las líneas que ya contengan algún DDC.
- No se ubica en las líneas de las trayectorias que finalizan en barras conectadas solamente a una línea. Estas trayectorias pueden existir debido a que la topología de la red, sin DDC, las tiene o debido a que se generan al inhabilitar las líneas en las que ya se ha ubicado algún DDC.
- No se ubica en las líneas que pertenecen a la trayectoria que proporciona potencia a aquellas trayectorias de las que trata la restricción anterior, a menos que exista más de una trayectoria que le pueda suministrar potencia. Esta restricción se extiende a las trayectorias que les suministran potencia sucesivamente, hasta llegar a una barra madre de la primera generación.
- No se ubica en las líneas que se indiquen como prohibidas al inicio del análisis. Estas líneas corresponden a aquellas que se desea excluir de la búsqueda, por ejemplo, debido a la restricción de regulación de tensión.

Teniendo en cuenta que:

- El objetivo de la metodología desarrollada es hacer que el sistema analizado suministre el servicio a la mayor cantidad de usuarios posible, aún en condiciones de falla.
- Aislar los elementos fallados del SDL reduce la cantidad de usuarios afectados por las reparaciones necesarias en dichos elementos.
- Los elementos cuya indisponibilidad (U), parámetro obtenido mediante la ecuación (7), sea mayor tienen más impacto negativo sobre la duración de los periodos de tiempo en que, por reparación de sus fallas, no se preste el servicio a los usuarios. Por lo anterior, se puede considerar que dichos elementos son críticos.

$$U_i = \lambda_i r_i \quad (7)$$

En donde:

U_i : corresponde a la indisponibilidad del elemento “ i ”, expresada en $\frac{\text{horas}}{\text{año}}$.

λ_i : es la frecuencia de fallas del elemento “ i ”, expresada en $\frac{\text{fallas}}{\text{año}}$.

r_i : es el tiempo medio de reparación del elemento “ i ”, expresado en $\frac{\text{horas}}{\text{falla}}$.

- Para reducir el efecto de los elementos críticos sobre el sistema, los DDC deben ser ubicados lo más cerca posible a ellos.

Una vez se determina el conjunto de líneas que cumplen las restricciones descritas anteriormente, los $Nddc$ dispositivos de conmutación se ubican, uno a la vez, en la línea con mayor indisponibilidad, si se presenta empate se selecciona la línea con menor número de identificación. Este algoritmo se aplica, inicialmente, para ubicar todos los $Nddc$ dispositivos de conmutación, sin embargo, puede ejecutarse para determinar la ubicación de algunos de ellos manteniendo fija la de los otros. Por ejemplo, si la cantidad de DDC que se requiere para obtener la configuración radial base es de cinco, inicialmente se aplica el algoritmo para ubicar cinco DDC, sin embargo, si la configuración obtenida no satisface la restricción de regulación de tensión se hace necesario cambiar la ubicación de los DDC. Para lograr lo anterior,

es posible ejecutar nuevamente el algoritmo solicitando ubicar el quinto dispositivo, indicando la ubicación de los cuatro primeros y marcando como prohibidas las líneas que pertenecen a la trayectoria en la que, inicialmente, se ubicó el quinto DDC.

En la Figura 9 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo usado para realizar la búsqueda de los *Nddc* dispositivos de conmutación. Con este algoritmo se realiza la búsqueda de la ubicación de los DDC según los criterios expuestos anteriormente, hasta encontrar la ubicación del dispositivo número *Nddc* o determinar que, para la topología suministrada, no es posible que el sistema opere de manera radial sin islas (o sectores desconectados de las subestaciones). Algunos detalles adicionales sobre este algoritmo y su código, en el lenguaje de programación de Matlab, se pueden encontrar en los anexos 7 y 8, respectivamente.

Figura 9. Algoritmo para ubicar los DDC para obtener la configuración radial base

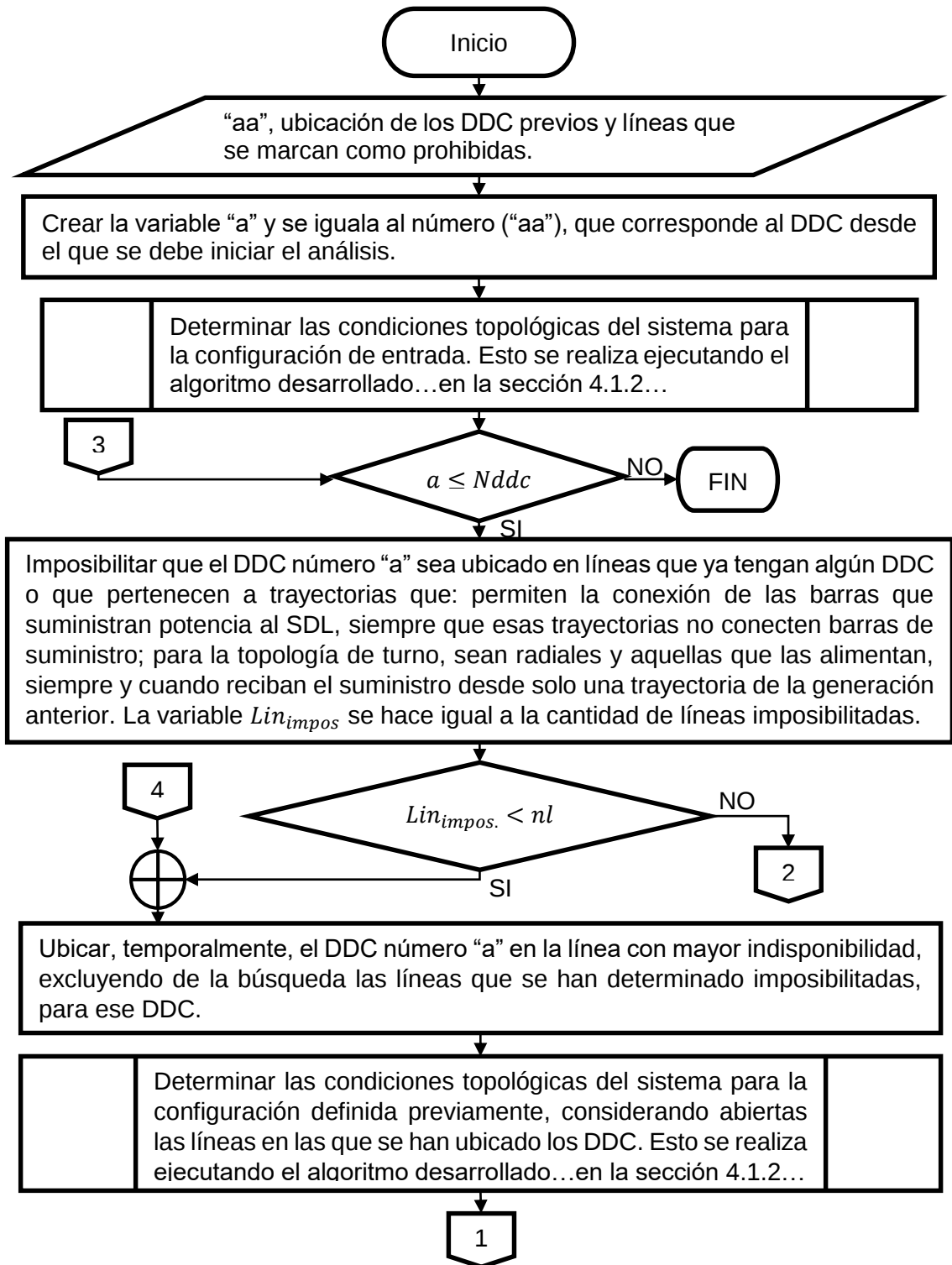
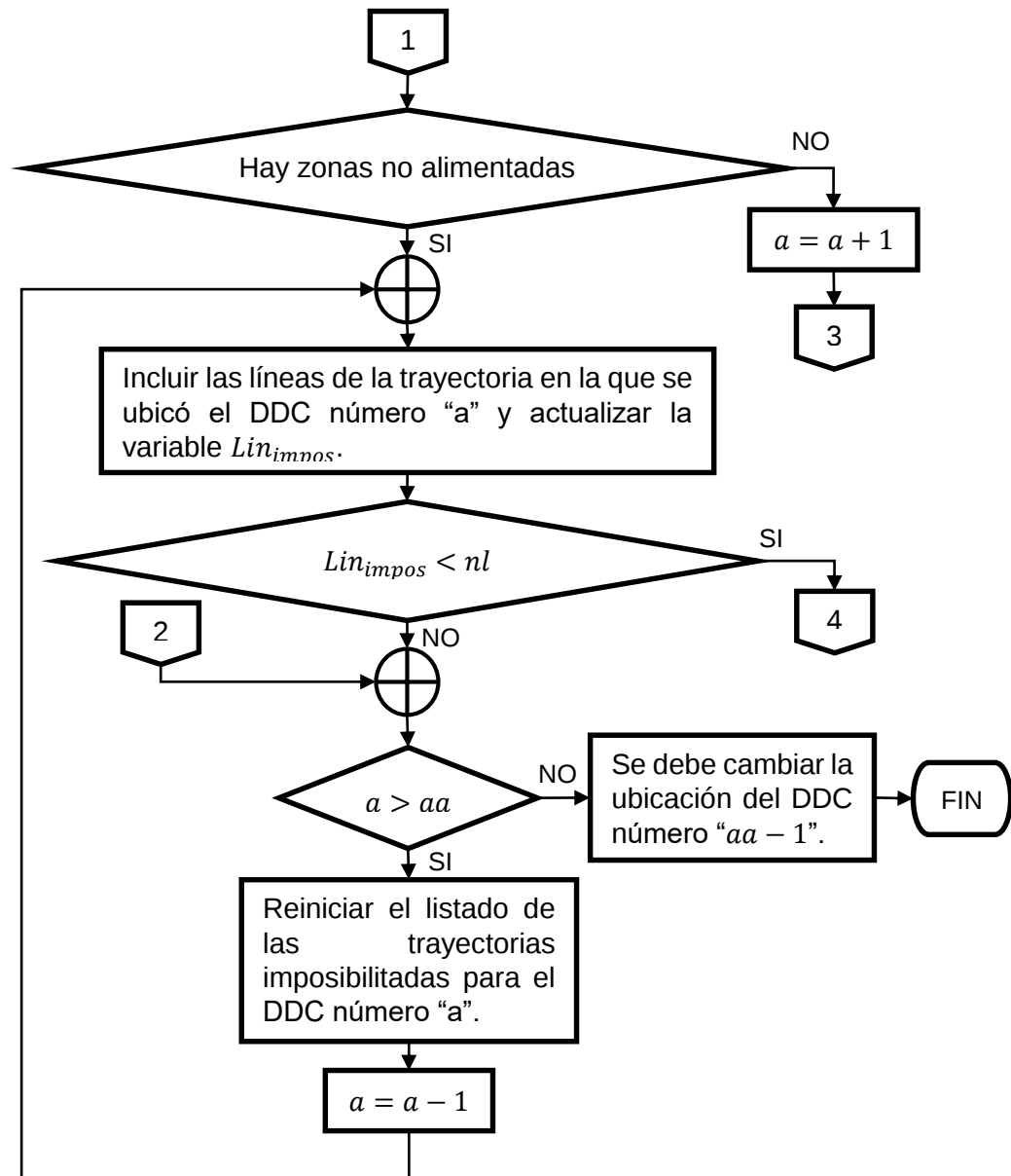


Figura 9. (Continuación)



Después de ejecutar por primera vez este algoritmo y determinado la ubicación de los $Nddc$ dispositivos de conmutación se hace necesario evaluar, mediante el flujo de carga, si la topología obtenida con la ubicación de los DDC hace que el sistema opere cumpliendo la restricción de regulación de tensión. Si la configuración obtenida no cumple la restricción técnica de operación, debe buscarse otra ubicación para el DDC con menor valor en su indisponibilidad, este es el último en

haber sido situado, evaluar el cumplimiento de la restricción y continuar este proceso iterativo hasta cumplir la restricción o agotar las posibilidades de ubicación del último dispositivo de conmutación, en cuyo caso, se debe cambiar la ubicación del dispositivo anterior, probar con las nuevas posibilidades para el último y continuar con este proceso hasta cumplir la restricción o agotar todas las opciones de ubicación del penúltimo dispositivo, si esto último ocurre se procede con el DDC anterior y se repite el proceso de búsqueda.

Debido a que las líneas de las trayectorias, del análisis topológico inicial, en las que ya se ha ubicado algún DDC se encuentran excluidas de la búsqueda hasta ahora expuesta, es necesario que antes de cambiar cada DDC de la trayectoria en la que se encuentre se pruebe cambiándolo entre las líneas que pertenecen a dicha trayectoria, iniciando por las más cercanas al elemento crítico que corresponde a la ubicación inicial. Es importante tener en cuenta que esta búsqueda se detendrá en la ubicación, de los DDC, más cercana a los elementos más críticos o determinará que no es posible cumplir la restricción de operación establecida.

Ya que las trayectorias en las que ha estado ubicado algún DDC de número inferior, por ejemplo el tercero en ser ubicado con respecto al cuarto y de ahí en adelante hasta el N_{ddc} , ya han sido tenidas en cuenta con todas las posibles combinaciones de ubicación en los números superiores, no es necesario probarlas en esos números de ubicación, por lo tanto, las líneas que pertenecen a ellas son excluidas de la búsqueda.

Si no se cumple la restricción de regulación de tensión impuesta por el usuario, el proceso de búsqueda se termina cuando en el primer DDC se haya probado en tantas trayectorias que las opciones que queden para ubicar los N_{ddc} dispositivos sean inferiores a N_{ddc} . Esto se calcula mediante el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$\begin{aligned} Tra_{Util} &= N_{Tra} - N_{tra_pro}^1 \\ N_{TraDis} &= Tra_{Util} - addc \end{aligned} \quad (8)$$

En donde:

Tra_{Util} : Cantidad de trayectorias sobre las cuales se puede ubicar algún DDC, es decir, las opciones que se tienen para ubicar el primer DDC al inicio del análisis.

N_{Tra} : Cantidad de trayectorias del sistema, cuando se realiza el análisis topológico sin inhabilitar alguna de las líneas del SDL.

$N_{tra_pro}^1$: Cantidad de trayectorias que son imposibilitadas para albergar el primer DDC al inicio del análisis.

$addc$: Cantidad de trayectorias que han sido probadas en el primer DDC.

N_{TraDis} : Cantidad de trayectorias que quedan disponibles como opciones de ubicación, en un determinado punto del análisis.

El proceso de búsqueda descrito anteriormente se realiza mediante el algoritmo mostrado en la Figura 10. Algunos detalles adicionales sobre este algoritmo y su código, en el lenguaje de programación de Matlab, y se pueden encontrar en los anexos 7 y 9, respectivamente.

Figura 10. Algoritmo para ubicar los primeros DDC, cumpliendo %R.V.

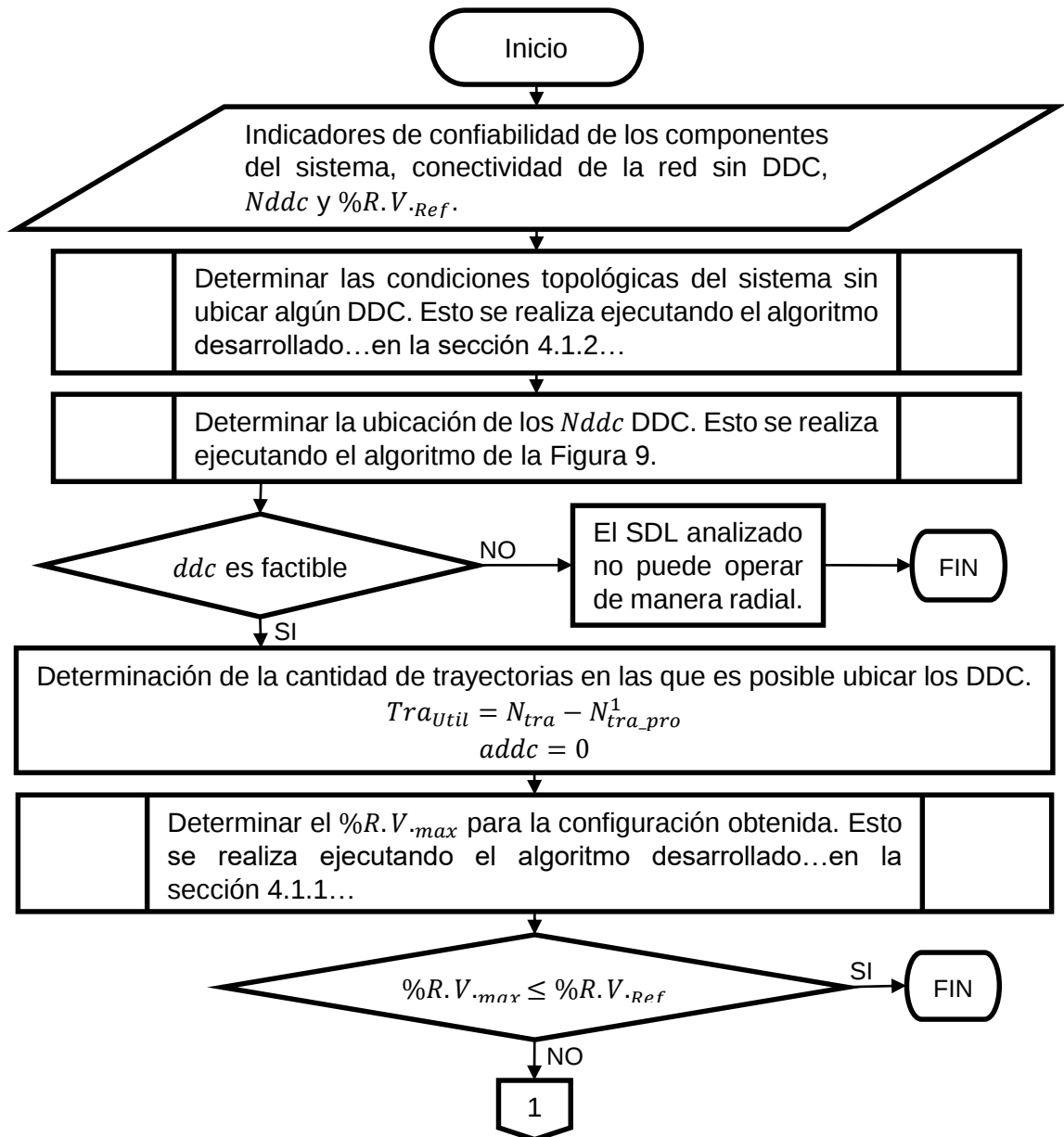


Figura 10. (Continuación)

