

**LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA USANDO
MÁQUINAS DE SOPORTE VECTORIAL**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

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

**TEMA:
LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA USANDO
MÁQUINAS DE SOPORTE VECTORIAL**

**AUTOR:
Joselyn Yajaira Pareja Espinoza**

**TUTOR:
Ramón Enrique Pérez Pineda**

Quito, Enero 2017

Joselyn Yajaira Pareja Espinoza

LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA USANDO MÁQUINAS DE SOPORTE VECTORIAL

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2017

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto



Joselyn Yajaira Pareja Espinoza (Y'1992-M'9). Realizo sus estudios secundarios en la Unidad Educativa Particular Mixta “Manuel Encalada- Julio Matovelle” de la ciudad de Machala. Egresada de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en técnicas de modelamiento y simulación matemática orientada a la Localización de Fallas en los Sistemas Eléctricos de Distribución.

jpareja@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Ramón Enrique Pérez Pineda (Y'1981-M'11). Se graduó de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Politécnica Antonio José de Sucre en Venezuela. Msc. Scientiarum en Ingeniería Eléctrica, actualmente está trabajando para lograr su título de Doctor en Ciencias de la Ingeniería. Es docente de la Universidad Politécnica Salesiana, miembro del grupo de investigación GIREI con énfasis en la inteligencia artificial aplicada a sistemas eléctricos y redes inteligentes.

rperezp@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

©2017 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO-ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Ramón Enrique Pérez Pineda declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación (*LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA USANDO MÁQUINAS DE SOPORTE VECTORIAL*) realizado por (Joselyn Yajaira Pareja Espinoza), obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Enero 2017



.....
Ramón Enrique Pérez Pineda

Cédula de identidad: 0959948290

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Joselyn Yajaira Pareja Espinoza, con documento de identificación N° 0706246808, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: “Localización de Fallas en Sistemas Eléctricos de Distribución con Generación Distribuida usando Maquinas de Soporte Vectorial ”, 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 impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma



.....

Nombre: Joselyn Yajaira Pareja Espinoza

Cédula: 0706246808

Fecha: Quito, Enero 2017

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios por permitirme vivir esta experiencia de llegar a ser profesional en esta carrera y por permitirme cumplir un sueño más, a mi mamá Martha Espinoza por pagar mis estudios y por todo el apoyo incondicional que me ha brindado a lo largo de mi vida, a mi papá Rolando Pareja por ayudarme en mi manutención y por estar siempre conmigo, ambos a pesar de la distancia y a mi hermano Marvin por todo su amor y confianza, a mis abuelitos por acogerme en su hogar y en especial a ti abuelita Gloria Achig ahora estas en el cielo pero gracias a ti tome la decisión de estudiar aquí.

Agradezco a mi tutor el Msc. Ramón Pérez Pineda por toda la ayuda que me supo brindar en el desarrollo de mi artículo, por su paciencia, por sus conocimientos compartidos y por su tiempo invertido.

INDICE GENERAL

1. Introducción.....	2
2. Desarrollo	4
2.1 Sistema de Distribución	4
2.2 La Generación Distribuida	5
2.3 Máquinas de Soporte Vectorial (SVM).....	5
3. Metodología.....	7
4. Resultados Obtenidos	9
5. Conclusiones	10
6. Referencias	10
7. Estado del Arte	14

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ilustración de la GD en el sistema de distribución	3
Figura 2. Sistema de Distribución en forma radial	4
Figura 3. Plano de Separación Óptimo	6
Figura 4. Circuito de 34 barras de la IEEE zonificado	7
Figura 5. Ejemplo de una matriz de confusión	9
Figura 6. Líneas de tendencia-precisión de las fallas monofásicas a tierra	9
Figura 7. Líneas de tendencia-precisión de las fallas bifásicas.....	9
Figura 8. Líneas de tendencia-precisión de las fallas bifásicas a tierra	9
Figura 9. Líneas de tendencia-precisión de la falla trifásica y trifásica a Tierra	9

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de Kernel.....	6
Tabla 2. Zonas y nodos del circuito	7
Tabla 3. Valores de impedancia	8
Tabla 4. Escenarios para la simulación del algoritmo.....	8
Tabla 5. Pseudocódigo para ejecutar las SVM.....	8
Tabla 6. Resultados finales	10
Tabla 7. Matriz de confusión de la falla A-B-Tierra.....	10
Tabla 8. Matriz del Estado del Arte	14
Tabla 9. Resumen e Indicadores del Estado del Arte.....	16

LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA USANDO MÁQUINAS DE SOPORTE VECTORIAL

Resumen.

En el presente documento se propone el uso de las Máquinas de Soporte Vectorial (SVM) como una herramienta que permita localizar el tipo de falla que se puede presentar en el sistema de distribución eléctrica, con la presencia de Generación Distribuida (GD). Este enfoque se basa en la medición de los voltajes RMS tanto en la subestación como en los puntos donde se conectan los generadores distribuidos y serán utilizados como descriptores para las SVM, para ilustrar la metodología propuesta se consideró el circuito de 34 barras de la IEEE en el cual se conectan dos generadores en el que se ira variando la penetración de energía a través de la impedancia de corto circuito, se simulan todos los tipos de fallas y la base de datos se construye mediante el software ATPDraw. Los resultados muestran un rango de precisión del 70% al 100% en localizar las fallas demostrando que los generadores distribuidos aumentan la precisión de las máquinas de soporte vectorial.

Palabras Clave: Generación Distribuida, Fallas, Máquinas de Soporte Vectorial, Matriz de Confusión, Sistema de Distribución.

Abstract.

