

**TÉCNICAS DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN
DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

**VICTOR ELIAS MENESES AGRESOTH
PEDRO MANUEL RUEDA PEÑA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA
ELÉCTRICA
BUCARAMANGA
2019**

**TÉCNICAS DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN
DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

**VICTOR ELIAS MENESES AGRESOTH
PEDRO MANUEL RUEDA PEÑA**

**Proyecto de grado para optar el título de Especialista en Sistemas de
Distribución de la Energía Eléctrica**

Director

JAIRO BLANCO SOLANO

Dr. en Ingeniería (Ing. Eléctrica, Electrónica y Gestión & Desarrollo)

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA
ELÉCTRICA
BUCARAMANGA**

2019

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	11
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	13
1.1 JUSTIFICACIÓN	13
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 Objetivo General	14
1.1.2 Objetivos Específicos	14
2. GENERALIDADES DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN	16
2.1 CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA	17
2.1.1 Calidad de Onda	18
2.1.2 Calidad de atención comercial al cliente.	18
2.1.3 Continuidad del suministro	18
2.1.3.1 Indicadores de la continuidad del suministro	19
2.1.3.2. Indicadores regulatorios en Colombia	21
2.2 GESTIÓN DE FALLAS	22
2.3 RETOS EN LA LOCALIZACIÓN DE FALLAS	24
2.4 MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS	24
2.4.1 Análisis de señales	25
2.4.2 Inteligencia artificial	26
2.4.3 Métodos híbridos	26
2.4.4 Otros métodos	27
2.4.4.1 Métodos que utilizan fasores sincronizados	27
2.4.4.2 Métodos que requieren etiquetado de tiempo de los eventos	27
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	28
4. PERSPECTIVAS DE LA LOCALIZACIÓN DE FALLAS	57
5. CONCLUSIONES	59

BIBLIOGRAFÍA.....61

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Análisis de los métodos estudiados.	53

RESUMEN

TÍTULO: TÉCNICAS DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA*

AUTORES: VICTOR ELIAS MENESES AGRESOTH
PEDRO MANUEL RUEDA PEÑA**

PALABRAS CLAVE: Sistemas de distribución, fallas, localización, topologías, interrupción del servicio, inteligencia artificial.

DESCRIPCION:

Los sistemas eléctricos se diseñan y operan para garantizar el suministro de energía eléctrica a todos los usuarios de manera segura, confiable y económica. No obstante, actualmente los usuarios se ven afectados por los cortes frecuentes o prolongados en el servicio de energía eléctrica, debidos a fallas en los sistemas de distribución que ocasionan insatisfacción en los usuarios por dependencia que se ha creado entre la sociedad y la calidad de vida por el uso de la tecnología. Por esta razón es necesario optimizar los tiempos de restablecimiento de los sistemas eléctricos con miras en la reducción de los impactos en los usuarios finales, además proteger a plenitud los elementos comprometidos en las condiciones de falla y así evitar las implicaciones técnicas y económicas que estas desconexiones traen consigo.

El problema de la localización de fallas en los sistemas de distribución de energía eléctrica es debido a la acotada adaptabilidad de los modelos desarrollados, limitados la mayoría de los casos a un pequeño número de topologías. Un gran número de metodologías utilizadas en determinación del punto de falla evidencian falencias al localizar y clasificar el tipo de falla presentado, siendo aún mayores estas deficiencias con las fallas de alta impedancia. En el campo de la inteligencia artificial se identifican trabajos con resultados aceptables en la localización de fallas de baja impedancia y corta distancia; otros presentan un alto costo de implementación por los equipos para medir las señales eléctricas.

En esta monografía se busca recopilar información de los trabajos más relevantes en el área de la localización de fallas en sistemas de distribución de energía, resaltando sus ventajas y desventajas dentro de una visión global de estos, además de realizar un análisis del estado actual y las perspectivas de desarrollo que se encuentren luego de esta revisión.

* Monografía

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Especialización en Sistemas de Distribución de la Energía Eléctrica. Director: Dr. Jairo Blanco Solano.

ABSTRACT

TITLE: METHODS FOR FAULT LOCATION IN DISTRIBUTION SYSTEMS OF ELECTRIC POWER*

AUTHORS: VICTOR ELIAS MENESES AGRESOTH
PEDRO MANUEL RUEDA PEÑA**

KEYWORDS: Distribution systems, faults, location, topologies, interruption of service, artificial intelligence.

DESCRIPTION:

Electrical systems are designed and operated to ensure the supply of electrical energy to all users in a safe, reliable and economical way. However, users are currently affected by frequent or prolonged outages in the energy service, because of faults in the electric power distribution system; this causes dissatisfaction on the part of the users due to the dependency that has been created between the society and the technology. For this reason, it is necessary to optimize the times for normal operation of the system, also to fully protect all the elements involved in the fault conditions, and thus avoid the technical and economic implications that these disconnections bring with them

The problem of fault localization in electric power distribution systems, is due to the limited adaptability of the models developed, most cases tied to a small number of topologies. Most of the methodologies used for the determination of failures, show failure to locate and classify the type of fault presented, increasing such deficiencies with high impedance faults, something very serious since they are the ones that happen most in our country. There are many recent methods that use artificial intelligence techniques with good results with low impedance and short distance relay faults; others have a high implementation cost for the equipment to measure electrical signals

This monograph aims to collect information on the most relevant work in the area of fault localization in energy distribution systems, to review their advantages and disadvantages by giving an overview of these, in addition to making an analysis of the current state with respect to the development prospects that are found after this review.

* Monograph

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications. Specialization in Distribution Systems of Electrical Energy. Director: Phd Jairo Blanco Solano.

INTRODUCCIÓN

Como consecuencia de la continua evolución de la regulación que rige el sector eléctrico, la calidad del servicio de energía eléctrica se ha convertido en tema de gran interés para las empresas prestadoras del servicio. Los problemas de la calidad de potencia eléctrica resultan más complejos en la medida que aumenta el uso de cargas electrónicas sensibles y que requieren de un suministro constante de energía para su correcto funcionamiento. En consecuencia la ubicación rápida y efectiva de las fallas en las redes juega un papel importante para una calidad del servicio.

Actualmente se considera que un localizador de fallas confiable, es capaz de identificar con precisión la parte defectuosa de la red, puede reducir el tiempo de interrupción y ayudar con la restauración rápida. A nivel del sistema de distribución, la problemática de la ubicación precisa de fallas ha sido formulada en base a varios enfoques que incluyen el análisis de frecuencia fundamental, la detección de ondas viajeras (TW) generadas en el inicio de una falla, inteligencia artificial, y otros métodos como por ejemplo el uso de medidores inteligentes en los sistemas de distribución.

Los sistemas eléctricos se diseñan y operan de tal forma que garanticen el suministro de energía eléctrica a todos los puntos de conexión de manera segura, confiable y económica. La rutina normal de la sociedad de hoy día tan dependiente de la tecnología, se ve afectada por los cortes frecuentes o prolongados en el servicio de energía, los cuales se deben en gran número a fallas en el sistema de distribución de energía eléctrica. De esta forma se vuelve necesario proteger a plenitud todos elementos comprometidos en las condiciones de falla y posibilitar la operación normal del resto del sistema, así como también restituir en el menor

tiempo posible la operación normal del sistema, debido a las implicaciones técnicas y económicas que estas desconexiones traen consigo.

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad los costos de operación y mantenimiento de los sistemas eléctricos se ven incrementados por el número de fallas de la red, motivo por el cual se han venido estudiando diversas técnicas de localización de fallas con el fin de que disminuyan los tiempos de interrupción del servicio, así como los gastos en los que se incurren al presentarse dichas anomalías. Dentro de las técnicas más utilizadas para la detección de fallas están las que emplean la transformada de wavelet, algoritmo genético, análisis de la frecuencia, inteligencia artificial, entre otros ¹.

Un caso muy particular de fallas que se presentan en los sistemas de distribución de energía eléctrica son las fallas de alta impedancia, cuya característica más relevante está asociada a su no linealidad acompañada de una magnitud baja de corriente de falla. Debido a las características de este tipo de fallas no pueden ser descubiertas con las medidas de tensión y corrientes que realizan los equipos de protección y en muchos de los casos arrojan resultados errados. Esto deriva en daños en el sistema y aún más grave a los usuarios que dependen del servicio de energía eléctrica, incurriendo en costos muy altos, lo cual da pie a la utilización de los métodos de inteligencia artificial para tratar mitigar dicha problemática. Uno de los más grandes desafíos que tiene esta aplicación de esta tecnología, es el dejar de lado la estructura centralizada complicada de reconfigurar en un corto plazo; otro problema al implementar las Smart Grids, es el temor por parte de las empresas prestadoras del servicio de energía en realizar grandes inversiones y

¹ ABOSHADY, F., THOMAS, D., y SUMNER, M. Esquema rápido de localización de fallas en Sistemas de Distribución basados en fallas transitorias. IEEE. 2017

que estas tecnologías cambien en periodos muy cortos de tiempos, lo que traería como consecuencia que queden con tecnologías obsoletas.

Con la implementación de las Smart Grids se esperan muchos beneficios tanto ambientales como económicos, pero hacen falta muchos retos por superar que garanticen la aplicación de estas redes inteligentes, una vez estas sean lo suficientemente robustas, confiables y económicamente seguras, serían una opción indicada para la evolución de los sistemas eléctricos de potencia ².

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo General Elaborar un estado del arte en el tema de localización de fallas en sistemas de distribución de energía eléctrica, destacando los nuevos métodos formulados, como también las tendencias y perspectivas en la solución de esta problemática.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar los trabajos más significativos en el tema de la localización de fallas en los sistemas de distribución de energía eléctrica.
- Documentar el estado del arte por avances y/o aportes relevantes de la localización de fallas de red.
- Analizar las ventajas y desventajas de los métodos existentes más utilizados para la identificación de fallas en los sistemas de distribución de energía eléctrica.

² MORALES, G., BARRERA, R., y VARGAS, H. Ubicación única de fallas en sistemas de distribución por medio de zonas con SVM; Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.º 47. 2009

- Realizar un análisis de los resultados relevantes a partir de la revisión del estado del arte, presentando las perspectivas de desarrollo en la localización de fallas.

2. GENERALIDADES DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN

La energía eléctrica es un servicio indispensable en la mayoría de las actividades de la población aun en sus tareas cotidianas y domésticas como en el campo industrial, por esto se hacen esfuerzos por mejorar la calidad del servicio prestado, que es gran importancia para la sociedad hoy día. Con las nuevas tecnologías, una gran parte de equipos eléctricos y electrónicos de uso residencial e industrial son más sensibles a las perturbaciones de los parámetros de alimentación. Por esta razón se requiere que la calidad de la energía y la continuidad en el servicio de energía eléctrica, se fundamenten en principios de confiabilidad.

A raíz de esto, las empresas distribuidoras de energía realizan grandes esfuerzos por implementar metodologías que faciliten el hallazgo de forma rápida y confiable de las fallas, con el fin de atenuar el impacto económico y social que se puede llegar a causar a los usuarios finales, asociado a los principios de calidad de la energía eléctrica.

Los recursos económicos invertidos por los operadores de red y comercializadores para mejorar dicha calidad del servicio, se debe evidenciar de manera fácil y transparente disminuyendo el número de interrupciones y la duración de estas, por lo cual se debe documentar por medio de los indicadores diseñados para este fin.³

³ GÓMEZ, V., PEÑA, R., y HERNÁNDEZ, C. Identificación y localización de fallas en sistemas de distribución, utilizando medidores de calidad del servicio de energía eléctrica. Revista Científica / ISSN 0124 2253/ Julio – Diciembre / No. 14 / Bogotá, D.C. 2011

2.1 CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Existen muchos conceptos acerca de la definición de la calidad del energía, dentro de los cuales destaca la siguiente *“Conjunto de características físicas de las señales de tensión y corriente, de un sistema de potencia en un momento determinado, que permiten satisfacer las necesidades requeridas por el usuario de la electricidad”* ⁴.