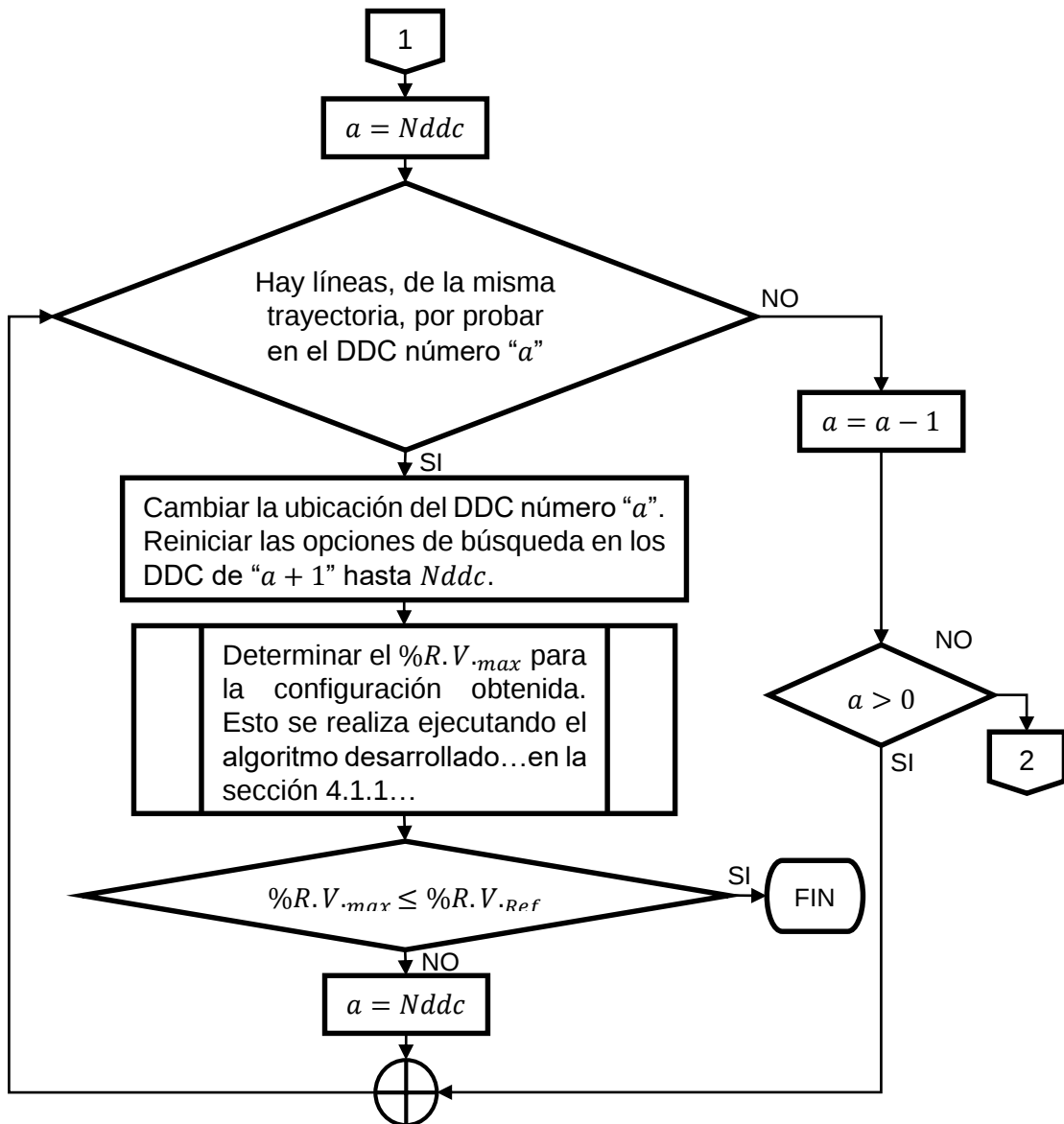
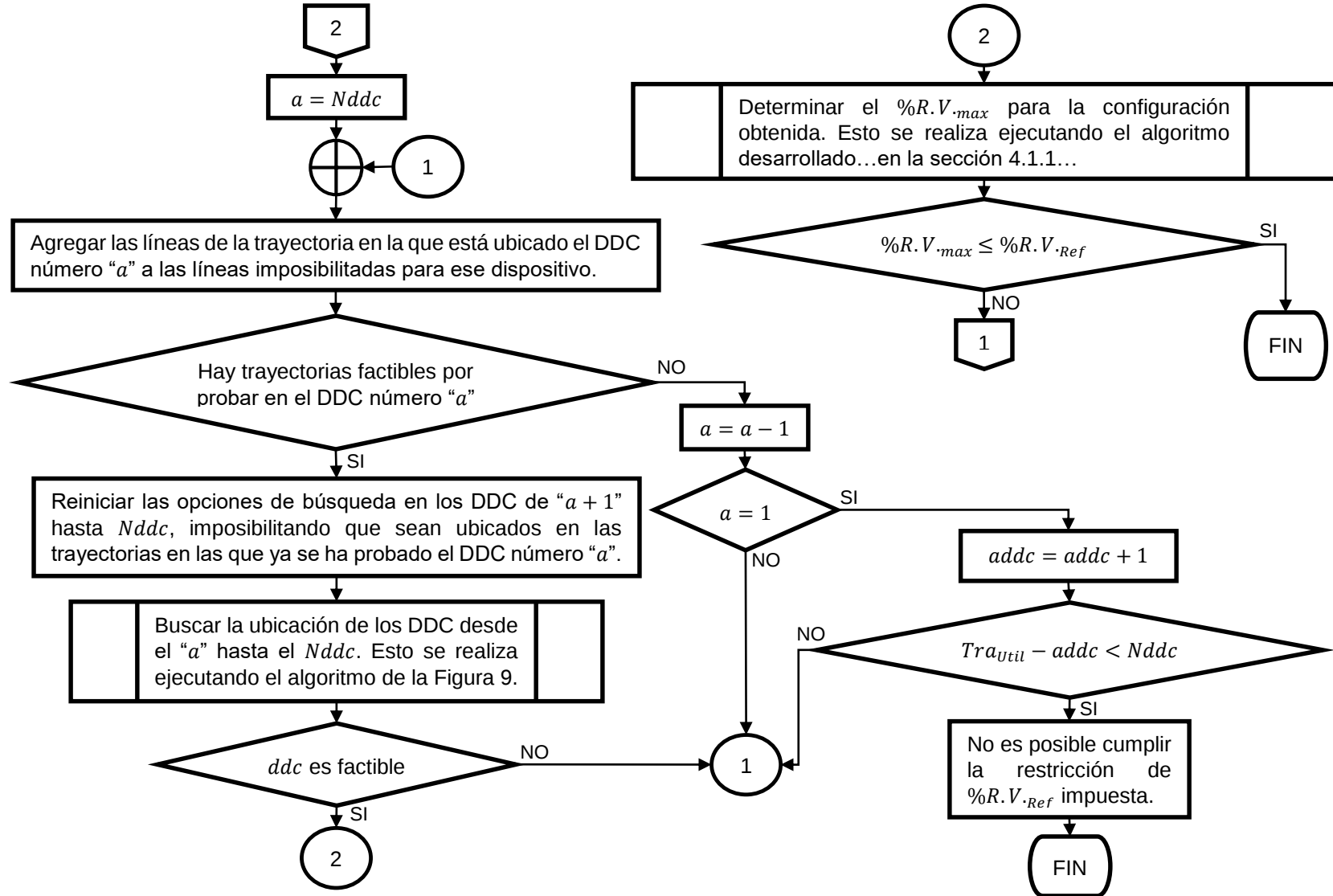


Figura 10. (Continuación)



Para ilustrar el proceso de ubicación de los $Nddc$ dispositivos de conmutación, se presenta un ejemplo con el sistema mostrado en la Figura 6, usando 13200V como tensión en las barras alimentadoras, b_1 y b_2 , y se le asignarán los parámetros de las líneas y demandas en las barras descritos en el Cuadro 5 y Cuadro 6, respectivamente. En este caso, aplicando la ecuación (6), se tiene que $Nddc$ es igual a tres, es decir que para lograr la operación radial del SDL de ejemplo se requiere ubicar tres DDC.

Cuadro 5. Impedancia, λ , r y U para las líneas del SDL de ejemplo.

Línea	Impedancia ($Z[\Omega]$)	Frecuencia de falla (λ [fallas/año])	Tiempo medio de reparación (r [horas/falla])	Indisponibilidad (U [horas/año]) (posición, de mayor a menor)
L_1	$5,8 + j2,5$	1	2	2 (11)
L_2	$6,2 + j3,4$	2	3	6 (10)
L_3	$7,2 + j5,3$	4	4	16 (5)
L_4	$6,8 + j3,4$	8	2	16 (6)
L_5	$5,5 + j3,9$	10	1	10 (8)
L_6	$5,5 + j4,1$	3	4	12 (7)
L_7	$10,8 + j8,4$	4	2	8 (9)
L_8	$8,8 + j5,7$	6	5	30 (3)
L_9	$10,3 + j9,1$	10	6	60 (1)
L_{10}	$7,6 + j5,1$	7	8	56 (2)
L_{11}	$4,7 + j2,5$	9	3	27 (4)

Cuadro 6. Demandas de P y Q en las barras del SDL de ejemplo.

Barras	Potencia activa (P[kW])	Potencia reactiva (Q[kVAr])
b_1	0	0
b_2	0	0
b_3	100	60
b_4	150	80
b_5	90	50
b_6	70	20
b_7	200	90
b_8	80	20
b_9	40	10
b_{10}	30	10

En el Cuadro 7 se muestra la trayectoria a la que pertenece cada línea del SDL del ejemplo, cuando se realiza el análisis topológico sin haber instalado algún DDC. Adicionalmente, se presenta, para cada una de las líneas, si es o no posible ubicar el DDC de turno.

La información contenida en el Cuadro 7 puede ser apreciada gráficamente en la Figura 11, en la que además, es fácil evidenciar la evolución de la topología del sistema a medida que se van localizando cada uno de los tres DDC, que al inhabilitar las líneas sobre las que son ubicados logran la operación radial del SDL. En esta figura se presentan en color verde los tramos de líneas, que por ser radiales, se van imposibilitando para ubicar algún DDC y las líneas a trazos representan aquellas en las que se ha ubicado algún DDC.

Cuadro 7. Trayectoria a la que pertenecen las líneas y posibilidad de instalación de DDC para cada línea.

Línea	Trayectoria sin DDC	Estado con 0 DDC	Estado con 1 DDC	Estado con 2 DDC
L_1	2	Posible	Posible	Posible
L_2	3	Posible	Posible	Posible
L_3	4	Imposibilitada	Imposibilitada	Imposibilitada
L_4	7	Posible	Imposibilitada	Imposibilitada
L_5	6	Posible	Posible	Imposibilitada
L_6	8	Posible	Posible	Imposibilitada
L_7	7	Posible	Imposibilitada	Imposibilitada
L_8	6	Posible	Posible	Imposibilitada
L_9	10	Posible	Imposibilitada	Imposibilitada
L_{10}	10	Posible	Imposibilitada	Imposibilitada
L_{11}	11	Imposibilitada	Imposibilitada	Imposibilitada

En la parte “a” de la Figura 11 se observa que las líneas L_{11} y L_3 no son tenidas en cuenta para buscar la ubicación del primer DDC, la primera por constituir un tramo que de por sí es radial y la segunda porque permite la conexión de la barra b_2 al SDL sin establecer contacto entre barras de conexión a subestaciones de distribución. Por lo anterior, el primer DDC es ubicado en la línea L_9 , que es la que presenta mayor indisponibilidad de las líneas posibles para la ubicación de este DDC, tal como se puede apreciar en el Cuadro 5 y el Cuadro 7.

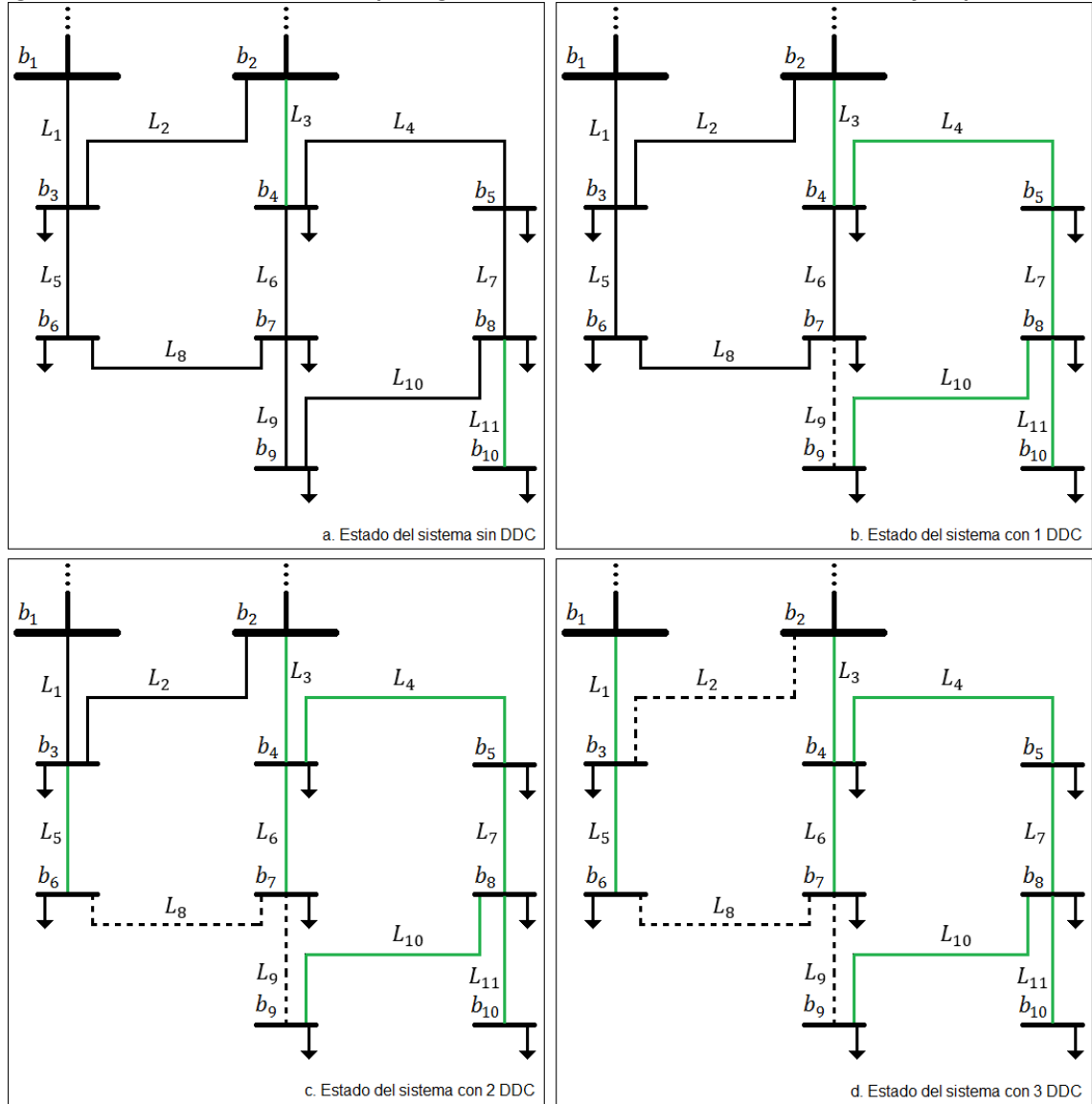
En la parte “b” de la Figura 11 se aprecia que al instalar el primer DDC las zonas radiales han crecido, por lo cual se han incrementado las líneas imposibilitadas para ubicar algún DDC, quedando como opciones L_1 , L_2 , L_5 , L_6 y L_8 , siendo L_8 la línea con mayor indisponibilidad, por lo cual es allí donde se ubica el segundo DDC.

En la parte “c” de la Figura 11 se observa que, teniendo la ubicación de los dos primeros DDC, el tercer dispositivo solo puede ser ubicado en L_1 o L_2 . Debido a que

la indisponibilidad de L_2 es mayor que la de L_1 , el tercer DDC se ubica sobre la línea L_2 .

La parte “d” de la Figura 11 muestra una topología completamente radial para el SDL analizado.

Figura 11. Evolución de la topología del sistema de distribución de ejemplo.



El proceso de ubicación realizado hasta ahora garantiza que los tres DDC que aseguran la operación radial del sistema se localizan en las líneas más críticas posibles. Sin embargo, después de obtener la configuración radial es necesario

evaluar el cumplimiento de la restricción técnica de operación, es decir, si se conserva para todas las barras del sistema un porcentaje de regulación de tensión menor o igual al máximo de referencia estipulado por el usuario de la metodología propuesta en este trabajo de aplicación. Lo anterior se evalúa ejecutando el algoritmo descrito...en la sección 4.1.1..., que para este sistema, teniendo en cuenta la información contenida en el Cuadro 5 y el Cuadro 6, y con la configuración que ofrece la ubicación de los tres DDC ($ddc = [9 \ 8 \ 2]$) arroja un %R.V máximo de 5,9705%, en la barra b_9 .

El proceso de búsqueda termina aquí, si el usuario impuso un valor de referencia mayor o igual a la regulación de tensión obtenida, de lo contrario la búsqueda continuará siguiendo el algoritmo mostrado en la Figura 10. Este proceso inicia cambiando la ubicación de los dispositivos, sobre las trayectorias en las que se encuentran, según el análisis topológico realizado sin inhabilitar alguna línea, iniciando por el último DDC ubicado. Para el ejemplo planteado se solicita una regulación de tensión máxima de 5%, lo que obliga a continuar el proceso de búsqueda, dicho proceso es explicado en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Descripción del proceso de búsqueda para cumplir el límite de regulación de tensión.

Descripción de los cambios	%R.V. obtenidos y análisis.
En este caso el tercer DDC ubicado, que corresponde al último, se encuentra en una trayectoria de una sola línea, por lo cual no se producen cambios en este DDC. Por lo anterior, se procede a cambiar la ubicación del segundo DDC, sobre la misma trayectoria.	$\%R.V_{.ddc=[9 \ 5 \ 2]} = 6,3711$ La línea L_8 en la que quedó ubicado el segundo DDC pertenece a la celda número seis de las contenidas en la “Salida2” de la función topología, este vector describe una trayectoria de tan solo dos líneas, L_8 y L_5, por lo tanto solo existe L_5 como opción adicional. El resultado obtenido no satisface el criterio de parada.
Cambios de ubicación del primer DDC, sobre la misma trayectoria. Este caso existe solo la línea L_{10} como opción, sin embargo debe probarse para todas las combinaciones posibles de los DDC ubicados posteriormente.	$\%R.V_{.ddc=[10 \ 8 \ 2]} = 5,3372$ $\%R.V_{.ddc=[10 \ 5 \ 2]} = 5,7364$ Ninguna de las dos combinaciones probadas satisface el criterio de parada. En este punto se han agotado las opciones de búsqueda, dejando los DDC sobre las trayectorias en las que se encuentran los elementos más críticos, por lo tanto se debe proceder a cambiar la trayectoria en que se ubica el último DDC.
Cambio de trayectoria en la que se localiza el último DDC ubicado. Para este caso, como puede observarse en la parte “c” de la Figura 11, existe una única opción, la trayectoria compuesta por tan solo la línea L_1 .	$\%R.V_{.ddc=[9 \ 8 \ 1]} = 5,9705$ Debido a que este resultado no satisface el criterio de parada, debe repetirse, con las opciones de cambio de líneas sobre las nuevas trayectorias de ubicación, el proceso de búsqueda anterior. En este caso se repiten los cambios anteriores pero en vez de tener el tercer DDC sobre la línea L_2 se tiene sobre L_1.

Cuadro 8. (Continuación).

Descripción de los cambios	%R.V. obtenidos y análisis.
Cambios de ubicación del segundo y primer DDC, sobre la misma trayectoria.	$\%R.V_{ddc=[9 \ 5 \ 1]} = 6,3711$ $\%R.V_{ddc=[10 \ 8 \ 1]} = 5,3372$ $\%R.V_{ddc=[10 \ 5 \ 1]} = 5,7364$ La búsqueda no se detiene porque ninguno de los resultados satisface el criterio de parada. Se procede a cambiar la trayectoria en la que se ubica el penúltimo DDC.
Cambio de trayectoria del segundo DDC, en este caso se tienen las opciones mostradas en la parte “b” de la Figura 11 sin incluir la trayectoria en la que ya estaba, es decir las líneas L_8 y L_5 , que tampoco formará parte de las opciones de ubicación de los dispositivos posteriores al segundo, en este caso el tercero y último. Por lo anterior, las opciones de ubicación para el segundo DDC son L_1 , L_2 y L_6 , de los cuales es L_6 la línea escogida ya que cuenta con el mayor indisponibilidad. El último DDC es ubicado en L_2 ya que es, de las opciones restantes, el de mayor producto λr .	$\%R.V_{ddc=[9 \ 6 \ 2]} = 4,7589$ En este punto se termina la búsqueda ya que el resultado obtenido satisface el criterio de parada. Si se hubiese solicitado un %R.V. más pequeño, la búsqueda continuaría hasta satisfacer dicho criterio o hasta agotar las posibles combinaciones, esto se calcula según el conjunto de ecuaciones (8), en este caso: $N_{Tra} = 8 \text{ y } N_{tra_pro}^1 = 2$ Por lo tanto: $Tra_{Util} = 8 - 2 = 6$ Ya que la cantidad mínima de DDC requerida para la operación radial del sistema es tres, se tiene como punto final de la búsqueda cuando: $N'_{TraDis} = N_{ddc} - 1 = 2$ Por lo tanto: $addc = Tra_{Util} - N'_{TraDis} = 6 - 2 = 4$ Lo que quiere decir que cuando se haya probado cuatro trayectorias para el primer DDC se habrá terminado la búsqueda, sin cumplir la restricción impuesta por el usuario.

4.2.1 Ajuste de la ubicación de los dispositivos de conmutación requeridos para obtener la configuración base. Después de encontrar una ubicación inicial para los DDC que permita la operación radial del sistema, cumpliendo la restricción de %R.V, es necesario determinar la ubicación exacta de cada DDC, sobre la trayectoria en la que se ha localizado inicialmente, que tenga el menor impacto posible sobre la indisponibilidad del servicio para los usuarios. Lo anterior se debe a que en cada línea se contemplan dos puntos para la ubicación de algún DDC, estos puntos corresponden a los dos extremos correspondientes, los cuales se identifican con las barras que conecta cada una de ellas. Es decir, la cantidad de líneas que contenga una trayectoria por dos, corresponde al número de posibles puntos de ubicación de DDC para el sistema analizado.

