



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**LOCALIZACIÓN DE LAS FALLAS EN REDES DE
DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA
BASADO EN MATRIZ MULTI-AGENTE**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: JORGE DAVID ACUÑA TACURI

TUTOR: MILTON GONZALO RUIZ MALDONADO

Quito -Ecuador

2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Jorge David Acuña Tacuri con documento de identificación N° 1600684813 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 25 de junio del año 2024

Atentamente,



Jorge David Acuña Tacuri

1600684813

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Jorge David Acuña Tacuri con documento de identificación No. 1600684813, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “Localización de las fallas en redes de distribución con generación distribuida basado en matriz multi-agente”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 25 de junio del año 2024

Atentamente,



Jorge David Acuña Tacuri

1600684813

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Milton Gonzalo Ruiz Maldonado con documento de identificación N° 1714409065, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: LOCALIZACIÓN DE LAS FALLAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA BASADO EN MATRIZ MULTI-AGENTE, realizado por Jorge David Acuña Tacuri con documento de identificación N° 1600684813, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 25 de junio del año 2024

Atentamente,



Ing. Milton Gonzalo Ruiz Maldonado, PhD
1714409065

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Marco teórico.....	3
2.1	Generación Distribuida.....	3
2.2	Fallas simétricas	3
2.3	Fallas asimétricas	4
2.4	Localización de fallas en redes de distribución.....	4
2.4.1	Confiabilidad del sistema eléctrico	5
2.4.2	Modelamiento del sistema	5
2.5	Matriz impedancia de barra.....	6
2.5.1	Creación de la impedancia de barra.	6
2.6	Matriz multi-agente.	7
3	Estrategia de desarrollo de solución	8
3.1	Reglas de juicio para la construcción de la matriz multi-agente	8
3.2	Análisis de la matriz multi-agente considerando la fórmula de la probabilidad bayesiana.....	10
3.3	Pseudocódigo: Localización de falla basada matriz multi-agente.	11
4	Análisis del caso de estudio.....	12
5	Análisis de resultados	15
6	Conclusión	17
7	Referencias.....	17

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Inserción de GD en la SD	3
Figura 2. Falla simétrica	4
Figura 3. Tipos de Fallas: a) monofásica, b) bifásica, c) bifásica a tierra.	4
Figura 4. Elementos de un poste armado	5
Figura 5. Reconector automático	5
Figura 6. Topología de una red.	6
Figura 7. Red de distribución	7
Figura 8. Elementos de control	7
Figura 9. Diagrama de información de g1	9
Figura 10. Nodo del IEEE33 con DG	12
Figura 11. Nodo IEEE33 con falla.....	12
Figura 12. Nodo IEEE33 M. Ybarra	15
Figura 13. Nodo IEEE33 M. Multi-agente	15
Figura 14. Nodo de IEEE33 barras	16
Figura 15. Exactitud de métodos	16

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rango de operación de GD.....	3
Tabla 2. Descripción de la fórmula de G2	9
Tabla 3. Pseudocódigo de la matriz multi-agente	11
Tabla 4. Elementos de nodo IEEE33 con DG.....	12
Tabla 5. Resultado de simulaciones.....	15
Tabla 6. Comparación de método.....	16

Localización de las fallas en redes de distribución con generación distribuida basado en matriz multi-agente

Resumen

El método de desarrollo que presenta este artículo se basa en la localización de fallas en redes de distribución con generación distribuida. Este método se apoya en la creación de la matriz multi-agente, respaldado por el diseño del algoritmo acorde a la estructura de la topología de la red de distribución con generación distribuida. El objetivo de este algoritmo es localizar la falla en el nodo exacto, basada en la creación de matrices y sub matrices que adoptan reglas de juicio, con la finalidad de dividir el sistema en múltiples secciones, otorgando así que el sistema conlleve menos información para poder detectar las falla con información concisa, posterior a ello se procedió a la inserción de la fórmula de probabilidad bayesiana que mediante probabilidades de ocurrencias que otorga una fuente de información precisa que determina el punto exacto del nodo ante una falla. El método propuesto adquirido como referencia para este caso de estudio es la topología de la red del IEEE33, que consta con generación distribuida y que se realizó un análisis comparativo de información real basada en el método de la matriz de impedancia de barra.

Palabras Clave: Localización del nodo exacto de falla, Matriz Multi-agente, Probabilidad bayesiana.

Abstract

The development method presented in this article is based on fault location in distribution networks with distributed generation. This method relies on the creation of a multi-agent matrix, supported by the design of an algorithm tailored to the topology structure of the distribution network with distributed generation. The objective of this algorithm is to locate the fault at the exact node by creating matrices and sub-matrices that adopt judgment rules, aiming to divide the system into multiple sections. This approach reduces the amount of information the system needs to process, enabling the detection of faults with concise information. Subsequently, the Bayesian probability formula was inserted, providing precise information through occurrence probabilities that determine the exact fault point at the node. The proposed method, taken as a reference for this case study, is the IEEE33 network topology, which includes distributed generation and was subjected to a comparative analysis with real data based on the bus impedance matrix method.

Keywords: Exact fault node location, multi-agent matrix, Bayesian probability.

1 Introducción

Con la evolución del tiempo las empresas suministradoras de energía eléctrica se han tenido que adaptarse a grandes cambios innovadores y avances tecnológicos los cuales podrán solventar las necesidades del incremento exponencial de la demanda energética [1].

Las empresas comercializadoras de energía eléctrica, en años anteriores, estimaban un excedente de generación eléctrica con el objetivo de poder suplementar el crecimiento del consumo de carga. Sin embargo, esta práctica ha llevado a la necesidad de replantear las estrategias de generación.

Frente a este desafío, las empresas han decidido no construir fuentes de generación tradicionales de grandes dimensiones debido a su elevado costo y el tiempo prolongado que requiere su ejecución. En su lugar, han optado por adoptar modelos de generación distribuida, ubicados cerca de las cargas, con el fin de solventar el déficit energético, evitar pérdidas económicas y brindar un servicio óptimo de calidad [2].