También puede definirse según la IEEE 1159- 95 como un gran número de fenómenos electromagnéticos propios de las señales de tensión y corriente un instante y punto determinado del sistema eléctrico. Otra definición acertada es el bajo número de interrupciones y perturbaciones sobre las señales de tensión y corriente en la red suministradas al usuario. ⁵

Se puede decir que existe un problema de calidad de la energía eléctrica cuando ocurre una alteración en los valores de la tensión, la corriente o la frecuencia, ocasionando el mal funcionamiento de los equipos y afecte también el bienestar de los usuarios ⁶. Las perturbaciones que ocurren en el sistema eléctrico afectan la calidad de la energía; las principales causas de esto son las fallas del sistema, conexión y desconexión de cargas muy elevadas, descargas atmosféricas y la no linealidad asociada a cargas como lo son los equipos electrónicos, entre otras.

Existen tres aspectos fundamentales a tener en cuenta cuando de calidad de servicio de energía eléctrica se trata:

⁴ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS (ICONTEC). Norma Técnica Colombiana 5000 (NTC 5000).. Calidad de la potencia eléctrica (CPE). Definiciones y términos fundamentales, 2013

⁵ COLCIENCIAS. . Un proyecto de la unidad de planeación minero energética de Colombia (UPME) y el instituto colombiano para el desarrollo de la ciencia y la tecnología. Francisco José de Caldas, Universidad del Atlántico, Universidad Autónoma de Occidente, disponible en: <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Docs/calidad.pdf>, consultado junio de 2017

⁶ Ibíd.

- **Calidad de Onda:** En esta característica se mide primordialmente los parámetros de las señales eléctricas.
- **Calidad de atención comercial al cliente:** Se evidencia capacidad y cobertura de atención al cliente, así como la entrega de información acertada.
- **Continuidad del suministro:** Se evalúa la cantidad y el tiempo de duración de las interrupciones del servicio ⁷.

2.1.1 Calidad de Onda Para hablar de calidad de onda hay que establecer antes estándares calidad y parámetros aceptables para esta. Sabiendo de antemano que la energía eléctrica se genera, transporta y distribuye en forma sinusoidal, cualquier desviación que se genere con respecto a la forma estándar de señales de tensión y/o corriente, se considera una disminución de la calidad en dichas ondas. ⁸.

2.1.2 Calidad de atención comercial al cliente. Abarca todo lo relacionado con los PQR's, la atención que se realiza a los usuarios para solucionar sus peticiones, quejas y reclamos, con relación a los procesos de facturación y/o contratación del servicio de energía eléctrica ⁹.

2.1.3 Continuidad del suministro Hace alusión al uso ininterrumpido de la energía eléctrica por parte de los usuarios y para su evaluación existen indicadores que se clasifican en dos grupos. El primero de estos hace referencia al tiempo de duración de las interrupciones, representadas en las horas que usuario no contó con el suministro de energía y en el segundo grupo se realiza un conteo del número de interrupciones en el suministro ¹⁰.

⁷ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS (ICONTEC). oP. cIT.

⁸ CARRERA, W. Modelo de dimensionamiento de cuadrillas para la atención de fallas en el Sistema de distribución de CODENSA S.A. ESP. Universidad Nacional de Colombia; Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Bogotá D.C. 2016

⁹ Ibíd.

¹⁰ Ibíd.

2.1.3.1 Indicadores de la continuidad del suministro La IEEE *Power Engineering Society* define y describe los indicadores de calidad del servicio orientados hacia los usuarios, estos estándares internacionales, son aplicados en Colombia. ¹¹.

A. Indicadores orientados al cliente

Estos indicadores son implementados por empresas distribuidoras de energía eléctrica para dar un diagnóstico de la confiabilidad de las redes y la afectación de los usuarios, los indicadores que se aplican en nuestro país son: ¹²

- **Índice de frecuencia promedio de interrupciones del sistema (System Average Interruption Frequency Index) SAIFI:**

El SAIFI muestra el tiempo total promedio de interrupción por usuario en un periodo determinado, y es calculado del resultado de dividir el número total de usuarios afectados en cada interrupción entre el número de usuarios del sistema eléctrico.

$$SAIFI = \frac{N_o \text{ total de interrupciones a usuarios}}{N_o \text{ total de usuarios atendidos}}$$

- **Índice de interrupciones promedio por cliente (Customer Average Interruption Frequency Index) CAIFI:**

El CAIFI representa el número promedio de interrupciones que sufre un usuario afectado y es calculado del resultado de dividir el total de interrupciones percibidas por cada usuario entre el total de usuarios afectados, este indicador evalúa la tendencia de la calidad de la energía proporcionada a los usuarios.

¹¹ Ibíd.

¹² Ibíd.

$$CAIFI = \frac{N_o \text{ total de interrupciones a usuarios}}{N_o \text{ total de usuarios afectados}}$$

- **Índice de duración promedio de interrupciones del sistema (System Average Interruption Duration Index) SAIDI:**

El SAIDI muestra la duración promedio de interrupciones experimentadas por cada usuario en un periodo determinado de tiempo y es calculado del resultado de dividir el total de la duración de las interrupciones de los usuarios entre el número total de usuarios, este indicador está relacionado con la ubicación de las fallas y los recursos necesarios para restablecer el servicio

$$SAIDI = \frac{\sum \text{de la duracion de interrupciones a usuarios}}{N_o \text{ total de usuarios atendidos}}$$

- **Índice de duración promedio de interrupciones por cliente (Customer Average Interruption Duration Index) CAIDI:**

El CAIDI representa la duración promedio de interrupciones de un usuario durante un periodo de tiempo y es calculado del resultado de dividir la duración total de las interrupciones de los usuarios entre el número total de usuarios interrumpidos, este indicador no necesariamente indica mejoras en la confiabilidad del sistema.

$$CAIDI = \frac{\sum \text{de la duracion de interrupciones a usuarios}}{N_o \text{ total de interrupciones a usuarios}}$$

- **Índice de disponibilidad promedio del servicio (Average Service Availability Index) ASAI:**

El ASAI muestra la misma información del SAIDI pero de manera porcentual o en por unidad, es la disponibilidad media del sistema.

$$ASAI = \frac{\text{Horas de disponibilidad de servicio a usuarios}}{\text{Horas demandadas por los usuarios}}$$

- **Índice de indisponibilidad promedio del servicio (Average Service Unavailability Index) ASUI:**

El ASUI es el complemento del indicador ASAI, es la indisponibilidad media del sistema.

$$ASUI = 1 - ASAI$$

2.1.3.2. Indicadores regulatorios en Colombia En Colombia hoy por hoy, está definida la metodología de remuneración para todos los sistemas de distribución de energía, a través de la comisión reguladora de energía y gas (CREG) en su Resolución 024 de 2016, estas medidas cobijan para el periodo tarifario comprendido entre los años 2014-2019. Toda esta normativa es implementada con un solo objetivo, el de mejorar la calidad media de servicio de distribución en Colombia, dando señales de mejora en los usuarios que hasta hoy tienen un servicio de pésima calidad ¹³. Para evaluar el servicio prestado por el operador de red (OR) se harán medidas en términos de la duración y la frecuencia de las perturbaciones que de alguna forma afecten a los usuarios. Con este fin, se adoptan indicadores

¹³ COMISIÓN REGULADORA DE ENERGÍA Y GAS. Documento CREG 008 – Metodología de remuneración de la actividad de distribución de energía eléctrica para el próximo periodo tarifario. Ministerio de Minas y Energía, Colombia. 2016

de referencia internacional para evaluar cómo estamos en materia de calidad de energía, a partir de la calidad que perciba cada uno de sus usuarios ¹⁴. Los indicadores utilizados como referencia son ITAD e IRAD a los cuales se les renombra como SAIDI y SAIFI respectivamente, simplificando el esquema de medición y concediendo que estos indicadores sean tenidos en cuenta a la hora de la remuneración al OR ¹⁵.

En la normativa también se define que para los SDL, los niveles de calidad individual se medirán a través de los indicadores DIU y FIU. Estos indicadores serán usados para garantizar los mínimos niveles de calidad por parte del OR, así como los niveles individuales que el OR proporciona mensualmente ¹⁶.

El indicador DIU muestra la duración total de las interrupciones que el usuario del SDL nota de un OR durante un periodo de tiempo de un mes. El indicador FIU representa el número total de interrupciones que el usuario del SDL percibe del OR en un período mensual ¹⁷.

2.2 GESTIÓN DE FALLAS

En la actualidad, son muchas las teorías que permiten desarrollar métodos dinámicos, los cuales ofrecen y dan las pautas para convertir los tiempo de falla, en sistemas de información logrando con esto la integración de las áreas operacionales

¹⁴ COMISIÓN REGULADORA DE ENERGÍA Y GAS. Resolución CREG 024, Ministerio de Minas y Energía, República de Colombia. 2016

¹⁵ VARGAS, C. Evaluación de las metodologías regulatorias para remunerar los sistemas de distribución en Colombia, y presentar propuestas de mejora, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C. 2016

¹⁶ COMISIÓN REGULADORA DE ENERGÍA Y GAS. Op. Cit.

¹⁷ Ibíd.

y funcionales de los OR, todo esto con la finalidad de lograr una interacción como un todo, dando facultades para realizar una medición puntual y eficaz ¹⁸.

Los estados de fallas reciben el nombre de fallas funcionales debido a que aparecen cuando el activo no puede ejecutar una función de acuerdo con el parámetro de funcionamiento que se considera aceptable por parte del usuario ¹⁹.

- **Modos de fallas**

Un modo de falla es una posible manera en la que un sistema eléctrico puede fallar a causa de las perturbaciones que ocurren en este. La complejidad de los sistemas eléctricos es proporcional a los modos de falla existentes en este. Los modos de fallas son importantes para mejorarla confiabilidad de un sistema. En los modos de falla, se tienen en cuenta fallas que están siendo evitadas por los esquemas de mantenimiento existentes, de la misma manera son consideradas fallas cuya probabilidad de ocurrencia se encuentre en un nivel alto ²⁰.

- **Efectos de falla**

En este apartado se debe especificar toda información necesaria que permita concientizar y realizar una evaluación objetiva de consecuencias que traen consigo fallas, tales como:

- Evidencia de la existencia y el tipo de falla.
- Amenazas latentes a la seguridad y medio ambiente.
- Afectación sobre la producción o a las operaciones.
- Daños en la integridad física ocasionados por la falla ²¹

¹⁸ SANTAMARÍA, W. Modelo de gestión para el proceso de atención de fallas en redes de distribución para CODENSA S.A. ESP, Universidad Libre, Facultad de Ingeniería Industrial, Bogotá D.C. 2016

¹⁹ Ibíd.

²⁰ Ibíd.

²¹ Ibíd.

2.3 RETOS EN LA LOCALIZACIÓN DE FALLAS

Uno de los problemas más renuentes en la localización de fallas en sistemas de distribución de energía eléctrica, se presenta a la hora de utilizar las metodologías existentes para localizar fallas debido al gran número que se han propuesto y la diversidad de datos de entrada que estas emplean para ubicarlas fallas en el sistema ²²[14]. Además, por la complejidad de las redes existentes, las cuales contienen cargas intermedias, conductores no homogéneos, desbalances y derivaciones laterales entre otras. Sumado a esto, está el impedimento de que en la mayoría de los casos solo existen medidas en la subestación.

