

**UBICACIÓN DE FALLAS ELÉCTRICAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN BASADO EN EL FILTRO
DE KALMAN.**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
ELECTRICIDAD**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
UBICACIÓN DE FALLAS ELÉCTRICAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN
BASADO EN EL FILTRO DE KALMAN.**

**AUTOR:
CHRISTIAN IVÁN PAREDES MORENO**

**TUTOR:
ING. DIEGO FRANCISCO CARRIÓN GALARZA**

Quito, Noviembre 2021

Christian Iván Paredes Moreno

UBICACIÓN DE FALLAS ELÉCTRICAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN BASADO EN EL FILTRO DE KALMAN.

Universidad Politécnica Salesiana
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



Christian Iván Paredes Moreno (Y'1992-J'07). Realizó sus estudios secundarios en el Colegio Técnico 12 de Febrero, se graduó de Bachiller Técnico en Electromecánica. Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo de investigación se basa en ubicar fallas en líneas de transmisión utilizando el filtro de Kalman.
cparedesm1@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Diego Francisco Carrión Galarza (Y'1981-M'12). Se graduó como Ingeniero Eléctrico en la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador en el año 2010 y en la actualidad está trabajando para lograr su título de doctor en ingeniería de la Universidad Politécnica Bolivariana – Medellín, Colombia. Es profesor e investigador de la Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador. En la actualidad es miembro del grupo de investigación GIREI (Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes – Smart Grid Research Group).
dcarrion@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:


Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS ©2021
Universidad Politécnica Salesiana
QUITO-ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Diego Francisco Carrión Galarza declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación denominado *UBICACIÓN DE FALLAS ELÉCTRICAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN BASADO EN EL FILTRO DE KALMAN* realizado por Christian Iván Paredes Moreno, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, Noviembre 2021



.....

Diego Francisco Carrión Galarza
Cédula de identidad: 1713703062

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Christian Iván Paredes Moreno, con documento de identificación N° 1804264412, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: *UBICACIÓN DE FALLAS ELÉCTRICAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN BASADO EN EL FILTRO DE KALMAN*, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



.....
Nombre: Christian Iván Paredes Moreno

Cédula: 1804264412

Fecha: Noviembre 2021

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación se lo dedico a Dios quien nunca dejo de bendecirme durante este largo proceso de estudio, con mucho cariño a mis padres, quienes han sido un pilar fundamental en el transcurso de mi vida brindándome su apoyo en todo momento. A mis tíos quienes vivieron de cerca todo el proceso para obtener este magnífico logro.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por brindarme su guía y sus bendiciones durante toda mi vida, a mis padres que siempre creyeron en mí y me dieron todo el apoyo necesario para culminar mis estudios universitarios.

Agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana, que me abrió las puertas para forjarme como profesional, a mis amigos con los que viví todo el proceso universitario.

Agradezco al Ingeniero Diego Carrión, quien es el tutor del presente artículo, por la apertura para dirigir el trabajo desarrollado.

ÍNDICE GENERAL

1.	Introducción	2
2.	Métodos Para Ubicar Fallas en Líneas de Transmisión.....	5
1.1.	Transformada de Wavelet.....	5
1.2.	Onda Viajera.....	6
1.3.	Hilbert Huang.....	6
1.4.	Método de Impedancia de un solo Extremo.....	7
1.5.	Filtro Kalman	7
3.	Planteamiento del Problema.....	8
1.6.	Ubicación Óptima de PMU.....	9
1.7.	Método de Identificación de Fallas Eléctricas en Líneas de Transmisión Basado en el Filtro Kalman.....	10
1.8.	Cálculo de distancia de la falla.....	12
4.	Análisis de Resultados.....	13
5.	Conclusiones	15
6.	Trabajos futuros	16
7.	Referencias.....	16
8.	Matriz de Estado de Arte.....	20
8.1.	Resumen de Indicadores	22

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Descomposición modo empírico.....	6
Figura 2. Modelo IEEE de 9 barras.....	8
Figura 3. Ubicación óptima de PMU.....	10
Figura 4. Diagrama de bloques Filtro Kalman.....	11
Figura 5. Modelo Pi línea de transmisión.....	12
Figura 6. Falla monofásica en la fase A.....	13
Figura 7. Detección de la falla.....	14
Figura 8. Falla bifásica A-C.....	14
Figura 9. Detección de falla bifásica.....	14
Figura 10. Falla trifásica.....	14
Figura 11. Ubicación falla trifásica.....	14
Figura 13. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.....	22
Figura 14. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....	22
Figura 15. Indicador de solución - Estado del arte.....	23

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Datos de generación.....	8
Tabla 2: Datos de transformadores.....	8
Tabla 3: Datos de líneas de transmisión.....	8
Tabla 4: Datos de las cargas.....	9
Tabla 5: Cálculo de la distancia falla monofásica línea 1.....	15
Tabla 6: Cálculo de la distancia falla bifásica 2.....	15
Tabla 7: Cálculo de la distancia falla trifásica línea 3.....	15
Tabla 9: Matriz del estado del arte.....	20

UBICACIÓN DE FALLAS ELÉCTRICAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN BASADO EN EL FILTRO DE KALMAN.

Resumen

En el presente trabajo se aborda una metodología que permita ubicar y clasificar los diferentes tipos de fallas eléctricas que se puedan generar en una línea de transmisión, para ello se realiza un algoritmo del filtro de Kalman el cual se basa en el análisis de las señales de corriente y voltaje obtenidas del simulador EMPT en el cual se planteó varios escenarios con fallas de tipo simétricas y asimétricas en las líneas de transmisión del SEP.

El problema está enfocado en ubicar fallas eléctricas en las líneas de transmisión del sistema IEEE de 9 barras y los resultados obtenidos llevarlos al algoritmo del filtro de Kalman que ha sido desarrollado en Matlab, el cual se basa en realizar un conjunto de procesos recursivos con las señales de voltaje y corriente que alimentan al filtro y así permitir visualizar un estado oculto de un proceso, que para el caso es ubicar fallas eléctricas.

Este es un método que no requiere de un previo conocimiento o aproximación del tipo de falla, puesto que el filtro se caracteriza por ser un estimador y por ende se forma de una parte predictiva y correctiva.

Los resultados obtenidos han sido verificados generando varios escenarios de fallas con el simulador EMPT, validando la eficacia y precisión del método propuesto basado en el filtro Kalman para la identificación de fallas eléctricas.

Palabras Clave: Clasificación de fallas, filtro Kalman, localización de fallas, líneas de transmisión, proceso recursivo.

Abstract

In the present work a methodology is approached that allows to locate and classify the different types of electrical faults that can be generated in a transmission line, for this a Kalman filter algorithm is carried out which is based on the analysis of the signals of current and voltage obtained from the EMPT simulator in which several scenarios with symmetric and asymmetric failures in the transmission lines of the SEP were proposed.

The problem is focused on locating electrical faults in the transmission lines of the IEEE 9-bar system and the results obtained are taken to the Kalman filter algorithm that has been developed in Matlab, which is based on performing a set of recursive processes with the voltage and current signals that feed the filter and thus allow to visualize a hidden state of a process, which for the case is to locate electrical faults.

This is a method that does not require prior knowledge or approximation of the type of failure since the filter is characterized by being an estimator and therefore is made up of a predictive and corrective part.

The results obtained have been verified by generating various fault scenarios with the EMPT simulator, validating the efficiency and precision of the proposed method based on the Kalman filter for the identification of electrical faults.

Keywords: Fault classification, Kalman filter, fault location, transmission lines, recursive process.

1. Introducción

Las líneas de transmisión en un sistema eléctrico de potencia (SEP), conectan grandes centros de producción con subestaciones que se ubican geográficamente dispersas en los alrededores de las ciudades y cuyo objetivo es el de disminuir el voltaje a niveles que puedan ser suministrados a los diferentes tipos de consumidores finales. La transmisión de energía a largas distancias se realiza a altos niveles de voltajes y así minimizar la corriente, y por ende la pérdida de la línea. El sistema de transmisión puede ser catalogado como la columna vertebral del SEP, puesto que de aquello depende el equilibrio dinámico entre producción y consumo [1].

El SEP debe poseer la capacidad de suministrar energía eléctrica ininterrumpidamente de tal forma que, su nivel de confiabilidad no se vea afectado en el caso que surgiera algún tipo de falla como los que se abordarán en los siguientes apartados. Es por ello la necesidad de buscar nuevos métodos que permitan ubicar fallas eléctricas en el sistema de transmisión de manera precisa y efectiva, de tal forma que el sistema pueda volver a reestablecer el servicio en el menor tiempo posible y se puedan evitar daños en los equipos [2]-[3].

En la actualidad existen varios métodos propuestos para la ubicación de fallas en un sistema de transmisión, de acuerdo a [4], se clasifican en tres categorías; método de impedancia de un solo extremo, método de impedancia de doble extremo, y método de la onda viajera. Los primeros dos métodos se basan en la medición fasorial de la frecuencia fundamental de uno o dos terminales, que forman la línea de transmisión para la ubicación de la falla a través del cálculo de la impedancia desde el punto de falla hasta el terminal [5]. Mientras que, el método de onda viajera registra los tiempos de arribo de las ondas para determinar la ubicación de la falla, este

método presenta cierta característica por el cual es cuestionado, puesto que, demanda una alta frecuencia de muestreo y cuando una falla se genera cerca de una barra la precisión del resultado no es muy acertado, otra particularidad es que, es limitada a la capacidad de detectar todas las posibles fallas que pudiesen generar. Es por ello que cuando se produce un falla monofásica a tierra, el ángulo de inicio es muy pequeño, las señales transitorias producidas por la falla son muy débiles y por lo tanto, las protecciones de onda viajera no podrían identificar este tipo de falla y es una de las que estadísticamente se producen con mayor frecuencia [4]-[6].