This paper proposes the Support Vector Machines (SVM) use as tool that allows us to locate the type of fault that can occur in the electrical distribution system, with the presence of Distributed Generation (GD). This approach is based on the measurement of the RMS voltages in both the substation and at the points where the distributed generators are connected and will be used as descriptors for the SVM, to illustrate the proposed methodology was considered the IEEE 34-bar circuit in which two generators are connected in which the energy penetration will be varied through the short-circuit impedance all types of faults were simulated and the database was constructed using the ATPDraw software. The results show a range of accuracy from 70% to 100% in locating faults, showing that distributed generators increase the accuracy of the vector support machines.

Keywords: Distributed generation, failures, Support Vector Machines, confusion matrix, distribution system.

1. Introducción

En los últimos años con el progresivo aumento de la demanda de energía, una tarea primordial para los ingenieros eléctricos es generar electricidad a partir de una energía más limpia como las renovables. Los sistemas de distribución que son parte del sistema eléctrico de potencia tienen muchos aspectos que deben considerarse como la calidad de la energía, la continuidad del servicio, aspectos económicos, entre otros. Se espera que el sistema que abastece la energía a los consumidores sea lo más confiablemente posible y a su vez represente un ahorro económico, si queremos que en la realidad la fuente de alimentación sea el 100% fiable no sería físicamente posible debido a las fallas que generalmente están fuera del control de los ingenieros[1]. El concepto de fiabilidad del sistema de potencia cubre todos los aspectos de la capacidad del sistema para satisfacer los requisitos de los consumidores, estos estudios se llevan a cabo en varias zonas funcionales del sistema de distribución que une las fuentes de energía a las instalaciones de los clientes[2]. La confiabilidad del servicio en los sistemas de distribución ante cualquier falla depende de la capacidad de aislamiento, la reparación y restauración del servicio eléctrico ya que existen diferentes tipos de fallas que pueden darse a causa de animales, por fuerza de la naturaleza, mecánicas, etc., las cuales pueden presentarse de manera imprevista. En la mayoría de los casos las fallas eléctricas se presentan como daños mecánicos que deben ser reparados para poder restaurar el servicio[3]. La restauración del servicio se realizaría con mayor velocidad si se determina la ubicación exacta de la falla, entre estas se encuentran las permanentes y las transitorias. En las fallas permanentes el sistema de protección realiza la desconexión de

falla y su reparación es llevada a cabo por el personal de la empresa del servicio eléctrico, en cambio las fallas transitorias son despejadas automáticamente por el sistema de protección sin ocasionar una interrupción prolongada del suministro de energía eléctrica; este tipo de fallas no se pueden localizar con una simple inspección. Todos estos cortes en el suministro debido a las fallas causan daños importantes en los equipos, pérdida de información, y por ende pérdidas económicas[4].

Los sistemas tradicionales son redes radiales con una fuente única de energía y con una gran cantidad de seccionadores, cuando la falla sucede se necesita llevar a cabo la localización, el aislamiento y la restauración de la fuente de alimentación, que por lo general el sistema de automatización de la red de distribución lo realiza, sin embargo, las funciones actuales del sistema de automatización no se están cumpliendo para la parametrización compleja y coordinación; lo cual a su vez está tomando mucho tiempo para llevar a cabo la detección y aislamiento de la falla, y eso hace que la confiabilidad del sistema se reduzca[5][6]. A lo largo del tiempo muchos autores han investigado el tema de localización de fallas dejando así un sinnúmero de métodos y algoritmos matemáticos para solucionar el problema, por mencionar algunos en [7] proponen una metodología basándose en la estimación de la corriente de falla por medio de mediciones de voltajes y corrientes medidos en la subestación y en los GD, asumiendo que la falla pueda presentarse en cualquier nodo, el uso de los valores estimados de voltaje y corriente en la subestación y en los GD representan una gran ventaja en la ubicación de la falla, ya que esto evita conocer el estado de los sistemas antes de la falla.

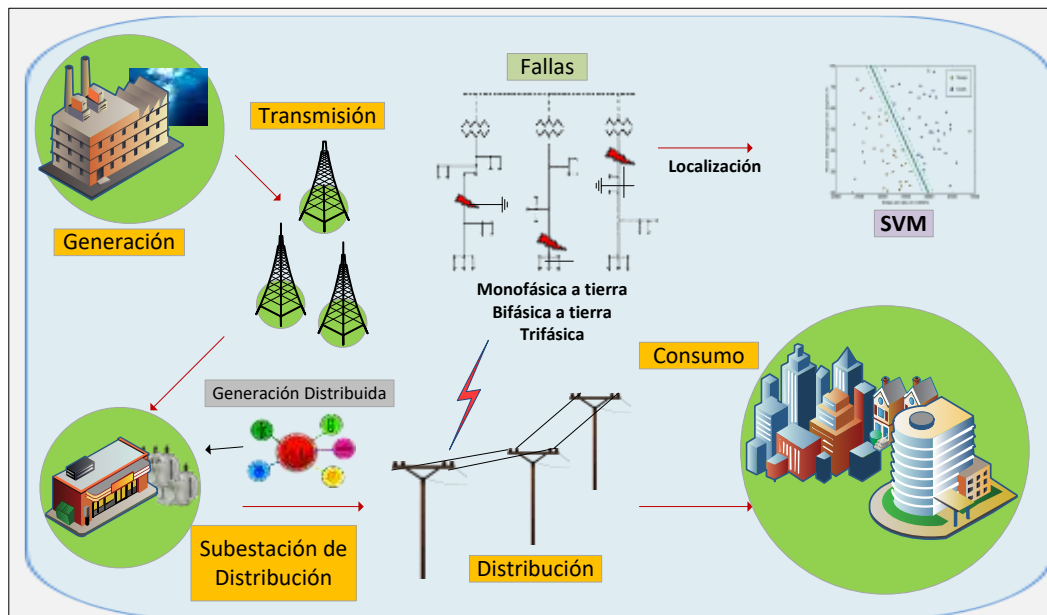


Figura 1. Ilustración de la GD en el sistema de distribución

En [8] se describe un método general para localizar fallas en sistemas de distribución eléctrica desbalanceados con múltiples fuentes, el cual utiliza mediciones sincronizadas de voltaje y corriente en la interconexión del GD y es capaz de adaptarse a los cambios en la topología del sistema.