Para cada uno de los posibles puntos de ubicación del DDC que tiene la correspondiente trayectoria que lo contiene, se determina el valor de una variable (PC_{tra}) proporcional al efecto sobre los indicadores de calidad media de la trayectoria en cuestión. Lo anterior se realiza mediante el conjunto de ecuaciones (9).

$$\begin{aligned}
 PC_{tra}^1 &= \sum_{i=1}^{nl_{tra}^1} U_i \sum_{j=1}^{nb_{tra}^1} NU_j \\
 PC_{tra}^2 &= \sum_{i=1}^{nl_{tra}^2} U_i \sum_{j=1}^{nb_{tra}^2} NU_j \\
 PC_{tra} &= PC_{tra}^1 + PC_{tra}^2
 \end{aligned} \tag{ 9 }$$

En donde:

PC_{tra} : Variable directamente proporcional al efecto negativo, en el indicador SAIDI de la trayectoria “tra”, que tiene ubicado un DDC en un punto determinado de dicha trayectoria.

PC_{tra}^1 : Aporte a la variable PC_{tra} de los elementos que se encuentran aguas arriba del DDC ubicado en un punto determinado de la trayectoria tra.

PC_{tra}^2 : Aporte a la variable PC_{tra} de los elementos que se encuentran aguas abajo del DDC ubicado en un punto determinado de la trayectoria tra .

U_i : Indisponibilidad de la línea i de la trayectoria tra .

NU_j : Número de usuarios conectados a la barra j de la trayectoria tra .

nl_{tra}^1 : Número de líneas que se encuentran aguas arriba del DDC ubicado en un punto determinado sobre la trayectoria tra .

nl_{tra}^2 : Número de líneas que se encuentran aguas abajo del DDC ubicado en un punto determinado sobre la trayectoria tra .

nb_{tra}^1 : Número de barras que se encuentran aguas arriba del DDC ubicado en un punto determinado sobre la trayectoria tra .

nb_{tra}^2 : Número de barras que se encuentran aguas abajo del DDC ubicado en un punto determinado sobre la trayectoria tra .

Un vez obtenidos los PC_{tra} de todas la trayectorias que contienen DDC, las líneas de cada una de ellas son ordenadas, de menor a mayor, según su respectivo valor de la variable PC_{tra} . Las trayectorias se ordenan de acuerdo a la diferencia que tiene, sobre la variable PC_{tra} , cambiar el DDC de la primera línea a la segunda, según el orden encontrado anteriormente. Se verifica el cumplimiento de la restricción por regulación de tensión, cambiando la ubicación de los DDC, iniciando por la combinación con menor PC_{tra} hasta encontrar una ubicación que satisfaga la restricción de operación del sistema. Las actividades descritas anteriormente son ejecutadas por las funciones “local_ddc” y “Refi_Ubi1”, que se encuentran en los anexos 10 y 11, respectivamente.

Finalmente, el extremo de la línea en el que se debe ubicar cada DDC se define determinando el número de usuarios que se ven afectados por la falla de la línea cuando el dispositivo se coloca en cada uno de sus extremos, ubicándolo en el

extremo que menor cantidad de usuarios afecte. Este proceso se realiza con la función “Ubi_ext1”, que se encuentra en el anexo 12.

Después de haber ubicado los DDC que permiten la operación radial del sistema, se incluye la generación distribuida en el análisis de flujo de carga, este proceso se realiza teniendo en cuenta la capacidad de cada GD y el factor de potencia de las cargas más cercanas que pueden ser alimentadas por cada uno de ellos. Para esta tarea se llaman las funciones “GD_ddc” e “Incluir_GD”, cuyos códigos en el lenguaje de programación de Matlab se encuentran en los anexos 13 y 14, respectivamente.

4.3 CÁLCULO DE LOS INDICADORES DE CALIDAD DEL SERVICIO

Teniendo en cuenta que el objetivo de la metodología propuesta en este trabajo de aplicación es mejorar la confiabilidad de los sistemas de distribución y que, según lo expuesto...en las secciones 2.1 y 2.2..., para cuantificar el nivel de confiabilidad se han seleccionado los indicadores SAIDI, SAIFI, FIU, DIU y ENS, se debe realizar el cálculo de estos indicadores para determinar el efecto de la ubicación de los DDC y determinar la localización que permita mejorar dichos indicadores.

En este trabajo se contempla la posibilidad de que dos o más elementos del sistema se encuentren fallados simultáneamente. Debido a que la simulación de Montecarlo ofrece la posibilidad de incluir el tipo de situaciones descritas anteriormente, es ese el método empleado para el cálculo de los indicadores de calidad. El algoritmo implementado para realizar esta simulación se describe...en la sección 4.3.3...

Cuando se realiza la búsqueda de la ubicación de cada uno de los DDC, se requiere calcular los indicadores de calidad para evaluar el impacto de cada posible ubicación del dispositivo en cuestión. Si para todos los casos se usara la simulación de Montecarlo, la ejecución de la metodología tomaría mucho tiempo, por lo tanto, en el proceso de búsqueda se utiliza el método de bloques de frecuencia y duración, que es mucho más rápido que la simulación de Montecarlo. El algoritmo implementado para este caso se describe...en la sección 4.3.4...

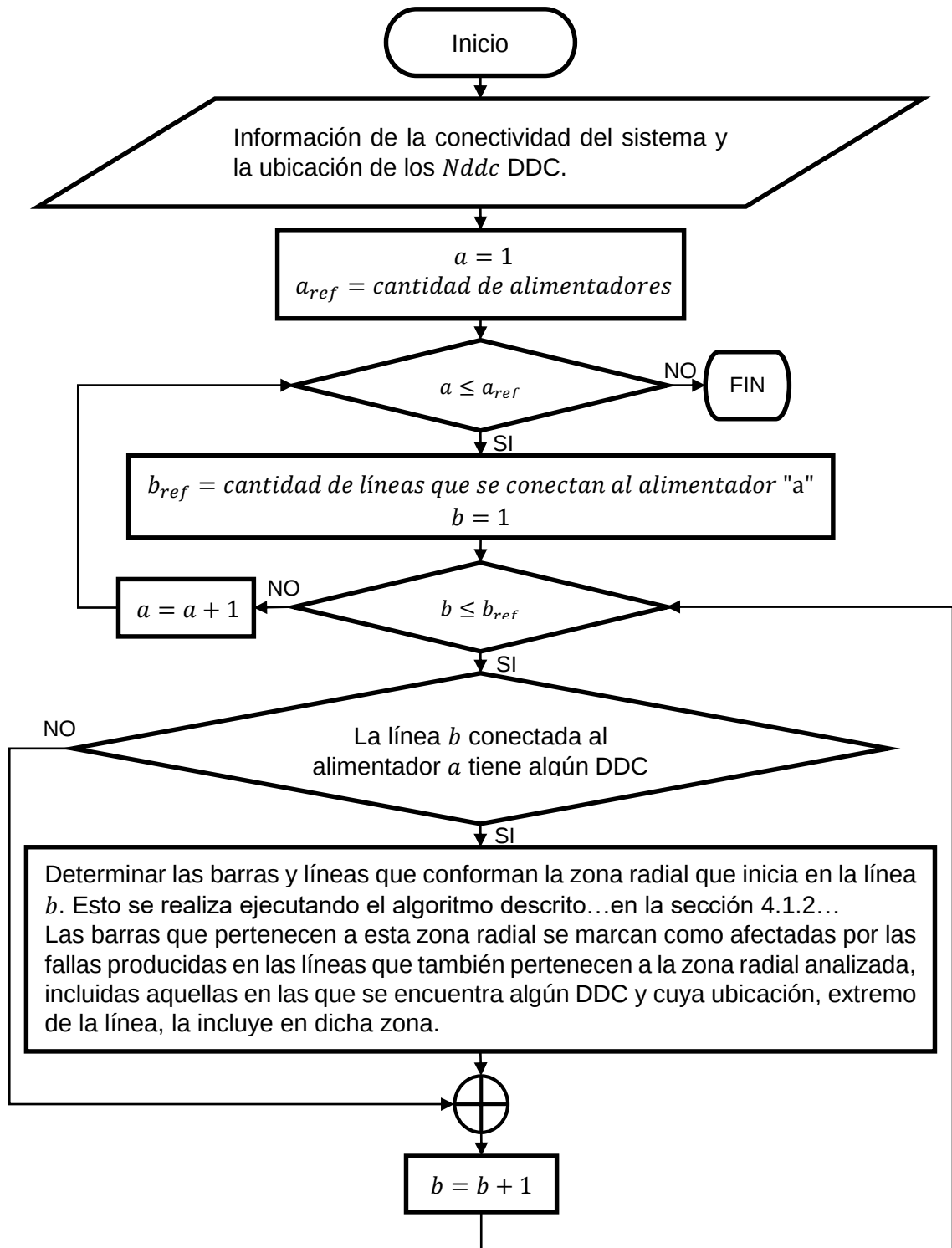
De acuerdo a las ecuaciones presentadas...en las secciones 2.1 y 2.2..., para el cálculo de los indicadores es necesario conocer el número de usuarios que son afectados por los eventos en cada una de las líneas del sistema analizado, para lo cual, se debe determinar las barras que son afectadas por las fallas de las líneas. La determinación de las barras afectadas se realiza de dos formas distintas, que son las siguientes:

- Cuando no existe la posibilidad de reconfigurar el sistema, es decir, solo se han ubicado solo los DDC que garantizan la operación radial en condiciones normales de todos los elementos. El algoritmo empleado en este caso se presenta...en la sección 4.3.1...
- Cuando existe la posibilidad de reconfigurar el sistema para aislar la falla, es decir, se han ubicado más DDC que los que garantizan la operación radial en condiciones normales de todos los componentes del sistema. El algoritmo empleado en este caso se presenta...en la sección 4.3.2...

4.3.1 Barras afectadas por eventos cuando solo se tienen los dispositivos requeridos para la configuración base. Debido a que con solo N_{ddc} dispositivos instalados no es posible realizar reconfiguración del sistema, el proceso de determinación de las barras afectadas por fallas en cada línea se reduce a determinar las barras que se encuentran ubicadas dentro de la zona radial a la que pertenece cada una de las líneas. El sistema tiene tantas zonas radiales como líneas que no contienen DDC se encuentran conectadas a las barras de conexión a subestaciones de distribución.

En la Figura 12 se presenta el diagrama de flujos del algoritmo empleado para determinar las barras cuyo suministro se ve interrumpido por fallas en cada línea.

Figura 12. Barras afectadas por fallas en cada línea, con solo $Nddc$ DDC

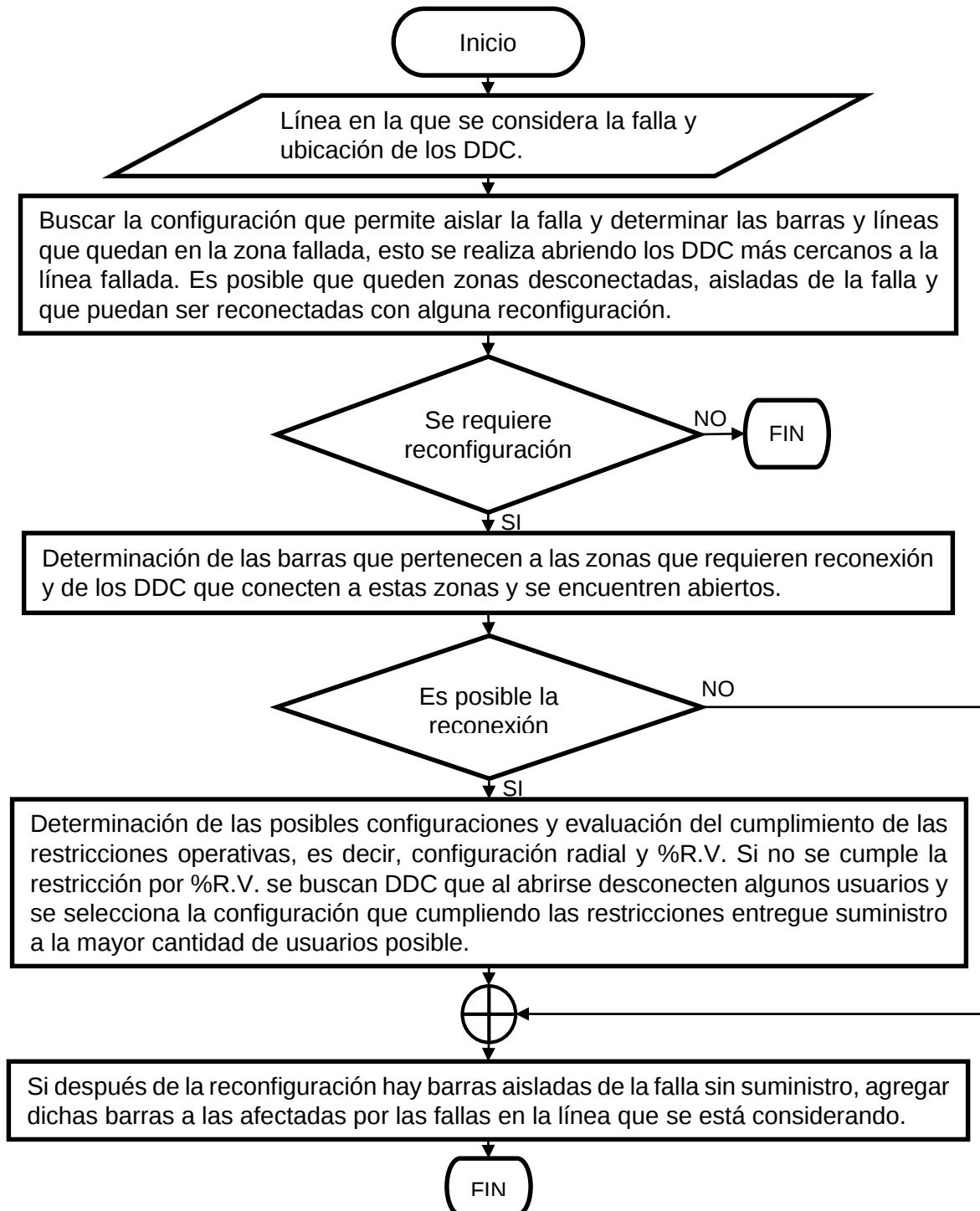


Algunos detalles adicionales sobre este algoritmo y su código, en el lenguaje de programación de Matlab, se pueden encontrar en los anexos 15 y 16, respectivamente.

4.3.2 Barras afectadas por eventos cuando existe posibilidad de reconfiguración. El número de barras que se ven afectadas por las fallas en las líneas puede ser reducido si se reconfigura el sistema para aislar la falla y alimentar la mayor cantidad de usuarios factibles. Lo anterior es posible si el SDL tiene instalados más DDC que los necesarios para garantizar la operación radial, en cuyo caso se requiere encontrar la configuración con mayor cantidad de usuarios que reciben suministro, sin alimentar la falla, considerando una falla en cada una de las líneas del sistema, con lo cual se determinan los usuarios que afecta la ocurrencia de un evento en cada tramo de línea.

El proceso de reconfiguración y determinación de las barras afectadas por eventos en alguna de las líneas se realiza con el algoritmo mostrado en la Figura 13. Algunos detalles adicionales sobre este algoritmo y los códigos correspondientes, en el lenguaje de programación de Matlab, y se pueden encontrar en los anexos 17 a 23.

Figura 13. Algoritmo para la reconfiguración y efecto de eventos



Adicionalmente, cuando alguna de las zonas aisladas de la falla ha quedado sin suministro y cuenta con por lo menos un generador distribuido que pueda operar en

isla, se evalúa la de que estas cargas puedan ser alimentadas por la GD presente, si es que cuentan con la capacidad suficiente. Este proceso se realiza llamando la función “GD_Rec”, cuyo código en el lenguaje de programación de Matlab se presenta en el anexo 24.

4.3.3 Simulación de Montecarlo. En esta etapa se calculan los indicadores de calidad del SDL, teniendo en cuenta la ubicación definitiva del DDC de la iteración correspondiente, esto se hace generando tiempos aleatorios de falla y reparación para los componentes del sistema y teniendo en cuenta las barras que se ven afectadas por los eventos ocurridos en cada uno de los componentes, de acuerdo a la ubicación de los DDC.

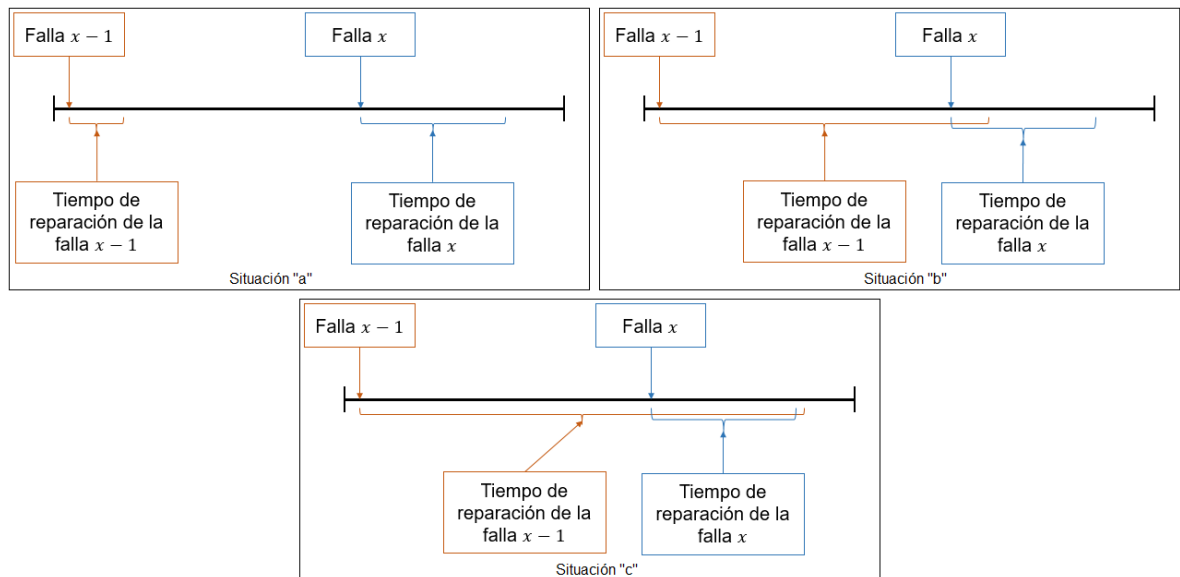
En la simulación planteada en este trabajo no se tuvo en cuenta el criterio $n - 1$, es decir, se considera la posibilidad de que las fallas ocurran de manera simultánea, por lo cual es necesario agrega el efecto de los tiempos de ocupación de la(s) cuadrilla(s) encargada(s) de las reparaciones, para esto es necesario que se indique la cantidad de cuadrillas con que cuenta el operador de red para el SDL analizado. Para explicar el tratamiento realizado a la duración de las fallas que ven los usuarios se plantean las tres posibles situaciones que se muestran en la Figura 14, considerando que la falla $x - 1$ y la falla x tienen en común por lo menos un usuario afectado y la línea horizontal representa un segmento de la línea temporal del periodo estudiado. El análisis de estas tres situaciones es el siguiente:

Situación “a”: En este caso el tiempo entre las dos fallas es mayor que el tiempo requerido para la reparación de la primera de ellas, por lo tanto, los usuarios que se vean afectados por estos eventos los observarán con una duración correspondiente al tiempo necesario para las respectivas reparaciones, tal como se muestra en la parte “a” de la Figura 14. El análisis anterior es correcto siempre y cuando en el momento que se presenta la falla $x - 1$ exista alguna cuadrilla disponible para ocuparse de su reparación, en caso contrario, el tiempo efectivo de la duración de la falla $x - 1$ corresponderá a la suma del tiempo necesario para su reparación y lo que tarde en haber alguna cuadrilla disponible desde la ocurrencia de esta falla.

Situación “b”: En este caso la falla x ocurre antes de que se haya terminado la reparación de la falla $x - 1$, esto puede deberse a que el tiempo de reparación natural de la primera falla equivale al mostrado en la parte “b” de la Figura 14 o a que es necesario esperar que haya alguna cuadrilla disponible. Por lo tanto, el tiempo efectivo visto por los usuarios afectados por la falla x corresponde al tiempo necesario para su reparación más el tiempo transcurrido desde que ocurre la falla hasta que se termina la reparación de la anterior, o se desocupa alguna otra cuadrilla si es que la hay. Para los usuarios que se ven afectados por las dos fallas, el tiempo efectivo de afectación por el evento x corresponde al tiempo real de duración, natural de reparación más tiempo de espera, menos el periodo de traslape de los dos eventos.

Situación “c”: En este caso la falla x es reparada antes de que termine la reparación de la falla $x - 1$, por supuesto, esto solo es posible si las fallas son atendidas por cuadrillas distintas. En esta situación los usuarios que se verían afectados por las dos fallas no perciben la falla x , tal como se muestra en la parte “c” de la Figura 14.