Por ende, las distribuidoras de energía eléctrica han propuesto la inserción de nuevos elementos eléctricos en el sistema de distribución convencional dando paso al acoplamiento de pequeñas fuentes de generación lo más cercano a las cargas, basadas en energía renovable con la finalidad de poder solventar las carencias de las pérdidas de energía, de modo que estas fuentes de generación mencionadas trabajen a horas programadas acorde a lo que necesite el usuario evitando así las variaciones innecesarias de voltaje y corriente en el sistema de distribución [3].

La ubicación exacta de las pequeñas fuentes de generación distribuida las cuales solventaran el déficit energético

juega un papel importante y hay que estudiarlas y analizarlas de acorde al tipo de topología de la red en la cual se va a instalar para así evitar pérdidas de potencia innecesarias, mejorando los perfiles de voltaje y corriente

Frente a ello los métodos convencionales de localización de fallas en el sistema de distribución, no son precisos y exactos ya que carecen de información real, el cual se desarrolla mediante la información de los datos adquiridos por un operario en el centro de control, que en consecuencia de ello el usuario tendrá que confiar que los datos adquiridos bajo el análisis del sistema son reales, lo cual no es verídico, ya que los elementos de protección se encuentran en la parte externa, es decir en campo, dando como resultado una información errada para el análisis frente a una falla ya que el suministro eléctrico deja de enviar información lo cual su estimación de la localización de falla en el nodo no es precisa y exacta [4].

El presente artículo pretende mejorar la confiabilidad del suministro eléctrico, recortando el tiempo de respuesta en la localización de falla en el nodo exacto frente a una incidencia que irrumpa de manera inesperada el suministro eléctrico tales como: conexión y desconexión de cargas, por carencias de mantenimiento en las líneas de distribución, por fuentes naturales etc.

Por ello se aborda en el diseño de múltiples matrices denominada matriz multi-agente para la localización de falla con generación distribuida, su modelado va de acuerdo a la topología e estructura de la red, el cual realizar una estimación de localización de falla y conjuntamente con la inserción de la fórmula de probabilidad bayesiana, dan con el nodo exacto de falla y así brinda una información precisa para que personal de la empresa comercializadora pueda

solventar este incidente brindando la continuidad del servicio eléctrico a los usuarios.

2 Marco teórico

Las redes de distribución en la actualidad se han visto en la necesidad de acoplarse a mejoras continuas, mediante la inserción de GD, las cuales cambian la manera en la que se gestiona su producción y administra el consumo de la electricidad [5].

El sistema actual no puede satisfacer toda la demanda de energía que necesitan los usuarios finales y para solventar el déficit energético, se ha implementado nuevas tecnologías, permitiendo a los consumidores producir parte de la energía eléctrica que se enfocan en las industrias y comercios reduciendo sus facturas energéticas [6].

La implementación de GD, al sistema convencional se ha afectado significativamente ya que modifica las amplitudes de las magnitudes eléctricas tales como (voltaje y corriente), afectando la exactitud de los algoritmos implementados para la localización ante un evento de falla eléctrica [7].

2.1 Generación Distribuida

La demanda creciente de consumo eléctrico, que se relaciona directamente con el incremento de los habitantes es una de las necesidades que afrontan las empresas comercializadoras de energía eléctrica, que tienen que buscar nuevos mecanismos innovadores los cuales puedan mitigar las fuentes de generaciones existentes por el agotamiento de los recursos que se utilizan para la generación de energía [8].

De acuerdo con el último año la implementación de GD ha ido en ascenso, mediante la colocación de GD ha otorgado bonificaciones considerables al sistema eléctrico de potencia.

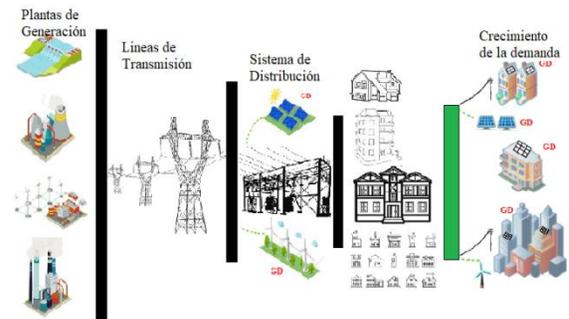


Figura 1. Inserción de GD en la SD

La inserción de Generación Distribuida la cual es la encargada en suplementar y aliviar el flujo de carga de energía en redes de distribución [8].

Rangos de operación de centrales GD, de acuerdo con el tipo de diseño de la demanda que se vaya a suplementar la cual esta detalla en la siguiente tabla. [9].

Tabla 1. Rango de operación de GD.

GD	Escala de operación
Micro generación	Inferior a 5 KW
Minigeneración	5Kw - 5Mw
Generación a mitad escala	5Mw- 50Mw
Generación a gran escala	50Mw-100Mw

2.2 Fallas simétricas

Esta clase de fallas son las de mayor impacto provocando que el sistema se vuelva vulnerable. Estas se pueden producir de gracias a descargas atmosféricas, provocando que entren en

contacto las tres líneas de distribución aumentando la magnitud del flujo de corriente [10].

La ocurrencia de probabilidad de este tipo de falla simétrica está estimada en un rango del 5%, ya que esta clase de fallas está dentro de las fallas de tipo permanente.

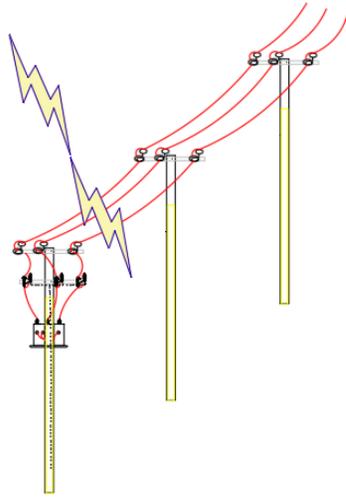


Figura 2. Falla simétrica

2.3 Fallas asimétricas

Las fallas asimétricas cuentan con la participación del contacto de una línea o varias líneas de distribución con la tierra provocando así cortocircuito, la cual distorsiona y desbalancea los ángulos tanto de la corriente como de la tensión o voltaje [11].