En [9] se presenta un algoritmo para localizar fallas basado en la secuencia positiva de la impedancia aparente el cual divide al sistema en dos partes antes del GD y después del GD, si la ubicación de la falla se presenta después del GD el circuito equivalente Thevenin es simplemente paralelo a todas las cargas mezcladas con la impedancia de línea, si la falla se presenta antes del GD el circuito Thevenin tendrá una fuente de voltaje y la corriente se calculara con el voltaje de falla.

La generación distribuida es un tema que se está volviendo importante y de gran uso en los sistemas de distribución, en la figura 1 se puede observar el sistema eléctrico de potencia con la presencia de GD en el sistema de distribución, la cual se basa en energía primaria convencionales y no convencionales, un estudio realizado por el Instituto de Investigación de Energía Eléctrica

(EPRI) indico que para el año 2010, se distribuirá el 25% de la nueva generación[10]. El diseño óptimo del sistema de generación distribuida con energías renovables significa que de acuerdo con los recursos y las características de las cargas, el tipo y la capacidad de los equipos están diseñados razonablemente en el caso de asegurar la fiabilidad de la fuente de alimentación, el índice económico del sistema de generación se convierte en un valor optimo, de tal forma se aumente la eficiencia de la energía renovable y se reduzca de forma considerable las dificultades en el control y el costo del sistema, el diseño óptimo del sistema puede lograr grandes beneficios económicos[11].

La introducción de las fuentes de generación, puede afectar de forma significativa el flujo de energía o voltaje en los clientes, estos impactos pueden presentarse de manera positiva o negativa, y depende de las características de funcionamiento del sistema de distribución y de la generación distribuida[12][13]. Algunos algoritmos de optimización y de inteligencia artificial se han presentado recientemente como la lógica difusa, las

redes Petri, algoritmos genéticos, por mencionar algunos, los cuales han sido utilizados para resolver problemas asociados con la localización de fallas debido a su fácil aplicación y a su alta velocidad para encontrar soluciones [14][15]. En este documento se presenta el uso de las SVM como una herramienta inteligente que permita localizar el punto de ocurrencia de la falla que se puede presentar en el sistema de distribución, se realiza la simulación de fallas en el sistema de 34 nodos de la IEEE implementado en el software ATPDraw y el manejo de los datos se analizan por un algoritmo propuesto en MATLAB®. Las SVM están recibiendo cada vez más atención en las áreas de aplicación de la ingeniería debido a sus muchas características para la resolución de los diferentes problemas en que se aplique, como el reconocimiento de patrones, dígitos u objetos; detección de rostros en las imágenes, etc.[16].

Este documento está dividido en cinco secciones en la primera se muestra una introducción acerca del tema, la segunda sección presenta una definición acerca de los diferentes temas que se presenta, en la sección tres se muestra la metodología para resolver el problema, en la sección cuatro se muestran los resultados obtenidos y por último en la sección cinco se presentan las conclusiones.

2. Desarrollo

2.1 Sistema de Distribución

Las redes de distribución de un sistema de energía eléctrica están vinculadas a las instalaciones de los clientes, ya que si se produce un corte de energía en un circuito de distribución, se interrumpe el suministro a los clientes[17]. El suministro de energía a los clientes debe ser continuo con un valor de voltaje adecuado el cual permita que sus equipos eléctricos operen con eficiencia. A comparación de todos los sistemas que

conforman un SEP (Sistema Eléctrico de Potencia).

En los sistemas de distribución es donde se generan la mayoría de interrupciones debido a las fallas lo cual representan un 80 y 95 por ciento, y solamente un 10% es generado por fallas en la transmisión y generación eléctrica[18][19].

El sistema de distribución típico incluye subtransmisión, circuitos secundarios, transformadores, servicios a los clientes, subestaciones y alimentadores como se observa en la figura 2.

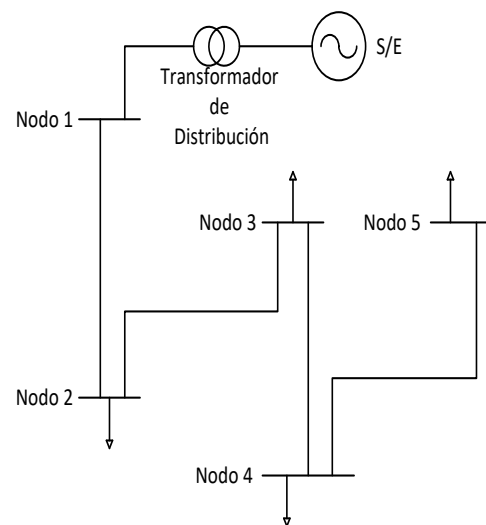


Figura 2. Sistema de Distribución en forma radial

Las líneas de distribución suelen ser operadas en modo radial, este sistema cuenta con una trayectoria entre la alimentación y la carga lo cual proporciona el servicio eléctrico, tiene un simple camino sin regreso sobre el cual pasa la corriente.