Para profundizar más a detalle algunos métodos propuestos por varios autores, se realiza un análisis de cada uno de los mismos.

El método expuesto en [7] propone localizar y clasificar las fallas eléctricas a partir de las mediciones de propagación para reconstruir los perfiles espaciales de los parámetros de impedancia distribuida y conductancia en derivación de una línea de transmisión con pérdidas. Este método se basa en la obtención de medidas de pérdidas de retorno en los dos extremos de la línea de transmisión, al igual que las medidas obtenidas cuando se genere una pérdida de transmisión entre los dos extremos. Además, dicho método utiliza un modelo de dispersión inversa que se basa en la aproximación de Born y así logra obtener las aproximaciones que requiere el método. Una de sus ventajas es que brinda un conjunto de expresiones analíticas individuales cuyo objetivo es el de proporcionar los parámetros de la línea de transmisión que serán objeto de estudio.

En [2] los autores proponen un método que se basa en la obtención de la corriente de las tres fases y una técnica de promedio móvil. Es decir, en condiciones normales la corriente de las tres fases es

constantes, mientras que si el sistema presenta algún tipo de variación que superen los límites establecidos, será considerado como falla eléctrica. Basado en la teoría de la media móvil, es definido un criterio el cual pueda detectar la presencia y tipo de falla producida. De acuerdo con resultados obtenidos, este método es viable utilizar en SEP de 5 y 9 barras de simple o doble circuito. Mientras que en [8] proponen un método basado en morfología matemática en tiempo real que permitirá ubicar y clasificar fallas eléctricas. Dicho método consiste en implementar un filtro de mediana morfología, que extraerá las características de la falla producida, y posterior a ello esta información servirá para alimentar a un árbol de decisiones y clasificar el tipo de falla.

Los autores [9] proponen una metodología basado en el modelo de línea distribuida de doble circuito considerando los acoplamientos mutuos entre los dos circuitos. Las mediciones de voltaje corriente permiten detectar, clasificar y ubicar el punto que se generó la falla eléctrica. Mientras que en [10], plantean una técnica diseñada con base a los fasores de corriente y voltaje recibidos, la cual calcula el coeficiente de varianza de cada muestra recibida dentro de un determinado tiempo, y en función de aquello es clasificado y ubicado el tipo de falla que se generó.

En [11] proponen un método analítico para ubicar fallas en líneas de doble circuito, el mismo que se basa en la medición de corriente y voltaje en los extremos de la línea. La distancia es calculada a través del análisis de la red de secuencia equivalente mientras se encuentre en condición de falla de línea única a tierra durante el otro circuito en falla se encuentre conectado a tierra en sus dos extremos. De acuerdo con los resultados obtenidos este método presenta un error menor al 1%. Mientras que el método propuesto por [12], considerando una metodología muy

similar, el error es inferior al 1.5% en 178 casos que se realizaron las pruebas, obteniendo una precisión igual al 98%. La diferencia que presentan los dos métodos respecto a la obtención de datos es muy baja.

En [13] presentan una novedosa metodología híbrida la cual está compuesta del algoritmo Relief y la transformada de Wavelet ante una contingencia. El método propuesto utiliza los datos de voltajes y corrientes obtenidos de las Unidades de Medición Fasorial (PMU por sus siglas en inglés), desplegadas en el SEP a prueba. El algoritmo Relief es quien ubica una falla en la línea de transmisión, mientras que, la Transformada Continua de Wavelet permite analizar el comportamiento transitorio obtenido de las señales de voltaje y corriente. De acuerdo con los resultados obtenidos, la precisión de este método es igual al 94.1%.

En [4], proponen un método de clasificación y ubicación de fallas eléctricas basado en el filtro de Kalman. Este filtro se basa en las señales fasoriales obtenidas tanto de corriente y voltaje, inicialmente proporciona una estimación del tipo de falla generada, posterior a ello, realiza un filtrado reforzado en el cual clasifica y ubica de manera precisa la falla eléctrica. Los resultados obtenidos representan una aproximación con un error promedio igual a 0.159%, en comparación al método de un solo extremo y doble extremo.

Por otra parte, como consecuencia de una falla, los componentes del SEP se ven sometidos a una variedad de perturbaciones, elevadas magnitudes de corriente de cortocircuito durante el tiempo que tomen las protecciones eléctricas en despejar la falla. Es por ello que las fallas eléctricas no afectan únicamente a los equipos, sino que también se ve afectada la calidad de energía entregada a los consumidores [3]. Las protecciones instaladas en las líneas de transmisión deben actuar en el

momento oportuno, es decir, que brinden un nivel de confianza y seguridad. De acuerdo con IEEE C.37.2-2008, el nivel de confianza está definida como el grado de certeza de que el relé opere correctamente. Mientras que, la seguridad está definida como el grado de certeza de que el relé no opere erróneamente [14]. La protección diferencial de corriente (87) y la protección de distancia (21) son ampliamente utilizados para protecciones de líneas de transmisión por su alto nivel de confiabilidad y su capacidad de visualizar la impedancia entre el relé y un punto de falla. Sin embargo, debido a ciertas características de sensibilidad propias de los equipos se ven afectados o influenciados por la capacidad distribuida de la línea y ciertos parámetros más como la resistencia de falla y la saturación del transformador de corriente [6].

Por otra parte, para obtener una medición óptima de los parámetros eléctricos, es indispensable la ubicación de PMU en sitios estratégicos. A pesar de los beneficios excepcionales que prestan estos equipos, los mismos requieren de un costo asociado para su despliegue en la red eléctrica [15]. Es por ello por lo que con la finalidad de maximizar la observabilidad y minimizar el número de PMU, algunos autores proponen varios métodos de ubicaciones óptimas para estos equipos [16]–[18].

En [19] proponen un modelo que permite ubicar de forma óptima las PMU, bajo el criterio de contingencia N-1, basado en la programación lineal de enteros mixtos como técnica de optimización. Básicamente este criterio se considera ciertas restricciones tales como; observabilidad y mediciones redundantes. Bajo estas condiciones el método propuesto ubica de manera óptima en lugares estratégicos las PMU, de tal forma que permita visualizar los datos de todas las barras que forman parte del SEP. Dicho método fue probado con los sistemas propuestos por IEEE de 9, 14, 30 y 118 barras.

En el actual documento será objeto de estudio el sistema de 9 barras, de acuerdo a los resultados obtenidos en [19], para obtener una observabilidad de todo el SEP, se requiere implementar las PMU en las barras 4, 7 y 9 sin considerar ningún tipo de contingencia, puesto que esto no es objeto de estudio para el caso [20].

En [21] presenta un método de optimización basado en el árbol de mínima expansión (MST) para la ubicación óptima de PMU. Es por ello por lo que el algoritmo que comprende el método optimiza la conexión entre los posibles sitios candidatos para la ubicación de las PMU, con el objetivo de evitar que tome por repetidas ocasiones el mismo sitio candidato. Con este método se pretende facilitar el análisis de fallas eléctricas con un mínimo costo de recursos utilizados para el caso. Mientras que en [22] proponen un método muy similar al anterior basado en MST y la combinación del algoritmo genérico para recuperar la información no observada. Este método está enfocado a la optimización del tráfico de datos entre unidades de medición, la implementación de un sistema de monitoreo de área amplia (WAMS por sus siglas en inglés), tiene como finalidad satisfacer la observabilidad completa del SEP con los datos recuperados del algoritmo genérico. De acuerdo a [23] los métodos existentes generalmente se basan en el ruido gaussiano para el análisis, también conocido como ruido blanco. Sin embargo, en la realidad este tipo de ruido no es muy robusto como lo consideran los demás métodos para el análisis. Es por ello que, el método propuesto por [23], es considerado como un ruido de medición no gaussiano o gaussiano. En [24] presentan un algoritmo competitivo imperialista modificado (MICA), cuyo objetivo es el de ubicar PMU de manera óptima, los resultados obtenidos con este método reflejan un número de PMU igual o menor que los métodos anteriores.

En el presente artículo se plantea un método basado en el filtrado de señales para ubicar fallas eléctricas en las líneas de transmisión. Para ello, se propone implementar el algoritmo del filtro Kalman en Matlab, el cual será alimentado por las señales de corrientes y voltajes obtenidos de las líneas de transmisión a través del software EMPT. Para generar los diferentes escenarios de fallas, se implementará el sistema IEEE 9 Barras del cual se obtendrá los fasores de voltaje y corriente de cada escenario planteado.

En presente documento se encuentra distribuido de la siguiente manera; introducción, marco teórico, planteamiento del problema, análisis de resultados y conclusiones. En la sección de la introducción se realiza un análisis entre los métodos propuestos por diferentes autores. Mientras que, en la sección del marco teórico se presenta algunas de las técnicas utilizadas para la ubicación de fallas con sus modelos matemáticos. En la sección del planteamiento del problema de describe el modelo matemático del filtro y la técnica propuesta para el método del filtro Kalman. La sección de análisis de resultados contiene la validación del método propuesto para el efecto al igual que los diferentes escenarios planteados. En la sección de conclusión se presenta la información más relevante obtenida durante el desarrollo del trabajo.