La ocurrencia de este tipo de fallas es mayor a comparación de las fallas simétricas ya que esta cuenta con diferentes tipos de probabilidad de ocurrencia tales como [12]

- Falla monofásica

Esta clase de falla se caracteriza por entrar en contacto cualquiera de sus tres

líneas con la estructura que lo sostiene dando origen a un cortocircuito a tierra.

- Falla bifásica

En este tipo de falla hacer referencia a que entran en contacto solamente dos de sus líneas de sistema de distribución provocando el cortocircuito.

- Falla bifásica a tierra

En esta clase de falla es cuando entran en contacto dos de cualquiera de sus tres líneas y también hacen contacto con la tierra.

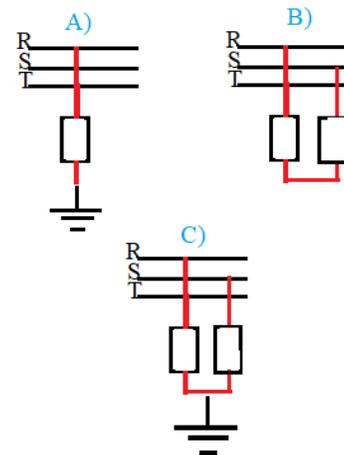


Figura 3. Tipos de Fallas: a) monofásica, b) bifásica, c) bifásica a tierra.

2.4 Localización de fallas en redes de distribución.

La localización de las fallas eléctricas en un sistema de distribución es compleja y es una de las más recurrentes e importantes a ser solventadas, ya que ocasionan problemas en el sistema eléctrico de potencia, provocando cortes de suministros eléctrico-inesperados que deben de ser solucionados de manera rápida y eficiente [12].

El método más básico de ubicación de fallas que se ha implementado en las

empresas que brindan el servicio eléctrico genera pérdidas significativas cuando ocurre una falla, ya que depende de una inspección visual o, en ocasiones, de reportes hechos por los mismos funcionarios de las empresas suministradoras. Este enfoque hace difícil localizar el punto de falla cuando ocurre un evento.

Ante esta situación, las empresas se han visto en la necesidad de implementar detectores de corriente ubicados en zonas estratégicas a lo largo del sistema. Estos detectores operan bajo ciertos parámetros y condiciones de uso para mejorar la precisión en la localización de fallas y, así, reducir las pérdidas económicas y mejorar la eficiencia del servicio [13], [14].

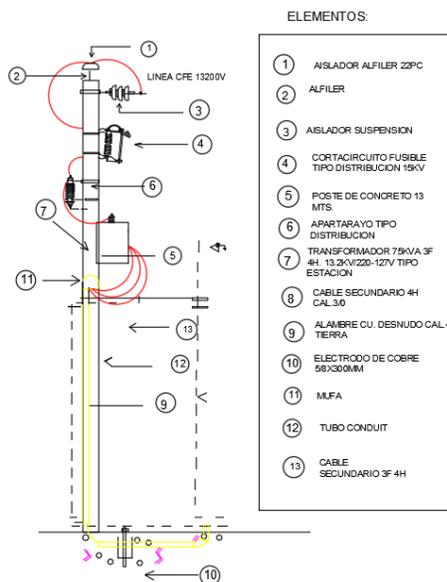


Figura 4. Elementos de un poste armado

La falta de mantenimiento a ciertos dispositivos que conforman las redes de distribución, son unas de las principales causas que reducen la fiabilidad del sistema eléctrico, reduciendo la calidad del servicio de la energía eléctrica.

2.4.1 Confiabilidad del sistema eléctrico

Es de vital importancia que las empresas suministradoras del sistema eléctrico brinden su servicio de manera confiable y segura, esto se logra a través de un óptimo servicio, lo cual, gracias a la localización rápida de las fallas en el sistema eléctrico de distribución, se pueden reducir gastos innecesarios brindando beneficios a las empresas comercializadoras y por ende a los usuarios finales, disminuyendo los rangos de restauración del suministro eléctrico [11].

Los aparatos electrónicos y eléctricos son encargados de monitorear y comparar que los parámetros de las magnitudes eléctricas se encuentren dentro del protocolo establecido que deben ser, para así brindar el servicio de energía eléctrica a los usuarios finales, su comunicación debe ser lo más precisas para así procesar la información y despejar las fallas existentes [10]

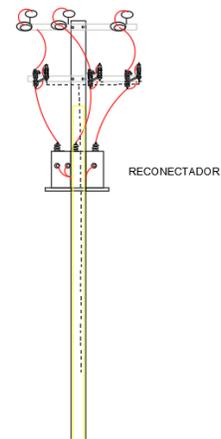


Figura 5. Reconvertidor automático

2.4.2 Modelamiento del sistema

Para el respectivo análisis es importante contar con la implementación del modelo para ser simulado en un software, mediante ello construir una base de datos para así realizar una estimación adecuada

que sirve para la resolución de la metodología implementada.

La estimación de los datos adquiridos que se forman a través de simulaciones en software tales como Matlab, etap o Powers Factory, en los cuales con la información de los parámetros importantes del estado del sistema ante una prefalla y postfalla, son de vital importancia para la estimación de la ubicación de la falla en el sistema eléctrico de distribución [15]

2.5 Matriz impedancia de barra.

Las características principales de una red eléctrica, cuenta con una extensión que para solventar las necesidades de la energía eléctrica va aumentando o variando su topología, la cual cuenta con un sin número y variedad de componentes que se interconectar entre sí de forma sistemática de construcción de bloques, para así brindar el servicio de energía eléctrica.

Para el modelamiento del sistema eléctrico de distribución implementado la matriz de Ybarra se necesita contar con una fuente de información la cual nos describa las características de los elementos y así asociar a una ecuación matricial que mediante ella y la ayuda de un software en una computadora se brindara una solución óptima [16].

$$Y_{barra} = \begin{bmatrix} Y_{1,1} & \cdots & Y_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n,1} & \cdots & Y_{n,n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

La Ybarra, dependerá de acuerdo con la topología de la red de distribución las cuales será de dimensiones $n \times n$, dependiendo el numero de barras, las cuales deben ser de fácil acceso de implementar en un software y así mismo debe de ser flexible a cuál tipo de modificación.

2.5.1 Creación de la impedancia de barra.

Para la creación de la matriz de la impedancia de barra, para su análisis se debe transformar a todos los datos reales a por unidad y, por ende, el análisis se deberá de ser por fase.