Se debe tener en consideración algunos aspectos que son muy importantes para los métodos de localización de fallas que se relacionan directamente con las características de los sistemas de distribución por ejemplo: la heterogeneidad de los alimentadores dados por los diferentes tamaños y longitud de los cables, la presencia de líneas aéreas y subterráneas, por líneas no transpuestas y presencia de cargas monofásicas, bifásicas y trifásicas; presencia de laterales a lo largo del

alimentador principal; y presencia de taps a lo largo de alimentadores principales y laterales[2][20].

En los sistemas de distribución se pueden presentar los siguientes tipos de fallas; las simétricas las cuales involucran las tres fases (trifásica y trifásica-tierra) llevan al sistema a trabajar con altas corrientes pero el sistema permanece balanceado, y las asimétricas (Monofásica a tierra, bifásica a tierra y bifásica) estas fallas presentan desbalances en los voltajes y corrientes del sistema y pueden causar graves daños en los elementos del mismo[21][22].

Las fallas tipo serie son asociadas generalmente a la ruptura de los conductores, los cuales no involucran a ningún contacto físico con alguna fase o tierra[23][24]. En este documento se utiliza únicamente las fallas en paralelo simétricas y asimétricas.

2.2 La Generación Distribuida

Otro importante concepto es la GD, conocida también por varios nombres como generación dispersa, distribuida o redistribuida y como generación descentralizada. Cualquier generación distribuida produce energía eléctrica a partir de muchas fuentes de energías pequeñas, en la mayoría de los países se genera electricidad en grandes instalaciones centralizadas como las que dependen de los combustibles fósiles, centrales hidroeléctricas, la energía nuclear, etc.[25].

La Generación Distribuida puede ser generada a través de grupos electrógenos o energías renovables, que a su vez puede alimentar la red en medio y bajo voltaje dependiendo del tipo y tamaño de la fuente que se utiliza. Se considera que las fuentes de GD de medio voltaje son de hasta aproximadamente de 25MW y las redes de bajo voltaje son equipos de funcionamiento permanente desde 30kW hasta estimativamente 250kW, la Conferencia Internacional de grandes

Sistemas Eléctricos de Alto Voltaje (CIGRÉ) definen a los generadores distribuidos como generadores menores de 50-100 MW[26]. Se obtiene muchos beneficios con la aplicación de este tipo de generación tales como: reducir el flujo de potencia a través de las redes de transmisión y distribución, la reducción de pérdidas en la distribución, y mejora la calidad de servicio eléctrico y la confiabilidad del sistema de distribución[11].

En los últimos años el uso de la generación distribuida se ha elevado, ya que su implementación en los sistemas de distribución ha resultado muy beneficiosa para el SEP y para los usuarios, y a su vez son una alternativa para contrarrestar los efectos operacionales que se presentan por el incremento en la demanda[27].

2.3 Máquinas de Soporte Vectorial (SVM)

Las SVM es un algoritmo de aprendizaje propuesto por Vapnik en el año 90, este algoritmo obtiene la minimización del riesgo real mediante la búsqueda de la minimización del riesgo estructural. Las SVM integra la óptima separación del hiperplano con el método del kernel[28]. Es una técnica útil para la clasificación de datos y se considera un algoritmo más fácil que usar que las redes neuronales[29], ya que es un método basado en el conocimiento del sistema el cual se ha utilizado para la solución de problemas de clasificación, para el caso de las fallas utilizan características significativas de los sistemas de distribución y son aplicables debido al gran tamaño de la información que necesita para su análisis[30].

La idea básica detrás de las SVM es mapear los puntos de datos en el espacio de entrada original a la función de mayor espacio de características dimensionales, donde la clasificación de puntos de datos se hace más simple.

El hiperplano óptimo se determina en el espacio mediante la explotación de la teoría de optimización, estos hiperplanos son utilizados para definir una frontera de decisión que separa los puntos de datos de diferentes clases como se muestra en la figura 3[31].

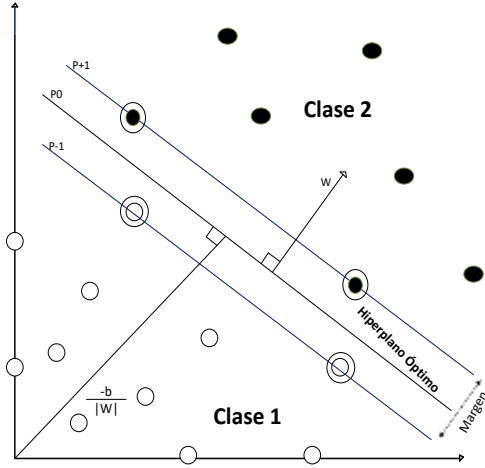


Figura 3. Plano de Separación Óptimo

$$g(x) = w * x + b = 0 \quad (1)$$

$$p_{+1} = w * x + b = +1 \quad (2)$$

$$p_{-1} = w * x + b = -1 \quad (3)$$

La expresión del hiperplano óptimo se muestra en (1) y los separadores del hiperplano se muestra en (2) y (3)[32]. La clasificación de las SVM por lo general implica la separación de datos en formación y las pruebas en conjuntos. Cada instancia en el conjunto contiene un valor objetivo, es decir las etiquetas de la clase y varios atributos que son las características o variables observadas. El objetivo de las SVM es realizar un modelo basado en los datos de entrenamiento que predice los valores objetivos de los datos de prueba dando solamente los atributos de los datos de prueba[33]. Se tiene un conjunto de entrenamiento de pares de etiquetas de instancia $(x_i, y_i), i = 1, \dots, l$, donde $x_i \in R^n$ y $y \in \{1, -1\}^l$, las máquinas de soporte vectorial requieren la solución del siguiente problema de optimización las

cuales se representan en las ecuaciones (4) y (5).

$$\min_{w,b,\xi} \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^M \xi_i \quad (4)$$

Sujeto a:

$$y_i(w^T \phi(x_i) + b) \geq 1 - \xi_i, \quad (5)$$

$$\xi_i \geq 0.$$

Donde W es un vector de entrenamiento de n dimensiones y b es un escalar. El vector W y el escalar b determina la posición de la separación del hiperplano, ξ_i es la distancia media entre el margen y el vector x_i [31].