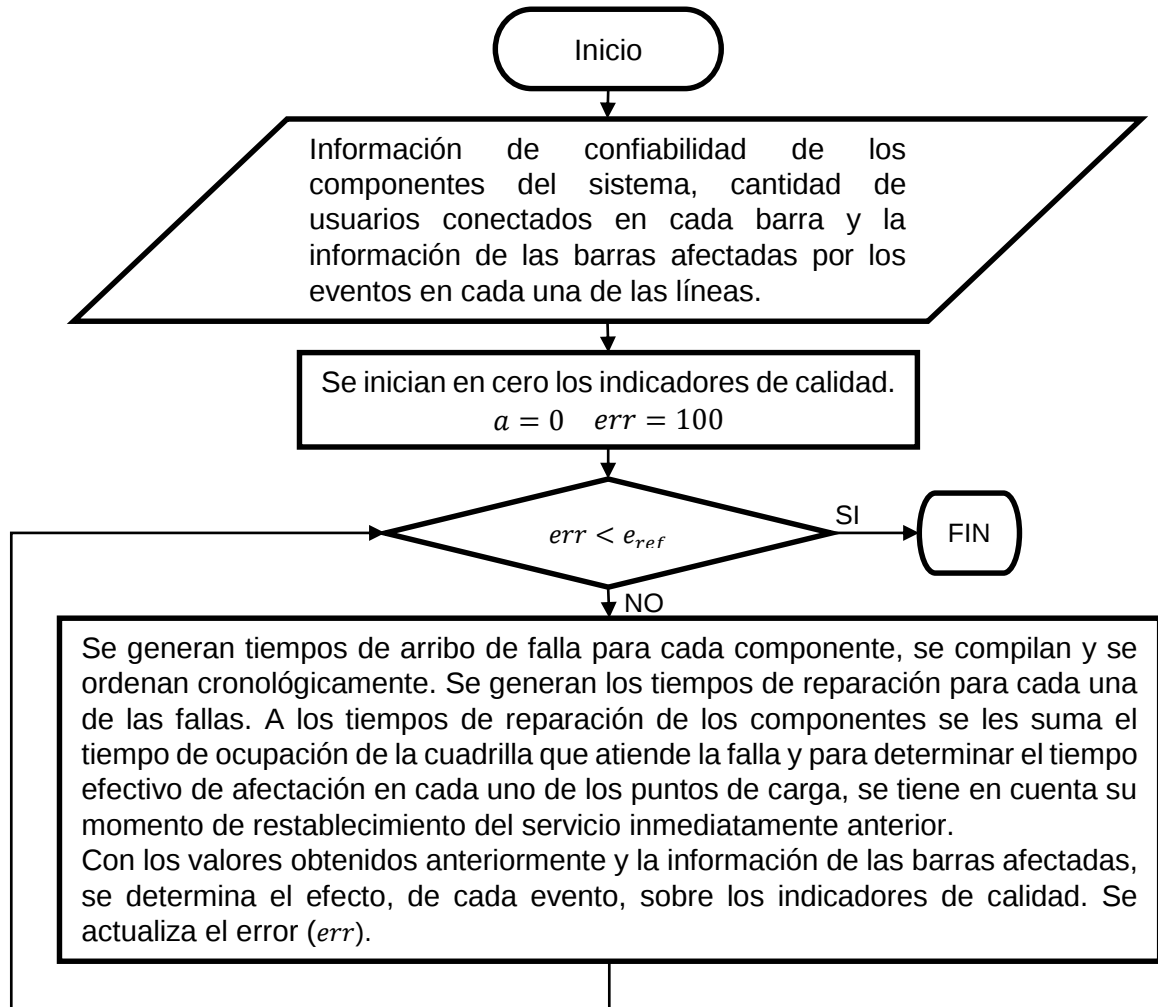
Figura 14. Traslape de tiempos de reparación



La Figura 15 muestra el diagrama de flujos que representa el algoritmo usado para la simulación. Algunos detalles adicionales sobre este algoritmo y los códigos

correspondientes, en el lenguaje de programación de Matlab, se pueden encontrar en los anexos 25 a 28.

Figura 15. Algoritmo para realizar la simulación de Montecarlo



4.3.4 Evaluación de la calidad del servicio con criterio $n - 1$. Para determinar la ubicación de cada uno de los DDC adicionales a los $Nddc$ es necesario calcular los indicadores SAIDI, SAIFI, DIU, FIU y ENS. Si el cálculo de estos indicadores se realiza mediante la simulación de Montecarlo, para cada una de las opciones que deben ser evaluadas, el proceso de búsqueda toma demasiado tiempo. Por lo anterior, el cálculo de los indicadores, para las opciones de ubicación de los DDC, se realiza mediante el método de bloques de frecuencia y duración, que es un método analítico que considera el criterio $n - 1$, pero es mucho más rápido que la simulación de Monte Carlo ya que no requiere iterar hasta satisfacer algún criterio de parada.

El cálculo de los indicadores de calidad mediante el método de bloques de frecuencia y duración considera la información de las barras afectadas por los eventos en cada una de las líneas obtenida por los algoritmos descritos...en las secciones 4.3.1 y 4.3.2... Con base en esta información, se suman los tiempos de indisponibilidad y las frecuencias de falla de las líneas que afectan a cada una de las barras para obtener los cinco indicadores de calidad considerados. Algunos detalles adicionales sobre este algoritmo y el código, en el lenguaje de programación de Matlab, se pueden encontrar en los anexos 29 y 30.

Es importante resaltar que para el cálculo de los valores de los indicadores de calidad obtenidos mediante el algoritmo descrito en esta sección no se contempla la posibilidad de traslape de fallas. Además, el usuario de la aplicación desarrollada en este trabajo de aplicación puede escoger, entre los dos métodos descritos, el que desea aplicar para el cálculo de los indicadores de calidad, en cada iteración, una vez se ha determinado la ubicación del DDC correspondiente.

4.4 UBICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE CONMUTACIÓN PARA CUMPLIR EL CRITERIO DE BÚSQUEDA

La ubicación de los dispositivos de conmutación propuesta en este trabajo de aplicación se divide en dos etapas. El objetivo de la primera de estas dos etapas es obtener la configuración base de operación radial, considerando que todos los componentes del sistema se encuentran en estado normal de funcionamiento y ubicando los DDC lo más cerca posible a las zonas que tienen los componentes que ocasionan mayor indisponibilidad, el algoritmo desarrollado para lograr este objetivo se describe...en la sección 4.2... Un vez obtenida la configuración base, se evalúan los indicadores de calidad del servicio y se verifica el cumplimiento del criterio de búsqueda estipulado por el usuario de la metodología propuesta, si dicho criterio no se cumple, se inicia la segunda etapa de ubicación de DDC, la cual tiene como objetivo cumplir el criterio de búsqueda estipulado, esto se realiza ubicando DDC, uno a la vez, hasta satisfacer el criterio de búsqueda. En esta sección se presenta el algoritmo desarrollado para lograr el objetivo de la segunda etapa para la ubicación de los DDC.

La ubicación de los dispositivos de conmutación necesarios para cumplir el criterio de parada estipulado por el usuario se realiza, inicialmente, mediante un algoritmo de búsqueda voraz, el cual se describe...en la sección 4.4.1... y consiste en evaluar el efecto de ubicar un DDC adicional en todos los lugares posibles que aún no tengan y escoger la ubicación con mejor resultado, este proceso se repite hasta cumplir el criterio de parada. Debido a que en cada iteración, del algoritmo de búsqueda voraz, no se tienen en cuenta los DDC que serán ubicados posteriormente, este proceso puede llevar a soluciones que no son óptimas globales, por lo cual, se brinda la opción de complementarlo con un algoritmo de búsqueda profunda, que se describe...en la sección 4.4.2... y consiste en evaluar el efecto de cambiar cada uno de los dispositivos ubicados anteriormente, teniendo en cuenta las otras ubicaciones con buen resultado en la búsqueda voraz.

4.4.1 Algoritmo de búsqueda voraz. Una vez se han ubicado los N_{ddc} dispositivos de conmutación se determinan, mediante la simulación de Monte Carlo o el análisis por bloques de frecuencia y duración, según la preferencia del usuario, los valores que asumen los indicadores de confiabilidad con los dispositivos ubicados hasta ese momento. Si estos resultados no satisfacen el criterio de búsqueda, se debe realizar lo siguiente: ubicar otro DDC, maximizando la mejoría en la calidad del servicio teniendo en cuenta, de los valores ingresados por el usuario, el indicador que se encuentre porcentualmente más alejado del valor de referencia; evaluar nuevamente los indicadores y repetir los pasos anteriores hasta cumplir el criterio de parada. Este proceso se realiza mediante el algoritmo mostrado en la Figura 16 y se ejecuta en la función “Bus_Ubi” cuyo código, en el lenguaje de programación de Matlab, se presenta en el anexo 31.

La función “Bus_Ubi” requiere las siguientes variables globales: $SAIDI_{ref}$, $SAIFI_{ref}$, DIU_{ref} , FIU_{ref} , ind_{ref} , nl , Ext_{ddc} , ddc , Ubi_{ddc} , Bar_{ddc} , $lineas$ y err_{SMC} , las cuales han sido definidas previamente. Adicionalmente, como único argumento de esta función ingresa el vector en el que se indican, con “1”, las líneas que se encuentran abiertas y, con “0”, las que se encuentran activas para la configuración base.

Figura 16. Algoritmo para la ubicación de n DDC, con $n > N_{ddc}$

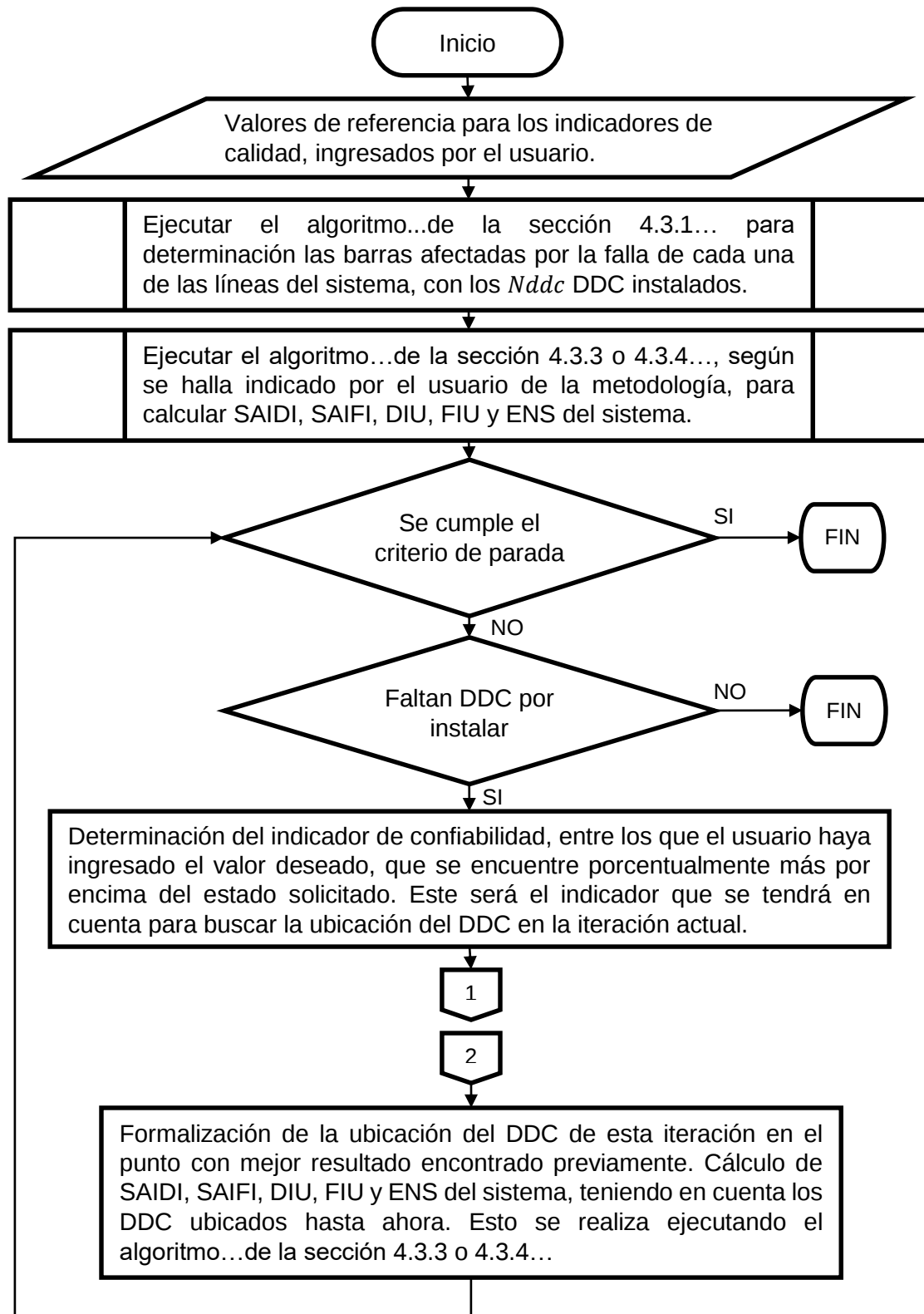
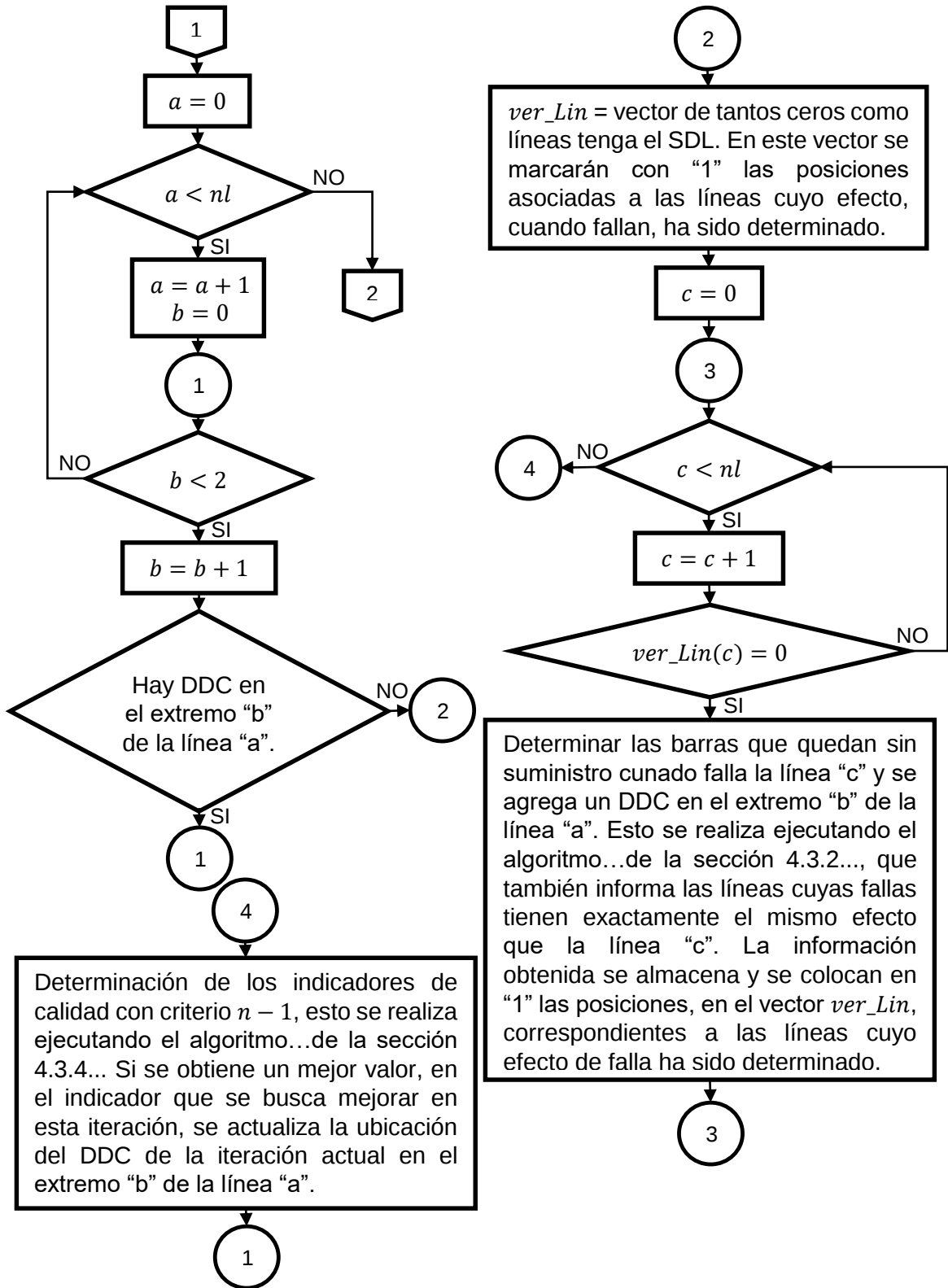


Figura 16. (Continuación)



Para la búsqueda profunda que se presenta en la siguiente sección, se requiere conocer el orden de las opciones de ubicación de cada DDC, desde la que produjo mejor resultado hasta la peor. Esta información se almacena y se ingresa al algoritmo de búsqueda profunda.

4.4.2 Algoritmo propuesto de búsqueda profunda. Una vez determinada la cantidad y ubicación de los DDC que, según la búsqueda voraz, satisfacen el criterio de parada, si el usuario lo ha indicado, se evalúa el efecto de cambiar la ubicación de los DDC entre las ubicaciones que produjeron mejor resultado. El número de opciones de cambio ($n1$) y la mayor cantidad de DDC que se cambiarán simultáneamente ($n2$), en este proceso de búsqueda, son estipulados por el usuario de la herramienta desarrollada. Después de evaluar todas las combinaciones posibles, se entrega la mejor solución encontrada. Este algoritmo se ejecuta mediante la función “Refi_Bus_Ubi”, cuyo código, en el lenguaje de programación de Matlab, se presenta en el anexo 32.

Si al número de opciones de cambio y la máxima cantidad de DDC que se cambiarán simultáneamente se les asignan valores muy altos, esta búsqueda se vuelve exhaustiva y puede tardar mucho tiempo. Esto no es necesario ya que las mejores soluciones se encuentran entre las primeras opciones, por lo tanto, lo mejor es ingresar parámetros relativamente bajos.

Por ejemplo, si se aplica la metodología propuesta al sistema de la Figura 6, con los parámetros estipulados en el Cuadro 5 y Cuadro 6, buscando obtener una energía no suministrada de cero con un máximo de once DDC y un %R.V. máximo de 6, empleando únicamente la búsqueda voraz, se obtiene la siguiente ubicación: L_8 -extremo dos, L_9 -extremo uno, L_2 -extremo dos, L_1 -extremo uno, L_2 -extremo uno, L_3 -extremo uno, L_7 -extremo uno, L_{10} -extremo uno, L_6 -extremo uno, L_8 -extremo uno y L_4 -extremo uno. Para este caso, dado que la referencia estipulada para el indicador de calidad es imposible de lograr, el algoritmo termina la búsqueda cuando haya ubicado el máximo de DDC estipulados, que corresponden a once en este ejemplo.

Como se mostró...en la sección 4.2..., este sistema requiere tres DDC para lograr la configuración de operación radial base y las tres líneas en las que se presenta la conexión a las subestaciones de distribución corresponden a las protecciones de las cabeceras de los circuitos. Por lo anterior, de los once DDC que se ubican, solo los cinco últimos corresponden a los que se localizan mediante los algoritmos presentados en esta sección. En el Cuadro 9 se presentan los resultados que se obtienen para estos cinco DDC aplicando el algoritmo de búsqueda profunda, descrito en la sección anterior.