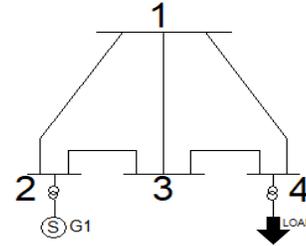


Figura 6. Topología de una red.

De acuerdo con cualquier tipo, de topología de red las dimensiones de la Ybarra variarán tendrá dimensiones $n \times n$.

$$Y_{ixj} = \begin{bmatrix} \sum Y_{ij} & -Y_{ij} & -Y_{ij} \\ -Y_{ij} & \sum Y_{ij} & -Y_{ij} \\ -Y_{ij} & -Y_{ij} & \sum Y_{ij} \end{bmatrix} \quad (2)$$

- Elementos fuera de la diagonal principal.

Los elementos que se van a llenar afuera de la diagonal principal de la matriz será el negativo de la admitancia

$$Y_{ij} = -Y_{ij} \quad (3)$$

- Elementos de la diagonal principal.

Para este caso todos los elementos de la diagonal principal serán la suma de todas las admitancias que estén conectadas a esa barra.

$$Y_{ij} = \sum Y_{ij} \quad (4)$$

Por último, para la construcción de la impedancia de barra, se debe de tener en cuenta que todos los datos sean correctos

ya que a partir de la Ybarra se realizara el inverso para construir la impedancia de barra.

$$Z_{bus} = [Y_{bus}]^{-1} \quad (5)$$

2.6 Matriz multi-agente.

La metodología de la matriz multi-agente aún no está bien definida en qué tipo de investigaciones nomas se pueda implementar, ya que consiste en la implementación de algoritmos los cuales bajo ciertas condiciones que dan paso a la creación de otras sub matrices y que bajo parámetros establecidos se tomarán decisiones para localizar de manera rápida y eficiente cualquier anomalía en el SEP ante cualquier evento de falla [17].

Para nuestro caso lo que se a implementar es atribuir a nodos agentes los cuales estarán programados codificados bajos ciertos parámetros de acuerdo con el tipo de topología que se va a implementar como es en este caso de la simulación con el IEEE con generación distribuida [18].

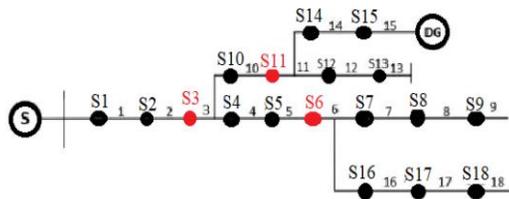


Figura 7. Red de distribución

2.6.1.1 Creación de las matriz multi-agente

De acuerdo con la topología de la estructura de la red de distribución las estrategias a tomarse en cuenta para la creación de las matrices y que el método de localización de falla tenga un intercambio de información de manera rápida y eficiente ante cualquier evento de fe falla eléctrica se establece criterios de tales como:

- Matriz de topología de la red.

Para la creación de estas matrices se toma como referencia a los nodos agentes, los cuales están establecidos como elementos de control listos para actuar ante cualquier evento de falla o mantenimiento que se pueda presentar, y son los reconectores, seccionadores, disyuntores e interruptores que están a lo largo del sistema de distribución eléctrica pueden ser subterráneos como aéreos dependerá del sitio de diseño [18].

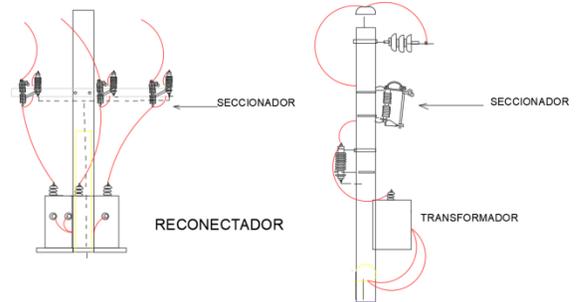


Figura 8. Elementos de control

- Matriz de información de falla.

Existen dos tipos de matrices alojadas en esta sección las cuales la matriz G1 nos otorgan la información del estado del evento en todos los tipos de nodos y G2 nos da información de los posibles eventos ocurrientes de fallas en todas las secciones del alimentador.

- Matriz de evaluación de falla.

En la creación de esta matriz de evaluación (P), se declara a través de la suma de la matriz de la topología y a su vez con la matriz del estado de los nodos del sistema no es nada más que la suma.

$$P = D1 + G1 \quad (6)$$

- Matriz de disparo del interruptor.

Para la matriz de disparo (S), se tendrá que multiplicar la matriz de la ubicación de falla que es D2, con la matriz de información de falla G2, para así evaluar las circunstancias del sistema dando paso a la apertura o cierre del cualquier

elemento antes mencionado en la topología de la de red ya que nos puede dar falsos datos y por ende el sistema es capaz de reconectarse caso contrario se abriría el paso del flujo eléctrico.

3 Estrategia de desarrollo de solución

La metodología implementada para la localización de fallas en sistemas de distribución con generación distribuida incluye la creación de un algoritmo que permite identificar con precisión el nodo donde se produce la falla. Este algoritmo maneja múltiples matrices bajo condiciones específicas, evaluando la información relacionada con la falla.

En la actualidad, es fundamental considerar que las redes de distribución son extremadamente extensas y cuentan con numerosas protecciones a lo largo de su trayecto, con el objetivo de garantizar el suministro eléctrico a los usuarios finales. Sin embargo, estas redes quedan vulnerables ante diversas fallas, ya sean causadas por fenómenos naturales, accidentes durante la manipulación de cargas o incluso por choques, lo que puede llevar al sistema a fallar.

Por esta razón, las empresas suministradoras han visto la necesidad de implementar mecanismos de localización de fallas adaptados a la topología de la red, con el fin de resolver las incidencias en el menor tiempo posible.

La metodología desarrollada se basa en la construcción de una matriz asignada a cada nodo agente, en función de sus sub- nodos distribuidos a lo largo de la topología de la red. Estas matrices, bajo ciertas condiciones y reglas de evaluación, permiten una localización precisa y exacta del nodo donde se ha producido la falla.