El vector de entrenamiento x_i es mapeado en un espacio de dimensiones superiores por la función ϕ . Las máquinas de soporte vectorial encuentran un hiperplano de separación lineal con el margen máximo en este espacio dimensional superior[34].

Además, $K(x_i, x_j) \equiv \phi(x_i)^T \phi(x_j)$ es llamado la función kernel. Existen algunos tipos de kernel propuestos por diferentes investigadores, pero los más utilizados se muestran en la tabla 1[32].

Tabla 1. Tipos de Kernel

Kernel	Función
Lineal	$K(x_i, x_j) = x_i^T x_j$
Polinómico	$K(x_i, x_j) = (\gamma x_i^T x_j + r)^d,$ $\gamma > 0$
Función de base radial (RBF)	$K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \ x_i - x_j\ ^2),$ $\gamma > 0$
Sigmoid	$K(x_i, x_j) = \tanh(\gamma x_i^T x_j + r)$
Gaussiana	$K(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\ x_i - x_j\ ^2}{2\sigma^2}\right),$ $\sigma > 0$

Donde γ, r y d son parámetros kernel. La arquitectura de las SVM depende de dos parámetros C y la función kernel. En este artículo se presenta el uso del kernel RBF ya que solo requiere el parámetro γ y porque no correlaciona las muestras en un espacio dimensional

superior para que, a diferencia del Kernel lineal, pueda manejar el caso cuando la relación entre las clases y atributos no sean lineales[14]. El parámetro C es elegido por el usuario el cual se encuentra mediante la validación cruzada, el objetivo de dicha validación es encontrar un valor óptimo del parámetro C y gamma (γ). La exactitud de la validación cruzada es el porcentaje de datos que se clasifican correctamente, este procedimiento puede evitar el problema de sobre-entrenamiento[35]. Para poder aplicar las SVM es muy importante realizar un escalamiento de datos, la principal ventaja es evitar atributos en rangos numéricos superiores que dominan aquellos de rangos numéricos más pequeños, otra ventaja es evitar las dificultades numéricas durante el cálculo. Se recomienda escalar linealmente cada atributo en el rango $[-1,+1]$ o $[0, 1]$ [31].

3. Metodología

El trabajo propuesto se basa en el uso de las máquinas de soporte vectorial para identificar el tipo de falla que se puede presentar en el sistema de distribución, se realizara la medición de los voltajes que están disponibles en todas las fuentes es decir en la subestación y en los generadores distribuidos. Se utiliza el circuito de 34 barras del IEEE para realizar la simulación de las fallas como se puede observar en la figura 4, se divide en zonas al circuito para identificar el número de clases que tendrán las SVM, estas zonas están descritas en la tabla 2, así como también la descripción de cada nodo. Las SVM clasifican cada uno de los eventos que se pueden presentar en este caso las fallas, utilizando cada zona como una clase y los valores RMS de voltaje y corriente como descriptores.

Tabla 2. Zonas y nodos del circuito

Zona	Nodos	Descripcion
1	800, 802, 806, 808, 810	3 nodos trifásicos y 1 monofásico en la fase B
2	812, 814, 850, 816, 824, 826	5 nodos trifásicos y 1 monofásico en la fase B
3	822, 820, 818	3 nodos monofásicos en la fase A
4	828, 830, 854, 856	3 nodos trifásicos y 1 nodo monofásico en la fase B
5	864, 858, 832, 852	3 nodos trifásicos y 1 nodo monofásico en la fase B
6	834, 860, 836, 840, 862, 838	5 nodos trifásicos y 1 nodo monofásico en la fase B
7	848, 846, 844, 842	4 nodos trifásicos
8	888, 890	2 nodos trifásicos

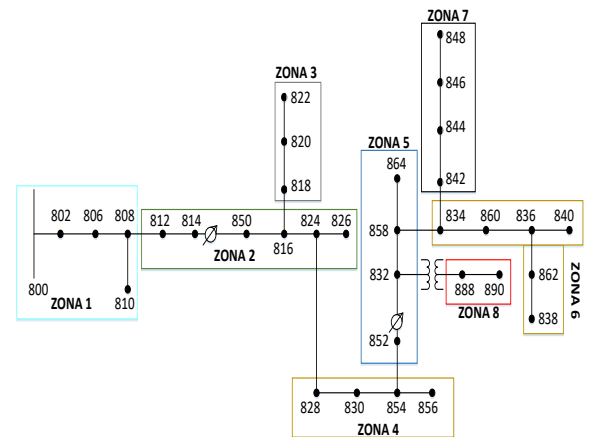


Figura 4. Circuito de 34 barras de la IEEE zonificado

También se implementa la conexión de dos generadores distribuidos los cuales irán variando su penetración de potencia en un 10, 20 y 30 por ciento a través de la impedancia de corto circuito la cual se determina mediante la ecuación (6):

$$Z_{cc} = \frac{(V_{kv})^2}{S_{ccMVA}} \quad (6)$$

Donde:

Z_{cc} , es la impedancia de corto circuito.

V_{kv} , es el voltaje total.