Muchos de los artículos planteados para esta temática, utilizan métodos clásicos de localización, los cuales usan las medidas tomadas en la S.E para estimar la reactancia, ya que con esta se puede estimar la distancia al sitio donde sucedió la falla. Los problemas de estos métodos comienzan con la necesidad de tener un buen modelo del sistema y la múltiple estimación, debido a que la distancia calculada a partir de la reactancia puede corresponder a varios lugares, debido al carácter ramificado de los sistemas de distribución ²³.

2.4 MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS

La ubicación de fallas en las redes de distribución, juega un papel importante al momento de prevenir sanciones debidas a la indisponibilidad del suministro. De la misma forma, la identificación y localización de estas perturbaciones se hace se

²² CADENA, A., FLÓREZ, J., y LONDOÑO, S. Estrategia de reducción para la aplicación generalizada de localizadores de fallas en sistemas de distribución de energía eléctrica; Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 17, p. 21-37. 2012

²³ MORALES, G., VARGAS, H., y FLÓREZ, J. Influencia de la variación en la carga y del tamaño de la zona en la precisión de un localizador de fallas para circuitos de distribución. UIS Ingenierías, Volumen 6, No.1, págs. 47-57. 2007

hace valiosa para mejorar los índices de calidad del servicio ²⁴. Las fallas del sistema eléctrico pueden ser permanentes y transitorias, y dispositivo localizador de fallas brinda información en ambos casos. Las fallas transitorias tienen un impacto menor y no se pueden ubicar haciendo inspección visual. Para fallas de este tipo, los localizadores deben dar la posibilidad de encontrar puntos frágiles en el sistema y tomar correctivos para evitar daños en una escala mayor por reincidencia. Por otro lado para las fallas permanentes, se requiere un rápido aislamiento, reparación y restauración del servicio ²⁵.

Los métodos utilizados para la localización de fallas pueden ser divididos en cuatro grupos:

- Técnicas basadas en la frecuencia fundamental de las corrientes y las tensiones, adquiridos primordialmente para medir la impedancia.
- Técnicas fundadas en ondas viajeras.
- Técnicas apoyadas en los componentes de alta frecuencia de las corrientes y tensiones generadas por los fallos.
- Aproximaciones basadas en el conocimiento ²⁶.

2.4.1 Análisis de señales Haciendo parte de la gran cantidad técnicas existentes de localización de fallas se encuentran las basadas en mediciones de los huecos de tensión. A su vez, estas se pueden clasificar en las siguientes categorías:

- Localización basada en la comparación de mediciones hechas en el nodo principal con una base de datos de huecos de tensión.
- Localización utilizando simulación de fallas en todo el sistema y luego comparando con las mediciones.

²⁴ MORALES, G., BARRERA, R., y VARGAS, H. Ubicación única de fallas en sistemas de distribución por medio de zonas con svm"; Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.º 47. Medellín (Colombia). 2009

²⁵ MORALES, G., BARRERA, R., y VARGAS, H. Op. Cit.

²⁶ SÁNCHEZ, S. Comparación y análisis de los métodos de localización de fallas en los sistemas de transmisión y distribución; Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación Manizales, Colombia. 2017

- Localización haciendo uso de las mediciones y la matriz de impedancias del sistema.

Una parte de los métodos antes mencionados pueden implementarse para en sistemas de distribución radiales y enmallados ²⁷.

2.4.2 Inteligencia artificial En los últimos años, han sido desarrollados varios métodos inteligencia artificial cuyas aplicaciones en el campo de análisis y diagnóstico de fallas ha aumentado con gran rapidez. Métodos como las redes neuronales artificiales, sistemas expertos, lógica difusa, agentes inteligentes y razonamiento basado en casos necesitan una base de datos que describan el funcionamiento. La mayoría de los desarrollos buscan sacar provecho ventajas que en materia de solución de problemas reales, ofrece de cada técnica ²⁸.

2.4.3 Métodos híbridos Con la integración de varias técnicas complementarias se busca que una supla las desventajas de la otra, con el fin de obtener una mejor respuesta a la necesidad planteada por algún problema específico. Estos métodos que integran varias técnicas son conocidos como híbridos, estos permiten tener trabajando en paralelo varias técnicas lo cual da un al sistema de distribución alto grado de robustez y resistencia a fallos ²⁹

²⁷ CELIS, J. Metodología para la estimación de hundimientos de tensión en sistemas eléctricos empleando una cantidad limitada de medidores de calidad de potencia; UNIVERSIDAD DEL VALLE, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Santiago de Cali Colombia. 2016

²⁸ MORA, J., GRANADA, M., y MARÍN, L. Los métodos de representación del conocimiento en inteligencia artificial y su integración en sistemas híbridos de localización de fallas; Tecnura, vol. 9, núm. 17, pp. 98-109 Universidad Distrital Francisco José de Caldas Bogotá, Colombia. 2005

²⁹ Ibíd.

2.4.4 Otros métodos

2.4.4.1 Métodos que utilizan fasores sincronizados La investigación reciente en el uso de fasores sincronizados indica que pueden ser útiles para la aplicación en la localización de fallas. En la actualidad, estos métodos requieren la disponibilidad de receptores GPS u otros equipos, y serían más costosos que un enfoque no sincronizado ³⁰.

2.4.4.2 Métodos que requieren etiquetado de tiempo de los eventos Un enfoque utiliza estimaciones de fasores previos a la falla para la ubicación de fallas de dos terminales. Los fasores previos a la falla se comparan para determinar el error de sincronización entre los dos extremos. Usando el error de sincronización, se puede calcular la ubicación de la falla. Este enfoque requiere que el usuario especifique manualmente los datos previos a la falla, calcule el error de sincronización y calcule la ubicación de la falla. Otro enfoque utilizó los fasores posteriores a la falla para resolver la ubicación de la falla. Las ecuaciones de caída de tensión se resuelven utilizando coordenadas cartesianas, lo que da como resultado una ecuación cuadrática para el error de sincronización desconocido. Después de usar la ecuación cuadrática para resolver el error de sincronización, se resuelven las ecuaciones de ubicación de fallas para cada tipo de falla ³¹.

³⁰ Ibíd.

³¹ Ibíd.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Con el fin de realizar esta monografía, se llevó a cabo búsqueda de la bibliografía relacionada con la localización de fallas en los sistemas de distribución de energía, enfocados principalmente en una búsqueda entre los años 2012 hasta 2018; luego de esto se procede a un análisis de los trabajos encontrados, de los cuales se escogieron los aquellos cuyos avances y/o aportes se consideraron fueron los más relevantes para la solución de la problemática en cuestión. Una vez seleccionados los artículos más destacados, se continuó con el estudio de las debilidades y fortalezas de cada uno de estos; para con ello lograr una visión de los avances encontrados hasta ahora en el ámbito de la localización de fallas a nivel de distribución.

A continuación, se muestra un resumen de los artículos que fueron seleccionados para dicho estudio, destacando de estos la metodología utilizada y las conclusiones a las cuales se logró llegar, luego de ser ejecutados:

- **Herrera, A., Pérez, S., y Mora, J. (2012). Modelado de carga para localización de fallas en sistemas de distribución con generación distribuida. IEEE, 1, 4673-2673.**

Resumen: Este trabajo muestra la influencia del modelado de carga durante las mediciones de voltaje, corriente e impedancia en los estados de pre-falla y falla de los sistemas de distribución de potencia. Los sistemas de prueba son los 24,9 kV IEEE 34 nodos sistema de distribución de energía, modelado por el software ATP, teniendo en cuenta modelos de carga con impedancia constante, corriente constante, potencia constante y carga híbrida compuesta con los tres modelos anteriores. Todas las cargas se codificaron usando los modelos ATP. Como

resultado de la prueba, se realiza un análisis comparativo de las señales de las mediciones V e I y también Z de la subestación de potencia. El resultado muestra que el modelo de carga afecta el estado de fallo del sistema de distribución de potencia que influirá directamente en el rendimiento del localizador de fallos, ya que utiliza las mediciones de V e I en la subestación de potencia en los estados previos a la falla y falla.

Fundamentación teórica: Este trabajo propone un análisis comparativo entre diferentes modelos de carga utilizando los valores de las mediciones de voltaje y corriente, y valores de las impedancias desde la subestación de potencia considerando un sistema de distribución de potencia con generación distribuida (DG), y realizando diferentes tipos de fallos de derivación (monofásico, fase a fase, doble fase a masa y trifásica), con diferentes resistencias de fallo (R_f) y variando el tipo de carga de un modelo programado utilizando los modelos de herramienta en ATP (impedancia constante, corriente constante, Potencia constante y modelos híbridos).

Simulación y análisis de resultados: El software utilizado para el modelado y la simulación de los circuitos de prueba es el programa alternativo transitorio (ATP). Este programa brinda una forma de adaptar el modelo de carga según la variación de tensión en el circuito de potencia, y por lo tanto es una herramienta útil para modelar el sistema de distribución de potencia, donde es importante tener este tipo de modelos. Hasta ahora, los sistemas de potencia implementados para localización de fallas fueron modelados como carga de impedancia constante.

ATP se puede utilizar para describir el funcionamiento de componentes de circuito y de componentes de control. También se puede utilizar para generar señales o para analizar mediciones del circuito. Por último, puede utilizarse como interfaz entre ATP y programas externos. La simulación de fallos de los nodos de circuitos considerando diferentes resistencias de fallo (R_F entre 0.5ohm y 40 ohm), y

diferentes tipos de fallas. Se simularon cuatro tipos de fallos: a) fallo monofásico a tierra b) fallo fase - fase c) fallo fase - fase a tierra, d) fallo trifásico.

Luego de esto se realizó el análisis comparativo de los modelos de carga propuestos, utilizando gráficas para observar las diferencias entre el modelo Zcte base y los modelos de cargas que se proponen. Estos gráficos muestran la distancia a la que se produce el fallo, que se mide con respecto a la subestación de potencia principal (DG1), además, para los diferentes tipos de fallas simuladas, se observó que la diferencia entre los modelos es semejante de una falla a otra. La mayor diferencia, en los casos estudiados, ocurre en el modelo Scte (Potencia Constante), seguido por el modelo Icte (Corriente Constante), luego el modelo híbrido ($0.8I_{cte} - 0.2Z_{cte}$), luego el híbrido IEEE34 y finalmente la diferencia más pequeña que presente (0% Aprox) es el modelo de Zcte (Impedancia Constante).

Conclusiones: La simulación se realizó en un HP Compaq 6000 pro Computadora SFF, con procesador Intel (R) core (TM) 2 Quad CPU Q8400 a 2,66 GHz y 4 GB de RAM instalados, con sistema operativo de 32 bits. La simulación duró un tiempo promedio de 2.976 horas para cada circuito, con un paso de tiempo de 0.1 ms en ATP.

El modelo fue codificado utilizando el software ATP, reproduce adecuadamente el comportamiento de la carga para diferentes tipos de fallas. Como se ve evidenciado en las simulaciones, el modelo que tiene el menor error de todos es Zcte. Debido a que el circuito base también es Zcte, pero modelado usando elementos predefinidos de ATPDraw.

Los errores de impedancia son un reflejo de la razón de errores en V e I, por lo tanto son más pronunciadas las diferencias en ambos, magnitud y ángulo. Es importante señalar que en DG2 (fuente de generación distribuida) es donde el mayor la diferencia se presenta, considerando las medidas de V y I con diferentes modelos

de carga analizados. Es porque es un generador con menor potencia de salida, y también en su ubicación varias cargas están conectadas.