Cuadro 9. Resultados de la ubicación de los DDC con la búsqueda voraz en el sistema de ejemplo

Número de DDC ubicado con la búsqueda voraz.	DDC 7	DDC 8	DDC 9	DDC 10	DDC 11
$ENS \left[\frac{MWh}{\text{año}} \right]$ Línea Extremo	55,75 7 1	41,59 10 1	30,51 6 1	25,41 8 1	23,01 4 1
	58,39 10 1	44,67 6 1	32,79 6 2	26,51 5 1	23,01 9 2
	59,27 7 2	45,51 10 2	35,99 4 1	27,51 5 2	23,25 11 1
	63,74 4 1	46,75 9 2	36,49 8 1	28,11 4 1	24,41 5 1
	69,34 4 2	46,95 6 2	37,59 5 1	28,11 9 2	25,15 1 2
	80,91 6 1	50,15 4 1	38,59 5 2	28,35 11 1	25,41 4 2
	83,19 6 2	50,65 8 1	39,19 9 2	30,25 1 2	25,41 5 2
	86,79 9 2	51,75 5 1	39,43 11 1	30,51 4 2	25,41 10 2
	89,19 10 2	52,51 11 1	41,49 1 2	30,51 10 2	25,41 11 2
	107,07 11 1	52,75 5 2	41,59 4 2	30,51 11 2	25,89 6 2
	117,09 8 1	55,75 4 2	41,59 10 2	30,99 6 2	27,33 7 2
	118,19 5 1	55,75 11 2	41,59 11 2	32,43 7 2	31,33 3 2
	119,19 5 2	56,53 1 2	44,31 3 2	36,43 3 2	
	121,93 1 2	58,47 3 2	45,43 7 2		
	122,19 11 2	59,27 7 2			
	124,91 3 2				

La búsqueda profunda se realiza con base en la información contenida en el Cuadro 9, cambiando la ubicación de cada uno de estos DDC según el orden obtenido con

la búsqueda realizada previamente. En este caso, si se probasen todas las posibilidades, se tendrían 16 opciones para el séptimo DDC, 15 para el octavo, 14 para el noveno, 13 para el décimo y 12 para el undécimo. Adicionalmente, para probar todas las posibilidades, se deben realizar los cambios en un solo DDC, luego en dos, luego en tres, luego en cuatro y finalmente en los cinco, ensayando todas las posibles combinaciones. Lo anterior produce demasiadas opciones, aún para este pequeño sistema de ejemplo, por lo cual, se brinda al usuario de la herramienta la posibilidad de estipular, con el parámetro $n1$, la cantidad de opciones de cambio que se probarán en cada DDC, y, con el parámetro $n2$, la cantidad de DDC que se cambiarán de manera simultánea. Por ejemplo, si se continúa el análisis con la búsqueda profunda, teniendo en cuenta los resultados consignados en el Cuadro 9, haciendo $n1 = 3$ y $n2 = 2$, se ensayan, para cada DDC, la posición estipulada por la búsqueda voraz y las opciones siguientes, además, se cambia la ubicación de hasta dos de los cinco DDC que se están localizando. Para este ejemplo se obtiene la siguiente ubicación: L_8 -extremo dos, L_9 -extremo uno, L_2 -extremo dos, L_1 -extremo uno, L_2 -extremo uno, L_3 -extremo uno, L_4 -extremo uno, L_{10} -extremo uno, L_6 -extremo uno, L_8 -extremo uno y L_{11} -extremo uno. Esta ubicación es casi la misma obtenida por la búsqueda voraz, pero ahora no se ubica algún DDC en L_7 -extremo uno y en cambio se tiene un DDC en L_{11} -extremo uno. La solución encontrada con la búsqueda voraz tiene una energía no suministrada de $23,01 \frac{MWh}{año}$, mientras que la solución obtenida complementando la búsqueda con el algoritmo de búsqueda profunda arroja una energía no suministrada de $20,93 \frac{MWh}{año}$, que es un mejor resultado.

A lo largo de este capítulo se ha presentado cada una de las etapas requeridas, según la metodología propuesta, para determinar la cantidad y ubicación de los dispositivos de conmutación necesarios para obtener algún valor en los indicadores de calidad SAIDI, SAIFI, DIU, FIU o ENS según lo establezca el usuario de la herramienta desarrollada, manteniendo las restricciones de operación radial y niveles de tensión eléctrica en todas las barras del sistema.

En el siguiente capítulo se presentan algunos sistemas de prueba y se realizan comparaciones de los resultados obtenidos con publicaciones que presentan otras metodologías y las aplican a los mismos sistemas de distribución. Además se analizan las consecuencias de los cambios en los parámetros de entrada de la metodología propuesta.

5. PRUEBAS, RESULTADOS Y COMPARACIÓN CON OTRAS METODOLOGÍAS

En este capítulo se prueba la metodología propuesta en tres sistemas de distribución de energía eléctrica. Dos de estos sistemas han sido utilizados en las publicaciones registradas en la síntesis presentada...en el capítulo 0..., por lo cual es posible comparar los resultados obtenidos, el tercero es utilizado para probar el funcionamiento del algoritmo para la obtención de la configuración radial base, cuando el SDL tiene más de una línea de enlace.

Los sistemas de prueba utilizados tienen las siguientes características:

- Primer sistema de prueba: Posee una sola línea de enlace y no incluye generación distribuida [5].
- Segundo sistema de prueba: No tiene construcción mallada, se realizan pruebas sin generación distribuida y con un generador distribuido, cambiando su capacidad [8].
- Tercer sistema de prueba: Tiene cinco líneas de enlace y no se incluye generación distribuida [16].

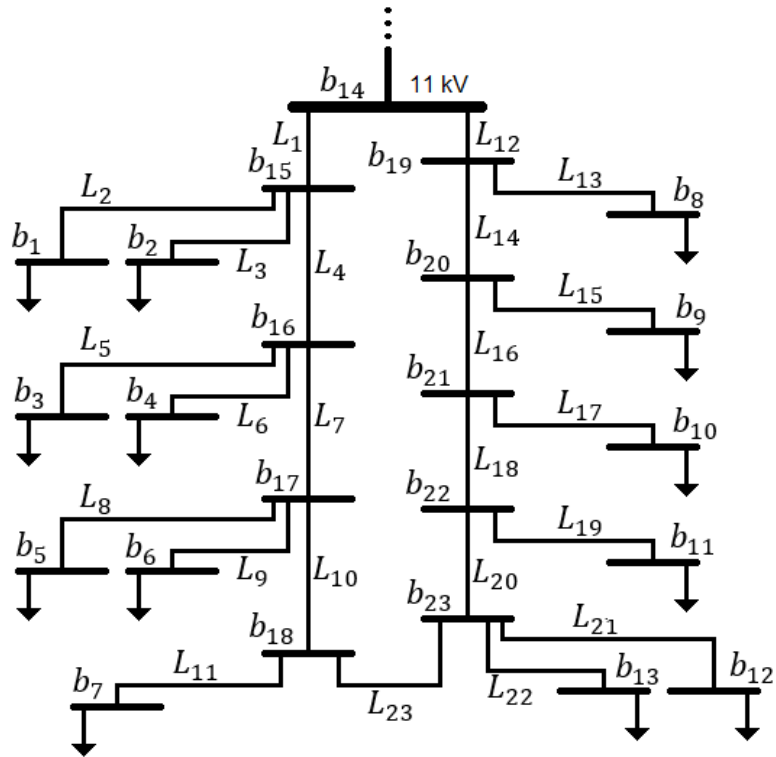
En este capítulo también se prueba el comportamiento de la metodología implementada en función del indicador de calidad seleccionado como referencia.

5.1 SISTEMA DE PRUEBA SIN GENERACIÓN DISTRIBUIDA Y CONSTRUCCIÓN POCO MALLADA, TOMADO DE BIN LIU 2006

El primer sistema de distribución de prueba es utilizado en el trabajo titulado “Optimal Feeder Switches Location Scheme for High Reliability and Least Costs in Distribution System”, que fue publicado en el año 2006 e incluido en la síntesis presentada...en el capítulo 0...como referencia número [5]. En ese trabajo aplican su metodología a un sistema como el presentado en la Figura 17, la cual muestra

un esquema adaptado de los datos presentados en [5], quienes a su vez, han tomado la información de [17] y [18].

Figura 17. Primer sistema de prueba



En el Cuadro 10 se presenta la información de este sistema, en este ejemplo no se considera potencia reactiva en ninguna barra y las tasas de falla son las mismas para todos los tramos de línea, situación que es poco real. La tensión eléctrica en la barra de conexión al STR es 11kV. La información de este sistema se puede cargar en el software creado seleccionando los archivos de los anexos 33 y 34 para las demandas y líneas respectivamente.

Cuadro 10. Información del primer sistema de prueba tomada de [5], [17] y [18]

Información de las barras				Información de las líneas						
Barra	P [kW]	Q [kVAr]	NU	Línea	Barra1	Barra2	R [Ω]	X [Ω]	λ [fallas/año]	r [horas/falla]
1	426,9	0	210	1	14	15	0,135	0,1735	0,13	4
2	426,9	0	210	2	15	1	0,216	0,2776	0,13	4
3	624,7	0	1	3	15	2	0,216	0,2776	0,13	4
4	417,6	0	240	4	15	16	0,1755	0,22555	0,13	4
5	624,7	0	1	5	16	3	0,216	0,2776	0,13	4
6	417,6	0	240	6	16	4	0,135	0,1735	0,13	4
7	408,9	0	15	7	16	17	0,1755	0,22555	0,13	4
8	624,7	0	1	8	17	5	0,1755	0,22555	0,13	4
9	321,3	0	195	9	17	6	0,135	0,1735	0,13	4
10	321,3	0	195	10	17	18	0,216	0,2776	0,13	4
11	321,3	0	195	11	18	7	0,216	0,2776	0,13	4
12	378,6	0	1	12	14	19	0,1755	0,22555	0,13	4
13	321,3	0	195	13	19	8	0,135	0,1735	0,13	4
14	0	0	0	14	19	20	0,135	0,1735	0,13	4
15	0	0	0	15	20	9	0,1755	0,22555	0,13	4
16	0	0	0	16	20	21	0,1755	0,22555	0,13	4
17	0	0	0	17	21	10	0,216	0,2776	0,13	4
18	0	0	0	18	21	22	0,135	0,1735	0,13	4
19	0	0	0	19	22	11	0,1755	0,22555	0,13	4
20	0	0	0	20	22	23	0,216	0,2776	0,13	4
21	0	0	0	21	23	12	0,135	0,1735	0,13	4
22	0	0	0	22	23	13	0,1755	0,22555	0,13	4
23	0	0	0	23	18	23	0,216	0,2776	0,13	4

En [5] expresan que incluyen restricción en el nivel de tensión de los nodos, sin embargo, no queda claro el límite o regulación de tensión admitida. Hacen el comentario de que, considerando las limitaciones prácticas, la ubicación del interruptor que establece la configuración base se restringe a las líneas L_{10} , L_{23} y L_{20} , según el esquema mostrado en la Figura 17. Como resultado de su análisis encuentran que la ubicación óptima de los DDC es la siguiente:

- El dispositivo para obtener configuración base lo ubican en la línea L_{10} .
- Ubican siete dispositivos adicionales en las líneas L_4 , L_7 , L_{14} , L_{16} , L_{18} , L_{20} y L_{23} .

Con esta ubicación obtienen, para el indicador SAIDI, un valor de $3,6806 \frac{\text{horas}}{\text{año} \cdot \text{usuario}}$.

Es importante tener en cuenta que en la metodología presentada en [5], la función

objetivo es el costo total de confiabilidad, consideran las fallas de los interruptores y fallas en los puntos de carga. Como en la metodología propuesta en este trabajo de aplicación el criterio de parada es un valor umbral para alguno de los indicadores de calidad expuestos...en el capítulo 2...para realizar la comparación se solicitó un valor umbral en el indicador SAIDI, ajustado con base en el resultado publicado en [5]. Este ajuste se realiza teniendo en cuenta lo siguiente: la tasa de falla y tiempo medio de reparación de los interruptores son $0,05 \frac{\text{fallas}}{\text{año}}$ y $12 \frac{\text{horas}}{\text{falla}}$, respectivamente; las de los puntos de carga son $0,01 \frac{\text{fallas}}{\text{año}}$ y $10 \frac{\text{horas}}{\text{falla}}$; la cantidad de usuarios en cada barra se muestra en el Cuadro 10 y el número total de usuarios del sistema es 1699. Con base en lo anterior, el ajuste al indicador SAIDI se realiza teniendo en cuenta la ecuación (10), como se describe en el Cuadro 11, en el cual se incluye el efecto de los DDC ubicados en la cabecera del sistema.

$$Efecto_i = \frac{\lambda_i r_i NU_i}{UT} = \frac{(0,05)(12)NU_i}{1699} = \frac{0,6NU_i}{1699} \quad (10)$$

Donde:

$Efecto_i$: Aporte al indicador SAIDI que, con criterio $n - 1$, tienen las fallas del interruptor i .

λ_i : Tasa de falla del interruptor i , para este caso todos tienen la misma, corresponde a $0,05 \frac{\text{fallas}}{\text{año}}$.

r_i : Tiempo medio de reparación de las fallas del interruptor i , para este caso todos tienen la misma, corresponde a $12 \frac{\text{horas}}{\text{falla}}$.

UT : Número total de usuarios conectados al sistema de distribución, para este caso corresponde a 1699.

NU_i : Número de usuarios afectados por las fallas del interruptor i .

Cuadro 11. Ajuste del indicador SAIDI para el primer sistema de prueba

Ubicación del DDC	Efecto de fallas del DDC sobre los puntos de carga	Cuantificación del efecto, ecuación (10) $\left[\frac{\text{horas}}{\text{año} \cdot \text{usuario}} \right]$
L_{10}	Sus fallas se aíslan abriendo los DDC ubicados en las líneas L_7 y L_{23} , afectando a los usuarios conectados a los puntos de carga b_5 , b_6 y b_7 ; la sumatoria de los usuarios conectados a estos puntos es 256.	0,0904
L_4	Teniendo en cuenta que la línea L_7 fue excluida de las opciones para ubicar el DDC que ofrece la configuración base, las fallas del dispositivo en L_4 afectan los puntos de carga b_1 , b_2 , b_3 , b_4 , b_5 y b_6 ; la sumatoria de los usuarios conectados a estos puntos es 902.	0,3185
L_7	Las fallas de este dispositivo pueden ser aisladas abriendo el que se encuentra en L_4 , para alimentar los puntos b_1 y b_2 . Por lo tanto, se ven afectados los puntos de carga b_3 , b_4 , b_5 y b_6 ; la sumatoria de los usuarios conectados a estos puntos es 482.	0,1702
L_{14}	Teniendo en cuenta que las líneas L_{16} y L_{18} fueron excluidas de las opciones para ubicar el DDC que ofrece la configuración base, las fallas del dispositivo en L_{14} afectan los puntos de carga b_8 , b_9 , b_{10} y b_{11} ; la sumatoria de los usuarios conectados a estos puntos es 586.	0,2069
L_{16}	Sus fallas se aíslan abriendo los DDC ubicados en las líneas L_{14} y L_{20} , afectando a los usuarios conectados a los puntos de carga b_9 , b_{10} y b_{11} ; la sumatoria de los usuarios conectados a estos puntos es 585.	0,2066

Cuadro 11. (Continuación)

Ubicación del DDC	Efecto de fallas del DDC sobre los puntos de carga	Cuantificación del efecto, ecuación (5) $\left[\frac{\text{horas}}{\text{año} \cdot \text{usuario}} \right]$
L_{18}	Sus fallas se aíslan abriendo los DDC ubicados en las líneas L_{16} y L_{20} , afectando a los usuarios conectados a los puntos de carga b_{10} y b_{11} ; la sumatoria de los usuarios conectados a estos puntos es 390.	0,1377
L_{20}	Sus fallas se aíslan abriendo los DDC ubicados en las líneas L_{18} y L_{23} , afectando a los usuarios conectados a los puntos de carga b_{11} , b_{12} y b_{13} ; la sumatoria de los usuarios conectados a estos puntos es 391.	0,1381
L_{23}	Sus fallas se aíslan abriendo el DDC ubicado en la línea L_{20} , afectando a los usuarios conectados a los puntos de carga b_7 , b_{12} y b_{13} ; la sumatoria de los usuarios conectados a estos puntos es 211.	0,0745
L_1	Se ven afectados los usuarios conectados a los puntos de carga b_1 , b_2 , b_3 , b_4 , b_5 y b_6 ; la sumatoria de los usuarios conectados a estos puntos es 902.	0,3185
L_{12}	Abriendo el DDC ubicado en la línea L_{20} , se ven afectados los usuarios conectados a los puntos de carga b_8 , b_9 , b_{10} y b_{11} ; la sumatoria de los usuarios conectados a estos puntos es 586.	0.2069
Total		1,8683

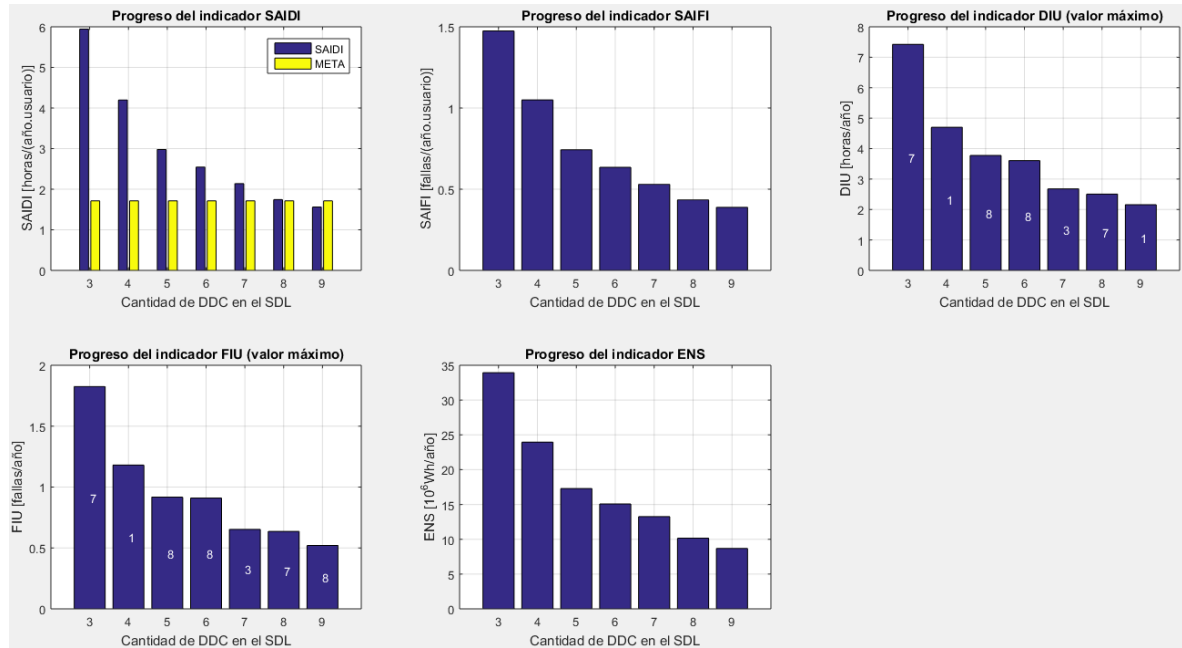
Al total encontrado con el procedimiento descrito en el Cuadro 11 es necesario sumarle $0,1 \frac{\text{horas}}{\text{año} \cdot \text{usuario}}$, correspondiente a las fallas en los puntos de carga. Por lo anterior, teniendo en cuenta que el resultado obtenido en [5] fue $3,6806 \frac{\text{horas}}{\text{año} \cdot \text{usuario}}$, el indicador SAIDI que se ingresa como umbral, para la metodología aquí propuesta, es $1,7123 \frac{\text{horas}}{\text{año} \cdot \text{usuario}}$, que equivale a $3,6806 - 1,9683$. Sin embargo, este valor tiene incertidumbre, ya que al no tener claridad sobre el extremo en el que ubican los DDC en las respectivas líneas, no se sabe que ocurre con las fallas en esas líneas.

Con el método propuesto, solicitando un SAIDI de $1,7123 \frac{\text{horas}}{\text{año} \cdot \text{usuario}}$, una regulación de tensión máxima de 5% y ajustando el error para la simulación de Montecarlo en 0,0001, se obtiene, después de 1 minuto y 39 segundos, que deben ubicarse nueve DDC, de la siguiente manera:

- Uno para conseguir la configuración base del sistema en la línea L_{10} , extremo uno.
- Dos dispositivos de protección en las líneas L_1 y L_{12} , ambos en el extremo uno. Estos DDC corresponden a las protecciones ubicados en las cabeceras de las conexiones al sistema de transmisión.
- Seis en los siguientes puntos: L_{18} -extremo dos, L_4 -extremo dos, L_{20} -extremo dos, L_{16} -extremo uno, L_7 -extremo uno y L_{23} -extremo dos.

Con estos DDC y realizando el análisis sin criterio $n - 1$, se obtiene un indicador SAIDI de $1,56199 \frac{\text{horas}}{\text{año} \cdot \text{usuario}}$, que es menor al valor solicitado. En la Figura 18 se presenta la evolución que tienen los indicadores de calidad a medida que se van incluyendo los DDC, en el orden indicado anteriormente, este registro inicia con los dispositivos que permiten la operación radial y las protecciones de las cabeceras instaladas, ya que de otra manera no es posible la operación del sistema.