3.1 Reglas de juicio para la construcción de la matriz multi- agente

$$S = D2 * G2 \quad (7)$$

En la topología de la red de distribución se debe de tener en cuenta que, los disyuntores, seccionadores, interruptores de contacto, son denominados nodos y la dirección del flujo de energía es tomado como referencia, se debe de considerar que la dirección de energía cambiara en ciertos tipos de configuración de la red ya que en la actualidad las empresas han incorporado generación distribuida y eso hace que el flujo de referencia cambie de forma contraria y que estarán derivados de acuerdo a la topología de construcción de la red.

Primero lo que se toma en cuenta es la topología de la red en lo cual consta de dos matrices de dimensiones m , de acuerdo con el número de nodos denominadas como matriz de la topología de la red D_1 y D_2 .

D_1 la cual se utiliza para aislar la falla cuenta con la regla de juicio que si la dirección del nodo i esta conectado al nodo j , $D_{ij} = 1(i < j \leq m)$ de lo contrario $D_{ij} = 0(i < j \leq m)$.

Por otro lado, la matriz D_2 la cual ubica la falla analizando la relación de conexión entre la sección del alimentador y los nodos, que si en el segmento del alimentador i se encuentra en el nodo de conmutación j entonces $D_{ij} = 1$ de lo contrario $D_{ij} = 0$.

El paso siguiente es la conformación de la matriz de información de falla, que está destinada bajo G_1 y G_2 .

Donde G_1 , describe la información de localización de la falla de todos los nodos, reflejados en la diagonal principal de la matriz, la cual es cuadrada de

dimensiones m , en la que cuenta con tres estados del sistema siendo:

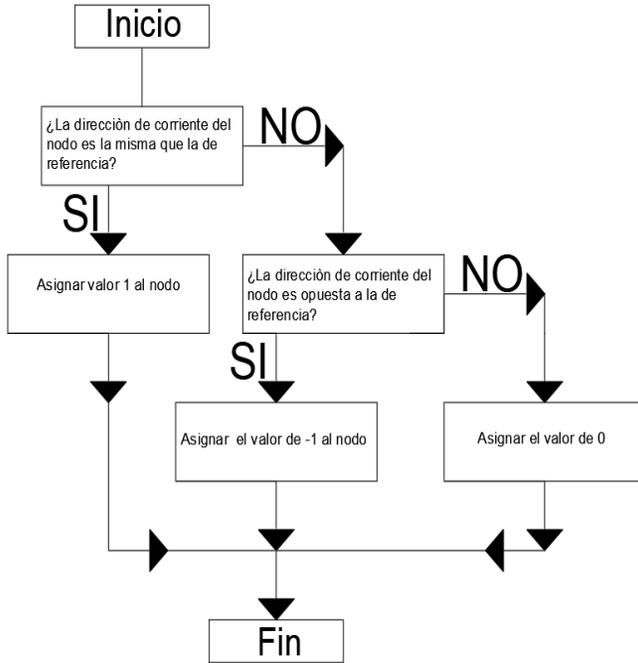


Figura 9. Diagrama de información de g_1

La matriz G_2 la cual es utilizada para aislar la falla que está calculada bajo la siguiente expresión matemática.

$$I * (X) = \underset{= 0}{\text{sign} \left(\sum_{n_1=1}^{N_1} x_j(n_1) - \sum_{n_2=1}^{N_2} x_j(n_2) \right)} \quad (8)$$

Tabla 2. Descripción de la fórmula de G_2

Expresión matemática para G_2	
N1	Es el número de segmentos de alimentación aguas abajo del nodo deseado.
N2	Es el número de segmentos de alimentación aguas arriba del nodo deseado.
$x_j(n_1)$	Es el estado de cada sección aguas abajo
$x_j(n_2)$	Es el estado de cada sección aguas arriba

El criterio de la matriz G_2 , el cual esta basada en aislar el suministro de energía

en el punto de falla aguas arriba del sistema, así como también aguas abajo, en lo que una vez aislado el nodo de falla se dividen en múltiples secciones las matrices, en lo que están catalogados como segmentos ascendentes toda el área que se encuentre transmitiendo corriente al nodo en específico y el resto del de nodos se definen como nodos descendentes.

A continuación se presenta una función no lógica $sign$ ya que de acuerdo al caso de estudio, si se implementa una función lógica se tendrá múltiples falencias al momento de la optimización inteligente del algoritmo el conlleva mucho tiempo para su precisión y exactitud, ya que si sus parámetros de la configuración no son exactos, su solución se verá afectada por ende al adoptar un cálculo no lógico debido a la extensión de topología de la red que en particularidad es muy grande, se evita fallas en la localización del nodo exacto de falla.

Teniendo en cuenta esos aspectos importantes, se estima que si después de la fuente de alimentación de aislamiento del punto falla en el nodo deseado no fluye corriente, el estado del nodo es 0.

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1, x \geq 1 \\ 0, x = 0 \\ -1, x < -1 \end{cases} \quad (9)$$

Posterior a ello se configura la matriz de evaluación de falla P , basada en la matriz de información de falla G_1 , junto con la matriz de topología de la red D_1 , en donde con solo la suma de las dos se determina la matriz.

$$P = D_1 + G_1 \quad (10)$$

En base a la información de la matriz de evaluación de falla se selecciona el

alimentador en donde en la que se encuentra la falla y así bajo ciertos criterios de juicio se evalúa directamente para así encontrar el nodo que este en falla.

- Cuando $P_{ii} = 1$ if $P_{ij} = 0 (i \neq j)$.

El final del segmento detrás del nodo j se encuentra en falla.

- Cuando $P_{ii} = 1$ if $P_{ij} = 1$ y $p_{jj} = (-1 / 0)$.

La sección del alimentador entre nodo i y el nodo j están defectuosos.

- Cuando $P_{ii} = 0$ if $P_{ij} = 1$ y $p_{jj} = -1$

La sección del alimentador que esta entre nodo i y el nodo j están defectuosos.

- Cuando $P_{ii} = -1$ if $P_{ij} = 1$ y $p_{jj} = 0$.

La sección del alimentador entre nodo i y el nodo j están defectuosos.

- Cuando hay una contradicción entre lo anterior y la sección T , si todo $P_{ij} = 1, p_{jj} \neq 1$.