Finalmente, las diferencias en las medidas de V e I en DG1 y DG2, considerando el modelado de carga propuesto, influirán directamente en los localizadores de fallas, ya que utilizan las mediciones de V e I en las subestaciones de potencia para estimar la distancia de falla. Como una buena estimación de la localización de la falla es extremadamente importante, debe tener en cuenta el modelado de carga en el estudio del sistema de potencia.

Otros trabajos relacionados: (Orozco, C., 2012) ³², (Nunes, J., 2010) ³³], (Serna, I., 2010) ³⁴.

- **Abo-Shady, F., Alaam, M., y Azmy, A. (2013). Técnicas de localización de fallas basadas en la impedancia para sistemas de distribución en presencia de generación distribuida. IEEE, 1, 1-6.**

Resumen: Este artículo presenta una técnica analítica para la localización de fallas en sistemas de distribución en presencia de una generación distribuida (DG). La presencia de DG cambia la naturaleza del flujo de energía de unidireccional a multidireccional. Por lo tanto, la precisión de los métodos de localización de fallas basados en la impedancia se verá afectada por la presencia de DG. La técnica propuesta es una modificación de los métodos basados en la impedancia para ser adecuada para sistemas que contienen DG basadas en mediciones de voltaje y

³² OROZCO, C., MORA, J., y PÉREZ, S. A robust method for single phase fault location considering distributed generation and current compensation. Transmission and Distribution Latin America Conference. September/ Montevideo – Uruguay. 2012

³³ NUNES, J., y BRETAS, A. Impedance-Based Fault Location Formulation for Unbalanced Primary Distribution Systems with Distributed Generation. Presented at the Int. Conf. on Power System Technology. 2010

³⁴ SERNA, I., FERREIRA, C., MARTÍNEZ, S., SUÁREZ, M., and CARRILLO, G. Impact of static load models on the power distribution fault location problem. Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America. IEEE/PES . Page(s): 706 – 711. 2010

corriente en la subestación de potencia. Para evaluar esta técnica, se implementa en un alimentador de 11 kV utilizando el paquete ATP / EMTP.

Fundamentación teórica: La localización de fallas es un trabajo difícil debido al gran número de variables que pueden ocasionar dicha distorsión (tipo de falla, punto de falla, resistencia a fallos, cargas, presencia de generación distribuida "DG"). Recientemente se han desarrollado algunas técnicas para tener en cuenta el efecto de la presencia de DG. La técnica basada en la impedancia es una de estas técnicas, la cual es aplicada en este artículo, estas se pueden dividir en dos categorías. La primera categoría depende de la medición de voltajes y corrientes en la subestación principal solamente. La segunda categoría depende de mediciones tanto en la subestación principal como en la DG.

En este trabajo, se evalúa la técnica propuesta bajo variación de la resistencia a fallas de hasta 50 Ω tanto para línea simple como para tierra y fallas trifásicas, donde 500 casos de falla fueron simulados.

Simulación y análisis de resultados: Para validar la técnica propuesta, es usado un sistema de distribución real. El sistema es una distribución de 27 nudos y 11 kV alimentador, que es un alimentador real en electricidad El-Gharbia, ciudad de Tanta. Todas las secciones de alimentador principal y los laterales tienen un área de sección transversal de 150 mm² y 70 mm² ACSR respectivamente. La carga del sistema investigado, es simulada utilizando el programa ATP para realizar cálculos de cortocircuito de diferentes tipos en diferentes ubicaciones. Las líneas de distribución los parámetros se estiman mediante la ecuación de Carson para distancias de falla.

Luego de realizar las respectivas simulaciones, se observa que el error obtenido cambia en el rango entre - 0.67% y 0.53% en caso de línea única a-falla a tierra y entre - 0.2% y 0.12% para falla-trifásica. Esto demuestra que la técnica propuesta

es prometedora y ayuda a mejorar la precisión de la ubicación de la falla para el sistema de distribución con DG.

Conclusiones: El localizador de fallas con una precisión mejorada es una herramienta efectiva para reducir el tiempo y el costo de la interrupción. Este necesita de equipos de cómputo de gama media para su ejecución y procesamiento de información. Este documento propuso y discutió una técnica de localización de fallas basada en la impedancia presencia de DG. La técnica usa solo mediciones locales en la subestación principal y depende de los componentes de la secuencia. Secciones de alimentador no homogéneas, tipo de falla, resistencia a fallas distribución de carga y alto nivel de penetración DG fueron factores considerados para llevar a cabo este estudio. Como resultado de un análisis general, se observó que el porcentaje de error varía en el rango de (- 0.67 a 0.53) % y (- 0.2 a 0.12) % para fallas de una sola línea a tierra y trifásicas respectivamente. Esto asegura la validez y exactitud de la propuesta técnica.

Otros trabajos relacionados: (Bedoya, A., 2012) ³⁵, (Brahma, S., 2011) ³⁶, (Gilany, M., 2007) ³⁷.

- **Ren, J., Venkata, S., y Sartomme, E. (2014). Un método exacto de localización de fallas basado en sincrofasor. IEEE, 29, 1-3.**

Resumen: Este artículo presenta un nuevo método para localizar una falla en los sistemas de distribución utilizando mediciones de sincronismo, que a menudo son

³⁵ BEDOYA, A., OROZCO, C., and MORA, J. Single Phase to Ground Fault Locator for Distribution Systems with Distributed Generation Transmission and Distribution. Latin America Conference and Exposition (T&D-LA), Sixth IEEE/PES. 2012

³⁶ BRAHMA, S. Fault Location in Power Distribution System with Penetration of Distributed Generation, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 26, Issue 3, pp. 1545-1553. 2011

³⁷ GILANY, M., IBRAHIM, D., and TAG ELDIN, E. Traveling-Wave – Based Fault-Location Scheme for Multiend-Aged Underground Cable Systems, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 22, no. 1, pp. 82 – 88. 2007

proporcionados por unidades de medida del fasor (PMU) con alta precisión y una marca de tiempo. Para esto se utilizan mediciones de fasor de tensión y corriente en las subestaciones y / o cabezas de alimentación obtenidas a través de esquemas de comunicación. Las ubicaciones de falla candidatas se identifican iterando cada segmento de línea posible. Las mediciones de los dispositivos remotos se utilizan para eliminar todos los casos sin fallos. Este método funciona eficazmente para redes activas y pasivas, topologías de radio y bucles, fallas de alta impedancia y no está restringido a un cierto patrón de ubicaciones de PMU. El método propuesto ha sido probado en un sistema de distribución real.

Fundamentación teórica: El método propuesto consta de dos pasos para encontrar la localización de avería real. En el primer paso, las localizaciones candidatas se encuentran utilizando sincrofasores medidos en un terminal iterando cada segmento de línea. En el segundo paso, la localización de falla se identifica comparando el fasor de voltaje para los nodos de unión de ramas. Para un fallo se deben buscar las ubicaciones candidatas, la búsqueda comienza desde el bus-1. En primer lugar, la distancia de fallo se calcula sobre la base de la impedancia aparente para comprobar si el fallo está dentro del segmento de la línea 1-2. A continuación, si el fallo no está en esta línea, el fasor de tensión en el bus-2 se calcula en términos de la caída de tensión que incluye el efecto de capacitancia. Las ramas laterales, se manejan asumiendo que una de ellas está averiada, y entonces los flujos de corriente en líneas sanas se calculan usando circuitos equivalentes de Thevenin. Para este caso, la suposición es que la línea 2-3 está fallada. Todo este proceso se realiza hasta que se encuentra un umbral de error aceptable, este error esta previamente definido, calculado a través del valor absoluto de la diferencia de las tensiones medidas en las barras. El valor de la impedancia de falla no tiene impacto en la precisión de la ubicación calculada, esto es debido a la disponibilidad de la medición remota.

Simulación y análisis de resultados: Una moderna subestación de distribución de 25 kV / 120 MVA ubicada en el territorio de Duke Energy se utiliza para demostrar la eficacia del método de localización de fallas propuesto. Este sistema consiste en seis alimentadores que abastecen a más de 17000 clientes. Los dispositivos de sincrofasores se implementan en la subestación y en el extremo lejano de cada alimentador. Extensivos casos de estudio, fueron realizados considerando diversos tipos de falla y ubicaciones de estas. Los resultados para un caso de falla monofásica, con resistencia de falla de $100\ \Omega$ que ocurre en el medio de una línea lateral del alimentador con 609 segmentos de línea, 419 transformadores de distribución y dos generadores distribuidos con capacidad de 3-MVA y 1-MVA. Seis posibles ubicaciones de fallas resultaron utilizando las mediciones de PMU-A, y la línea con falla real se identificó utilizando PMU-B con una precisión del 1% de la línea longitud.

Conclusiones: Este método propone localizar con precisión las fallas en los sistemas de distribución, aprovechando las mediciones de sincrofasores desde múltiples ubicaciones para identificar la línea con falla. El método puede aplicarse para redes activas y pasivas, y no está limitado por las ubicaciones de los dispositivos de medición. El método de localización de fallos automático en tiempo real puede implementarse utilizando un esquema de comunicación adecuado. Las iteraciones necesarias fueron realizadas a través de código en MATLAB, agilizando el proceso de ubicación de las fallas.

Otros trabajos relacionados: (Zhu, J., 1997) ³⁸, (Mora, J., and Carrillo, G., 2008) ³⁹.

³⁸ ZHU, J., LUBKEMAN, D., and GIRGIS, A. Automated fault location and diagnosis on electric power distribution feeders," IEEE Trans. Power Del., vol. 12, no. 2, pp. 801–809, Apr. 1997

³⁹ MORA, J., and CARRILLO, G. Comparison of impedance based fault location methods for power distribution systems, Elect. Power Syst. Res., vol. 78, no. 4, pp. 657–666, Apr. 2008

- **Naidu, S., Guedes, E., y Andrade, G. (2014). Localización de fallas en sistemas de distribución utilizando la tabla de tensión hueco-duración. IEEE, 978, 4799-5551.**

Resumen: Los huecos de tensión son caídas de corta duración en el valor rms de la tensión del sistema de distribución y son causadas principalmente por fallas en el sistema. La tensión del sistema durante un fallo es usualmente entre 0.1pu y 0.9pu, y la duración del hueco entre 8ms y 1 minuto. Las caídas de tensión se han convertido en un importante problema de calidad de energía. Para solucionar dicha problemática se ha descrito una técnica de localización de fallos basada en la tabla de tensión `hueco-duración. La técnica es sencilla de aplicar y tiene el potencial de ser implementada en línea. Necesita los datos de los medidores de calidad instalados en algunas estaciones de medición. La técnica se ha demostrado mediante la simulación de fallas en redes de distribución reales.

Fundamentación teórica: Para la aplicación de este método, se hace necesario simular fallos en el sistema y crear con estos una base de datos en forma de tabla llamadas tablas de tensión-duración, en la cual se representan la magnitud de tensión y la duración de los huecos expresado en rangos. Cada estación de medición tiene una duración de hundimiento asociada. Esta tabla está construida aplicando aleatoriamente un gran número de fallas en un sistema de distribución, para así crear una base de datos de la magnitud y duración de los huecos. Durante la construcción de la tabla de duración del hundimiento, las ubicaciones de fallas que contribuyeron a las entradas de cada celda se almacenan en matrices de ubicación. Esta matriz de ubicación permite la construcción del gráfico de frecuencia para la celda. Este gráfico muestra el porcentaje de eventos asociados con una celda que resultó de fallas que ocurren en un segmento de línea en particular.