Figura 18. Resultados de indicadores de calidad para el primer sistema de prueba



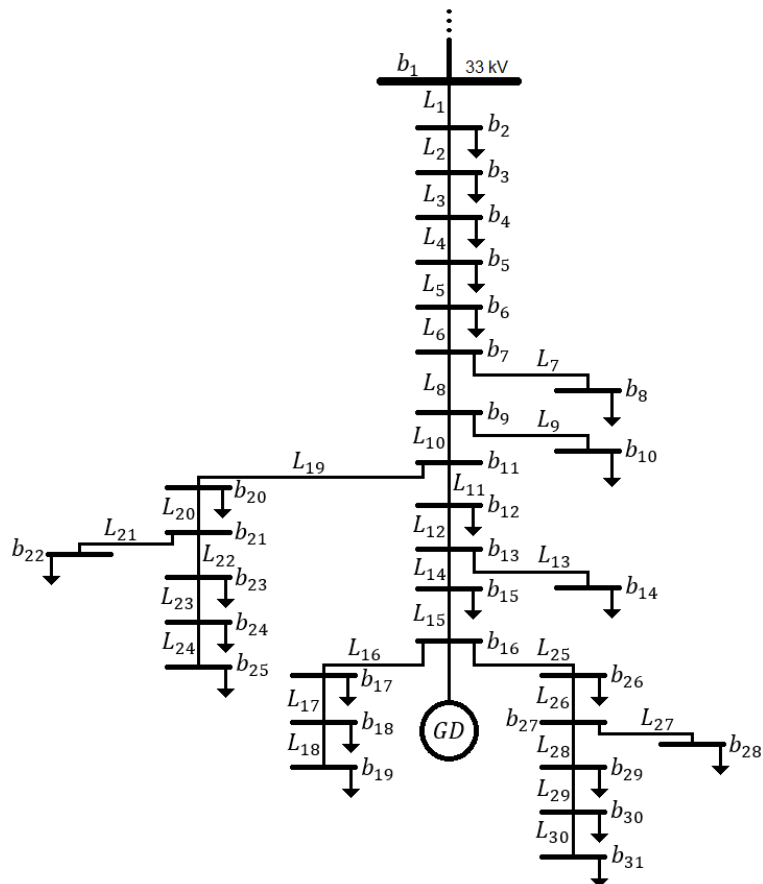
Teniendo en cuenta la incertidumbre en el indicador solicitado, estas ubicaciones son consistentes con las encontradas en [5] ya que para que las soluciones sean idénticas solo falta la ubicación del DDC en la línea L_{14} , que es el siguiente en ser ubicado si se realiza el análisis solicitando un valor umbral en el indicador SAIDI de $1,5 \frac{\text{horas}}{\text{año} \cdot \text{usuario}}$.

Si se realiza el análisis con criterio $n - 1$, se obtiene la misma ubicación para los DDC con un valor en el indicador SAIDI de $1,5551 \frac{\text{horas}}{\text{año} \cdot \text{usuario}}$, que es un resultado equivalente al obtenido sin criterio $n - 1$ y cuya diferencia obedece a los métodos empleados para el cálculo de los indicadores de calidad. Sin embargo, el tiempo requerido para encontrar los resultados, cuando el análisis se realiza con criterio $n - 1$, es de 17 segundos, que corresponde al 17,2% del tiempo empleado para el análisis sin criterio $n - 1$.

5.2 SISTEMA DE PRUEBA CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA Y CONSTRUCCIÓN RADIAL, TOMADO DE HAMID FALAGHI 2009

El segundo sistema de distribución en el que se prueba la metodología propuesta y se comparan los resultados obtenidos es el utilizado en el trabajo titulado “Ant Colony Optimization-Based Method for Placement of Sectionalizing Switches in Distribution Networks Using a Fuzzy Multiobjective Approach”, que fue publicado en el año 2009 e incluido en la síntesis presentada...en el capítulo 0...como referencia número [8]. En ese trabajo aplican su metodología a un sistema como el presentado en la Figura 19, la cual muestra un esquema adaptado de los datos presentados en [17] y [19], que fueron las fuentes de información de la publicación [8].

Figura 19. Segundo sistema de prueba



Este sistema no presenta construcción mallada ya que la metodología expuesta en [8] no incluye esta condición, por lo tanto no se requieren dispositivos de conmutación para tener la configuración base del sistema y la reconfiguración, sin presencia de generación distribuida, se limita al aislamiento de la falla.

Al respecto de la información del sistema, existen inconsistencias entre lo publicado en el artículo de la referencia [8], en el cual presentan la metodología para la ubicación de DDC con la que se realiza la comparación, y en el de la referencia [17], que es del que tomaron los datos del sistema de prueba. Las diferencias son las siguientes:

- En [8] consideran que la potencia activa total demandada en los puntos de carga es 4,8136 MW con un factor de potencia de 0,9, pero, la suma correspondiente a los datos publicados en [17] es 4,9155 MW sin considerar potencia reactiva en todas las barras del sistema.
- El esquema del sistema presentado en [8] repite, según la nomenclatura allí utilizada, las cargas LP19, LP20, LP21, LP22 y LP23, que realmente, según lo publicado en [17], corresponden a las cargas LP36, LP37, LP38, LP39 y LP40.
- Las cargas LP28 y LP30 se encuentran trocadas.

Al respecto de estas diferencias en la información, se supone que se trata solo de un error en la figura y los datos que utilizaron son los publicados en [17].

Para el cálculo de la energía no suministrada, en [8] tienen en cuenta el tiempo requerido para que los dispositivos de conmutación reconfiguren el sistema para reestablecer el servicio a los usuarios que sea posible, una vez se ha aislado la falla. Este tiempo no se incluye en la metodología propuesta en este trabajo, ya que se considera que los dispositivos operarán de modo automático, tardando menos de tres minutos en lograr la configuración adecuada y, según la resolución CREG 015 de 2018, las interrupciones del servicio que duren tres minutos o menos no se tienen en cuenta para el cálculo de los indicadores de calidad media e individual de los que trata este trabajo. Por lo anterior, y teniendo en cuenta las inconsistencias en la

información presentada en [8] y [17], se esperan diferencias en la energía no suministrada obtenida en [8] y la obtenida en este trabajo.

En el Cuadro 12 se presenta la información del sistema, en este ejemplo no se considera potencia reactiva en ninguna barra y, debido a que es mucho más completa, se utiliza la información publicada en [17] y [19]. La tensión eléctrica en la única barra de conexión al STR, la uno, es 33 kV. La información de este SDL se puede cargar en el software creado seleccionando los archivos de los anexos 35, 36 y 37 para las demandas, las líneas y la GD respectivamente.

Cuadro 12. Información del segundo sistema de prueba

Información de las barras				Información de las líneas						
Barra	P [kW]	Q [kVAr]	NU	Línea	Barra1	Barra2	R [Ω]	X [Ω]	$\lambda \left[\frac{\text{fallas}}{\text{año}} \right]$	$r \left[\frac{\text{horas}}{\text{falla}} \right]$
1	0	0	0	1	1	2	0,7196	0,2436	0,182	8
2	165,9	0	147	2	2	3	0,6425	0,2175	0,1625	8
3	180,8	0	126	3	3	4	0,4112	0,1392	0,104	8
4	250,1	0	1	4	4	5	0,2313	0,0783	0,0585	8
5	263,3	0	1	5	5	6	0,4112	0,1392	0,104	8
6	207	0	132	6	6	7	0,6425	0,2175	0,1625	8
7	0	0	0	7	7	8	0,1542	0,0522	0,039	8
8	165,9	0	147	8	7	9	0,4112	0,1392	0,104	8
9	0	0	0	9	9	10	0,19275	0,06525	0,04875	8
10	305,7	0	1	10	9	11	0,2313	0,0783	0,0585	8
11	0	0	0	11	11	12	0,8224	0,2784	0,208	8
12	155,4	0	79	12	12	13	0,7196	0,2436	0,182	8
13	0	0	0	13	13	14	0,1542	0,0522	0,039	8
14	283,1	0	1	14	14	15	0,8995	0,3045	0,2275	8
15	158,5	0	76	15	15	16	0,4112	0,1392	0,104	8
16	0	0	0	16	16	17	0,7196	0,2436	0,182	8
17	155,4	0	79	17	17	18	0,8224	0,2784	0,208	8
18	158,5	0	76	18	18	19	0,6425	0,2175	0,1625	8
19	250,1	0	1	19	11	20	0,8224	0,2784	0,208	8
20	255,4	0	79	20	20	21	0,4112	0,1392	0,104	8
21	0	0	0	21	21	22	0,2056	0,0696	0,052	8
22	192,9	0	1	22	21	23	0,7196	0,2436	0,182	8
23	158,5	0	76	23	23	24	0,6425	0,2175	0,1625	8
24	250,1	0	1	24	24	25	0,8224	0,2784	0,208	8
25	263,3	0	1	25	16	26	0,7196	0,2436	0,182	8
26	155,4	0	79	26	26	27	0,6425	0,2175	0,1625	8
27	0	0	0	27	27	28	0,19275	0,06525	0,04875	8
28	192,9	0	1	28	27	29	0,4112	0,1392	0,104	8
29	283,1	0	1	29	29	30	0,8224	0,2784	0,208	8
30	158,5	0	76	30	30	31	0,7196	0,2436	0,182	8
31	305,7	0	1							

Para este sistema se presentan dos escenarios, uno sin generación distribuida y otro con generación distribuida, los cuales son analizados en las siguientes secciones.

5.2.1 Sistema de prueba construido radialmente sin generación distribuida.

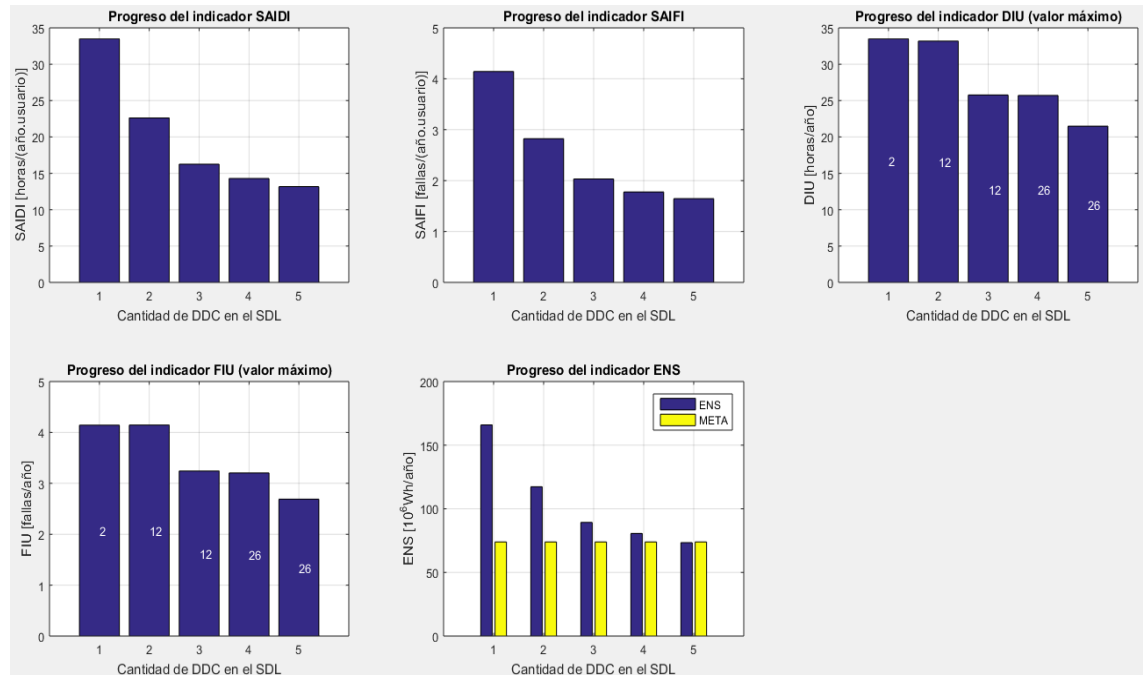
En este caso no se considera la existencia de la GD mostrada en la Figura 19. Según los resultados reportados en [8], con una restricción de porcentaje de regulación de tensión de 5%, tienen una energía no suministrada de $62,328 \frac{MWh}{año}$ con cuatro dispositivos de conmutación ubicados, según el esquema presentado en la Figura 19 y la información del Cuadro 12, en los siguientes puntos: línea 11-barra1, línea 16-barra1, línea 19-barra1 y línea 25-barra1.

Debido a las diferencias en la información descritas anteriormente, para determinar la energía no suministrada que se debe ingresar como valor umbral de referencia para la metodología planteada en este trabajo de aplicación y realizar la comparación de métodos para determinar la cantidad y ubicación de dispositivos, se calculó la energía no suministrada en el sistema de prueba con la ubicación de los dispositivos reportada en [8] y el algoritmo descrito...en la sección 4.3.3..., obteniendo $73,4408 \frac{MWh}{año}$.

Por lo anterior, el indicador de referencia ingresado, a la herramienta aquí desarrollada, es la energía no servida de $74 \frac{MWh}{año}$. Realizando el análisis para una restricción del 5% en la regulación de tensión y un error máximo de 0,0001 en la simulación de Monte Carlo, después de 4 minutos y 58 segundos se obtiene la misma cantidad y ubicación de los dispositivos de conmutación que en [8], con el siguiente orden: L_{11} -extremo uno, L_{19} -extremo uno, L_{25} -extremo uno y L_{16} -extremo uno. Con esta ubicación se tiene una energía no suministrada de $73,4408 \frac{MWh}{año}$, que es menor al valor solicitado. La evolución de los indicadores de calidad con cada dispositivo de conmutación ubicado, después de los que entregan la configuración base y las protecciones principales, se muestra en la Figura 20, para la cual se debe

tener en cuenta que el primer DDC ubicado corresponde a la protección eléctrica ubicada en la barra de conexión al STR.

Figura 20. Resultados de indicadores de calidad para el segundo sistema de prueba sin generación distribuida



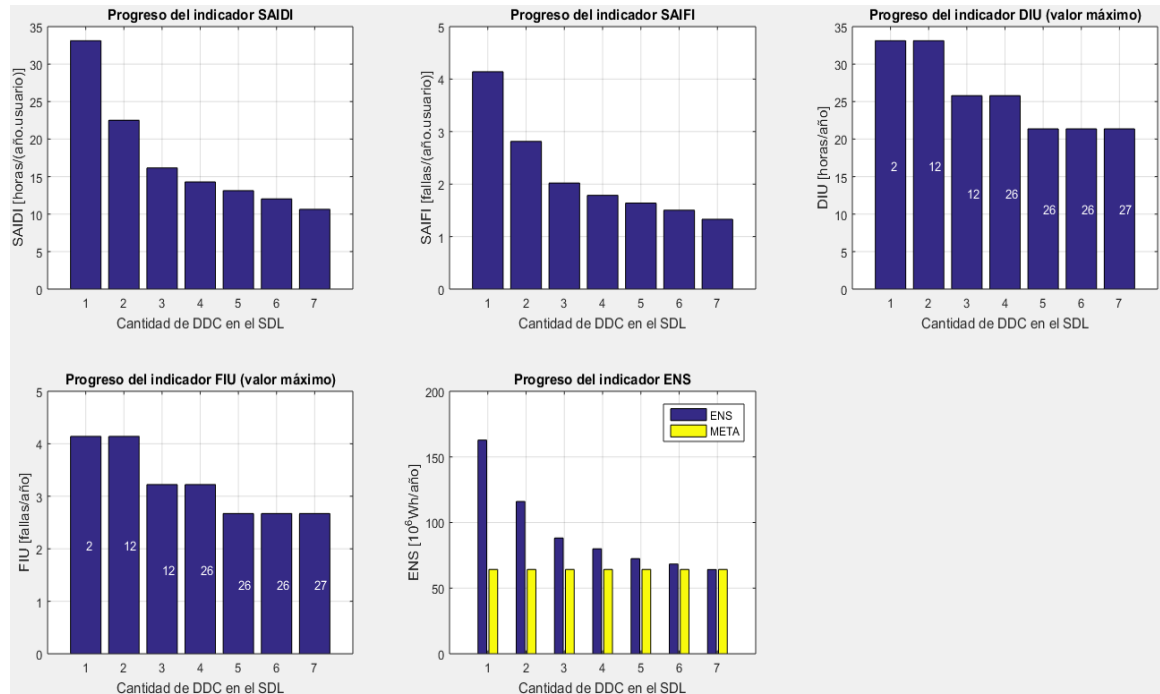
Si se realiza el análisis con criterio $n - 1$, se obtiene la misma ubicación para los DDC con un valor en el indicador ENS de $72,4699 \frac{MWh}{año}$, que es un resultado equivalente al obtenido sin criterio $n - 1$ y cuya diferencia obedece a los métodos empleados para el cálculo de los indicadores de calidad. Sin embargo, el tiempo requerido para encontrar los resultados, cuando el análisis se realiza con criterio $n - 1$, es de 8 segundos, que corresponde al 2,7% del tiempo empleado para el análisis sin criterio $n - 1$.

5.2.2 Sistema de prueba construido radialmente con generación distribuida.

Para este caso se considera la existencia del generador distribuido mostrado en la Figura 19, con una capacidad de 1 MVA. Según la información presentada en [8], la ubicación óptima de seis DDC es la siguiente: línea 5-barra1, línea 11-barra1, línea 14-barra2, línea 16-barra1, línea 19-barra1 y línea 26-barra1. Para este escenario, la energía no suministrada en el sistema de prueba, calculada con el algoritmo descrito...en la sección 4.3.4..., es $64,1138 \frac{MWh}{año}$.

Por lo anterior, el indicador de referencia ingresado a la herramienta aquí desarrollada es la energía no suministrada de $64,2 \frac{MWh}{año}$. Después de realizar el análisis para una restricción del 5% en la regulación de tensión, con criterio $n - 1$ y con búsqueda profunda (con $n1 = 2$ $n2 = 2$), se concluye (después de 41 segundos) que se requieren, además de la protección eléctrica de la barra de conexión al STR, seis dispositivos de conmutación, en los siguientes puntos: L_{11} -extremo uno, L_{19} -extremo uno, L_{26} -extremo uno, L_{16} -extremo uno, L_{14} -extremo dos y L_5 -extremo uno. Con esta ubicación se tiene una energía no suministrada de $64,1138 \frac{MWh}{año}$, que es menor al valor solicitado. La evolución de los indicadores de calidad con cada dispositivo de conmutación ubicado, después de la protección principal, se muestra en la Figura 21, en la cual hay que tener en cuenta que el primer DDC ubicado corresponde a la protección eléctrica ubicada en la barra de conexión al STR. La solución encontrada es exactamente la misma que la publicada en [8].

Figura 21. Resultados de indicadores de calidad para el segundo sistema de prueba con generación distribuida



Para este caso, si la búsqueda se realiza solo mediante el algoritmo voraz, se obtiene una solución inferior, con un dispositivo de conmutación ubicado en un punto distinto, en L_{25} en vez de L_{26} . Con este hecho se confirma que la búsqueda voraz puede converger a una solución que no es óptima global, por lo cual es necesario complementarla con la búsqueda profunda para refinar el resultado.

Para el segundo sistema de prueba, además de los casos analizados hasta ahora, en el artículo de la referencia [8] realizan pruebas considerando diferentes ponderaciones a sus dos objetivos, el mejoramiento de la calidad del servicio y la minimización de la cantidad de DDC, y cambiando la capacidad del generador distribuido. La descripción de las condiciones de esos casos y los resultados obtenidos, tanto en [8] como mediante la aplicación de la metodología propuesta en este trabajo de aplicación, se muestran en el Cuadro 13. Para poder comparar la energía no suministrada, se muestra ese indicador para las ubicaciones de los DDC

reportadas en [8] con criterio $n - 1$, mediante el algoritmo descrito...en la sección 4.3.4...

Para la metodología propuesta en este trabajo se ingresan las siguientes condiciones:

- Un valor de cero para la energía no servida y se limita la cantidad de dispositivos de conmutación a la reportada en [8] más uno, que corresponde a la protección ubicada en la cabecera del sistema. Con estos criterios de parada se busca determinar la mejor ubicación posible, con respecto a la ENS, para la cantidad de DDC solicitada.
- Restricción del 5% en la regulación de tensión.
- La evaluación de los indicadores se realiza con criterio $n - 1$.
- Se considera complementar la localización con el algoritmo de búsqueda profunda.