2. Métodos Para Ubicar Fallas en Líneas de Transmisión.

La detección y ubicación de fallas en las líneas de transmisión, requieren de técnicas y aplicaciones altamente sofisticadas en el área [25]–[27]. De acuerdo a [28] los métodos comúnmente más utilizados para la detección, clasificación y localización son:

- Transformada de Wavelet.
- Onda viajera.
- Hilbert Huang.

- Método de impedancia de un solo extremo.
- Método de impedancia de dos extremos.

A continuación, se describe cada uno de los métodos mencionados.

1.1. Transformada de Wavelet.

Es un método eficiente que permite analizar magnitudes de corrientes y voltajes transitorias en las protecciones del sistema de energía eléctrico este método permite analizar matemáticamente los tipos de señales no estacionarias [2].

La transformada de La transformada de wavelet descompone funciones que se encuentren en el dominio del tiempo $f(t)$, que ayudan a encontrar un conjunto de coeficientes denominados, parámetros de traslación y escala $C_f(a, b)$. Dichos parámetros generan una función $\psi(t)$ llamada wavelet madre y está dada por la siguiente ecuación [28].

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

Donde:

“*” hace referencia al conjugado.

Por otra parte, la implementación de este método en otras aplicaciones prácticas puede resultar complicado, puesto que no existe un método estandarizado que permita determinar el número óptimo de niveles de descomposición de la función wavelet madre [11]. La transformada de wavelet se caracteriza por su flexibilidad en el uso de información de tiempo y frecuencia. Se aplica para detectar el arribo y tiempo de las ondas a los terminales de la línea de transmisión [28]. Transformada de wavelet discreta (DWT), es utilizada cuando se requiere extraer información en ciertos rangos de frecuencias, los coeficientes de diferentes niveles de descomposición se utilizan para obtener ciertas características [29]. Este método permite estudiar y analizar los cambios tanto en tiempo como frecuencia, es por ello que posee una

amplia capacidad de localización de fallas eléctricas [30].

1.2. Onda Viajera.

Este método se basa en el monitoreo constante de los tiempos de llegada de las ondas para determinar la ubicación de la falla, sin embargo, este método demanda de una frecuencia de muestreo muy alta, y la veracidad del resultado no es muy confiable cuando ocurre una falla cercana a un bus [31]. De acuerdo a [31] los esquemas tradicionales para detectar la onda viajera, se basan únicamente en la información proporcionada por una sola línea en falla, por tal razón presentan menor sensibilidad y confiabilidad. Especialmente cuando uno de sus dispositivos falla, el tiempo registrado de arribo de la onda es incorrecto.

La distancia desde el punto de falla hacia el punto de detección está definida por la siguiente ecuación:

$$d_i = \frac{v\Delta t_{ij} + l_{ij}}{2} \quad (2)$$

Donde:

v : es la velocidad de propagación de la onda viajera.

t_i y t_j : son los tiempos iniciales de arribo de la onda viajera registrados por los puntos i y j .

$\Delta t_{ij} = t_i - t_j$. l_{ij} : es la ruta más corta entre los puntos i, j que atraviesan la línea en falla.

Los datos obtenidos por los dispositivos de medición ubicados en los extremos de las líneas, pueden no ser siempre correctos y dependen de factores tales como; el clima, la edad del conductor, la temperatura y el pandeo de la línea de transmisión [32]. De acuerdo a resultados obtenidos, este método proporciona una gran confiabilidad para detectar fallas a tierra dentro del sistema de transmisión, ya que no se ve afectada por factores como; capacitancia distribuida, la oscilación del sistema y la saturación del transformador de corriente [33]–[35].

1.3. Hilbert Huang.

Es un método basado en tiempo y frecuencia que permite filtrar formas de onda no estacionarias unidimensionales en diferentes bandas de frecuencia. Como parte central, la transformada de Hilbert Huang descompone la señal no estacionaria y no lineal en una función de modo intrínseco de modo único [36].

En la Fig.1 se muestra la división de la señal original $S(t)$ en una combinación lineal de componentes de múltiples ordenes $C_j(t)$ en orden de frecuencia y da un resto uniforme $r_n(t)$:

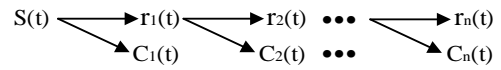


Figura 1. Descomposición modo empírico.

Representado matemáticamente:

$$S(t) = \sum c_j(t) + r_n(t) \quad (3)$$

El componente de alta frecuencia contiene la información característica de la ubicación de la falla. La descomposición empírica es utilizada para extraer el componente de alta frecuencia en la señal de falla [36]. La transformada de Hilbert para cada IMF se representa de la siguiente forma [37].

$$\text{Hilbert} [C_n(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{C_n(\zeta)}{(t - \zeta)} d\zeta \quad (4)$$

Donde:

$c_n(t)$ representa la n -enésima función de modo intrínseco (IMF) de una señal arbitraria.

$S(t)$ la transformada de Hilbert para cada IMF.

Considerando la definición de la ecuación (4), se obtiene (5).

$$X_n(t) = C_n(t) + jH[C_k(t)] \quad (5)$$

Donde:

$C_n(t)$ y $C_n(\zeta)$: representan los pares de complejos conjugados que forman la señal analítica $X_n(t)$.

1.4. Método de Impedancia de un solo Extremo.

La ubicación de fallas basados en la impedancia de un solo extremo, miden la ubicación de la falla en función de la impedancia aparente vista desde uno de los extremos de la línea. Se deben medir los voltajes y corrientes de fase a tierra en cada fase para localizar todos los tipos de fallas eléctricas [38]. Una característica de este método es que, permite ubicar fallas de fase a fase en el caso que únicamente se cuente con voltajes línea – línea, además, las fallas de fase a tierra también pueden ser ubicadas conociendo la impedancia de la fuente de secuencia cero Z_0 , considerando que la resistencia de falla es cero, las siguientes ecuaciones proporcionan una aproximación de la falla [5].

Secuencia positiva para una falla monofásica:

$$mZ_{1L} = \frac{V_a}{(I_a + kI_R)} \quad (6)$$

Impedancia de secuencia positiva para una falla bifásica.

$$mZ_{1L} = \frac{V_{ab}}{I_a} \quad (7)$$

Donde:

k : es $(Z_{0L} - Z_{1L})/3Z_{1L}$

Z_{0L} : es la impedancia de la línea de secuencia cero.

m : es la distancia por unidad de falla.

I_R : es la corriente residual.

C

$$e_a = |m_m - m_t| \quad (8)$$

Donde:

e_a : es el error absoluto por unidad (p.u), porcentaje (%) o distancia en kilómetros (km).

m_m : es la ubicación de la falla en; p.u, %, km.

m_t : es la verdadera ubicación de la falla en p.u, %, km.

El error relativo basado en la longitud de la línea esta dado por la siguiente ecuación:

$$e_l = \frac{|m_m - m_t|}{L} \quad (9)$$

Donde:

e_l : es el error relativo basado en la longitud de la línea en; p.u, %, km.

L : es la longitud de la línea en; p.u, %, km. Mientras que el error relativo tradicional está definido por la siguiente ecuación:

$$e_t = \frac{|m_m - m_t|}{m_t} \quad (10)$$

Donde:

e_t : es el error relativo tradicional en por unidad (p.u), o porcentaje (%).

1.5. Filtro Kalman

Fue desarrollado por Rudolf E. Kalman en 1960 cuyo objetivo es el de identificar un estado oculto en un sistema dinámico lineal, y tiene como objetivo proporcionar una solución indefinida del método de mínimos cuadrados. Este tipo de filtro es comúnmente utilizado cuando se dispone de un conjunto de ecuaciones que describen el comportamiento de un sistema lineal [39]. Es un método recursivo, elaborado para aquellas aplicaciones que operan en el dominio del tiempo [40].

Un sistema dinámico lineal puede incorporar mediciones ruidosas, por ende, puede ser afectado por algún tipo de ruido externo, comúnmente conocido como ruido blanco, es por ello que se utilizan mediciones que relacionen con el estado [33]. El modelo matemático del filtro asume que en un tiempo t el estado de un sistema evolucionó desde un estado anterior en el tiempo $t - 1$ según la ecuación (11) [41].

$$x_t = F_t x_{t-1} + B_t u_t + w_t \quad (11)$$

Donde:

x_t : es el vector de estado que contiene los términos de interés para el sistema en el tiempo t .

u_t : es el vector que contiene las entradas de control.

F_t : es la matriz de transición de estado.

B_t : es la matriz de entrada de control

w_t : es el vector que contiene los términos de ruido del proceso.

Las medidas del sistema también pueden ser obtenidas de acuerdo con el modelo matemático descrito en la ecuación (12).

$$Z_t = H_t x_t + v_t \quad (12)$$

Donde:

Z_t : es el vector de mediciones

H_t : es la matriz de transformación que ubica en el vector de estado los parámetros en el dominio de la medición.

v_t : vector con el ruido de la medición y el ruido blanco gaussiano.

En [4] presentan un modelo que permite ubicar fallas basado en el filtro Kalman, el modelo matemático utilizado para el efecto es el siguiente:

Ecuaciones de predicción:

$$\begin{cases} \hat{x}_{t|t-1} = F_t \hat{x}_{t-1|t-1} + B_t u_t \\ P_{t|t-1} = F_t P_{t-1|t-1} F_t^T + Q_t \end{cases} \quad (13)$$

Donde:

Q_t : es la matriz de covarianza de ruido de proceso asociado con entradas de control ruidosas.