Entonces la sección está T esta defectuosos.

Acorde con esa información de las matrices anteriores se llega a establecer la matriz de disparo del interruptor S , la cual se obtiene de la suma de la matriz de información de falla G_2 y la matriz de topología de la red D_2 , si $S_i = 1$, es necesario que se active el interruptor i , caso contrario no se activa y esta matriz se utilizara para ubicar correctamente el nodo que debe de activarse para aislar la falla bajo ciertas condiciones normales de trabajo.

3.2 Análisis de la matriz multi-agente considerando la fórmula de la probabilidad bayesiana.

La metodología del algoritmo implementado basado en la matriz multi-agente resuelve el problema SPOF

(Punto único de falla), el cual analiza con exactitud el nodo que se encuentra en falla siempre y cuando la información es correcta, bajo estas circunstancias se debe de tener en cuenta que todos los equipos de protección e información de datos del sistema se encuentran en la parte externa, por lo tanto, hace que se distorsione la información ya sea por diversas circunstancias estableciendo datos errados lo cual hace difícil encontrar el nodo exacto de falla.

Bajo esta aclaración se tiene en consideración la implementación de la fórmula de probabilidad bayesiana, definiendo el resultado de la ubicación de la falla del algoritmo en la matriz multi-agente, así como la sección de falla sospechosa, después de ello, se toma en consideración las probabilidades de los datos errados y perdidos de FTU (Unidad de terminación de falla), para así hacer una estimación bajo la fórmula de probabilidad bayesiana y localizar la falla real en el nodo exacto.

En la siguiente formula de probabilidad bayesiana se obtiene un análisis más exhaustivo el cual busca la probabilidad de que sucedan las falencias sobre la base de probabilidades condignamente.

$$P(S_L | I_L) = \frac{P(S_L)P(I_L|S_L)}{P(I_L)} \quad (11)$$

Donde:

- $P(I_L|S_L)$, es la probabilidad de que S_L ocurra bajo la condición de que S_L falle.
- $P(S_L)$, es la probabilidad de que el interruptor S_L falle.
- Para calcular $P(S_L|I_L)$, se necesita conocer los valores de $P(S_L)$, $P(I_L)$ y $P(I_L|S_L)$, pero es más fácil obtener los valores de

$P(S_L)$ y $P(I_L)$, según la premisa del supuesto:

- $P(S_L)$ y $P(I_L)$, son iguales, se puede obtener que $P(S_L|I_L)$, es proporcional a $P(I_L|S_L)$, como la formula siguiente.

$$P(S_L|I_L) = P(S_L|I_1)P(S_L|I_2) \dots P(S_L|I_N) \quad (12)$$

$$\propto P(I_1|S_L)P(I_2|S_L) \dots P(I_N|S_L)$$

Por ende en base al caso de estudio de puede juzgar indirectamente el segmento de línea con mayor probabilidad ante una falla ocurrente dando como resultado una precisión exacta del nodo de falla, por ende después de establecer la matriz de información de falla $[G_1 = G_{11}, G_{22}, G_{33}, \dots G_{nn}]$, sobre cada nodo y el resultado de ubicación preliminar se establece en función de la ubicación del segmento de falla, basado en la matriz de agente múltiples es $P_{ii} = 1$, pensando en G como el evento y Li como la causa de G . Posterior a ello se utiliza la fórmula de probabilidad bayesiana para la tolerancia a fallas que Li cause que G ocurra bajo condiciones de que G ya ha ocurrido, como se muestra en la formula siguiente.

$$P(Li|G) = P \sum_{i=1}^D G_{ii} (1 - P) \sum_{i=1}^N G_{ii} \quad (13)$$

Esta fórmula ayuda para evaluar la falla sospechosa y en base a ello localizar la falla real, donde D es el número de los nodos descendentes de la matriz en la que se encuentra el nodo actual de falla y N es el número de los nodos ascendente de la matriz actual.

3.3 Pseudocódigo: Localización de falla basada matriz multi-agente.

A continuación, presenta la lógica de los pasos para la creación del Pseudocódigo que se utiliza para la matriz multi-agente.

Tabla 3. Pseudocódigo de la matriz multi-agente

Pseudocódigo del matiz multi-agente para la localización de falla en red de distribución con generación distribuida

PASO 1	INICIO
PASO 2	Creación de modelo de la matriz multi-agente, en la que se definen los agentes de acuerdo con la topología de la red.
PASO 3	Construcción de la matriz de topología de la red D , basándose en la identificación de las secciones de la red.
PASO 4	Definición de la conexión entre las secciones de alimentación y los nodos $D2$, vinculando los nodos correspondientes a cada sección de alimentación.
PASO 5	Construcción de la matriz de información de falla $G1$, recopilando los datos de las fallas, para su debida clasificación según su tipo y ubicación.
PASO 6	Construcción de la segunda matriz de información de falla $G2$, basada con la nueva información de las fallas analizando los datos adicionales de las incidencias recientes.
PASO 7	Inserción de la fórmula de probabilidad bayesiana para cada nodo $P1$, ajustando las

probabilidades con datos actuales y previos.

PASO 8

Construcción de la matriz de evaluación de falla P2, priorizando las fallas según su impacto en la red.

PASO 9

Construcción de la matriz de disparo del interruptor, basados en los criterios de las evaluaciones en el nodo de falla exacto.

FIN

4 Análisis del caso de estudio

Para la verificación del método propuesto de localización de falla basado en la matriz multi-agente, se desarrolla simulaciones y verificaciones en el nodo IEEE33 con generación distribuida.

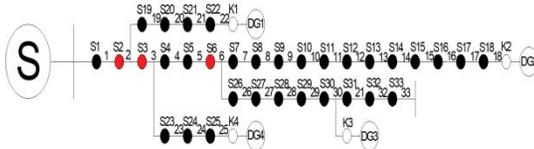


Figura 10. Nodo del IEEE33 con DG

Tabla 4. Elementos de nodo IEEE33 con DG

Componentes del Nodo IEEE33	
Nodos de conmutación	33
Interruptores de contacto K	4
Fuentes de alimentación DG	4
Subestación S	1

Bajo el diseño de la topología de la red que se tomara como ejemplo se desarrolla que la sección del alimentador 11 y la sección del alimentador 31, están con falla.