S_{ccMVA} , es la potencia de corto circuito.

La potencia en MVA de todo el circuito es igual a 2 y el voltaje es de 25kV estos datos fueron obtenidos a través del IEEE 34 Node Test Feeder, se reemplazan los datos en la ecuación (6) y se obtienen los siguientes resultados de impedancia para cada porcentaje de penetración de potencia, los cuales se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Valores de impedancia

% de penetración	Impedancia
10	3125Ω
20	1563Ω
30	1042Ω

Las simulaciones se realizan mediante un algoritmo propuesto en MATLAB® a través de seis (6) escenarios diferentes en los cuales varían la cantidad de los generadores y los porcentajes de penetración, estos datos se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Escenarios para la simulación del algoritmo

Escenario	GD	%	Ubicación del GD
1	1	10	Nodo 854
2	1	20	Nodo 854
3	1	30	Nodo 854
4	2	10	Nodo 854 y 836
5	2	20	Nodo 854 y 836
6	2	30	Nodo 854 y 836

Se implementó el mismo pseudocódigo para cada uno de los escenarios el cual se lo presenta en la tabla 5.

Tabla 5. Pseudocódigo para ejecutar las SVM

Pseudocódigo para las SVM

Paso 1: Inicio

Paso 2: Declaración de variables

Inicio: nbus, nzonas, TN, rmin, rmax, rpas.

Salida: Matriz de Confusión

Paso 3: Asignación de valores.

nbus = 34

nzonas = 8

TN = monofásico, bifásico, trifásico

rmin = 5

rmax = 30

rpas = 5

Paso 4: Proceso

Ejecutar el flujo de potencia.

Generar la combinación de fallas n*n donde n es el número de barras.

Acondicionar las variables en el rango de [-1,1] para generar la base de datos.

Utilizar el kernel RBF.

Optimización del parámetro C y γ .

$$\max \text{bestc} = 2^{\log_2 c}$$

$$\max \text{bestg} = 2^{\log_2 g}$$

s.a.

$$\log_2 c \in [15:16]$$

$$\log_2 g \in [2:4]$$

$$c \wedge g > 0$$

Dividir los datos en dos subconjuntos 70% para entrenamiento y 30% para pruebas.

Entrenar las SVM utilizando el kernel elegido y los parámetros C y γ .

Probar los datos utilizando los parámetros de validación.

Paso 5: Visualizar

Graficas de tendencia donde se muestran las fallas vs los escenarios.

Paso 6: Fin

Los resultados obtenidos mediante la simulación serán mostrados en una matriz de confusión, esta matriz

representa el diseño de una tabla específica la cual permite visualizar los resultados de un algoritmo. La matriz de confusión contiene información acerca de las clasificaciones actuales y las predicciones hechas por un sistema de clasificación en este caso por las SVM. El tamaño de la matriz es n por n , en la cual n es el número de clases.

La diagonal principal serán los casos verdaderos y el resto las clasificaciones erróneas.

Cada columna de la matriz representa los datos del evento real, y en cada fila representa los casos que el algoritmo predijo como se muestra en la figura 5.

PREDICCIÓN	EVENTO REAL	
	abrir (p)	cerrar (n)
	ABRIR (P)	CERRAR (N)
	TP	FP
	FN	TN

Diagonal de Aciertos

Figura 5. Ejemplo de una matriz de confusión

4. Resultados Obtenidos

En las gráficas 6, 7, 8 y 9 se puede observar la precisión de las SVM para cada falla en cada escenario, estos resultados fueron obtenidos mediante la simulación de los 6 escenarios en MATLAB®, cada uno representa el porcentaje de penetración como lo muestra la tabla 4, se simulan automáticamente las 11 fallas que se pueden presentar en el sistema de distribución, obteniendo una matriz de confusión para cada una de las fallas, se realizaron los cálculos de los porcentajes de precisión obtenidos para cada escenario y se presentan en la tabla 6. Mediante las gráficas se puede observar cómo va subiendo la precisión al ir aumentando la penetración de los generadores distribuidos.