Hay una matriz de ubicación asociada con cada celda de la tabla de duración del hundimiento. El conjunto de todas las matrices de ubicación es el inverso de la tabla

de duración del hundimiento. Las tablas de duración de la caída de voltaje para todas las estaciones de medición y sus matrices de ubicación respectivas forman la base de datos que se requerirá para rastrear la zona de falla.

Simulación y análisis de resultados: Se consideró un sistema hipotético de 69 kV, el cual está conformado por 10 barras y 10 segmentos de línea. Las barras 2 y 10 son consideradas como las estaciones de medición. Aplicando un numero aleatorio de fallas se construyó la base de datos para las matrices de ubicación, para este caso en particular se simularon 10000 fallas. Las duraciones en las estaciones de medida fueron calculadas, aunque en una implementación práctica, este dato es obtenido de medidores instalados en las barras consideradas como estaciones de medida. Con toda esta información se procede a realizar las gráficas de frecuencia y la inspección de estos nos lleva a decidir donde ocurrió la falla, con base en las más alta probabilidades de ocurrencia de falla, permitiéndonos acotar la zona donde el fallo se presentó

Conclusiones: Para la aplicación de esta técnica en sistemas reales se requiere de la instalación de medidores de calidad de energía instalados en cada una de las estaciones de medida. Las construcciones de las tablas de tensión-duración, tienen en cuenta las principales incertidumbres y la respuesta del sistema de protección a las fallas. Dadas estas tablas, la aplicación de la técnica propuesta es simple y no requiere cálculos elaborados.

La ubicación de un fallo en un sistema de distribución es una tarea compleja. La práctica habitual para localizar fallos es desplegar instrumentos de medición en unas pocas barras, conocidos como estaciones de medición. Las variables que se miden y registran usualmente son las tensiones y corrientes previas a la falla y las tensiones y corrientes de falla en tiempo real. Basándose en estas mediciones, se estima la localización de la falla. Dado que el número de alimentadores en un sistema de distribución típico es más que el número de estaciones de medición, el

procedimiento de estimación indicará inevitablemente una zona de fallo en lugar de una localización de falla única.

Otros trabajos relacionados: (Mora, J., y Meléndez, J., 2004) ⁴⁰, (Rojas, J., y Giraldo, J., 2015) ⁴¹.

- **Huaiguang, J., Zhang, J., Wenzhong, G., y Ziping, W. (2014). Detección de fallas, identificación y ubicación en redes inteligentes basadas en métodos computacionales conducidos por datos. IEEE, vol. 5, no. 6, Nov, 1949-3053.**

Resumen: En este trabajo se propone y estudia un enfoque de detección, identificación y ubicación de fallas. Este enfoque se basa en la descomposición de búsqueda (MPD) utilizando el modelo de Markov oculto (HMM) de la frecuencia en tiempo real y las características de variación de tensión, y mapas de contorno de fallas generados por algoritmos de aprendizaje automático en sistemas de red inteligente (SG). Especialmente, las características de tiempo-frecuencia son extraídas por MPD a partir de las señales de frecuencia y voltaje. Por otro lado, se utilizan los HMMs entrenados en la detección de fallas y una vez detectadas; se construye un mapa de contorno de falla utilizando la característica extraída por el MPD a partir de las señales de voltaje y la información de topología de SG.

Fundamentación teórica: La red inteligente (SG) es considerada como la nueva generación de redes eléctricas, por su eficiencia energética mejorada, demanda perfilada, utilidad maximizada, reducción de costos y emisión controlada. Un mecanismo de detección e identificación de fallas es necesario para operaciones seguras de estas. En los sistemas de potencia, la detección de fallos, la

⁴⁰ MORA, J., y MELÉNDEZ, J. Caracterización de huecos de tensión para localización de fallas en sistemas de distribución - un primer paso hacia un método híbrido, Scientia et Technica Año X, No 25, UTP. ISSN 0122-1701, Agosto. 2004

⁴¹ ROJAS, J., y GIRALDO, J. Implementación de algoritmo para determinar la localización de sags y sus causas en redes de distribución. Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia. 2015

identificación y la ubicación por lo general necesitan ser resueltos como un problema unificado. Sin embargo, la mayoría de los métodos discutidos en la literatura se centran en sólo uno o dos aspectos y no pueden ser resueltos los tres problemas simultáneamente. Se puede prever que un enfoque multifuncional, que puede lograr la detección de fallos, la identificación y la ubicación.

Un registrador de perturbaciones de frecuencia (FDR) es un dispositivo de adquisición de datos en tiempo real conectado en SG, que es menos costoso y más fácil de instalar que las mediciones fasoriales de información multidimensional como el voltaje, el ángulo de fase y la frecuencia. Con tal capacidad de FDR distribuidos, una vez que se produce una falla, las señales multimodales resultantes pueden ser registradas para ayudar a diagnosticar el tipo de fallo y localizar la posición topológica, lo cual es crítico para acortar el tiempo de respuesta y mejorar la fiabilidad del sistema SG evitando Interrupciones en cascada.

Simulación y análisis de resultados: En este trabajo se utiliza el esquema del sistema IEEE New England 39-barras, que contiene 10 generadores, 36 líneas de transmisión, 12 transformadores y 19 cargas. Luego de dar las notaciones matemáticas para diferenciar los tipos de falla y la ocurrencia de estas, luego se escogen las señales en el dominio de la frecuencia para la detección e identificación de las fallas, bajo la consideración de que están estrechamente relacionados con la variación del equilibrio de potencia. La arquitectura del enfoque propuesto, usa la señal de frecuencia en tiempo real y la señal de voltaje son recogidas por los FDR en SG.

Un algoritmo de análisis tiempo-frecuencia, MPD, se utiliza para extraer características de datos de señales de frecuencia y voltaje. El algoritmo de extracción de características de MPD, puede descomponer la señal original en átomos gaussianos y generar energía de señal residual mínima. Todo esto con el

fin de obtener la información necesaria para la detección precisa de las fallas que ocurran en el sistema de potencia.

Conclusiones: Este método estudia basado en datos proporciona un enfoque multifuncional para detección de fallas, identificación y ubicación en sistemas SG, alcanzando unas tasas de detección e identificación significativamente altas, en diferentes escenarios y con pocos FDRs. Esto indica la robustez y viabilidad de implementación del enfoque propuesto considerando los costos de equipo y de instalación en las aplicaciones del mundo real.

La implementación del algoritmo MPD está cuidadosamente diseñada para el intercambio entre el rendimiento y complejidad computacional. Este método es muy intuitivo y se hace fácil ubicar las zonas afectadas una vez ocurre la falla, esto ayuda a acortar el tiempo de respuesta para decidir las acciones de protección más efectivas como el cambio generadores, sistemas de alimentación de islas y desconexión de carga.

Otros trabajos relacionados: (Axelberg, P., Gu, I and Bollen, M., 2007) ⁴², (Fang, X., 2012) ⁴³, (Chakraborty, D., 2009) ⁴⁴.

- **Jia, K., Ren, Z., Bi, T., y Yang, Q. (2015). Ubicación de falla a tierra usando los datos grabados del lado de baja tensión en sistemas de distribución. IEEE, vol. 51, no. 6, Nov, 4994-5001.**

Resumen: La localización y aislamiento de falla a tierra son difíciles en sistemas de distribución compensados debido al hecho de que la corriente de falla es demasiado

⁴² AXELBERG, P., GU, I and BOLLEN, M. Support vector machine for classification of voltage disturbances, IEEE Trans. PowerDel., vol. 22, no. 3, pp. 1297–1303, Jul. 2007

⁴³ FANG, X., MISRA, S., XUE., G and YANG, D. Smart grid—The new and improved power grid: A survey, IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 14, no. 4, pp. 944–980, Fourth Quarter. 2012

⁴⁴ CHAKRABORTY, D. Damage classification structural health monitoring in bolted structures using time-frequency techniques, J. Intell. Mater. Syst. Struct., vol. 20, pp. 1289–1305, Mar. 2009

pequeña para ser medida. Teniendo en cuenta que un masivo número de dispositivos electrónicos inteligentes masivos y medidores inteligentes están siendo instalados en las redes de distribución con el desarrollo de la red inteligente, este documento propone un método de localización de fallos utilizando los datos registrados por el medidor inteligente, en el lado de baja tensión. El método en desarrollo utiliza la tensión de secuencia negativa con fallo y localiza las secciones averiadas aplicando la relación entre la distancia de falla y los grupos de medidas agrupadas.

Fundamentación teórica: Con el desarrollo de la red inteligente, los disyuntores inteligentes y los contadores que son capaces de aislar fallas, la condición de funcionamiento de la unidad y la monitorización de la calidad de la energía del sistema y la comunicación de señales han sido ampliamente instalados en los extremos de media y baja tensión del sistema de distribución. Los datos de la demanda de una red eléctrica suelen ser centralizados, lo cual conlleva a retardo en la comunicación que se traduce en demora en la localización de las fallas.

La localización de fallas en los sistemas de distribución se ha investigado durante décadas. Los métodos propuestos se pueden clasificar en tres grupos: los que están basados en la estimación de la impedancia del sistema, los métodos de las ondas viajeras y los métodos que usan información sincronizada de un área amplia. Debido a su bajo requerimiento ya su fácil aplicación, los métodos de localización de fallas basados en la impedancia se han empleado en la industria durante bastante tiempo. El método basado en ondas viajeras utiliza los transitorios de alta frecuencia generados por fallas, y la distancia de falla puede localizarse midiendo las ondas incidentes y reflejadas. Debido al desarrollo de los modernos dispositivos electrónicos inteligentes (IED), se han propuesto la ubicación de fallas y / o los métodos de seccionamiento con tecnología de comunicación de área amplia. Sin embargo, casi todas las comunicaciones basadas en los esquemas de localización de fallas requieren sincronización de datos. La demora de la señal o incluso la

pérdida de comunicación pueden llevar a resultados de localización de fallas totalmente erróneos.

En este trabajo se propone un método de localización de fallas a tierra, en sistemas de distribución compensados, usando los datos de medidores inteligentes ubicados en el lado de baja tensión. Las secciones de fallo se seleccionan utilizando las caídas de voltaje de secuencia negativa medida que se refieren a distancias de falla.

Simulación y análisis de resultados: El esquema de localización de fallas propuesto se prueba utilizando los resultados de simulación de MATLAB. El sistema de distribución utilizado contiene diferentes longitudes de líneas que conectan múltiples cargas en los extremos de BT. Para la ubicación de las fallas se aprovecha la instalación de medidores inteligentes en el sistema, para registrar los voltajes de secuencia negativa en los terminales etiquetados. Aunque el fallo de tierra en un sistema compensado ofrece poca corriente de falla, creará tensiones de fase desequilibradas, y supervisando los aumentos de las tensiones de secuencia negativa, el fallo puede ser detectado y localizado. Este método que no exige ninguna sincronización y comunicaciones de datos reales es inmune a la resistencia de falla ya las variaciones de carga. El controlador central sólo necesita conocer los resultados de estado calculados por cada IED, lo que hace que el algoritmo propuesto sea más práctico para aplicaciones industriales.

Conclusiones. El algoritmo propuesto ha sido probado utilizando sistemas de distribución ramificados y muestra buena precisión con diferentes perfiles de carga, distorsiones armónicas, ruidos de medición y pérdida de comunicaciones. Los resultados de localización pueden verse afectados por la pérdida de más de una de las unidades de medición, aunque no se requiere de ninguna sincronización de datos.