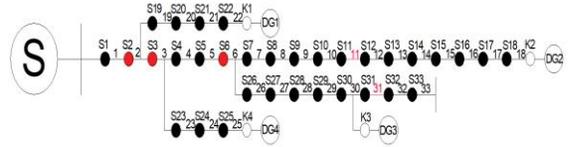


Figura 11. Nodo IEEE33 con falla.

En lo que erróneamente da señal el nodo S_6 $K = [1 \ 1 \ 0 \ 1]$, y falta información de los otros nodos tales como el S_2 y S_3 , por ende, se empieza a crear las matrices.

Agente matriz 1 (agente nodo S_2)

$$1 \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 19 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 21 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 22 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

La matriz de información de fallas G_1

$$1 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 19 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 20 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 21 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 22 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Matriz de evaluación de fallas $P_1 = D_1 + G_1$.

$$1 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 19 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 20 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 21 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 22 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

De los elementos internos en la matriz de determinación de fallas P_1 , se puede observar que $P_{[22,22]} = -1$, $P_{[21,22]} = 1$, $P_{[21,21]} = 0$, la falla de la sección P_{21} se puede determinarse por la falla en la sección 2 sobre la base del cuarto.

insuficiente, lo que resulta en la apertura de seccionadores en otros nodos que no están relacionados con el nodo de falla. Esto provoca una pérdida de tiempo y dinero.

Sin embargo, el método propuesto en este artículo implementa un algoritmo para la localización precisa del nodo ante una falla existente. Al incorporar la probabilidad bayesiana, el método se vuelve más exacto para la identificación del nodo de falla.

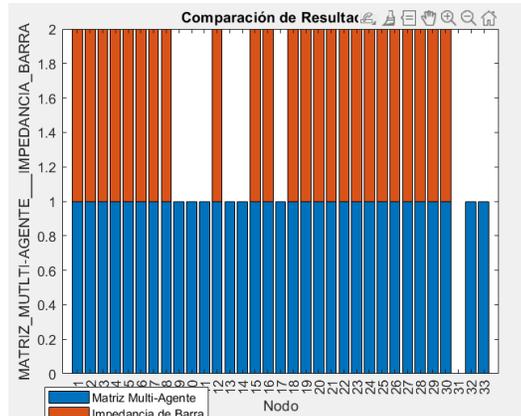


Figura 14. Nodo de IEE33barras

En la siguiente figura 15, se visualiza que el método basado en la matriz multi-agente tiene una exactitud y precisión superior al método de la impedancia de barra, brindando así una respuesta rápida en la localización del nodo de falla.

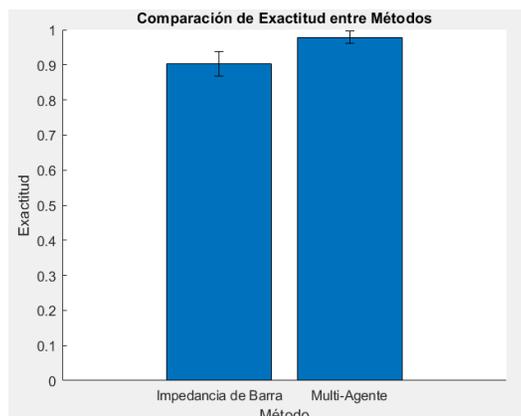


Figura 15. Exactitud de métodos

El método propuesto ofrece una mayor exactitud y precisión en comparación con

el método de la impedancia de barra [10]. Este enfoque alcanza un margen de precisión media del 98% y una exactitud superior del 8%, lo que permite solventar una falla en el menor tiempo posible. Al implementar la matriz multi-agente y subdividirla en nodos agentes de acuerdo con la topología de la red, junto con la fórmula de probabilidad bayesiana en el algoritmo, se reducen los tiempos de cálculo en un 33%, minimizando los falsos disparos en un 5%. Esto garantiza que el sistema no se vea perjudicado y que solo se activen las protecciones del nodo de falla.

La matriz multi-agente no solo mejora la precisión, sino que también hace que el sistema sea más confiable, rápido y seguro. Esto permite una restauración inmediata del suministro eléctrico ante un evento de falla, lo que contribuye a la eficiencia general del sistema eléctrico de distribución.

Tabla 6. Comparación de método

Secuencia	Nodo_Falla	Porcentaje_Error_Matriz_Multiagente	Porcentaje_Error_Impedancia	Comparación_Error	Metodo_Efectivo
1	23	10,49486165	7,566925582	2,9279361	Impedancia de Barra
2	8	4,564296955	6,463785654	-1,899489	Matriz Multi-Agente
3	29	7,977163463	8,878119955	-0,900956	Matriz Multi-Agente
4	10	1,771116118	3,296440315	-1,525324	Matriz Multi-Agente
5	5	0,578403975	10,64256441	-10,06416	Matriz Multi-Agente
6	1	8,861948162	13,90585068	-5,043903	Matriz Multi-Agente
7	26	9,355214228	9,794144439	-0,43893	Matriz Multi-Agente
8	14	0,830000974	8,448422075	-7,618421	Matriz Multi-Agente
9	29	12,0744698	14,1334038	-2,058934	Matriz Multi-Agente
10	18	1,577155619	11,22858798	-9,651432	Matriz Multi-Agente
11	17	0,742455119	5,933362668	-5,190908	Matriz Multi-Agente
12	13	8,635454243	12,72287479	-4,087421	Matriz Multi-Agente
13	6	11,36120014	1,361105433	10,000095	Impedancia de Barra
14	6	2,276063328	10,16791032	-7,891847	Matriz Multi-Agente
15	31	9,97819747	8,871767468	1,10643	Impedancia de Barra

16	2	8,359807022	5,384865075	2,9749419	Impedancia de Barra
17	28	2,978401183	9,149747853	-6,171347	Matriz Multi-Agente
18	22	8,934659517	8,522337238	0,4123223	Impedancia de Barra
19	17	5,75819513	14,36324671	-8,605052	Matriz Multi-Agente

6 Conclusión

El método de localización de falla basada en la matriz multi- agente brinda un enfoque innovador para la localización de fallas en sistemas de distribución con generación distribuida. Este método se basa en la creación de matrices multi-agente y la inserción de la fórmula de probabilidad bayesiana en la matriz.