Cuadro 13. Resultados para varios casos de estudio publicados en [8]

Caso	$S_{m\acute{a}x. GD}$ [MVA]	Cantidad de DDC ubicados	Solución reportada en [8]		Solución aplicando la metodología propuesta en este trabajo			
			Ubicación ($L_i^{Extremo}$)	ENS [$\frac{MWh}{a\tilde{n}o}$]	Ubicación ($L_i^{Extremo}$)	ENS [$\frac{MWh}{a\tilde{n}o}$]	Mejoría en ENS [%]	Tiempo (min: s)
1	1	2	L_{12}^1 L_{19}^1	90,1396	L_{11}^1 L_{19}^1	88,1919	2,1608	00: 04
2	1	4	L_{11}^1 L_{14}^2 L_{19}^1 L_{26}^1	73,213	L_{14}^1 L_{19}^1 L_{26}^1 L_{16}^1	70,4045	3,8361	00: 13
3	1	12	L_5^1 L_7^1 L_{10}^1 L_{11}^1 L_{14}^1 L_{15}^2 L_{16}^1 L_{19}^1 L_{22}^1 L_{25}^1 L_{26}^1 L_{29}^1	56,956	L_{11}^1 L_{19}^1 L_{25}^1 L_{16}^1 L_{14}^1 L_5^1 L_{22}^1 L_{29}^1 L_9^1 L_7^1 L_{26}^1 L_{15}^2	55,8112	2,01	01: 55
4	2	6	L_5^1 L_{11}^1 L_{15}^2 L_{16}^1 L_{19}^1 L_{26}^1	46,588	L_{11}^1 L_6^1 L_{15}^2 L_{16}^1 L_{25}^1 L_{20}^1	45,5877	2,1471	04: 20
5	3	7	L_5^1 L_{10}^1 L_{11}^1 L_{15}^2 L_{16}^1 L_{22}^1 L_{25}^1	33,541	L_{11}^1 L_{15}^2 L_{10}^1 L_{23}^1 L_{26}^1 L_6^1 L_{16}^1	33,3882	0,4556	03: 13
6	4	6	L_8^1 L_{10}^2 L_{11}^1 L_{15}^2 L_{16}^1 L_{26}^1	30,59	L_{11}^1 L_{10}^2 L_{15}^2 L_6^1 L_{16}^1 L_{26}^1	28,8325	5,7453	00: 21

Los parámetros, opciones de cambio ($n1$) y máxima cantidad de DDC que se cambian simultáneamente ($n2$), de la búsqueda profunda requeridos para obtener los resultados registrados en el Cuadro 13 son los siguientes:

Primer caso: $n1 = 0$ $n2 = 0$
 Segundo caso: $n1 = 2$ $n2 = 2$
 Tercer caso: $n1 = 1$ $n2 = 2$

Cuarto caso: $n1 = 4$ $n2 = 3$
 Quinto caso: $n1 = 7$ $n2 = 2$
 Sexto caso: $n1 = 2$ $n2 = 1$

Los casos en los que $n1$ y $n2$ son iguales a cero, no requieren búsqueda profunda para la solución presentada.

Para los análisis, cuyos resultados se presentan en el Cuadro 13, los parámetros n_1 y n_2 se ajustaron, desde cero, hasta obtener resultados iguales o mejores a los reportados en [8], esto se hizo con el ánimo de probar el complemento que la búsqueda profunda realiza al algoritmo voraz. Con los resultados anteriores se confirma que la búsqueda voraz debe ser mejorada con la búsqueda profunda implementada en este trabajo de aplicación, llegando a soluciones muy buenas, para este caso de estudio son todas mejores que las reportadas en [8], aun cuando estas diferencias pueden deberse a la discrepancia de información descrita al inicio de...la sección 5.2... Debe tenerse en cuenta que, si se incrementan los valores de los parámetros n_1 y n_2 , es posible encontrar una mejor solución, aunque el tiempo de cómputo se incrementa drásticamente.

También se observa que los incrementos en el número de dispositivos de conmutación y en la capacidad de la generación distribuida permiten mejorar la calidad del servicio, esto se debe a que ambos aspectos incrementan el número de configuraciones del sistema que permiten brindar suministro a los usuarios después de aislar alguna falla.

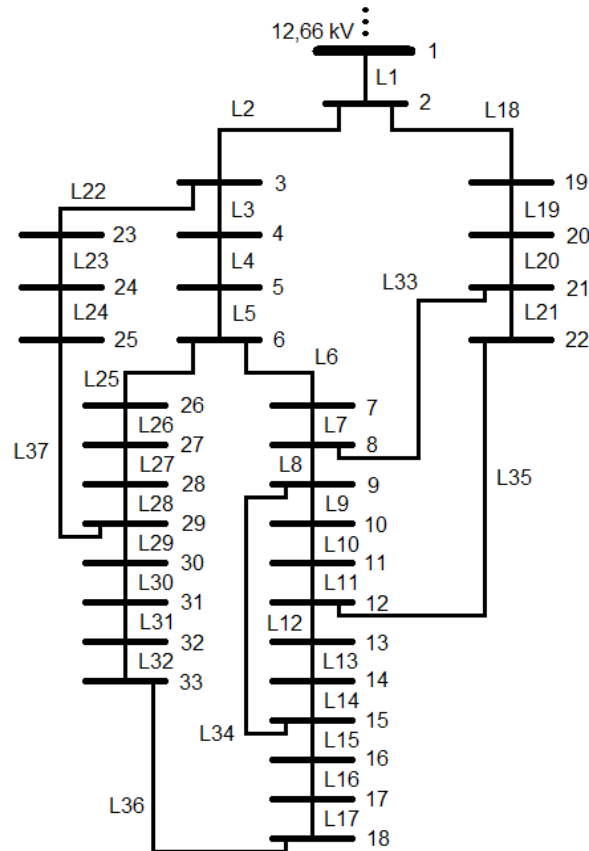
5.3 SISTEMA DE PRUEBA SIN GENERACIÓN DISTRIBUIDA Y CONSTRUCCIÓN BASTANTE MALLADA, TOMADO DE MESUT 1989

En esta sección se analizan las consecuencias de la restricción de regulación de tensión y el indicador de calidad seleccionado como referencia. Para realizar las pruebas correspondientes se utiliza el sistema mostrado en la Figura 22, cuyos datos básicos se tomaron de [16].

Este sistema se seleccionó para las pruebas de esta sección por presentar una construcción predominantemente mallada. Esta característica no ha sido muy estudiada en las publicaciones encontradas, por ejemplo: el sistema de prueba de la sección anterior no posee ninguna línea de enlace y el presentado...en la sección 5.1...solo requiere ubicar un dispositivo de conmutación para obtener la

configuración radial base, por lo cual no ofrece mucha dificultad en la ubicación de los DDC iniciales, por la misma razón, tampoco se tiene mucha versatilidad en las opciones de configuración para alimentar las barras de carga, después de presentarse alguna falla.

Figura 22. Tercer sistema de prueba



Este sistema tiene solo una barra de conexión al STR, que es la barra 1, la tensión en esa barra es de 12660 V. En el Cuadro 14 se presenta la información de este sistema, esos datos, tal como se mencionó anteriormente, son tomados de [16], sin embargo, debido a que en esa publicación no incluyen la cantidad de usuarios en cada barra, la frecuencia de falla y el tiempo medio de reparación, la frecuencia de falla y el tiempo medio de reparación se asignaron al azar y el número de usuarios en cada barra se asignó de manera proporcional a la potencia demandada. La

información de este SDL se puede cargar en el software creado seleccionando los archivos de los anexos 38 y 39 para las demandas y las líneas respectivamente.

Cuadro 14. Información del tercer sistema de prueba

Información de las barras				Información de las líneas						
Barra	P [kW]	Q [kVAr]	NU	Línea	Barra1	Barra2	R [Ω]	X [Ω]	λ [fallas] año	r [horas] [falla]
0	0	0	0	1	1	2	0,0922	0,047	0,3	2
2	100	60	7	2	2	3	0,493	0,2511	0,9	4
3	90	40	6	3	3	4	0,366	0,1864	1,2	2
4	120	80	8	4	4	5	0,3811	0,1941	1	8
5	60	30	4	5	5	6	0,819	0,707	0,6	2
6	60	20	4	6	6	7	0,1872	0,6188	1	5
7	200	100	14	7	7	8	0,7114	0,2351	0,5	4
8	200	100	14	8	8	9	1,03	0,74	0,4	2
9	60	20	4	9	9	10	1,044	0,74	0,8	3
10	60	20	4	10	10	11	0,1966	0,065	0,6	2
11	45	30	3	11	11	12	0,3744	0,1238	0,3	3
12	60	35	4	12	12	13	1,468	1,155	0,5	3
13	60	35	4	13	13	14	0,5416	0,7129	0,6	8
14	120	80	8	14	14	15	0,591	0,526	0,2	5
15	60	10	4	15	15	16	0,7463	0,545	0,4	2
16	60	20	4	16	16	17	1,289	1,721	0,7	2
17	60	20	4	17	17	18	0,732	0,574	0,9	4
18	90	40	6	18	2	19	0,164	0,1565	0,6	2
19	90	40	6	19	19	20	1,5042	1,3554	0,3	4
20	90	40	6	20	20	21	0,4095	0,4784	0,6	2,5
21	90	40	6	21	21	22	0,7089	0,9373	0,4	3,2
22	90	40	6	22	3	23	0,4512	0,3083	0,5	3
23	90	50	6	23	23	24	0,898	0,7091	0,3	2
24	420	200	28	24	24	25	0,896	0,7011	0,7	4
25	420	200	28	25	6	26	0,203	0,1034	0,2	2
26	60	25	4	26	26	27	0,2842	0,1447	0,4	2,1
27	60	25	4	27	27	28	1,059	0,9337	0,7	2,8
28	60	20	4	28	28	29	0,8042	0,7006	0,9	2,7
29	120	70	2	29	29	30	0,5075	0,2585	0,2	6
30	200	600	14	30	30	31	0,9744	0,963	0,9	2
31	150	70	10	31	31	32	0,3105	0,3619	0,5	3,4
32	210	100	15	32	32	33	0,341	0,5302	0,7	6
33	60	40	4	33	21	8	2	2	0,4	3
				34	9	15	2	2	0,2	3,1
				35	12	22	2	2	0,2	2
				36	18	33	0,5	0,5	0,4	1,5
				37	25	29	0,5	0,5	0,15	1

5.3.1 Ubicación de los dispositivos de conmutación y calidad del servicio en función de la restricción de regulación de tensión. Para observar el efecto que tiene la restricción de regulación de tensión sobre la ubicación de los dispositivos de conmutación se aplicó la metodología propuesta al tercer sistema de prueba con los siguientes parámetros de entrada:

- La energía no suministrada como indicador de referencia, solicitando un valor máximo de cero. Con este parámetro se establece la cantidad máxima de DDC como criterio de parada.
- Ubicación de máximo diez dispositivos de conmutación. Esto incluye los cinco requeridos para obtener la configuración base, según la ecuación (6), y la protección eléctrica ubicada en la barra de conexión al STR.
- Los indicadores de calidad son calculados con criterio $n - 1$.
- El algoritmo voraz es complementado con la búsqueda profunda, con:
 $n1 = 3 \quad n2 = 4$.

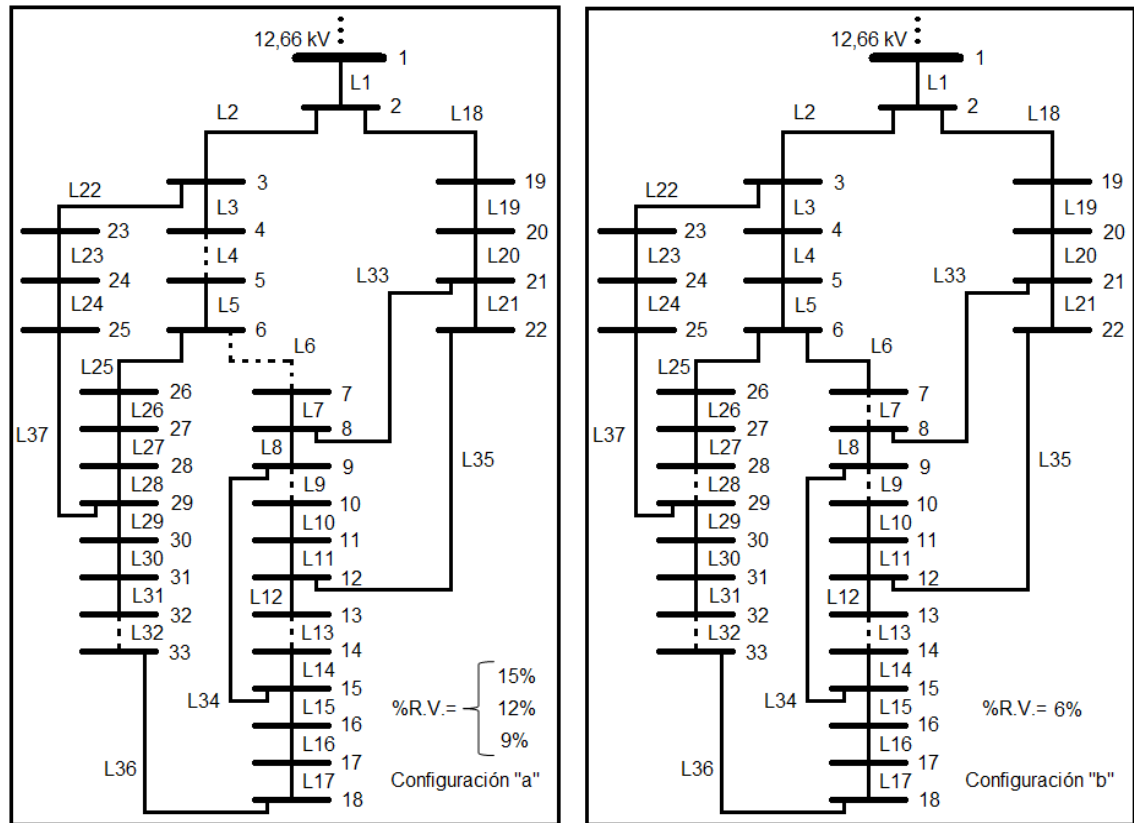
Los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 15.

Cuadro 15. Repercusión de la restricción de regulación de tensión

Regulación de tensión máxima	Ubicación ($L_i^{Extremo}$)	ENS $\left[\frac{MWh}{año}\right]$	Tiempo (min:s)
15%	L_{32}^1 L_6^1 L_4^1 L_{13}^1 L_9^1 L_1^1 L_{18}^1 L_{28}^2 L_8^1 L_2^1	63,9145	01: 29
12%	L_{32}^1 L_6^1 L_4^1 L_{13}^1 L_9^1 L_1^1 L_{18}^1 L_{28}^2 L_8^1 L_2^1	63,9145	01: 29
9%	L_{32}^1 L_6^1 L_4^1 L_{13}^1 L_9^1 L_1^1 L_{18}^1 L_{28}^2 L_{33}^2 L_2^1	65,4055	01: 21
6%	L_{32}^1 L_7^1 L_{13}^1 L_{28}^1 L_9^1 L_1^1 L_{18}^1 L_3^1 L_{24}^1 L_8^1	67,459	03: 43
3%	Para este caso no es posible cumplir la restricción impuesta, ya que la mínima regulación de tensión que se logra, en condiciones normales de todos los componentes del sistema y alimentando todas las cargas, es 5,87129%. Esta regulación se obtiene abriendo las líneas: L_7 , L_{14} , L_{32} , L_{28} y L_9 .		06: 18

Los primeros cinco DDC ubicados deben operar en estado abierto para lograr la operación radial del sistema, esto si todos los elementos se encuentran en condiciones normales de operación. En la Figura 23 se muestran las configuraciones base obtenidas en las pruebas realizadas en esta sección, en esa figura, las líneas punteadas corresponden a aquellas en las que se ubicó alguno de los DDC requeridos para obtener la configuración base. De los casos de prueba relacionados en el Cuadro 15, para los tres primeros, los cinco dispositivos iniciales tienen la misma ubicación, consiguiendo la configuración mostrada en la parte izquierda de la Figura 23. En el cuarto caso, como consecuencia de una mayor restricción en el nivel de tensión, cambia su ubicación, obteniéndose la configuración mostrada en la parte derecha de la Figura 23. En todo caso se mantiene la operación radial del sistema.

Figura 23. Configuraciones base para el tercer sistema de prueba con distintos %R.V. de referencia, las líneas a trazos son aquellas inhabilitadas por algún DDC



Al respecto de las variaciones obtenidas en los valores del indicador de calidad, los resultados anteriores son coherentes ya que indican que a medida que se disminuye la regulación de tensión máxima permitida, aumenta la energía no suministrada. Este efecto se debe a que algunas de las configuraciones, con que se puede brindar suministro a los usuarios mientras se reparan las fallas, pierden factibilidad porque ocasionan que la tensión eléctrica caiga demasiado, incumpliendo la restricción impuesta. La obtención de la misma solución para los casos en que la restricción de regulación de tensión es de 15% y 12%, se debe a que ninguna de las configuraciones obtenidas, para las ubicaciones de los DDC encontradas, producen una regulación de tensión mayor a 12%.

Además, se nota que el algoritmo implementado cambia la localización de algunos dispositivos, ya que encuentra mejor calidad del servicio con esas ubicaciones, para la nueva restricción.

Esta prueba también permite observar las ventajas del algoritmo implementado para la ubicación de los dispositivos de conmutación que entregan la configuración base del sistema, a continuación se profundiza este concepto.

5.3.1.1 La metodología propuesta como herramienta para minimizar pérdidas y regulación de tensión. Es importante resaltar que si se introduce una restricción operativa menor a la que el sistema analizado puede tener, por ejemplo cero, la función “ubicacion1”, descrita...en la sección 4.2..., se convierte en una herramienta de búsqueda exhaustiva de la configuración con menor regulación de tensión posible. Debido a que en la función “flujos” también se calcula la eficiencia y a que, como consecuencia de la imposibilidad de cumplir la restricción, todas las posibles configuraciones son evaluadas, se obtiene también la configuración con menos pérdidas.

Lo anterior se prueba comparando los resultados obtenidos aquí con los reportados en [15], trabajo en el cual fue analizado el tercer sistema de pruebas para dos condiciones de demanda y parámetros de líneas diferente, buscando, de manera exhaustiva, las configuraciones con mayor eficiencia y con menor porcentaje de regulación de tensión. Algunos de los datos de las potencias demandadas, las resistencias y reactancias de las líneas son distintos a los presentados en el Cuadro 14, esto se debe a que la fuente usada en [15] presenta esos errores. Los resultados obtenidos, tanto en [15] como en el presente trabajo, se muestran en el Cuadro 16.

Cuadro 16. Comparación de resultados en búsqueda de mejor eficiencia y regulación de tensión

Fuente de los resultados	tiempo empleado en la búsqueda	Criterio de búsqueda	Secciones de líneas inhabilitadas	Eficiencia	Regulación de tensión máxima
Algoritmo presentado en [15]. Parámetros y condiciones de demanda 1.	26 minutos y 32 segundos	Eficiencia	7, 9, 14, 32 y 37	96,4803%	5,4572%
		%R.V.	7, 9, 14, 32 y 37	96,4803%	5,4572%
Algoritmo desarrollado en el presente trabajo. Parámetros y condiciones de demanda 1.	5 minutos y 46 segundos	Eficiencia	7, 9, 14, 32 y 37	96,4803%	5,4572%
		%R.V.	7, 9, 14, 32 y 37	96,4803%	5,4572%
Algoritmo presentado en [15]. Parámetros y condiciones de demanda 2.	26 minutos y 38 segundos	Eficiencia	7, 9, 14, 32 y 37	98,5806%	3,3730%
		%R.V.	6, 9, 14, 32 y 37	98,5252%	3,1906%
Algoritmo desarrollado en el presente trabajo. Parámetros y condiciones de demanda 2.	6 minutos y 30 segundos	Eficiencia	7, 9, 14, 32 y 37	98,5806%	3,3730%
		%R.V.	6, 9, 14, 32 y 37	98,5252%	3,1906%

La información de este SDL se puede cargar en el software creado seleccionando los archivos de los anexos 40 y 41 para las demandas y las líneas respectivamente.

Con estos resultados, se observa que el algoritmo planteado en este trabajo, para la búsqueda de la ubicación de los *Nddc* dispositivos de conmutación, puede ser usado para realizar la búsqueda exhaustiva de las configuraciones con mejor eficiencia y porcentaje de regulación de tensión, obteniendo resultados con gran rapidez, en este caso, aproximadamente en un 25% del tiempo empleado por el algoritmo presentado en [15].

La gran diferencia de tiempo entre los dos métodos se debe a que el programado en la función “ubicacion1” descarta todas las líneas que pertenecen a una misma trayectoria tan pronto encuentra que una de ellas imposibilita la operación radial del sistema, esto es posible porque el efecto topológico que tiene ubicar algún dispositivo de conmutación en cualquiera de las líneas de una misma trayectoria es el mismo. Por otro lado, el algoritmo empleado en [15] evalúa la posibilidad de operación radial de todas las combinaciones de líneas que tenga el sistema, para albergar los DDC que entregan la configuración base.