El método propuesto utiliza datos medidos de área-amplia, que junto con los contactores de bajo coste, el método puede localizar y aislar las secciones de falla sin interrumpir las operaciones normales del sistema, lo que lo hace factible para aplicaciones industriales.

Otros trabajos relacionados: (Ericson, T., 2006) ⁴⁵, (Liu, H., Mitolo, M., and Qiu, J, 2014) ⁴⁶.

- **Majidi, M., Arabali, A., y Etezadi-Amoli, M. (2015). Localización de fallas en la red de distribución por sensado compresivo. IEEE, vol. 30, no. 4, Agosto, 1761-1767.**

Resumen: Este artículo propone un método novedoso para la localización de fallas en redes de distribución usando una detección compresiva. Durante la falla y los voltajes de pre-falla son medidos por medidores inteligentes a lo largo de los alimentadores. Debido al número limitado de medidores inteligentes instalados en los alimentadores primarios, la ecuación del sistema es subdeterminada. En este trabajo se utiliza una red de distribución real de 13,8 kV, 134 buses cuando se producen cortocircuitos monofásicos, trifásicos, bifásicos y bifásicos a tierra. Los resultados de la simulación muestran la robustez del método propuesto en entornos ruidosos y un rendimiento satisfactorio para diversas fallas con diferentes resistencias.

Fundamentación teórica: La localización de fallas en las redes de distribución proporciona beneficios significativos para los operadores de red. Una estrategia apropiada de localización de fallas acelera el tiempo de restauración y mejora la calidad y fiabilidad de las redes de distribución. Muchos de los métodos actuales

⁴⁵ ERICSEN, T., HINGORANI, N., and KHERSONSKY, Y. Power electronics and future marine electrical systems, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 42, no. 1, pp. 155–163, Jul./Aug. 2006

⁴⁶ LIU, H., MITOLO, M., and QIU, J. Ground-fault loop impedance calculations in low-voltage single-phase systems, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 40, no. 50, pp. 1331–1337. Jul./Aug. 2014

para la localización de fallas en los sistemas de distribución, no son aplicables a las redes de distribución debido a la falta de infraestructuras y aparatos inteligentes en los sistemas de distribución. Las unidades de medición de fasor (PMU) y los medidores inteligentes se clasifican como dispositivos de medición inteligentes. Las PMU rara vez se utilizan en las redes de distribución debido a sus altos precios. En este estudio, las pérdidas de voltaje se miden mediante medidores inteligentes instalados a lo largo del alimentador. La matriz de impedancia trifásica sin cargas se utiliza entonces para calcular el vector de corrientes. Un nuevo método basado en el algoritmo de detección de compresión y la minimización se utiliza para estimar el bus real fallado dentro de una red de distribución. El método propuesto sólo utiliza medidores de alimentación inteligentes para medir las magnitudes de voltaje a lo largo del alimentador y con esto localizar la falla desde la subestación.

Simulación y análisis de resultados: La precisión del medidor está siempre influenciada por los ruidos debido a las variaciones de temperatura y carga. Por lo tanto, los datos medidos, que se entregan a los centros de control, suelen ser ligeramente diferentes de los datos reales. En este estudio se incluye el efecto del ruido, se evalúa el desempeño de las unidades de medición fasorial y del número de medidas. Para realizar esto, se utiliza la técnica de Shannon/Nyquist, técnica de reconstrucción que se usa para recuperar señales dispersas de un pequeño número de mediciones y con estas ubicar las fallas.

Este estudio asume que los medidores inteligentes se colocan arbitrariamente a lo largo de la red. El Software DIgSILENT, se utiliza para modelar la red, el modelo incluye la heterogeneidad de las líneas aéreas de distribución. DIgSILENT simula la red y proporciona los datos de medición con respecto a los voltajes de prefalla y durante la falla. Todos estos datos son analizados en un algoritmo realizado en Matlab, el cual se utiliza para estimar la ubicación de la falla, teniendo en cuenta resistencias de falla. El rendimiento del método no está muy influenciado por el

cambio de resistencias de fallo, a mayor resistencia a fallos aumenta los resultados del método propuesto siguen siendo satisfactorios.

Conclusiones: Este método no necesita enormes cantidades de datos de carga, lo cual lo hace más económico y aplicable con las tecnologías actuales, debido a que los datos de carga en la mayoría de métodos deben estar sincronizados con mediciones de voltaje a lo largo del alimentador, implicando la instalación de un medidor inteligente con una alta tasa de muestreo para cada consumidor, haciendo casi imposible la aplicación.

El método propuesto produce resultados similares para resistencias de fallas altas y bajas y maneja los cortocircuitos monofásicos, bifásicos a tierra y trifásicos. Además, posee un rendimiento aceptable ante los niveles de ruido, puede utilizarse para redes convencionales con un número pequeño de medidores inteligentes instalados en las redes primarias.

El rendimiento del algoritmo se puede mejorar aún más en las redes modernas donde los medidores inteligentes se reemplazan con PMU. Esta amplia flexibilidad y aplicabilidad hacen que el algoritmo sea más deseable.

Otros trabajos relacionados: (Thomas, D., 2003) ⁴⁷, (Trindade, F., 2014) ⁴⁸.

⁴⁷ THOMAS, D., CARVALHO, R., and PEREIRA, E. Fault location in distribution systems on traveling waves, presented at the IEEE Bologna Power Tech Conf., Bologna, Italy, Jun. 23–26. 2003

⁴⁸ TRINDADE, F., FREITAS, W., and VIEIRA, J. Fault location in distribution systems based on smart feeder meters, IEEE Trans. Power Del., vol. 29, no. 1, pp. 251–260, Feb. 2014

- **Sun, K., Chen, Q., and Gao, Z. (2016). Método de localización de la sección de línea de fallas automáticas para el sistema de distribución de energía eléctrica basado en información de fuentes múltiples. IEEE, vol. 31, no. 4, Agosto, 1542-1551.**

Resumen: Este artículo presenta un método de localización automática de la sección de líneas fallidas para el sistema de distribución. Se puede dividir en dos partes: el método de ubicación de la sección de líneas defectuosas para alimentadores de distribución de media tensión y la técnica de identificación de áreas defectuosas para el sistema de distribución de baja tensión. En la primera parte, se desarrolla una lista de adyacencia que muestra la relación de adyacencia y el estado de los dispositivos indicadores de falla. A continuación, se diseña una técnica de búsqueda iterativa para recorrer la lista de adyacencia para determinar la sección de línea fallada. En la segunda parte, se desarrolla una tabla relacional, que muestra la relación de asociación entre medidores inteligentes, medidores y transformadores de distribución. Basándose en la lista de adyacencia y en la tensión obtenida de los medidores inteligentes, se puede localizar el área fallada.

Fundamentación teórica: En estos días, es una cuestión importante para mantener la fiabilidad de la fuente de alimentación en la transmisión de energía y sistema de distribución. Dado que la escala de los sistemas de distribución es mucho mayor que los sistemas de transmisión, el sistema de distribución de energía es mucho más vulnerable a fallas. Casi el 80% de las fallas se observan en los sistemas de distribución.

Por tales razones, se hace importante la localización precisa de las fallas para sistemas de distribución. Hoy día, la localización de la falla aún se realiza por la inspección visual, recorriendo los tramos del circuito afectado; aunque existen muchos métodos de localización de fallas para los sistemas de distribución. Es una tarea difícil para el personal de mantenimiento averiguar el punto de falla exacta. Y

como existe un gran número de cables laterales y subterráneos, la duración del procedimiento de localización es muy larga.

En este trabajo, se propone un método de localización automática de la sección de fallas. Incluye principalmente dos partes: 1) la identificación de la sección de fallas en los sistemas de distribución de media tensión (MV) utilizando la información de estado de los dispositivos indicadores de falla (FID) y la ubicación de la zona de fallo en el sistema de distribución de baja tensión (LV) basado en el sistema de llamada problema (TCS) y los colectores de información de los medidores inteligentes (CEIAS). En la primera parte de este método, y la lista de adyacencia y un método de búsqueda se desarrollan. Teniendo en cuenta los impactos de las DG y el problema de pérdida de información, se elabora una modificación para la lista de adyacencia. En la segunda parte, se desarrolla una tabla relacional que muestra la relación de asociación entre medidores inteligentes, medidores y transformadores de distribución. Usando esta tabla y el voltaje de los medidores, se puede localizar el área fallada.

Simulación y análisis de resultados: Para la aplicación de este método los indicadores de falla deben ser instalados al comienzo de los ramales, luego se realiza la lista de adyacencia donde se muestra la relación de adyacencia y se construye el estado de los dispositivos indicadores de fallas. El método para encontrar la sección de línea defectuosa se identifica el último FID activado y así se ubica el segmento de línea con falla.

A diferencia de otros métodos, el enfoque propuesto puede localizar no sólo las fallas en las redes de distribución de MT, sino también las que ocurren en las redes de distribución de BT. Ofreciendo un método robusto que tiene en cuenta la DG, y soluciona el problema de la pérdida de información de los FID's, a través de un método iterativo aquí presentado.

En método es probado en dos casos: ubicación de sección de línea para fallas múltiples en diferentes laterales, en este caso también se consideran las DG, y también se enfrentó al problema de la pérdida de información. En ambos arrojando resultados satisfactorios comprobando así su funcionalidad y desempeño en la ubicación de fallas.

Conclusiones: En este trabajo, se presenta por primera vez un método automático de localización de la sección de fallas para el sistema de distribución de MT, donde se diseña un algoritmo de búsqueda iterativo para identificar el último FID desencadenado, basado en lunas tablas de adyacencia.

El método se puede utilizar para localizar fallas únicas y múltiples. Se considera el impacto de las DG en el método. Asumiendo que los FID que son disparados por la corriente de falla inversa ya que se dispararan, el problema puede ser eliminado. La pérdida de información de estado es otra cuestión que puede influir en la exactitud del método. Para resolver este problema, se crea un método de identificación de información de estado perdido. Puede identificar qué información de FID no se reporta al centro de control y, por lo tanto, la lista de adyacencia inicial se puede modificar.

Otros trabajos relacionados: (Bjerkan, E., 2009) ⁴⁹, (Ramar, K., and Ngu, E., 2010) ⁵⁰, (Kezunovic, M., 2011) ⁵¹.

⁴⁹ BJERKAN, E. Efficient fault management using remote fault indicators, presented at the 20th Int. Conf. Exhibit. Elect. Distrib.—Part 1 & 2 (CIRED 2009), Prague, Czech Republic. 2009

⁵⁰ RAMAR, K., and NGU, E. A new impedance-based fault location method for radial distribution systems, in Proc. Power Energy Syst.Gen. Meeting, pp. 1–9. 2010

⁵¹ KEZUNOVIC, M. Smart fault location for smart grids, IEEE Trans.Smart Grid, vol. 2, no. 1, pp. 11–22, Mar. 2011

- **Bíscaro, A., Pereira, R., Kezunovic, M., y Mantovani, J. (2016). Localización de fallas integradas y análisis de calidad de potencia en el sistema de distribución de energía eléctrica. IEEE, vol. 31, no. 2, Abril, 428-436.**

Resumen: Este artículo presenta una metodología para el análisis automatizado de perturbaciones y localización de fallas en sistemas de distribución de energía eléctrica utilizando una combinación de técnicas modernas para análisis de redes, procesamiento de señales y sistemas inteligentes. Se desarrollan nuevos algoritmos para detectar, clasificar y localizar perturbaciones de la calidad de la potencia. El proceso continuo de detección de estas perturbaciones se logra mediante análisis estadístico y análisis de señales multinivel en el dominio wavelet. Los índices de comportamiento de las señales de corriente y tensión se extraen empleando la transformada discreta wavelet, el análisis multiresolución y el concepto de energía de señal. Estos índices son utilizados por varias redes neuronales independientes Fuzzy-ARTMAP, que tienen como objetivo clasificar el tipo de falla y los eventos de calidad de potencia. La ubicación de falla se realiza después del proceso de clasificación.