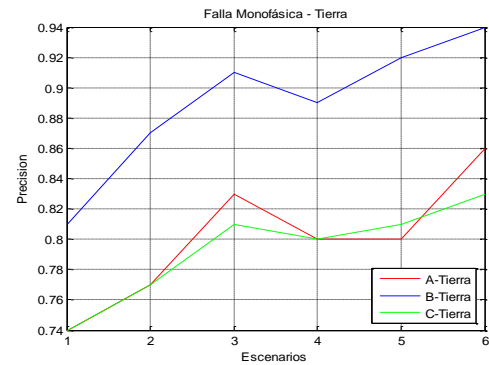


Figura 6. Líneas de tendencia-precisión de las fallas monofásicas a tierra

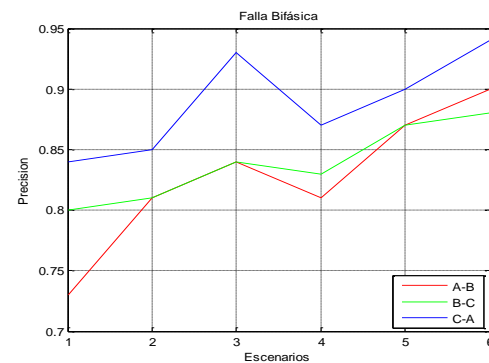


Figura 7. Líneas de tendencia-precisión de las fallas bifásicas

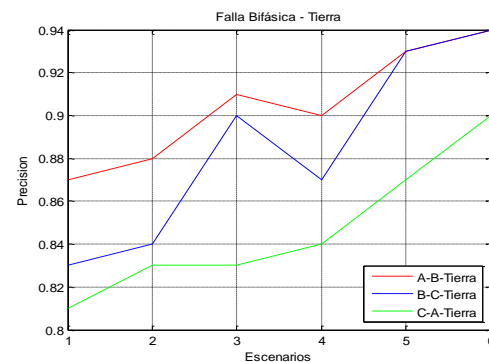


Figura 8. Líneas de tendencia-precisión de las fallas bifásicas a tierra

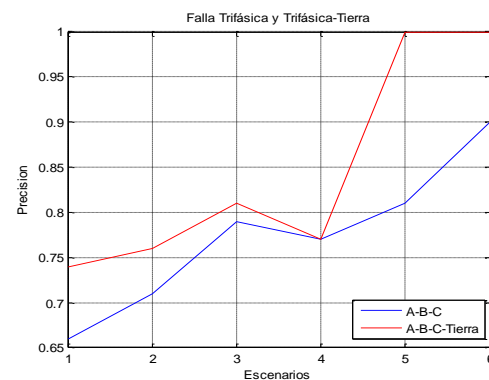


Figura 9. Líneas de tendencia-precisión de la falla trifásica y trifásica a Tierra

Tabla 6. Resultados finales

Escenarios	Precisión										
	A-Tierra	B-Tierra	C-Tierra	A-B-Tierra	B-C-Tierra	C-A-Tierra	A-B	B-C	C-A	A-B-C	Trifásica-Tierra
1	0.74	0.81	0.74	0.87	0.83	0.81	0.73	0.80	0.84	0.66	0.70
2	0.77	0.87	0.77	0.88	0.84	0.83	0.81	0.81	0.85	0.71	0.76
3	0.83	0.91	0.81	0.91	0.90	0.83	0.84	0.84	0.93	0.79	0.81
4	0.80	0.89	0.80	0.90	0.87	0.84	0.81	0.83	0.87	0.77	0.77
5	0.80	0.92	0.81	0.93	0.93	0.87	0.87	0.87	0.90	0.81	1
6	0.86	0.94	0.83	0.94	0.94	0.90	0.90	0.88	0.94	0.90	1

Para poder explicar cómo se obtuvieron los datos de precisión mostrados en la tabla 6, se presenta en la tabla 7 la matriz de confusión de la falla bifásica a tierra (A-B-Tierra) del escenario 1.

Tabla 7. Matriz de confusión de la falla A-B-Tierra

	1	2	4	5	6	7	8	Datos Prueba	Precisión
1	7	0	0	0	0	0	0	7	1
2	0	4	0	0	0	0	0	4	1
4	0	2	3	0	0	0	0	5	0.6
5	0	0	0	3	0	0	0	3	1
6	0	0	0	0	4	2	0	6	0.66
7	0	0	0	0	0	2	0	2	1
8	0	0	0	0	0	0	4	4	1
							27	31	0.87

En esta tabla se observan los datos obtenidos por las SVM, en la cual los valores de la diagonal principal muestran los elementos exitosos y los datos fuera de la diagonal los elementos errados, para obtener el porcentaje de precisión de cada matriz de confusión se utiliza la ecuación (7) presentada a continuación:

$$Precisión = \frac{\text{Datos correctamente clasificados}}{\text{Número de datos de prueba}} \quad (7)$$

También cabe mencionar que solo en la zona 3 se simula la falla monofásica ya que en esta zona se encuentra un ramal monofásico perteneciente a la fase A, en las demás zonas no habrá esta falla. En cada una de las gráficas también se observa que en el tramo que va del escenario 3 al 4 la precisión de las SVM disminuye, esto se debe a que teniendo la presencia de un generador con una

penetración de energía al 30% en el escenario 3 es mayor que tener dos generadores con una penetración de energía al 10% en el escenario 4.

5. Conclusiones

En este trabajo se presenta una técnica de localización del tipo de fallas que se presentan en los sistemas de distribución con la presencia de GD, con las SVM como una herramienta para el problema del diagnóstico de fallas, el enfoque se basa en las mediciones de voltaje que son fácilmente disponibles tanto en la subestación como en otras fuentes.

El resultado de la simulación muestra un desempeño satisfactorio en términos de clasificación, y la precisión va desde el 70% al 100% en los diferentes escenarios, tomando en cuenta que al tener una mayor penetración de energía por parte de los generadores distribuidos la precisión de las SVM es mucho más alta, y a su vez el sistema se vuelve más robusto.

Esta técnica queda abierta para mayores implementaciones que se pueden requerir para la localización de fallas.

6. Referencias

- [1] V. Calderaro and a Piccolo, "Identifying fault location in distribution systems with high distributed generation penetration," ... , 2009. *Africon '09.*, no. September, pp. 1–6, 2009.