Ganancia Kalman:

$$K_t = P_{t|t-1} H_t^T (H_t P_{t|t-1} H_t^T + P_{n_t})^{-1} \quad (14)$$

Ecuaciones de correcciones:

$$\begin{cases} \hat{x}_{t|t} = \hat{x}_{t|t-1} + K_t (y_t - H_t \hat{x}_{t|t-1}) \\ P_{t|t} = P_{t|t-1} - K_t (H_t P_{t|t-1} H_t^T + P_{n_t}) K_t^T \end{cases} \quad (15)$$

De acuerdo a los resultados obtenidos es evidente la efectividad del método propuesto para ubicar fallas en líneas de transmisión eléctrica [4].

3. Planteamiento del Problema

El modelo de prueba del IEEE 9 barras fue considerado como el escenario para simular los diferentes tipos de fallas que

se pueden presentar en un SEP, así mismo, dicho sistema fue implementado en el software EMPT para obtener las señales de voltaje y corriente. En la Fig.2 se muestra el modelo del sistema que se implementó en el software antes mencionado.

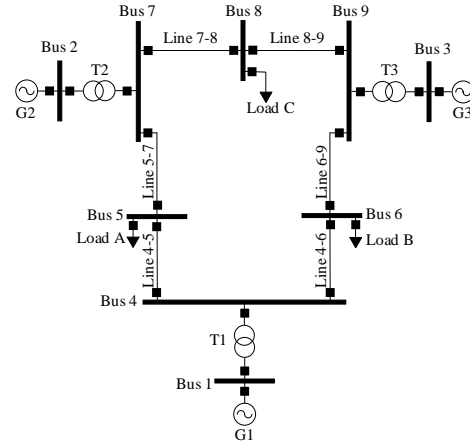


Figura 2. Modelo IEEE de 9 barras.

A continuación, se describen los parámetros de cada uno de los componentes eléctricos en p.u, todos referidos a una base de 100 MVA y 230 kV. En la tabla 1 se describe las características de los generadores que comprenden el sistema IEEE de 9 barras.

Tabla 1: Datos de generación.

Bus	V [kV]	δ [deg]	P [p.u]	Q [p.u]
1	17.1600	0.0000	0.7163	0.2791
2	18.4500	9.3507	1.6300	0.0490
3	14.1450	5.1420	0.8500	-0.1145

La tabla 2 muestra las reactancias de cada uno de los transformadores.

Tabla 2: Datos de transformadores.

N.º Transformador	X [p.u]
Transformador 1	0.0576
Transformador 2	0.0625
Transformador 3	0.0586

En la tabla 3 se describen los datos de las líneas de transmisión. Todas las líneas de transmisión tienen una longitud de 100 km.

Tabla 3: Datos de líneas de transmisión.

Línea	P	X	B	Sil
From To	[p.u/m]	[p.u/m]	[p.u/m]	

4	5	0.0100	0.0680	0.1760	200
4	6	0.0170	0.0920	0.1580	200
5	7	0.0320	0.1610	0.3060	200
6	9	0.0390	0.1738	0.3580	200
7	8	0.0085	0.0576	0.1490	200
8	9	0.0119	0.1008	0.2090	200

En la tabla 3 se describe los parámetros de las cargas conectadas al sistema. Las cargas son modeladas con su valor en p.u de potencia activa y reactiva PQ.

Tabla 4: Datos de las cargas.

Bus	P [p.u]	Q [p.u]
5	1.25	0.50
6	0.90	0.30
8	1.00	0.355

1.6. Ubicación Óptima de PMU.

La ubicación de los equipos de medición fasorial PMU, se realizó aplicando un método de optimización que permita ubicar en lugares estratégicos los cuales proporcionen una visibilidad completa de los parámetros del SEP. Las PMU se ubican de manera óptima en función de los parámetros eléctricos propios del sistema, para ello, se requiere de una matriz de conectividad (CM) que muestre los enlaces existentes entre cada uno de los buses. La matriz CM se arma de acuerdo con los enlaces existentes, es decir, si existe enlace entre dos buses se marca el número 1, caso contrario 0. Esta matriz debe ser cuadrada $n \times n$, siendo n la cantidad de buses del SEP.

$$CM_{n \times n} = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 1 & \text{si el bus } i, j \text{ se conectan} \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (16)$$

Donde:

i : es el nodo de salida.

j : es el nodo de llegada.

La matriz de conectividad (CM) para el modelo de prueba IEEE de 9 barras se obtiene de la siguiente forma:

$$CM = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Para calcular la observabilidad del SEP en función de sus condiciones y características topológicas se puede aplicar las siguientes reglas:

- **Regla 1:** Conocidos los valores de voltaje y corriente en un lado de cualquier ramal, aplicando la ley de Ohm se puede calcular los valores del otro extremo.
- **Regla 2:** Los buses ZIB que no poseen generación ni carga, si únicamente un bus es inobservable, aplicando la ley de corriente de Kirchhoff se puede hacer visible.
- **Regla 3:** Si es conocido el fasor de voltaje en los dos extremos de la línea, el valor fasorial de la corriente se puede obtener.

Las siguientes ecuaciones objetivo y restricción son aplicadas considerando la observabilidad y la redundancia para minimizar la cantidad de PMU.

F.O.:

$$\min n_{PMU} = \sum_{i=1}^n W_i * X_i \quad (17)$$

$\forall i \in \text{buses}$

Sujeto a:

$$f(x) \geq 1 \quad (18)$$

$$\max R = (n_{PMU}, U_{PMU}) \quad (19)$$

$$X_i + \sum_{j=1}^n X_j \geq \alpha_i \quad (20)$$

$\forall i \in \text{buses}$

Donde:

n_{PMU} : representa el número de PMU.

U_{PMU} : representa el nodo de ubicación.

n : representa el número de nodos del sistema.

W_i : es el proceso de acuerdo con el costo de implementación por PMU en el bus i .

X_i : representa una variable binaria de ubicación de PMU.

$$X_i = \begin{cases} 1 & \text{si se requiere PMU nodo } i \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (21)$$

α_i : representa una variable binaria de observabilidad.

$$\max R = (n_{PMU}, U_{PMU}) \quad (22)$$

A continuación, se presenta el algoritmo de la metodología planteada para la optimización de unidades de mediciones fasoriales.

Algoritmo 1: Ubicación óptima de PMU sin contingencia.

Paso 1: Datos de inicialización

$CM_{n \times n}$: Matriz de conectividad

W_i : Se asigna el mismo valor para todas las PMU

Paso 2: Aplicación de reglas de observabilidad

Paso 3: Minimización de PMU

F.O: $\min n_{PMU} = \sum_{\substack{i=1 \\ \forall i \in buses}}^n W_i * X_i$

Sujeto a: $f(x) \geq 1$

$$\max R = (n_{PMU}, U_{PMU})$$

$$X_i + \sum_{\substack{j=1 \\ \forall i \in buses}}^n X_j \geq \alpha_i$$

Paso 4: Mostrara resultados de la optimización

Una vez aplicado la metodología antes mencionada se obtiene que, se requiere de 3 PMU las mismas que deben ser ubicadas en el Bus 4, Bus 7 y bus 9 en el sistema para obtener una visibilidad completa de todo el SEP. En la fig.3 se muestra la ubicación óptima de las PMU para el modelo de prueba IEEE 9 barras. A través de las PMU ubicadas en el SEP se obtendrán las señales de corriente y voltaje que serán objeto de estudio y las mismas alimentarán al filtro Kalman para lograr identificar cuando se produce una falla eléctrica.

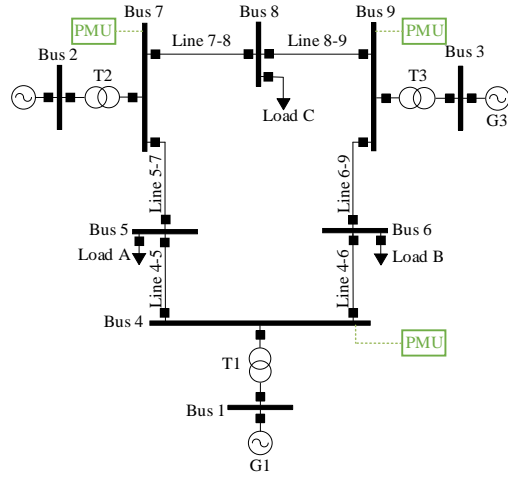


Figura 3. Ubicación Óptima PMU.

Para el caso de estudio se ubicó un amperímetro en cada extremo de las líneas de transmisión los cuales permiten obtener la intensidad de las tres fases que comprende la línea.

1.7. Método de Identificación de Fallas Eléctricas en Líneas de Transmisión Basado en el Filtro Kalman.

El filtro Kalman es un algoritmo que estima un proceso usando una forma de realimentación y control, el filtro estima el estado del proceso en un tiempo y después obtiene la realimentación en forma de mediciones ruidosas. Las ecuaciones que forman el filtro Kalman están formadas por dos secciones; la primera sección comprende la parte de actualización de tiempo, las ecuaciones que forman parte de la segunda sección son las de actualización de medidas (corrección). A continuación, se describen las ecuaciones de estados para el caso de estudio.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_i}{dt} \\ \frac{dv_l}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} i_{in} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{c} \end{bmatrix} i_o \quad (23)$$

El modelo de ecuaciones de estado se obtuvo a partir de las ecuaciones planteadas en el modelo pi de la línea de transmisión aplicando leyes de Kirchhoff para voltajes y corrientes.

Mientras que, como resultado a la salida del sistema de las ecuaciones de estado que describen el comportamiento de la línea se obtiene lo siguiente:

$$Y = C_x + v \quad (24)$$

Donde:

Y : Salida estimada por el sistema de ecuaciones de la línea de transmisión.

C_x : variable controlada o monitoreada.