La combinación de estas técnicas permite que el método se adapte a cualquier tipo de topología de red, identificando con precisión el segmento de falla ante un evento real. Esta flexibilidad es una ventaja significativa en la gestión de redes de distribución modernas y complejas.

El método propuesto ha sido modelado en diferentes escenarios, demostrando un promedio de error significativamente inferior al modelo de impedancia de barra. Con un margen de error del 6.88%, brinda una confiabilidad del 93.12%, mientras que el error calculado de la impedancia de barra es del 7.63% con una confiabilidad del 92.37%. Estos resultados indican que el método de matriz multi- agente es 10.49% más efectivo para la localización de fallas en el sistema eléctrico de distribución.

7 Referencias

[1] P. Kayal and C. K. Chanda, "Placement of wind and solar based DGs in distribution system for power loss minimization and voltage stability improvement," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*,

vol. 53, pp. 795–809, 2013, doi: 10.1016/j.ijepes.2013.05.047.

R. Rajaram, K. Sathish Kumar, and N. Rajasekar, "Power system reconfiguration in a radial distribution network for reducing losses and to improve voltage profile using modified plant growth simulation algorithm with Distributed Generation (DG)," *Energy Reports*, vol. 1, pp. 116–122, May 2015, doi: 10.1016/j.egy.2015.03.002.

M. M. Aman, G. B. Jasmon, A. H. A. Balar, and H. Mokhlis, "A new approach for optimum simultaneous multi-DG distributed generation Units placement and sizing based on maximization of system loadability using HPSO (hybrid particle swarm optimization) algorithm," *Energy*, vol. 66, pp. 202–215, 2014, doi: 10.1016/J.ENERGY.2013.12.037.

I. D. Serna-Suárez, C. D. Ferreira-Sequeda, S. A. Martínez-Gutiérrez, M. F. Suárez-Sánchez, and G. Carrillo-Caicedo, "Impact of static load models on the power distribution fault location problem," in *2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, T and D-LA 2010*, 2011, pp. 706–711. doi: 10.1109/TDC-LA.2010.5762961.

C. Tebaldi and M. West, "Bayesian inference on network traffic using link count data," *J Am Stat Assoc*, vol. 93, no. 442, pp. 557–573, Jun. 1998, doi: 10.1080/01621459.1998.10473707.

Universidad de Sevilla, "2. Generación distribuida 2.1. Introducción."

Accessed: Nov. 12, 2023. [Online]. Available:

<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/70549/fichero/Capitulo+2.pdf>

R. Pérez, C. Vásquez, and A. Viloriaf, "Métodos de localización de fallas en sistemas eléctricos de distribución con presencia de generación distribuida. In:

- INGA, E., ed. *Aplicaciones e innovación de la ingeniería en ciencia y tecnología* [online]. Quito: Editorial Abya-Yala, 2019, pp. 57-96. ISBN: 978-9978-10-491-0. ORTEGA, E.,", Accessed: Oct. 27, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.7476/9789978104910.0004>. [14]
- [8] O. Delgado, "Inserción de generación distribuida en redes de distribución considerando la minimización de energía no servida," 2022. Accessed: Sep. 12, 2023. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/22641/1/UPS%20-%20TTS816.pdf> [15]
- [9] T. Ackermann and T. Ackermann, "Distributed generation: a definition," *Electric Power Systems Research* 57, vol. 7796, no. August 2016, pp. 195–204, 2001, doi: 10.1016/S0378-7796(01)00101-8. [16]
- [10] D. Acuña, "Localización de fallas en sistemas eléctricos de distribución basados en la matriz de impedancia de barra," Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2017. Accessed: Sep. 22, 2023. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14294/6/UPS-KT01379.pdf> [17]
- [11] R. Camacho, "Localización de fallas en redes de distribución eléctrica por sensado comprimido (COMPRESSIVE SENSING)," 2017. Accessed: Oct. 23, 2023. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/13585/3/UPS-KT00262.pdf>
- [12] M. López, "Ubicación de fallas en redes de distribución eléctrica basado en sensado comprimido," 2018. Accessed: Oct. 22, 2023. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15722> [18]
- [13] J. J. Mora Flórez, J. (Colomer L. Colomer, Joaquim. Meléndez Frigola, Gilberto. Carrillo Caicedo, and I. i A. Universitat de Girona. Departament d'Electrònica, *Localización de faltas en sistemas de distribución de energía eléctrica usando métodos basados en el modelo y métodos basados en el conocimiento*. Universitat de Girona, 2007.
- Z. Moravej, O. Hajhosseini, and M. Pazoki, "Fault location in distribution systems with DG based on similarity of fault impedance," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 25, no. 5, pp. 3854–3867, 2017, doi: 10.3906/elk-1606-461.
- J. Bedoya, "Algoritmos para localización de fallas en sistemas de distribución usando maquinas de soporte vectorial."
- John J. Grainger and Jr. William D. Stevenson, *Análisis-de-Sistemas-de-Potencia-Grainger-Stevenson*. 2023. Accessed: Nov. 12, 2023. [Online]. Available: <https://catedras.facet.unt.edu.ar/sep/wp-content/uploads/sites/20/2020/03/An%C3%A1lisis-de-Sistemas-de-Potencia-Grainger-Stevenson.pdf>
- Z. Lin, Y. Wang, R. Zhong, B. Luo, Q. Ma, and C. Yu, "Coordinated Optimization Method of Distributed Protection for Distribution Network Based on Multi-agent," in *Proceedings - 2023 8th Asia Conference on Power and Electrical Engineering, ACPEE 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023, pp. 2650–2655. doi: 10.1109/ACPEE56931.2023.10136014.
- C. Zhang, Z. Wang, Q. He, C. Wang, and J. Yuan, "Fault Location and Isolation of Distribution Network with Distributed Generation Based on Multi-Agent Matrix," in *2022 1st International Conference on Cyber-Energy Systems and Intelligent Energy, ICCSIE 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. doi: 10.1109/ICCSIE55183.2023.10175293.