5.3.2 Ubicación de los dispositivos de conmutación y la calidad del servicio en función del indicador de calidad seleccionado como referencia. Para evaluar el efecto del indicador de calidad seleccionado como criterio de parada, se realizó el análisis de los tres sistemas de prueba, con el objetivo de mejorar cada uno de los cinco indicadores de calidad utilizados en este trabajo.

Para los tres sistemas de prueba se realizaron los siguientes ajustes: la referencia del indicador de calidad de turno se ajustó en cero, con este parámetro se establece la cantidad máxima de DDC como criterio de parada; el cálculo de los indicadores de calidad se realizó con criterio $n - 1$ y la búsqueda se realiza solo con el algoritmo voraz.

Los parámetros de entrada, para el análisis del primer sistema de prueba, se ajustaron del siguiente modo:

- Se ubican siete dispositivos de conmutación. Esto incluye el requerido para obtener la configuración base, según la ecuación (6), y las dos protecciones eléctricas ubicadas en la barra de conexión al STR.
- La regulación de tensión máxima permitida se ajustó en 5%.

Los parámetros de entrada, para el análisis del segundo sistema de prueba, se ajustaron del siguiente modo:

- Se ubican cinco dispositivos de conmutación. Esto incluye la protección eléctrica ubicada en la barra de conexión al STR.
- La regulación de tensión máxima permitida se ajustó en 5%.
- Se incluyó la generación distribuida con 1 MVA de capacidad.

Los parámetros de entrada, para el análisis del tercer sistema de prueba, se ajustaron del siguiente modo:

- Se ubican diez dispositivos de conmutación. Esto incluye los cinco requeridos para obtener la configuración base, según la ecuación (6), y la protección eléctrica ubicada en la barra de conexión al STR.
- La regulación de tensión máxima permitida se ajustó en 9%.

Los resultados obtenidos para los sistemas de prueba uno, dos y tres se muestran en el Cuadro 17, Cuadro 18 y Cuadro 19, respectivamente.

Cuadro 17. Resultados para el primer sistema de prueba en función del indicador de referencia seleccionado

Indicador seleccionado	Ubicación ($L_i^{Extremo}$)	Valores obtenidos		
		$SAIDI \left[\frac{\text{horas}}{\text{año} \cdot \text{usuario}} \right]$ $SIFI \left[\frac{\text{veces}}{\text{año} \cdot \text{usuario}} \right]$	$DIU \left[\frac{\text{horas}}{\text{año}} \right]$ $FIU \left[\frac{\text{veces}}{\text{año}} \right]$	$ENS \left[\frac{MWh}{\text{año}} \right]$
SAIDI	L_{10}^1 L_1^1 L_{12}^1 L_{18}^2 L_4^2 L_{20}^2 L_{16}^1	$SAIDI = 2,11305$ $SAIFI = 0,528264$	$DIU = 2,6$ $FIU = 0,65$	$ENS = 12,8818$
SAIFI	L_{10}^1 L_1^1 L_{12}^1 L_{18}^2 L_4^2 L_{20}^2 L_{16}^1	$SAIDI = 2,11305$ $SAIFI = 0,528264$	$DIU = 2,6$ $FIU = 0,65$	$ENS = 12,8818$
DIU	L_{10}^1 L_1^1 L_{12}^1 L_{16}^2 L_2^1 L_2^2 L_3^1	$SAIDI = 4,16398$ $SAIFI = 1,04099$	$DIU = 4,68$ $FIU = 1,17$	$ENS = 22,8799$
FIU	L_{10}^1 L_1^1 L_{12}^1 L_{16}^2 L_2^1 L_2^2 L_3^1	$SAIDI = 4,16398$ $SAIFI = 1,04099$	$DIU = 4,68$ $FIU = 1,17$	$ENS = 22,8799$
ENS	L_{10}^1 L_1^1 L_{12}^1 L_{18}^2 L_4^2 L_7^1 L_{23}^2	$SAIDI = 2,21314$ $SAIFI = 0,553284$	$DIU = 3,64$ $FIU = 0,91$	$ENS = 11,8608$

Cuadro 18. Resultados para el segundo sistema de prueba en función del indicador de referencia seleccionado

Indicador seleccionado	Ubicación ($L_i^{Extremo}$)	Valores obtenidos		
		$SAIDI \left[\frac{\text{horas}}{\text{año} \cdot \text{usuario}} \right]$ $SIFI \left[\frac{\text{veces}}{\text{año} \cdot \text{usuario}} \right]$	$DIU \left[\frac{\text{horas}}{\text{año}} \right]$ $FIU \left[\frac{\text{veces}}{\text{año}} \right]$	$ENS \left[\frac{MWh}{\text{año}} \right]$
SAIDI	L_1^1 L_8^1 L_{15}^1 L_{26}^1 L_{20}^1	$SAIDI = 11,902$ $SAIFI = 1,48775$	$DIU = 27,456$ $FIU = 3,432$	$ENS = 78,7901$
SAIFI	L_1^1 L_8^1 L_{15}^1 L_{26}^1 L_{20}^1	$SAIDI = 11,902$ $SAIFI = 1,48775$	$DIU = 27,456$ $FIU = 3,432$	$ENS = 78,7901$
DIU	L_1^1 L_1^2 L_2^1 L_2^2 L_3^1	$SAIDI = 25,9545$ $SAIFI = 3,24431$	$DIU = 33,124$ $FIU = 4,1405$	$ENS = 152,077$
FIU	L_1^1 L_1^2 L_2^1 L_2^2 L_3^1	$SAIDI = 25,9545$ $SAIFI = 3,24431$	$DIU = 33,124$ $FIU = 4,1405$	$ENS = 152,077$
ENS	L_1^1 L_{11}^1 L_{19}^1 L_{25}^1 L_{16}^1	$SAIDI = 13,1173$ $SAIFI = 1,63966$	$DIU = 21,372$ $FIU = 2,6715$	$ENS = 72,4699$

Cuadro 19. Resultados para el tercer sistema de prueba en función del indicador de referencia seleccionado

Indicador seleccionado	Ubicación ($L_i^{Extremo}$)	Valores obtenidos		
		$SAIDI \left[\frac{horas}{año \cdot usuario} \right]$ $SIFI \left[\frac{veces}{año \cdot usuario} \right]$	$DIU \left[\frac{horas}{año} \right]$ $FIU \left[\frac{veces}{año} \right]$	$ENS \left[\frac{MWh}{año} \right]$
SAIDI	L_{32}^1 L_6^1 L_4^1 L_{13}^1 L_9^1 L_1^1 L_{20}^1 L_{37}^1 L_{33}^2 L_2^1	$SAIDI = 21,4199$ $SAIFI = 6,53204$	$DIU = 33,58$ $FIU = 10,35$	$ENS = 80,3295$
SAIFI	L_{32}^1 L_6^1 L_4^1 L_{13}^1 L_9^1 L_1^1 L_{18}^1 L_{37}^1 L_{33}^2 L_2^1	$SAIDI = 19,9104$ $SAIFI = 5,96143$	$DIU = 31,19$ $FIU = 9,45$	$ENS = 74,6859$
DIU	L_{32}^1 L_6^1 L_4^1 L_{13}^1 L_9^1 L_1^1 L_4^2 L_6^2 L_{13}^2 L_{32}^2	$SAIDI = 46,78$ $SAIFI = 16,85$	$DIU = 46,78$ $FIU = 16,85$	$ENS = 173,788$
FIU	L_{32}^1 L_6^1 L_4^1 L_{13}^1 L_9^1 L_1^1 L_4^2 L_6^2 L_9^2 L_{32}^2	$SAIDI = 49,18$ $SAIFI = 16,65$	$DIU = 49,18$ $FIU = 16,65$	$ENS = 182,704$
ENS	L_{32}^1 L_6^1 L_4^1 L_{13}^1 L_9^1 L_1^1 L_{20}^1 L_{37}^1 L_{33}^2 L_2^1	$SAIDI = 21,4199$ $SAIFI = 6,53204$	$DIU = 33,58$ $FIU = 10,35$	$ENS = 80,3295$

Con los resultados anteriores se observa lo siguiente:

- Para el tercer sistema de prueba, los resultados obtenidos al usar como referencia los indicadores SAIDI o ENS son idénticos debido a que la cantidad de usuarios en las barra se asignó de manera proporcional a la potencia activa demandada en cada una de ellas.
- Cuando se usan como referencia los indicadores de calidad individual, DIU y FIU, no se obtienen buenos resultados. Esto se debe a que en cada iteración se busca mejorar el indicador individual de la barra con la peor calidad, lo cual no ocasiona notorias mejorías en la calidad del servicio de las demás barras.
- Entre los tres indicadores, de los utilizados en este trabajo, que miden la calidad media, el más pertinente para realizar la búsqueda depende de las características del sistema.

6. CONCLUSIONES

Debido a que los cuatro indicadores de calidad del servicio, SAIDI, SAIFI, DIU y FIU, utilizados en el esquema de incentivos y compensaciones, implementado en la metodología colombiana para la remuneración de la actividad de distribución, se basan solo en la cantidad de usuarios, se pueden presentar los siguientes casos:

- Zonas de poco interés para los operadores de red por la baja demanda energética, pero de alto impacto en sus indicadores de calidad, si tienen gran número de usuarios.
- Zonas de gran interés para el operador de red por la gran demanda energética, pero de poco impacto en sus indicadores de calidad, si tienen pocos usuarios.

Por lo anterior, se concluye que en la regulación colombiana actual falta incluir indicadores de calidad orientados a la energía demandada en los puntos de conexión de los usuarios.

El usuario de la herramienta desarrollada en este trabajo debe determinar la cantidad de dispositivos de conmutación que es rentable ubicar, ya que la metodología implementada determina la cantidad y ubicación de los dispositivos de conmutación requeridos para alcanzar un valor máximo en los indicadores de calidad o la ubicación de un número determinado de dispositivos de conmutación, pero no considera los costos de dichos dispositivos.

A pesar de que la ubicación de los dispositivos de conmutación necesarios para lograr que los sistemas de distribución que cuentan con construcción mallada operen de manera radial es fundamental en la confiabilidad de los SDL, no ha sido suficientemente estudiada.

El algoritmo implementado en este trabajo para la ubicación de los dispositivos de conmutación que consiguen la configuración base de los SDL se convierte en una herramienta de búsqueda exhaustiva de la configuración con menor regulación de

tensión, si se introduce una restricción de tensión inferior a la mínima posible para las condiciones del sistema.

Debido a que en cada iteración del algoritmo voraz, implementado para encontrar la ubicación de los DDC, no se tienen en cuenta la ubicación de todos los dispositivos de conmutación finalmente ubicados, es posible que se encuentre una solución que no corresponde al óptimo global.

La búsqueda profunda, implementada en este trabajo, es un complemento necesario para el algoritmo voraz, debido a que, con base en los resultados obtenidos, permite refinar la búsqueda y encontrar mejores soluciones.

El impacto positivo de los dispositivos de conmutación en la confiabilidad de los sistemas de distribución se incrementa cuando la red está construida de forma mallada o cuenta con generación distribuida capaz de operar en isla. Esto se debe a que en estas circunstancias es posible reconfigurar el sistema, aislando la falla y brindando suministro a una gran cantidad de usuarios, desde alternativas distintas a las de la configuración base; si el sistema está construido de modo radial y no tiene GD con capacidad de operar en isla, el efecto de la reconfiguración se limita al aislamiento de la falla sin la posibilidad de realimentar a los usuarios que se encuentran conectados aguas abajo del punto de falla.

El efecto positivo de la generación distribuida con capacidad de operar en isla sobre la calidad del servicio de los sistemas de distribución se incrementa con la capacidad de dichas fuentes de energía. Esto se debe a que entre más capacidad tengan los GD, mayor es la cantidad de potencia y el número de usuarios que se pueden alimentar en condiciones de falla de alguno de los elementos del sistema.

7. RECOMENDACIONES

Se debe incluir en el análisis de confiabilidad las tasas de falla y tiempo medio de reparación de los dispositivos de conmutación ubicados. Estos parámetros no han sido tenidos en cuenta en este trabajo y es posible que su efecto en la ubicación de los DDC no sea muy grande, debido a que cuando se evalúen los indicadores de calidad considerando las fallas de los dispositivos de conmutación se debe tener un incremento, pero este afectará por igual a todos los posibles puntos de ubicación, Sin embargo, es necesario probar esta tesis.

Una vez se tiene la ubicación de los dispositivos de conmutación en el sistema, deben determinarse las corrientes, para todos los escenarios de falla y sus posibles configuraciones, en cada uno de los puntos donde haya alguna protección eléctrica con el fin de ajustar los valores de referencia que accionan las respectivas protecciones para lograr su adecuada coordinación.

Con la herramienta desarrollada en este trabajo, es posible realizar diversos tipos de estudios relacionados con la planeación de los sistemas de distribución, por ejemplo: buscar la capacidad y ubicación de los generadores distribuidos que mejoren la calidad del servicio, probar el efecto de nuevas líneas en los SDL y probar distintos escenarios de demandas en los puntos de consumo para evaluar solicitudes de conexión al sistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. d. R. d. E. y. G. CREG, *Resolución No. 015 de 2018*, Bogotá: Ministerio de Minas y Energía, 2018.
- [2] C. d. R. d. E. y. G. CREG, *Resolución CREG 097*, Bogotá: Ministerio de Minas y Energía, 2008.
- [3] P. Carvalho, L. Ferreira y A. Cerejo da Silva, «A decomposition approach to optimal remote controlled switch allocation in distribution systems,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. XX, nº 2, pp. 1031-1036, 2005.
- [4] D. Popovic´, J. Greatbanks, M. Begovic´ y A. Pregelj, «Placement of distributed generators and reclosers for distribution network security and reliability,» *Electrical Power and Energy Systems*, vol. XXVII, pp. 398-408, 2005.
- [5] B. Liu, S. Kun, J. Zou, X. Duan y X. Zheng, «Optimal Feeder Switches Location Scheme for High Reliability and Least Costs in Distribution System,» de *2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Dalian, China, 2006.
- [6] L. Wesz da Silva, R. Fernandes Pereira, J. Rivier Abbad y J. Sanches MAntovani, «Optimised placement of control and protective devices in electric distribution systems through reactive tabu search algorithm,» *Electric Power Systems Research*, vol. LXXVIII, nº 3, pp. 372-381, 2008.
- [7] W. Tippachon y D. Rerkpreedapong, «Multiobjective optimal placement of switches and protective devices in electric power distribution systems using ant colony optimization,» *Electric Power Systems Research*, vol. LXXIX, nº 7, pp. 1171-1178, 2009.
- [8] H. Falaghi, M.-R. Haghifam y S. Chanan, «Ant Colony Optimization-Based Method for Placement of Sectionalizing Switches in Distribution Networks

- Using a Fuzzy Multiobjective Approach,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. XXIV, nº 1, pp. 268-276, 2009.
- [9] H. Dezaki, H. Abyaneh, A. Agheli y K. Mazlumi, «Optimized switch allocation to improve the restoration energy in distribution systems,» *Journal of Electrical Engineering*, vol. LXIII, nº 1, pp. 47-52, 2012.
- [10] S. Abdi, K. Afshar, S. Ahmadi, N. Bigdeli y M. Abdi, «Optimal recloser and autosectionalizer allocation in distribution networks using IPSO–onte Carlo approach,» *Electrical Power and Energy Systems*, vol. LV, pp. 602-611, 2014.
- [11] A. Vieira, V. Fernão y J. Murta-Pina, «Multiobjective Switching Devices Placement Considering Environmental Constrains in Distribution Networks with Distributed Energy Resources,» de *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Seville, 2015.
- [12] A. Heidari, V. G. Agelidis y M. Kia, «Considerations of Sectionalizing Switches in Distribution Networks With Distributed Generation,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. XXX, nº 3, pp. 1401-1409, 2015.
- [13] S. Ray, a. Bhattacharya y S. Bhattacharjee, «Optimal placement of switches in a radial distribution network for reliability improvement,» *Electrical Power and Energy Systems*, vol. LXXVI, pp. 53-68, 2016.
- [14] Ž. Popović, S. Knezević y B. Brbaklić, «Optimal reliability improvement strategy in radial distribution networks with island operation of distributed generation,» *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, nº 1, pp. 78-87, 2018.
- [15] J. R. Camacho Marínez y G. Carrillo Caicedo, «Implementación de un Método de Búsqueda Exhaustiva para la Reconfiguración de Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica,» Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2016.

- [16] M. E. Baran y F. F. Wu, «Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. IV, nº 2, pp. 1401-1407, 1989.
- [17] R. Billinton y S. Jonnavithula, «A Test System for Teaching Overall,» *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, nº 4, pp. 1670-1676, 1996.
- [18] R. Billinton, S. Kumar, N. Chowdhury, K. Chu, K. Debnath, L. Goel, E. Khan, P. Kos, G. Nourbakhsh y J. Oteng-Adjei, «A reliability test system for educational purposes-basic data,» *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 4, nº 3, pp. 1238-1244, 1989.
- [19] R. N. Allan, R. Billinton, I. Sjarief, L. Goel y K. S. So, «A reliability test system for educational purposes-basic distribution system data and results,» *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, nº 2, pp. 813-820, 1991.
- [20] R. Ballinton y L. Wenyuan, Reliability assessment of electric power systems using Monte Carlo methods, New York: Springer, 1994.
- [21] R. Brown, Electric Power Distribution Reliability, USA: CRC Press, 2009.
- [22] C. J. Zapata, S. C. Silva, H. I. Gonzalez, O. L. Burbano y J. A. Hernandez, «Modeling the repair process of a power distribution system,» de 2008 *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, Bogotá, Colombia, 2008.

BIBLIOGRAFÍA

- A. Vieira, V. Fernão y J. Murta-Pina, «Multiobjective Switching Devices Placement Considering Environmental Constrains in Distribution Networks with Distributed Energy Resources,» de *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Seville, 2015.
- B. Liu, S. Kun, J. Zou, X. Duan y X. Zheng, «Optimal Feeder Switches Location Scheme for High Reliability and Least Costs in Distribution System,» de *2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Dalian, China, 2006.
- C. d. R. d. E. y. G. CREG, *Resolución CREG 097*, Bogotá: Ministerio de Minas y Energía, 2008.
- C. d. R. d. E. y. G. CREG, *Resolución No. 015 de 2018*, Bogotá: Ministerio de Minas y Energía, 2018.
- C. J. Zapata, S. C. Silva, H. I. Gonzalez, O. L. Burbano y J. A. Hernandez, «Modeling the repair process of a power distribution system,» de *2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, Bogotá, Colombia, 2008.
- D. Popović, J. Greatbanks, M. Begović y A. Pregelj, «Placement of distributed generators and reclosers for distribution network security and reliability,» *Electrical Power and Energy Systems*, vol. XXVII, pp. 398-408, 2005.
- H. Dezaki, H. Abyaneh, A. Agheli y K. Mazlumi, «Optimized switch allocation to improve the restoration energy in distribution systems,» *Journal of Electrical Engineering*, vol. LXIII, nº 1, pp. 47-52, 2012.
- R. Ballinton y L. Wenyuan, *Reliability assessment of electric power systems using Monte Carlo methods*, New York: Springer, 1994.

R. Billinton y S. Jonnavithula, «A Test System for Teaching Overall,» *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, nº 4, pp. 1670-1676, 1996.

R. Billinton, S. Kumar, N. Chowdhury, K. Chu, K. Debnath, L. Goel, E. Khan, P. Kos, G. Nourbakhsh y J. Oteng-Adjei, «A reliability test system for educational purposes-basic data,» *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 4, nº 3, pp. 1238-1244, 1989.

R. Brown, *Electric Power Distribution Reliability*, USA: CRC Press, 2009.

R. N. Allan, R. Billinton, I. Sjarief, L. Goel y K. S. So, «A reliability test system for educational purposes-basic distribution system data and results,» *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, nº 2, pp. 813-820, 1991.

S. Abdi, K. Afshar, S. Ahmadi, N. Bigdeli y M. Abdi, «Optimal recloser and autosectionalizer allocation in distribution networks using IPSO– onte Carlo approach,» *Electrical Power and Energy Systems*, vol. LV, pp. 602-611, 2014.

S. Ray, a. Bhattacharya y S. Bhattacharjee, «Optimal placement of switches in a radial distribution network for reliability improvement,» *Electrical Power and Energy Systems*, vol. LXXVI, pp. 53-68, 2016.

Ž. Popović, S. Knezević y B. Brbaklić, «Optimal reliability improvement strategy in radial distribution networks with island operation of distributed generation,» *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, nº 1, pp. 78-87, 2018.