La salida obtenida de las ecuaciones de estado de la línea, son ingresadas nuevamente al filtro para la actualización de valores, considerando la ganancia Kalman (K).

$$K = \frac{c}{cx + v} \quad (25)$$

Donde:

K : es la ganancia Kalman.

v : es la señal de ruido de las mediciones.

El modelo matemático del filtro Kalman toma como datos de inicio el estado de un sistema en el intervalo de un tiempo t , es decir, que este evolucionó desde un estado anterior en el tiempo $(t - 1)$ conforme expresa la ecuación (26).

$$\dot{X}_t = A_t X_{t-1} + B_t u_t + w_t \quad (26)$$

Donde:

x_t : es el vector de estado que contiene los términos de interés para el sistema en el tiempo t .

A_t : es la matriz de transición de estado.

B_t : es la matriz de entrada de control.

u_t : es el vector que contiene las entradas de control.

w_t : es el vector que contiene los términos de ruido del proceso.

Como resultados a la salida (y) del filtro se obtiene, ecuación (27).

$$y = C_{x,est} + v \quad (27)$$

Donde:

y : salida estimada por el filtro.

C_x : variable controlada estimada.

Considerando la ecuación (27) el modelo a la salida del filtro, para el sistema del caso de estudio se obtiene el siguiente:

$$y = [-1 \quad 0] \begin{bmatrix} i_c \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{in} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

Los términos w y v son considerados como ruido blanco, es decir, poseen una distribución probabilística de tipo gaussiano. Es por ello por lo que en la ecuación (29) y (30) la media está representado por el cero, y la medición de la covarianza representan los términos Q_c y R_c para cada uno de los ruidos.

$$w \sim (0, Q_c) \quad (29)$$

$$v \sim (0, R_c) \quad (30)$$

En la fig.4 se presenta a través de un diagrama de bloques la estructura de cómo está formado el filtro Kalman.

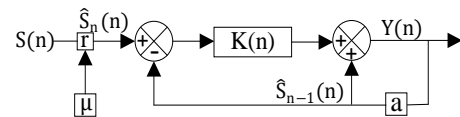


Figura 4. Diagrama de bloques Filtro Kalman.

Una vez descrito la parte matemática del filtro Kalman, en este artículo se pretende aplicar esta metodología para ubicar las diferentes fallas que pueden suscitar en el sistema de transmisión eléctrico. Como se había indicado en el apartado anterior, las señales de pre-falla y falla fueron obtenidos del simulador EMPT y posterior a ello son llevadas al software de Matlab donde se implementó dicho método.

Las señales de corriente de las fases (A- B- C) son las principales que alimentan al filtro, es decir, para el caso de estudio al filtro se ingresó una señal base y la señal con falla. De acuerdo con los parámetros establecidos, el momento que presente una diferencia entre la señal base y la con falla el filtro muestra una tercera señal, la misma que contiene la señal del error, basado en ese principio son identificadas los diferentes tipos de fallas eléctricas. Kalman.

1.8. Cálculo de distancia de la falla.

La distancia a la que se genera una falla es un factor indispensable en los sistemas de potencia, puesto que una vez conocido la distancia a la cual se genere la falla se puede movilizar al personal a verificar en caso de no reconectarse por sí sola la línea. Este factor permite minimizar tiempo y volver a reestablecer el sistema lo más pronto posible. Para ello, se aplica la metodología de la onda viajera, la cual básicamente se fundamenta en medir los tiempos de arribo de las ondas una vez que se genere una falla.

Matemáticamente se expresa a través de las siguientes ecuaciones:

$$v_{ij} = \frac{1}{(I_{scij} * C_{LTij})^{\frac{1}{2}}} \quad (31)$$

$$v_{ji} = \frac{1}{(I_{scji} * C_{LTji})^{\frac{1}{2}}} \quad (32)$$

$$T1 = \frac{I_{scij}}{v_{ij}} \quad (33)$$

$$T2 = \frac{I_{scji}}{v_{ji}} \quad (34)$$

$$d = \frac{1}{2}(T2 - T1) \left(\frac{1}{\sqrt{L_{LTij} * C_{LTij}}} \right) \quad (35)$$

Donde:

v_{ij} : velocidad del nodo i al nodo j.

I_{scij} : corriente de falla del nodo i al j.

C_{LTij} : capacitancia de la línea de transmisión del nodo i al nodo j.

L_{LTij} : inductancia de la línea de transmisión desde el nodo i al nodo j.

$T1$: tiempo del nodo i al nodo j.

$T2$: tiempo del nodo j al nodo i.

Las letras j,i hacen referencia a las medidas tomadas desde el nodo j hacia el i en este caso las capacitancias e inductancias serán las mismas tanto para los nodos i,j y j,i.

En la Fig. 5 se puede observar cómo se encuentran distribuidos en el modelo Pi de una línea de transmisión los

parámetros mencionados en las ecuaciones que forman parte de la onda viajera. Las letras i,j representan los nodos (subestaciones) a las cuales conectan la línea de transmisión.

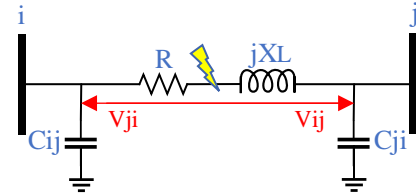


Figura 5. Modelo Pi línea de

Algoritmo 2: Ubicación y Clasificación de Fallas Eléctricas Basado en el Filtro Kalman.

Paso 1: Llamado al algoritmo de optimización de PMU

Paso 2: Obtener las señales de voltaje y corriente en pre falla y falla de las PMU.

Ifa: Corriente de falla fase A.

Ifb: Corriente de falla fase B

Ifc: Corriente de falla fase C

Paso 3: Definir parámetros requeridos por el filtro Kalman.

A, B: Matriz del modelo de estado

V: Ruido blanco

Q: Varianza del ruido

Paso 4: Predicción.

$$X = Ax + Bu + W$$

$$Y = CX + v$$

Paso 5: Implementación Filtro Kalman (actualización).

$$K = \frac{c}{cx+v}$$

$$X_{est} = AX + Bu + K(Y - CX)$$

$$y = C * X_{est} + v$$

for j=1:1:1001

Análisis fase A 12isp.12;

xa= [i; v];

[Xest, Y,y]=kalmanFun;

xa=Xest;

error=y-Y;

if error ≤ -20, error ≥ 20

a=a+1;

12isp.(‘Falla Monofásica Fase

A’)

Análisis fase A nodo j;

Xa1= [i; v];

[Xest, Y, y] =kalmanFun;

```

Xa1=Xest;
end

```

```

end

```

Paso 6: Repetir el paso 4 y 5 para las fases B y C.

Paso 7: Distancia de la falla

$$d = \frac{1}{2}(T2 - T1) \left(\frac{1}{\sqrt{L_{LTij} * C_{LTij}}} \right)$$

Paso 8: Mostrar resultados

Paso 9: Fin

La función denominada kalmanFun, es aquella que posee los parámetros del filtro Kalman, es decir, las matrices del modelo matemático de la línea de transmisión llevados a un modelo de ecuaciones de estado; ecuación (23), (24), (25). Esta función fue creada con el objetivo de minimizar líneas de código en la programación. Por otra parte, el error es calculado en función de las señales obtenidas de pre falla y post falla, es por ello por lo que estos valores se obtuvieron de un previo calculo en función de las señales antes mencionadas. En el caso de implementar en la vida real, este análisis se debería realizar para cada una de las señales que tomen las PMU. Para el actual trabajo se realizó el análisis para 1001 muestras que fueron tomadas para cada una de las fases.

4. Análisis de Resultados.

Los resultados obtenidos con el filtro de Kalman permiten visualizar e identificar cuando se produce una falla en una línea de transmisión. El algoritmo del filtro de Kalman se basa en las corrientes de cortocircuito obtenidas del sistema de potencia, específicamente de las líneas de transmisión para su posterior análisis. En la Fig.6 se muestra las señales en pre-falla y falla separadas por fase. Como se puede observar en la fase A se genera una falla monofásica a una distancia de 50 km, la cual se da a los 0.02 segundos y la misma es despejada en 1 ms después de haberse producido. Estas señales son de utilidad para aplicar en la metodología propuesta

ya lograr alcanzar el objetivo que es el de ubicar y clasificar los diferentes tipos de fallas eléctricas.

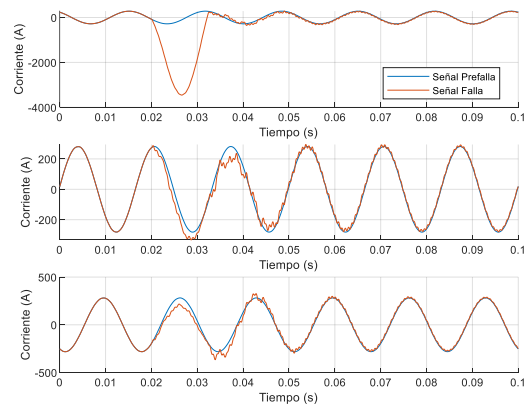


Figura 6. Falla monofásica en la fase A

En la Fig. 7 se puede evidenciar la detección de la falla con el método propuesto, las curvas de color azul y verde representan las señales de corriente obtenidas de las PMU ubicadas en los extremos de la línea de transmisión, mientras que, la curva de color amarillo representa la estimación realizada por el filtro, el momento que detecta una diferencia entre señales son ploteados los asteriscos de color rojo los cuales indican el momento exacto donde se genera la falla, de igual forma la fase en la cual surgió la misma, es decir, identifica el tipo de falla que se generó basándose en las fases que presenten una diferencia que supere al error establecido. El algoritmo está diseñado de tal forma que el momento que detecta la presencia de una falla se detiene automáticamente y muestra una alerta indicando el tipo de falla y la línea donde se generó. Posteriormente, se aplica la metodología de la onda viajera para obtener una aproximación de la distancia de falla en kilómetros (km). Los resultados se presentan en la tabla 5.