Fundamentación teórica: El principal objetivo relacionado con el funcionamiento de un sistema de energía eléctrica es el suministro continuo de energía, fiabilidad e interrupciones mínimas. La referencia proporciona las mejores prácticas para monitorear PQ, presentando una descripción consistente de los fenómenos que ocurren en el sistema de potencia.

Las fallas que ocurren en los sistemas de distribución afectan a PQ en términos de continuidad de servicio y propagación de perturbaciones. Son responsables de perturbaciones en los procesos de producción industrial, pérdida de información, pérdidas económicas y descomposición de equipos, entre otros. Y la localización eficiente de fallas (FL) rápida y precisa ayuda a minimizar el tiempo necesario para encontrar el problema y reparar los sistemas, acelerando el restablecimiento de

suministro de energía a través de la restauración de la red. Además, ayuda a reducir los costos de mantenimiento y operación. La restauración del sistema se puede realizar con mayor eficiencia y velocidad cuando se conoce la localización del fallo o, al menos, se puede estimar con buena precisión.

La tarea de monitorear el PQ y la detección de fallos, aislamiento y restauración de red (FDIR) puede ser muy complicada en un ambiente DCC principalmente en condiciones de emergencia, donde un gran flujo simultáneo de información de varias subestaciones supervisadas puede abrumar al operador. Este trabajo se centra en un enfoque integrado en PQ y FL, a través de una cantidad reducida de dispositivos de medición asignados en la red de distribución, permitiendo el análisis continuo de una amplia gama de perturbaciones del sistema de potencia, para así, lograr detectar fallas si estas llegaran a presentarse.

Simulación y análisis de resultados: El procedimiento determinar automáticamente la localización geográfica de un fallo consiste en hacer un procesamiento digital de las señales de voltajes y corrientes. Se miden a nivel de la subestación y un conjunto mínimo de puntos situados a lo largo del alimentador para calcular las desviaciones de tensión. Estas formas de onda se obtienen a través del uso de medidores inteligentes - equipos de protección y control con sensores inteligentes.

Para comprobar la eficiencia del método propuesto, utilizó un sistema de distribución trifásico de la vida real con 134 nodos: 13,8 kV y 7,065 MVA, para probar los algoritmos propuestos. La localización de fallas se realiza después del proceso de detección y clasificación de fallas. La técnica propuesta se aplica a las redes trifásicas o con mallas débiles, alimentadores con cargas desequilibradas, extensiones laterales con una, dos o tres fases y presenta generación distribuida.

Para este caso, la falla se detectó después de 0.08372 s relacionada con el número de muestra 323 de la señal registrada. Este resultado se encontró durante el análisis

de la 18ª ventana muestreada y descompuesta por MRA. Se utilizó Programa de Transitorios Alternativos / Electromagnético Programa de Transitorios (ATP / EMTP), para generar los eventos PQ, luego de fueron clasificados a través de los ANN entrenados para finalmente ubicar la falla en cuestión.

Conclusiones: En este trabajo se utilizan algoritmos de detección de falla los cuales son diseñados teniendo en cuenta, la monitorización continua de las señales tomadas desde un sistema de medición presente en la subestación. A su vez, se aprovecha la transformada wavelet (WT), que puede usarse para extraer características importantes de diferentes tipos de perturbaciones, incluso en estado transitorio.

En esta propuesta se aprovecha el uso combinado de técnicas de análisis de redes, procesamiento de señales y dispositivos inteligentes, para dar un diagnóstico integrado y automatizado de la localización de fallas, aplicable con cargas desequilibradas, prolongaciones laterales de doble línea o de una sola línea y con presencia de DG.

El sistema integrado de diagnóstico y FL son capaces de ayudar al personal de la electricidad en su trabajo diario, proporcionando información importante para el funcionamiento y mantenimiento, minimizando el tiempo de reparación y, con ellos reduciendo costos por multas impuestas debido a la indisponibilidad del servicio.

La metodología propuesta puede aplicarse en operación en línea para identificar eventos PQ y sigue siendo válida incluso después de la reconfiguración de red ya que las ANNs de ARTMAP difusas son capaces de realizar el reconocimiento de patrones, independientemente de la configuración de la red.

Otros trabajos relacionados: (Senger, E., 2005) ⁵², (Senger, E., 1993) ⁵³.

A continuación se muestra una tabla donde se resaltan las ventajas y desventajas de los métodos estudiados, así como también las técnicas que estos utilizan para llevar a cabo la localización de las fallas que ocurren en el sistema de distribución.

⁵² SENGER, E., MANASSERO, G., GOLDEMBERG, C., and PELLINI, E. Automated fault location system for primary distribution networks, IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 2, pt. 2, pp. 1332–1340, Apr. 2005

⁵³ GIRGIS, A., FALLON, C., and LUBKEMAN, D. A fault location technique for rural distribution feeders, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 29, no. 6, pp. 1170–1175, Nov. 1993

Tabla 1. Análisis de los métodos estudiados.

Método de localización	Técnica	Ventajas	Desventajas
[Herrera 2012]	Sistema basado en reglas	• Requiere valores de corriente y tensión de la subestación. • No requiere sincronización de registros. • Calculo de localización para todo tipo de fallas (1F, 2F, 2F-T y 3F).	• Errores considerables para altos valores de resistencia de fallas y fallas alejadas del punto de medida. • Necesita ser entrenado ante cualquier cambio del circuito (ATP).
[Abo-Shady2013]	Método de la impedancia modificado	• Requiere medidas solo en la subestación. • Considera R_f, secciones no homogéneas, distintos tipo de falla y GD. • Calculo de localización para todo tipo de fallas (1F, 2F, 2F-T y 3F).	• Depende de las componentes de secuencia. • Se debe conocer con anticipación el valor de la impedancia equivalente • Se usa ATP para cálculos de cortocircuito y las ecuaciones de Carson para estimar los parámetros de las líneas
[Ren2014]	Mediciones Sincronizadas (PMU)	• Sincrofasores medidos en un terminal • Se pueden estimar la localización de fallas en tiempo real, con un	• Requiere sincronización de registros o con desincronización pequeña.

Método de localización	Técnica	Ventajas	Desventajas
		esquema de comunicación. • Calculo de localización para todo tipo de fallas (1F, 2F, 2F-T y 3F). • No requiere saber el tipo de falla • No está limitado por la ubicación de los dispositivos de medición.	• Se requiere conocer la topología de red líneas y modelos de carga. • Los errores en la medición tienen un impacto lineal en la estimación de la distancia de falla.
[Naidu2014]	Tabla de amplitud y duración de huecos de tensión.	• Gran potencial para ser implementada en línea. • Simple aplicación, no requiere de cálculos elaborados. • Los datos de entrada magnitud y duración del hueco son tomados de los medidores de energía instalados.	• Se debe crear una base de datos de las magnitudes y duraciones de huecos en cada caso de estudio. • Se presenta incertidumbre en la duración de los huecos dependiendo de las protecciones que respondan, primarias o de respaldo. • La precisión del método depende de la cantidad medidores instalados.
[Huaiguang2014]	Descomposición de búsqueda coincidente	• Algoritmo de aprendizaje automático.	• Implica instalación de registradores de

Método de localización	Técnica	Ventajas	Desventajas
	y modelo de Markov oculto	• Ubica e identifica el tipo de falla ocurrido. • Combina información de la topología con características de la señal de tensión. • Método intuitivo fácil detección de la falla	perturbaciones de frecuencia (FDR) de alto costo. • Alta carga computacional • Cálculos matemáticos elaborados.
[Jia2015]	Medidores inteligentes ubicados en el lado de baja tensión.	• Adecuado para sistemas con cargas pasivas y generación distribuidas. • No se ve influenciado por distorsiones armónicas • No requiere ninguna sincronización.	• Precisión sujeta a la calidad y cantidad de los medidores. • Utiliza componentes de secuencia. • La pérdida de comunicación afecta a las unidades de medición afectan la ubicación de la falla. •
[Majidi2015]	Sensado compresivo	• Baja cantidad de datos de carga. • No se ve afectado por la resistencia de falla • Cálculo de localización para todo tipo de fallas (1F, 2F, 2F-T y 3F). • Robusto ante ruidos y tipos de falla	• Se utilizan las mediciones de falla y prefalla. • El rendimiento del método depende de la cantidad y calidad de los medidores instalados, así como de su ubicación dentro de la red eléctrica.

Método de localización	Técnica	Ventajas	Desventajas
[Sun2016]	Método automático de localización información multi-fuente.	• Se consideran los impactos de la pérdida de información y la GD. • Funciona para redes de media y baja tensión. • Localiza fallas simultáneas en diferentes laterales. • Es un método adaptativo, gracias de adyacencia.	• Se deben instalar indicadores de falla y unidades terminales de alimentación. • Alta dependencia del estatus de información. • Utilizan reportes de falla de los clientes. • Las tablas de adyacencia deben ser modificadas ante cualquier modificación del sistema.
[Bíscaro2016]	Transformada de wavelet, análisis multiresolución y red neuronal artificial	• Análisis de oscilografía • No posee problemas con la múltiple estimación. • Alta precisión y flexibilidad. • Alto rendimiento computacional.	• Cálculo de la energía de las señales en prefalla y postfalla. • Se necesitan datos de medición junto con la información de la topología de la red. • Deben entrenarse varias redes neuronales clasificar, cortocircuitos y calidad de potencia.

4. PERSPECTIVAS DE LA LOCALIZACIÓN DE FALLAS

Como perspectivas futuras, se espera el diseño de una metodología implemente una localización automática de fallas, aprovechando las ventajas que proporcionan cada uno de los métodos analizados, buscando que se ajuste de la mejor forma a las topologías circuitales que sean analizadas. Logrando con esto una herramienta robusta que permita el estudio rápido y confiable de las fallas que ocurren de los sistemas de distribución.

Para trabajos posteriores, también se espera un gran avance en el tema de la sincronización de registros, debido a que está íntimamente relacionado con la localización de fallas, considerando que los mejores métodos manejan la información captada en ambos extremos de la línea, pero su gran debilidad es la sincronización de la que dependen. Haciendo de esta una de las temáticas más novedosas en cuanto a localizar fallas se refiere.

También se espera que junto a la temática de localización de fallas, se pueda desarrollar una estrategia operativa que permita un restablecimiento del sistema durante el tiempo que ocurra la anomalía, desconectando de manera rápida la zona fallada, ubicando seccionalizadores que trabajen de manera conjunta, permitiendo con esto que se mantenga la continuidad del suministro a los usuarios que estén cerca de donde ocurrió la falla.

Se pretende que con el avance de las redes inteligentes y el uso que hoy día se da a estas por parte de las empresas que prestan el servicio de energía eléctrica, ocasione que la aparición los sincrofasores se vuelva algo habitual, permitiendo hacer uso de todos sus beneficios dentro de lo que destacan, que se pueden mostrar datos análogos de tensión y corriente sincronizados con un sistema de

posicionamiento global y además el uso en aplicaciones como monitoreo, control y protección de los sistemas de potencia.