- [2] J. Mora-Flórez, J. Meléndez, and G. Carrillo-Caicedo, "Comparison of impedance based fault location methods for power distribution systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 4, pp. 657–666, 2008.
- [3] 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.
- [4] S. Das, N. Karnik, and S. Santoso, "Distribution fault-locating algorithms using current only," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 3, pp. 1144–1153, 2012.
- [5] L. Shu-guang and Q. Ping-ge, "A fault detection and isolation algorithm for distribution systems containing distributed generations," vol. 1, no. x, pp. 1753–1756, 2011.
- [6] F. Pabón and R. Pérez, "Diagnóstico de Fallas en Sistemas Eléctricos de Distribución mediante La Transformada de Wavelet," *Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador*, pp. 1–23, 2016.
- [7] C. Orozco-Henao, J. Mora-Flórez, and S. Pérez-Londono, "A robust method for single phase fault location considering distributed generation and current compensation," *Proceedings of the 2012 6th IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition, T and D-LA 2012*, pp. 1–7, 2012.
- [8] S. M. Brahma, "Fault location in power distribution system with penetration of distributed generation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 3, pp. 1545–1553, 2011.
- [9] A. S. Bretas and R. H. Salim, "Fault location in unbalanced dg systems using the positive sequence apparent impedance," *2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, TDC'06*, vol. 00, pp. 1–6, 2006.
- [10] R. Lasseter, "Control of distributed resources," *Proc. Bulk Power System Dynamics and Control IV - Restructuring*, 1998.
- [11] P. Chiradeja, "Benefit of Distributed Generation: A Line Loss Reduction Analysis," *2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*, pp. 1–5, 2005.
- [12] P. P. Barker and R. W. De Mello, "Determining the impact of distributed generation on power systems. I. Radial distribution systems," *Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE*, vol. 3, no. c, pp. 1645–1656 vol. 3, 2000.
- [13] D. Criollo and R. Pérez, "Localización de Fallas en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica usando Generación Distribuida y Basado en Métodos Algorítmicos," *Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador*, pp. 1–21, 2016.
- [14] C.-J. L. Chih-Wei Hsu, Chih-Chung Chang, "A Practical Guide to Support Vector Classification," *BJU international*, vol. 101, no. 1, pp. 1396–400, 2008.
- [15] R. Pérez, "Técnicas para la localización de Fallas en Sistemas Aéreos Radiales de Distribución de Energía

- Eléctrica,” *Revista Digital de Investigación y Postgrado*, vol. 3, no. 1, 2013.
- [16] C. J. C. Junli and J. L. J. Licheng, “Classification mechanism of support vector machines,” *WCC 2000 - ICSP 2000. 2000 5th International Conference on Signal Processing Proceedings. 16th World Computer Congress 2000*, vol. 3, pp. 0–3, 2000.
- [17] N. Rezaei, S. a M. Javadian, N. Khalesi, and M. R. Haghifam, “Diagnosis of impedance fault in distribution system with distributed generations using radial basis function neural network,” *SMFG 2011 - IEEE International Conference on Smart Measurements for Grids, Proceedings*, pp. 79–83, 2011.
- [18] R. Pérez, G. Araujo, and C. Vásquez, “Aplicación de lógica borrosa para la identificación de fallas en sistemas eléctricos de distribución,” pp. 82–94, 2016.
- [19] M.-S. Choi, S.-J. Lee, D.-S. Lee, and B.-G. Jin, “A New Fault Location Algorithm Using Direct Circuit Analysis for Distribution Systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 1, pp. 35–41, 2004.
- [20] Y. C. Y. Chao, Z. X. Z. Xiangjun, and X. Y. X. Yunfeng, “Improved Algorithm for Fault Location in Distribution Network with Distributed Generations,” *2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA)*, vol. 2, pp. 2008–2011, 2008.
- [21] W. Tippachon, a Kwansawaitham, N. Klairuang, D. Rerkpreedapong, and J. Hokierti, “Failure Analysis of Power Distribution Systems in Thailand,” *Power System Technology, 2006. PowerCon 2006. International Conference on*, pp. 1–5, 2006.
- [22] R. Das, “Determining the locations of faults in Distribuion Systems,” *Thesis*, 1998.
- [23] G. Ledwich and S. Member, “a Failure Model for Distribution Systems,” pp. 4–8, 2004.
- [24] S. M. Brahma and A. a. Girgis, “Development of Adaptive Protection Scheme for Distribution Systems with High Penetration of Distributed Generation,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 1, pp. 56–63, 2004.
- [25] A. Yadav and L. Srivastava, “Optimal placement of distributed generation: An overview and key issues,” *Power Signals Control and ...*, no. January, pp. 8–10, 2014.
- [26] T. Ackermann, G. Andersson, and L. Söder, “Distributed generation: A definition,” *Electric Power Systems Research*, vol. 57, no. 3, pp. 195–204, 2001.
- [27] G. W. Ault, J. R. McDonald, and G. M. Burt, “Strategic analysis framework for evaluating distributed generation and utility strategies,” *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 150, no. 4, p. 475, 2003.
- [28] S. F. Yuan and F. L. Chu, “Fault diagnostics based on particle swarm optimisation and support vector machines,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 21, no. 4, pp. 1787–1798, 2007.
- [29] C. J. C. Burges, “A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition,” *Data Mining and Knowledge*

- Discovery*, vol. 2, no. 2, pp. 121–167, 1998.
- [30] a J. Smola and B. Scholkopf, “A tutorial on support vector regression,” *Statistics and Computing*, vol. 14, no. 3, pp. 199–222, 2004.
- [31] R. Agrawal and D. Thukaram, “Identification of fault location in power distribution system with distributed generation using support vector machines,” *2013 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, pp. 1–6, 2013.
- [32] R. Pérez, A. Aguila, and C. Vásquez, “Classification of the status of the voltage supply in induction motors using Support Vector Machines,” *2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, pp. 1–5, 2016.
- [33] T.-L. (Bill) Tseng, K. R. Aleti, Z. Hu, and Y. (James) Kwon, “E-quality control: A support vector machines approach,” *Journal of Computational Design and Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 1–11, 2015.
- [34] R. Pérez and C. Vásquez, “Fault Location in Distribution Systems with Distributed Generation Using Support Vector Machines and Smart Meters,” *Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM), IEEE*, pp. 0–5, 2016.
- [35] C. Hsu and C. Lin, “A comparison of methods for multiclass support vector machines,” *Neural Networks, IEEE Transactions on*, vol. 13, no. 2, pp. 415–425, 2002.