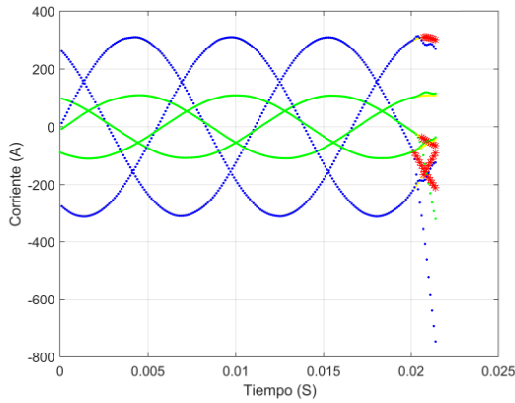


Figura 7. Detección de la falla

En la Fig.8 se simula una falla bifásica producida en las fases A-C, la misma fue generada a una distancia de 80 km, con los mismos tiempos que se simuló para la falla monofásica.

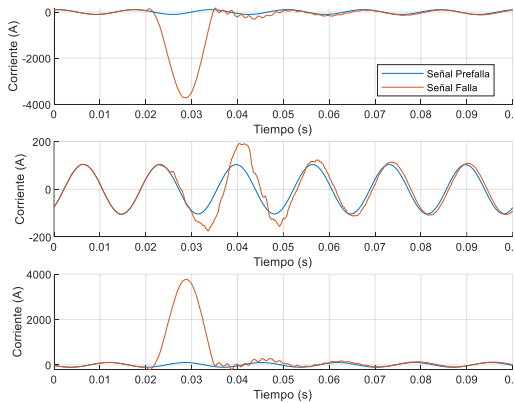


Figura 8. Falla bifásica A-C

En la Fig.9 se representa la detección de la falla bifásica en las fases A-C, donde los asteriscos de color rojo muestran el momento en el que se produce la falla.

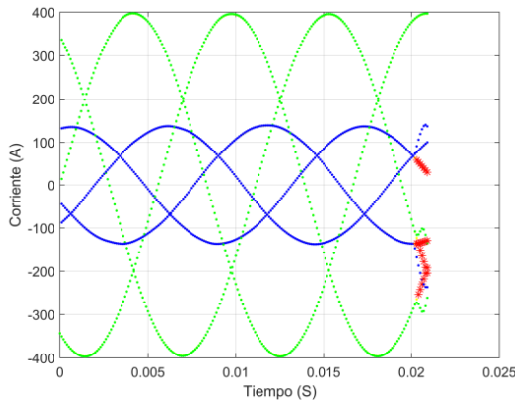


Figura 9. Detección de falla bifásica

En la Fig. 10 se realizó la simulación de una falla trifásica a una distancia de 30 km. El tiempo en el cual se dio la falla es de 0.02 segundos, y una vez transcurrido un segundo se da el despeje de esta. La resistencia de falla con la cual se simuló la falla es igual a 1Ω . Cabe recalcar que la distancia de esta línea de transmisión es igual a 100 km. Los parámetros de cada una de las líneas se especifican en la tabla 3. Los parámetros están dados en p.u con las bases especificadas en el apartado anterior.

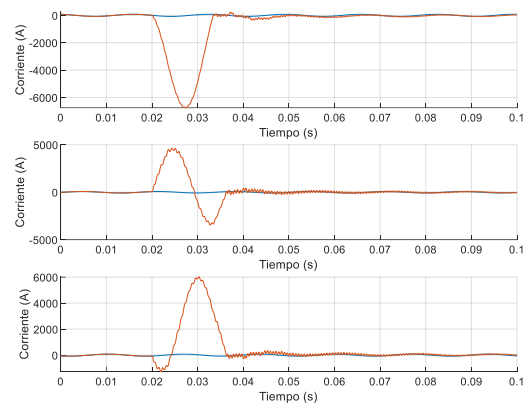


Figura 10. Falla trifásica

En la Fig.11 se presenta la ubicación de la falla trifásica la cual fue generada en la línea 3 del SEP. De igual forma los asteriscos de color rojo representan el momento en el que el algoritmo detecta la presencia de una falla.

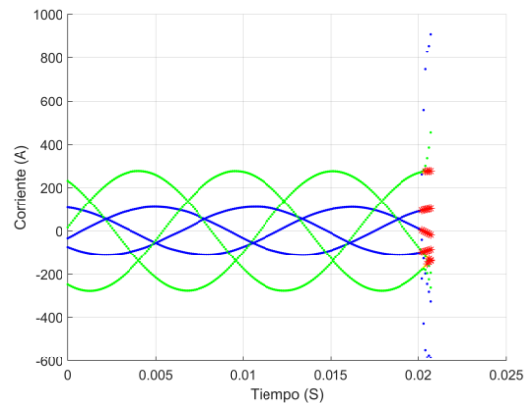


Figura 11. Ubicación falla trifásica

A continuación, en la tabla 5 se presenta los resultados de las distancias calculadas para una falla monofásica producida en la fase A. Para cada una de las fallas se generó

nueve pruebas con un intervalo de 10 km hasta alcanzar los 90 km. Sin embargo, en las mediciones inferiores a 50 km el error es mayor al 12%. La justificación se presenta en la sección de conclusiones.

Tabla 5: Cálculo de la distancia falla monofásica línea 1.

N.º Falla	Distancia Real [km]	Distancia Calculada [km]	Error Relativo [%]
5	50	43.954	12.092
6	60	57.053	4.911
7	70	68.404	2.279
8	80	78.344	2.07
9	90	87.362	2.930

En la tabla 6 se presentan los resultados de las distancias calculadas para una falla bifásica en la línea de transmisión 2, a una distancia de 80 km, sin embargo, el cálculo fue realizado cada diez kilómetros para identificar el error que presenta el cálculo realizado con el método de la onda viajera.

Tabla 6: Cálculo de la distancia falla bifásica 2

N.º Falla	Distancia Actual [km]	Distancia Real [km]	Error Relativo [%]
5	50	44.222	11.556
6	60	54.966	8.389
7	70	64.923	7.251
8	80	74.202	7.247
9	90	81.488	9.457

Para una falla bifásica el error únicamente se presenta significativamente en las medidas de 20, 30 y 40 km como se puede observar en la Fig.13.

La tabla 7 presenta las mediciones realizadas para el cálculo de la distancia de una falla trifásica en la línea 3.

Tabla 7: Cálculo de la distancia falla trifásica línea 3

N.º Falla	Distancia Actual [km]	Distancia Real [km]	Error Relativo [%]
5	50	48.391	3.218
6	60	57.184	4.693
7	70	67.38	3.742
8	80	77.058	3.667
9	90	88.174	2.028

4.1. Ventajas del Obtenidas en la Presente Investigación.

Una de las principales ventajas que se puede recalcar de este método es que, en comparación con [8], el actual método no requiere de un tratamiento de señales previo a su análisis, es decir, los datos que se obtienen en dominio del tiempo pueden ser tratados directamente con el filtro, es por ello que, el filtro empleado es de tiempo continuo. Cabe recalcar que existen varios tipos de filtros Kalman que fueron adaptados para diferentes aplicaciones, entre ellos tenemos el filtro de Kalman de tiempo discreto.

Los métodos tradicionales requieren de una alta velocidad de muestreo de señales, mientras que este método por su característica de estimador puede predecir el siguiente paso en función del modelo de la línea. Además, este método únicamente requiere de las señales en dominio del tiempo.

5. Conclusiones

La metodología planteada permitió ubicar y clasificar cada uno de los tipos de falla basándose en las señales de corriente y voltaje obtenidas del simulador EMPT. El filtro trabaja con las señales en el dominio del tiempo por lo que no requiere de otros procesos matemáticos para su operación. Sin embargo, requiere de un modelo matemático que represente el comportamiento de la línea de transmisión, puesto que basado en el modelo realiza el proceso de estimación. El modelo matemático de la línea de transmisión fue desarrollado en función de los parámetros de inductancia, resistencia y capacitancia de esta.

Para el sistema IEEE de 9 barras se obtuvo que, ubicando las PMU en las barras 4, 7 y 9 es posible obtener una visibilidad completa de todos los parámetros eléctricos que son objeto de estudio del SEP.

Respecto a la medición del punto de falla se presentó cierto inconveniente con las medidas inferiores a los 50 km, las mismas presentan un error muy elevado,

de acuerdo con estudios anteriores aplicando esta metodología, cuando se produce una falla cerca a la barra la distancia varia como consecuencia de la impedancia de falla, una posible alternativa podría ser considerar las mediciones desde el otro extremo de la línea y así obtener un resultado próximo al real. Mientras que, las distancias superiores a los 50 km presentan un error igual a 3.18 km para el caso de la falla monofásica, y para la falla bifásica es de 14.06 km. Es por ello por lo que se

7. Referencias

- [1] S. Edition, *Electric Energy Systems, Second Edition*. 2018.
- [2] M. A. Jarrahi, H. Samet, and T. Ghanbari, "Fast Current-Only Based Fault Detection Method in Transmission Line," *IEEE Syst. J.*, vol. 13, no. 2, pp. 1725–1736, 2019.
- [3] S. Bhattacharya, "Fault detection on a ring-main type power system network using artificial neural network and wavelet entropy method," pp. 1032–1037, 2015.
- [4] R. Fan, Y. Liu, R. Huang, R. Diao, and S. Wang, "Precise Fault Location on Transmission Lines Using Ensemble Kalman Filter," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 33, no. 6, pp. 3252–3255, 2018.
- [5] P. System, R. Committee, I. Power, and E. Society, *IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines*, vol. 2014, no. June. 2014.
- [6] G. B. Zou and H. L. Gao, "Extra high speed hybrid protection scheme for high voltage transmission line," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 63, pp. 83–90, Dec. 2014.
- [7] L. Jing, W. Wang, Z. Li, and R.

consideró para el análisis únicamente las medidas que se presentan en las tablas; 4, 5 y 6.