Por último, se tiene la expectativa de combinar junto a las unidades de medición fasorial, métodos híbridos que permitan reducir el tiempo de búsqueda de la falla y la cantidad de PMU instalados. Haciendo con esto un proceso más versátil y rápido, para esta tarea se propone un algoritmo genético aprovechando las propiedades de cruce y mutación, logrando de esta manera determinar el lugar de ocurrencia de la falla de forma veloz y eficaz, y a su vez disminuyendo costos de instalación de PMU.

5. CONCLUSIONES

Como conclusiones generales de esta monografía se pueden mencionar las siguientes:

Luego de realizar la revisión del estado del arte acerca del tema de localización de fallas en los sistemas de distribución, se encontró que existe una variedad de métodos que permiten realizar dicha tarea y cada uno cuenta con características propias que los diferencian entre sí. Por esta razón, antes de tratar de averiguar cuál de todos es el mejor método de localización, la preocupación principal debe ser cual se ajusta a las características del sistema de potencia que se está analizando.

Se presenta gran dificultad al tratar de localizar fallas de alta impedancia, debido principalmente a la no linealidad y la baja amplitud de corriente de falla producida, por lo que se suelen confundirse con aumentos de demanda. Se pudo observar a su vez, que los algoritmos tradicionales que necesitan un modelo matemático, arrojan buenos resultados trabajando con fallas de baja impedancia, pero el error en la ubicación crece a medida que la falla ocurre más lejos de la subestación y la resistencia de falla aumenta.

Los modelos propuestos con técnicas de inteligencia artificial, arrojan muy buenos resultados en la localización del punto donde ocurre la falla, sin embargo se valen de otros métodos para calcular la resistencia de falla y así ubicar el lugar donde la falla ocurrió. En general el uso de métodos que necesitan ser previamente entrenados permite una buena aproximación a la solución del problema, con el inconveniente que debe estar en constante aprendizaje debido a los cambios que hay en los sistemas de distribución frecuentemente.

Al analizar los diferentes métodos de la bibliografía, se logró encontrar ventajas y desventajas de cada uno de ellos, las cuales tienden a repetirse, pero se observa que lo que es ventaja o desventaja en un método, termina siendo información de entrada para otro, la cual permite crear la metodología para utilizarlos en un orden específico, permitiendo de esta manera utilizarlos de manera conjunta, obteniendo mejores resultados que al hacerlo de manera aislada. Al trabajar en conjunto con técnicas que utilizan información del tipo teórico con las que usan de tipo empírico, se aprovechan las bondades de estas y se reduce en gran medida el problema de la múltiple estimación.

Al desarrollar este trabajo se pudo identificar que la principal característica de los métodos de localización de fallas son los datos de entrada, ya que el resultado final, o sea, la ubicación de la falla, depende del tratamiento que cada modelo matemático haga a los datos de entrada utilizados por cada método en particular. Por tal motivo, sino se cuenta con información veraz, se incurrirá en análisis erróneos para búsqueda de la fallas en los sistemas de distribución. Cada metodología tiene ventajas y desventajas ligadas esencialmente a su coste de instalación, a su operación, precisión, y mantenimiento, y al aprovechamiento de toda la información disponible.

BIBLIOGRAFÍA

ABOSHADY, F., THOMAS, D., y SUMNER, M. Esquema rápido de localización de fallas en Sistemas de Distribución basados en fallas transitorias. IEEE. 2017

ARBOLEDA, A. Localización de fallas de alta impedancia en líneas de transmisión para un estudio de caso mediante redes neuronales. Tesis Pregrado Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 2010

AXELBERG, P., GU, I and BOLLEN, M. Support vector machine for classification of voltage disturbances, IEEE Trans. PowerDel., vol. 22, no. 3, pp. 1297–1303, Jul. 2007

BAHARAT, M., MO Hanta, D. Performance Evaluation of an Adaptive Network Based Fuzzy Inference System Approach for Location of Faults on Transmission Lines Using Monte Carlo Simulation. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 16, No 4. 2008

BEDOYA, A., OROZCO, C., and MORA, J. Single Phase to Ground Fault Locator for Distribution Systems with Distributed Generation Transmission and Distribution. Latin America Conference and Exposition (T&D-LA), Sixth IEEE/PES. 2012

BJERKAN, E. Efficient fault management using remote fault indicators, presented at the 20th Int. Conf. Exhibit. Elect. Distrib.—Part 1 & 2 (CIRED 2009), Prague, Czech Republic. 2009

BRAHMA, S. Fault Location in Power Distribution System with Penetration of Distributed Generation, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 26, Issue 3, pp. 1545-1553. 2011

CADENA, A., FLÓREZ, J., y LONDOÑO, S. Estrategia de reducción para la aplicación generalizada de localizadores de fallas en sistemas de distribución de energía eléctrica; Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 17, p. 21-37. 2012

CARRERA, W. Modelo de dimensionamiento de cuadrillas para la atención de fallas en el Sistema de distribución de CODENSA S.A. ESP. Universidad Nacional de Colombia; Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Bogotá D.C. 2016

CELIS, J. Metodología para la estimación de hundimientos de tensión en sistemas eléctricos empleando una cantidad limitada de medidores de calidad de potencia; UNIVERSIDAD DEL VALLE, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Santiago de Cali Colombia. 2016

CHAKRABORTY, D. Damage classification structural health monitoring in bolted structures using time-frequency techniques, J. Intell. Mater. Syst. Struct., vol. 20, pp. 1289–1305, Mar. 2009

COLCIENCIAS. . Un proyecto de la unidad de planeación minero energética de Colombia (UPME) y el instituto colombiano para el desarrollo de la ciencia y la tecnología. Francisco José de Caldas, Universidad del Atlántico, Universidad Autónoma de Occidente, disponible en: <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Docs/calidad.pdf>, consultado junio de 2017.

COMISIÓN REGULADORA DE ENERGÍA Y GAS. Documento CREG 008 – Metodología de remuneración de la actividad de distribución de energía eléctrica para el próximo período tarifario. Ministerio de Minas y Energía, Colombia. 2016

COMISIÓN REGULADORA DE ENERGÍA Y GAS. Resolución CREG 024, Ministerio de Minas y Energía, República de Colombia. 2016

ERICSEN, T., HINGORANI, N., and KHERSONSKY, Y. Power electronics and future marine electrical systems, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 42, no. 1, pp. 155–163, Jul./Aug. 2006

FANG, X., MISRA, S., XUE, G and YANG, D. Smart grid—The new and improved power grid: A survey, IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 14, no. 4, pp. 944–980, Fourth Quarter. 2012

GARCIA, J., y MASON, J. at least. Best ANN Structures for Fault Location in Single and Double Circuit Transmission Lines. IEEE Transactions on power delivery, vol. 20, No 4 April. 2005

GILANY, M., IBRAHIM, D., and TAG ELDIN, E. Traveling-Wave – Based Fault-Location Scheme for Multiend-Aged Underground Cable Systems, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 22, no. 1, pp. 82 – 88. 2007

GIRGIS, A., FALLON, C., and LUBKEMAN, D. A fault location technique for rural distribution feeders, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 29, no. 6, pp. 1170–1175, Nov. 1993

GÓMEZ, V., PEÑA, R., y HERNÁNDEZ, C. Identificación y localización de fallas en sistemas de distribución, utilizando medidores de calidad del servicio de energía eléctrica. Revista Científica / ISSN 0124 2253/ Julio – Diciembre / No. 14 / Bogotá, D.C. 2011

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS (ICONTEC). Norma Técnica Colombiana 5000 (NTC 5000). . Calidad de la potencia eléctrica (CPE). Definiciones y términos fundamentales, 2013

KEZUNOVIC, M. Smart fault location for smart grids, IEEE Trans.Smart Grid, vol. 2, no. 1, pp. 11–22, Mar. 2011

LIU, H., MITOLO, M., and QIU, J. Ground-fault loop impedance calculations in low-voltage single-phase systems, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 40, no. 50, pp. 1331–1337. Jul./Aug. 2014

MORA, J., and CARRILLO, G. Comparison of impedance based fault location methods for power distribution systems, Elect. Power Syst. Res., vol. 78, no. 4, pp. 657–666, Apr. 2008

MORA, J., GRANADA, M., y MARÍN, L. Los métodos de representación del conocimiento en inteligencia artificial y su integración en sistemas híbridos de localización de fallas; Tecnura, vol. 9, núm. 17, pp. 98-109 Universidad Distrital Francisco José de Caldas Bogotá, Colombia. 2005

MORA, J., y MELÉNDEZ, J. Caracterización de huecos de tensión para localización de fallas en sistemas de distribución - un primer paso hacia un método híbrido, Scientia et Technica Año X, No 25, UTP. ISSN 0122-1701, Agosto. 2004

MORALES, G., BARRERA, R., y VARGAS, H. Ubicación única de fallas en sistemas de distribución por medio de zonas con SVM; Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.º 47. 2009

MORALES, G., BARRERA, R., y VARGAS, H. Ubicación única de fallas en sistemas de distribución por medio de zonas con svm"; Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.º 47. Medellín (Colombia). 2009

MORALES, G., VARGAS, H., y FLÓREZ, J. Influencia de la variación en la carga y del tamaño de la zona en la precisión de un localizador de fallas para circuitos de distribución. UIS Ingenierías, Volumen 6, No.1, págs. 47-57. 2007

NUNES, J., y BRETAS, A. Impedance-Based Fault Location Formulation for Unbalanced Primary Distribution Systems with Distributed Generation. Presented at the Int. Conf. on Power System Technology. 2010

OROZCO, C., MORA, J., y PÉREZ, S. A robust method for single phase fault location considering distributed generation and current compensation. Transmission and Distribution Latin America Conference. September/ Montevideo – Uruguay. 2012

RAMAR, K., and NGU, E. A new impedance-based fault location method for radial distribution systems, in Proc. Power Energy Syst.Gen. Meeting, pp. 1–9. 2010

ROJAS, J., y GIRALDO, J. Implementación de algoritmo para determinar la localización de sags y sus causas en redes de distribución. Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia. 2015

SÁNCHEZ, S. Comparación y análisis de los métodos de localización de fallas en los sistemas de transmisión y distribución; Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación Manizales, Colombia. 2017

SANTAMARÍA, W. Modelo de gestión para el proceso de atención de fallas en redes de distribución para CODENSA S.A. ESP, Universidad Libre, Facultad de Ingeniería Industrial, Bogotá D.C. 2016

SENGER, E., MANASSERO, G., GOLDEMBERG, C., and PELLINI, E. Automated fault location system for primary distribution networks, IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 2, pt. 2, pp. 1332–1340, Apr. 2005.

SERNA, I., FERREIRA, C., MARTÍNEZ, S., SUÁREZ, M., and CARRILLO, G. Impact of static load models on the power distribution fault location problem. Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America. IEEE/PES . Page(s): 706 – 711. 2010

THOMAS, D., CARVALHO, R., and PEREIRA, E. Fault location in distribution systems on traveling waves, presented at the IEEE Bologna Power Tech Conf., Bologna, Italy, Jun. 23–26. 2003

TRINDADE, F., FREITAS, W., and VIEIRA, J. Fault location in distribution systems based on smart feeder meters, IEEE Trans. Power Del., vol. 29, no. 1, pp. 251–260, Feb. 2014

VARGAS, C. Evaluación de las metodologías regulatorias para remunerar los sistemas de distribución en Colombia, y presentar propuestas de mejora, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C. 2016

ZHU, J., LUBKEMAN, D., and GIRGIS, A. Automated fault location and diagnosis on electric power distribution feeders,” IEEE Trans. Power Del., vol. 12, no. 2, pp. 801–809, Apr. 1997