6. Trabajos futuros

Generar un modelo que permita ubicar fallas eléctricas en sistemas de transmisión de doble circuito o más.

Analizar fallas eléctricas en sistemas desbalanceados.

Analizar la eficacia utilizando un filtro de Kalman de tiempo discreto.

- D. Murch, "Detecting Impedance and Shunt Conductance Faults in Lossy Transmission Lines," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 66, no. 7, pp. 3678–3689, 2018.
- [8] R. Godse and S. Bhat, "Mathematical Morphology-Based Feature-Extraction Technique for Detection and Classification of Faults on Power Transmission Line," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 38459–38471, 2020.
- [9] A. Saber, A. Emam, and H. Elghazaly, "A backup protection technique for three-terminal multisection compound transmission lines," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 6, pp. 5653–5663, 2018.
- [10] M. H. H. Musa, L. Fu, Z. He, Y. Deng, and L. Kai, "Variance index based method for fault detection and classification in power transmission linea," *2017 Asian Conf. Energy, Power Transp. Electrification ACEPT 2017*, vol. 2017-Decem, pp. 1–7, 2017.
- [11] M. Gil, A. A. Abdoos, and M. Sanaye-Pasand, "A precise analytical method for fault location in double-circuit transmission lines," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 126, no. PA, p. 106568, 2021.

- [12] P. R. Chegireddy and R. Bhimasingu, "Synchrophasor based fault location algorithm for three terminal homogeneous transmission lines," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 191, no. May 2020, p. 106889, 2021.
- [13] D. Carrión, J. W. González, I. A. Isaac, and G. J. López, "Optimal Fault Location in Transmission Lines Using Hybrid Method," in *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference*, 2017, p. 6.
- [14] IEEE, *IEEE Standard for Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations*, vol. 2008, no. October. 2008.
- [15] H. A. Abd el-Ghany, "Optimal PMU allocation for high-sensitivity wide-area backup protection scheme of transmission lines," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 187, no. June, p. 106485, 2020.
- [16] E. Inga, D. Carrión, A. Aguila, E. García, R. Hincapié, and J. W. González, "Minimal Deployment and Routing Geographic of PMUs on Electrical Power System based on MST Algorithm," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 5, pp. 2264–2270, 2016.
- [17] A. Sánchez and D. Carrión, "Modeling of the Behavior Power Flow on Transmission Lines Based on Voltage and Current Synchronopasors," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 4, pp. 1142–1149, 2017.
- [18] D. Carrión, J. W. Gonzalez, I. A. Isaac, G. J. Lopez, and H. A. Cardona, "Load Characterization Based on Voltage and Current Phasorial Measurements in Micro-Grids," *2017 Int. Conf. Inf. Syst. Comput. Sci.*, pp. 1–6, 2017.
- [19] D. Carrion and J. W. Gonzalez, "Optimal PMU Location in Electrical Power Systems Under N-1 Contingency," in *2018 International Conference on Information Systems and Computer Science (INCISCOS)*, 2018, no. 1, pp. 165–170.
- [20] D. Carrión and J. W. González, "Ubicación óptima de PMU considerando restricciones de contingencias N-1 en sistemas eléctricos de potencia," *Enfoque UTE*, vol. 10, no. 1, pp. 1–12, 2019.
- [21] E. Inga, D. Carrion, A. Aguila, E. García, R. Hincapie, and J. W. González, "Minimal Deployment and Routing Geographic of PMUs on Electrical Power System based on MST Algorithm," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 5, pp. 2264–2270, 2016.
- [22] M. Meenakshi Devi and M. Geethanjali, "Hybrid of Genetic Algorithm and Minimum Spanning Tree method for optimal PMU placements," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 154, p. 107476, 2020.
- [23] T. Chen, Y. Cao, X. Chen, L. Sun, J. Zhang, and G. A. J. Amaratunga, "Optimal PMU placement approach for power systems considering non-Gaussian measurement noise statistics," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 126, no. PA, p. 106577, 2021.
- [24] M. Ghamsari-Yazdel, H. reza Najafi, and N. Amjady, "Novel notions of zero injection property of buses in optimal PMU location with efficient observability enhancement focusing on security concepts," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 169, no. April 2018, pp. 24–34, 2019.

- [25] X. D. Wang, X. Gao, Y. M. Liu, and Y. W. Wang, "WRC-SDT Based On-Line Detection Method for Offshore Wind Farm Transmission Line," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 53547–53560, 2020.
- [26] D. Carrión, J. W. González, G. J. López, and I. A. Isaac, "Alternative fault detection method in electrical power systems based on ARMA model," *2019 FISE-IEEE/CIGRE Conf. - Living Energy Transition, FISE/CIGRE 2019*, 2019.
- [27] A. Aguila, D. Carrión, and L. Ortiz, "Analysis of power losses in the asymmetric construction of electric distribution systems," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 7, pp. 2190–2194, 2015.
- [28] D. P. Mishra and P. Ray, "Fault detection, location and classification of a transmission line," *Neural Comput. Appl.*, vol. 30, no. 5, pp. 1377–1424, 2018.
- [29] K. Chen, J. Hu, and J. He, "Detection and Classification of Transmission Line Faults Based on Unsupervised Feature Learning and Convolutional Sparse Autoencoder," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 1748–1758, 2018.
- [30] A. Abdullah, "Ultrafast Transmission Line Fault Detection Using a DWT-Based ANN," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 2, pp. 1182–1193, 2018.
- [31] S. Member, "Li Zewen Hua Huanhuan Zeng Xiangjun YuKun," pp. 12–17, 2013.
- [32] O. D. Naidu and A. K. Pradhan, "Model Free Traveling Wave Based Fault Location Method for Series Compensated Transmission Line," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 193128–193137, 2020.
- [33] K. Yu *et al.*, "A novel traveling wave fault location method for transmission network based on time linear dependence," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 126, no. PA, p. 106608, 2021.
- [34] B. Kong, X. Liu, B. Pu, J. Feng, Z. Ying, and S. Liu, "Modeling and Simulation of Fault Location with Traveling Wave for 35kV Distribution Networks," *2019 3rd IEEE Conf. Energy Internet Energy Syst. Integr. Ubiquitous Energy Netw. Connect. Everything, EI2 2019*, pp. 2617–2620, 2019.
- [35] L. Cruz, D. Carrión, and A. Riofrío, "Localización de fallas mediante la transformada de wavelet en líneas de transmisión," *Rev. Técnica "Energía"*, vol. 13, no. 1, p. 11, 2017.
- [36] S. Lan, M. J. Chen, and D. Y. Chen, "A Novel HVDC Double-Terminal Non-Synchronous Fault Location Method Based on Convolutional Neural Network," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 34, no. 3, pp. 848–857, 2019.
- [37] S. Biswal, M. Biswal, and O. P. Malik, "Hilbert Huang transform based online differential relay algorithm for a shunt-compensated transmission line," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 33, no. 6, pp. 2803–2811, 2018.
- [38] K. Ramar, H. S. Low, and E. E. Ngu, "One-end impedance based fault location in double-circuit transmission lines with different configurations," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 64, pp. 1159–1165, 2015.
- [39] R. Huang *et al.*, "Calibrating Parameters of Power System Stability Models Using

- Advanced Ensemble Kalman Filter,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 3, pp. 2895–2905, 2018.
- [40] Y. Cui, Y. Xi, and X. Zhang, “Detection of harmonic based on residual analysis using adaptive Kalman filter,” *Dianli Xitong Baohu yu Kongzhi/Power Syst. Prot. Control*, vol. 47, no. 24, pp. 92–100, 2019.
- [41] R. Faragher, “Understanding the basis of the kalman filter via a simple and intuitive derivation [lecture notes],” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 29, no. 5, pp. 128–132, 2012.

8. Matriz de Estado de Arte

Tabla 8: Matriz del estado del arte.

ITEM	DATOS			TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA			
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	DETECCIÓN DE FALLAS	FALLAS EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN	LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	PROTECCIONES ELÉCTRICAS	TÉCNICAS DE UBICACIÓN DE FALLAS	UBICACIÓN ÓPTIMA PMU's	ADQUISICIÓN DE DATOS	OPTIMIZACIÓN DE PMU's	UBICACIÓN ÓPTIMA DE FALLAS	CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA	CALIDAD DE DATOS	CALIBRACIÓN DEL FILTRO	OBSERVABILIDAD	FILTRO KALMAN	FLUJO ÓPTIMO DE POTENCIA	SIMULACIÓN DE FALLAS ELÉCTRICAS	UBICACIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FALLAS	ANÁLISIS DE RESULTADOS CON OTROS MÉTODOS	VALIDACIÓN DE RESULTADOS
1	2019	Fast current only based fault detection method in transmission line	24		☒									☒						☒		
2	2015	Fault detection on a ring- main type power system network using artificial neuronal and wavelet entropy method	13	☒					☒													
3	2018	Precise fault location on transmission lines using ensemble Kalman Filter	24	☒	☒				☒								☒					
4	2014	Guide for determining fault location on AC transmission and distribution lines.	2		☒																	
5	2014	Extra high speed hybrid protection scheme for high voltage transmission lines.	8				☒															
6	2008	Standard for electrical power system device function numbers, acronyms, and contact designations.	6				☒															
7	2017	Variance index-based method for fault detection and classification in power transmission line.	0	☒	☒						☒			☒						☒		
8	2016	Minimal deployment and routing geographic of PMUs on electrical power system based on MST Algorithm.	37					☒	☒	☒				☒		☒						
9	2018	Optimal PMU location in electrical power systems under N-1 contingency.	17					☒		☒						☒						
10	2017	Optimal fault location in transmission lines using hybrid method.	28	☒	☒	☒					☒											
11	2021	Synchrophasor based fault location algorithm for three terminal homogeneous transmission lines.	0	☒	☒	☒					☒											
12	2018	A backup protection technique for three-terminal multisection compound transmission lines.	23				☒										☒					
13	2020	Mathematical Morphology - Based Feature - Extraction Technique for detection and classification of faults on power transmission line.	19		☒						☒											

8.1. Resumen de Indicadores

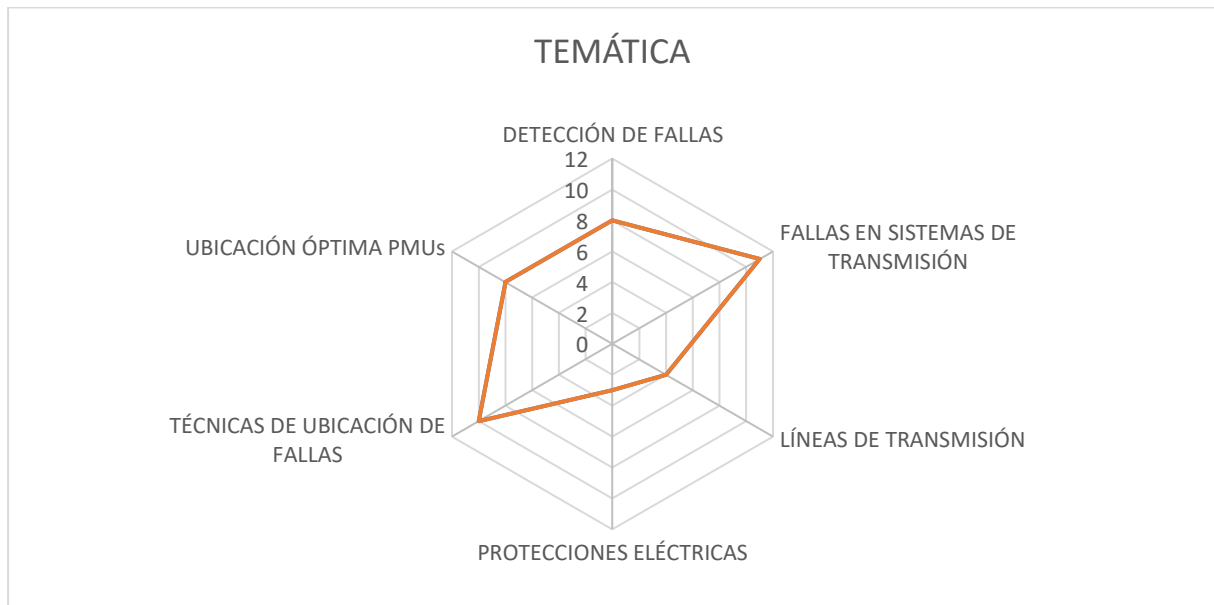


Figura 12. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

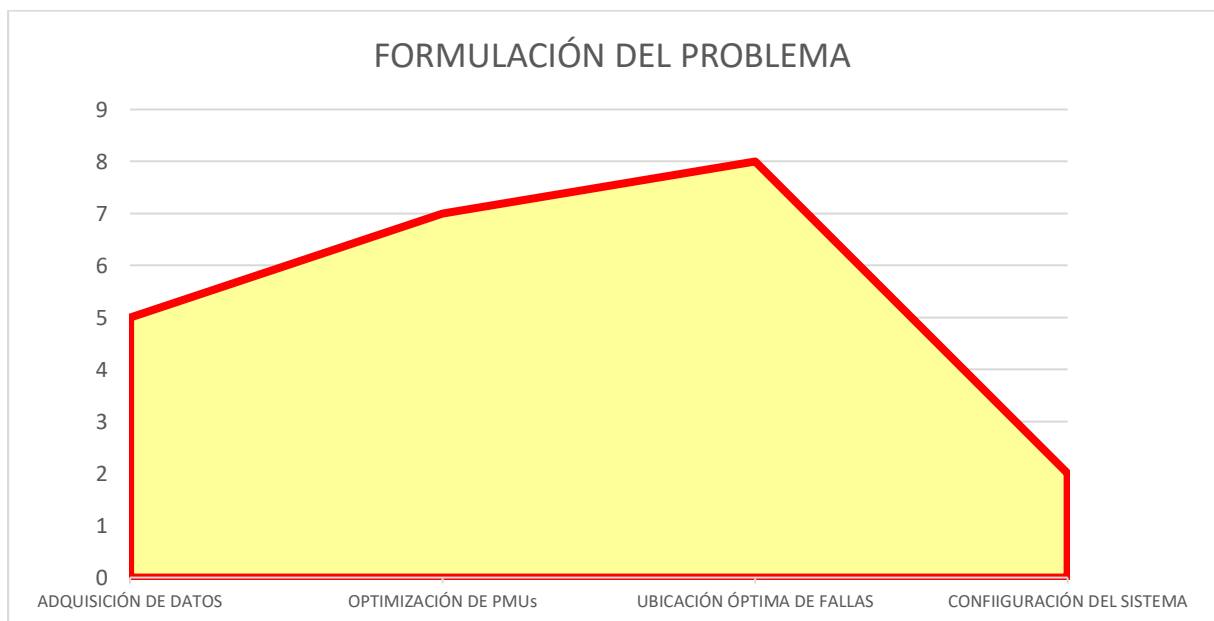


Figura 13. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

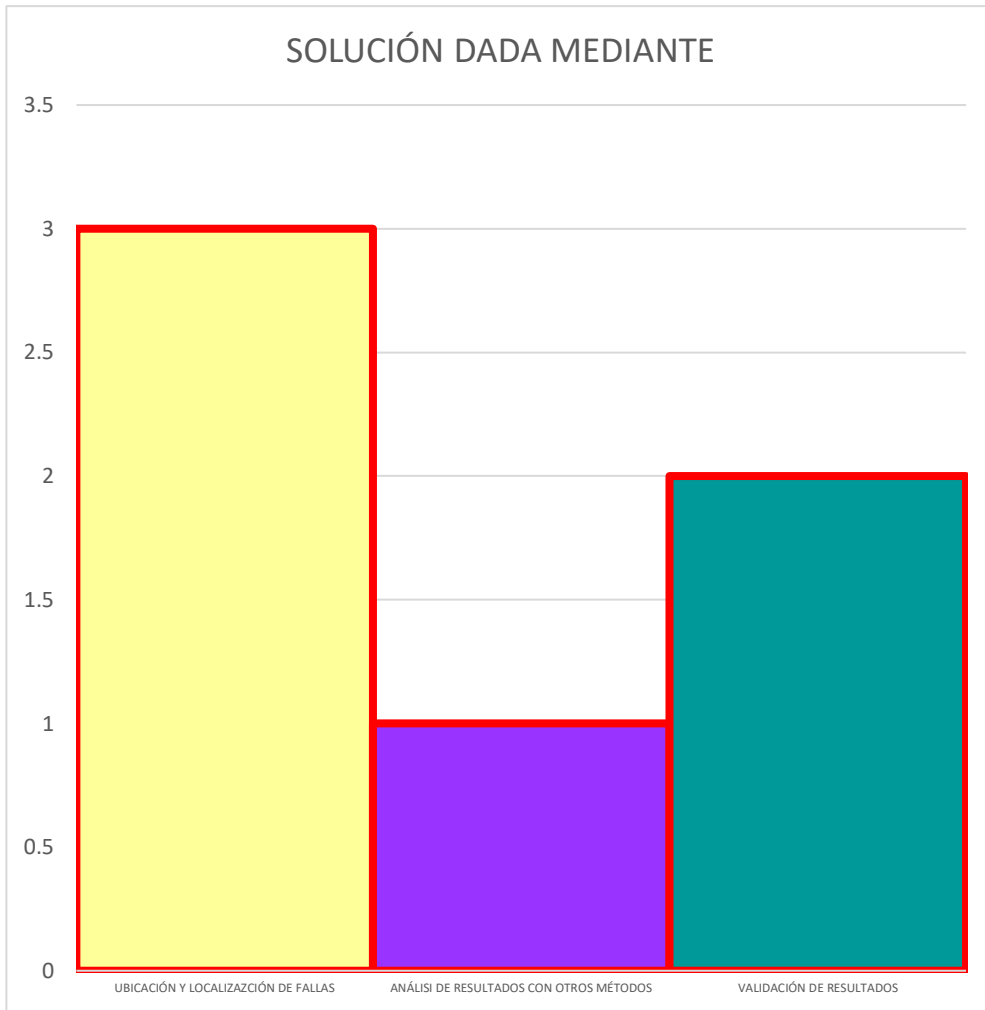


Figura 14. Indicador de solución - Estado del arte