

## DISEÑO CONCEPTUAL DE UN LOCALIZADOR DE FALLAS PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN USANDO MINERÍA DE DATOS Y ANÁLISIS CIRCUITAL

### Conceptual design of a fault locator for power distribution systems using data mining and circuit analysis

#### RESUMEN

En este artículo se presenta un análisis de la implementación de sistemas híbridos, para integrar varios métodos que permitan una solución al problema de localización de fallas. Como resultados se muestra una propuesta de arquitectura genérica para abordar el problema de la localización de fallas en sistemas de distribución de energía eléctrica, y también las pruebas de localización donde se obtiene precisión muy alta, para un circuito típico de distribución.

Ésta es una alternativa útil para el aprovechamiento integrado y efectivo de los métodos de análisis de circuitos y las técnicas de clasificación para resolver un problema del sector eléctrico.

**PALABRAS CLAVES:** Análisis de circuitos, localización de fallas, sistemas de distribución, técnicas de clasificación.

#### ABSTRACT

*In this paper, the development of hybrid systems used to integrate methods for fault location is discussed. As results of this research, a generic hybrid architecture to solve the problem of fault location in power distribution systems, and also the reported tests which shows a high performance in case of a typical power system are presented.*

*According to the analysis performed, the proposal is a useful alternative to take advantage of both, the circuit analysis based methods and the classification techniques to solve a specific problem of the power systems.*

**KEYWORDS:** Circuit analysis, classification techniques, fault location, power distribution systems.

## 1. INTRODUCCIÓN

Una de las dificultades que afronta el sector eléctrico, como consecuencia del crecimiento de los sistemas de potencia, tanto el número de líneas en operación como su longitud total, consiste en que las líneas experimentan fallas causadas principalmente por tormentas, descargas atmosféricas, ruptura del aislamiento y corto circuitos debidos a crecimiento de la vegetación u otros objetos externos. Esto causa la pérdida de continuidad en el servicio y por tanto una mala calidad del mismo [1][2].

En la mayoría de los casos, las fallas son permanentes y se manifiestan como daño mecánico, el cual debe ser reparado para restaurar el servicio a los clientes afectados. El proceso de restauración se puede acelerar si la localización de la falla es conocida o puede ser estimada con una exactitud razonable [3]. Para el caso de fallas transitorias, con un localizador de fallas, se pueden fortalecer puntos débiles en el sistema y evitar fallas que pueden ser graves en el futuro.

Para el caso de los sistemas de distribución, donde este problema es más grave, los métodos de localización de fallas utilizan medidas en un terminal de línea, y se

#### GÉRMAN ANDRÉS MORALES ESPAÑA

Ingeniero Electricista, M.Sc. (c)  
Investigador  
Universidad Pontificia Comillas,  
Madrid, España.  
german.morales.e@upco.es

#### JUAN JOSÉ MORA FLÓREZ

Ingeniero Electricista, Ph.D.  
Profesor asistente  
Universidad Tecnológica de Pereira  
jjmora@utp.edu.co

#### SANDRA MILENA PÉREZ LONDOÑO

Ingeniera Electricista, M.Sc.  
Profesor asistente  
Universidad Tecnológica de Pereira  
saperez@utp.edu.co

#### Grupo de Investigación en Calidad de Energía Eléctrica y Estabilidad - ICE<sup>3</sup>

pueden clasificar en dos grupos: Aquellos que utilizan la teoría de análisis de circuitos (MAC), y aquellos que utilizan la información obtenida de la explotación de bases de datos (MEB). Los MAC usan el valor de la componente fundamental de las señales de tensión y corriente medidas en la subestación y el circuito del sistema de potencia, para calcular la reactancia aparente vista desde la subestación hasta el sitio de falla [4]. Los MEB utilizan técnicas de minería de datos para explotar las bases de datos y establecer una relación entre parámetros de entrada y la zona en falla [5].

Los métodos más utilizados en la localización de fallas en los sistemas de distribución son los MAC, debido a que su implementación y operación normalmente no es tan costosa como los MEB. Sin embargo, su alta dependencia de un buen modelo y la múltiple estimación de la posible localización de la falla (estiman una distancia eléctrica desde la subestación hasta el sitio de falla, el número de estimaciones es igual al número de laterales que existan en el circuito), son sus grandes desventajas. Así mismo, las desventajas de los MEB son el alto costo, debido a la cantidad de información que utilizan, y una precisión no tan alta como la de los MAC. Por lo tanto, se reconoce la importancia de desarrollar técnicas híbridas para aprovechar las ventajas de los dos

métodos [3]. En la arquitectura propuesta en este artículo se unen los MAC, y los MEB para resolver dos problemas: la alta dependencia del modelo del sistema de potencia, y la múltiple estimación de la localización de una falla.

Como contenido de este artículo, en la sección 2 se presenta el análisis de uno de los métodos utilizados para la localización de fallas, basado en el análisis circuital. Algunas alternativas para la explotación del conocimiento contenido en las bases de datos se presentan en la sección 3. En la sección 4 se presenta el diseño conceptual y la arquitectura híbrida propuesta. Las pruebas del localizador desarrollado se presentan en la sección 5, mientras que la sección 6 es destinada para las conclusiones más importantes de esta investigación.

**2. MÉTODO DE ANÁLISIS CIRCUITAL-MAC**

El análisis clásico de las redes eléctricas tiene una teoría claramente establecida, que corresponde al análisis de sistemas de potencia [6]. Esta estrategia es la utilizada por los métodos de análisis circuital (MAC) para determinar una distancia desde un nodo de medida hasta el sitio de falla. Existen muchas técnicas de localización de fallas que responden a esta clasificación, tal como se muestra en [4], pero aquí solo se presentan los fundamentos del método propuesto por D. Novosel [7], seleccionado de acuerdo a su desempeño, para la conformación del híbrido.

**2.1. Estimación de distancia de falla**

Para la estimación de la distancia a la falla, el circuito del sistema se simplifica tal como se presenta en la figura 1.

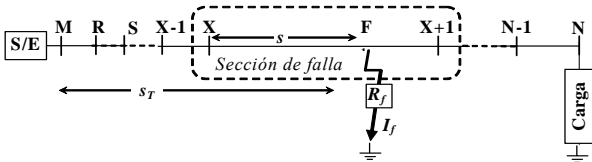


Figura 1. Modelo simplificado del sistema de distribución

La simplificación del circuito se realiza considerando que las impedancias de las cargas intermedias son mucho mayores que las de las líneas y por tanto el error de la aproximación no es significativo. Para calcular la distancia de falla  $S_T$  (desde la subestación), se estima la impedancia aparente medida durante la falla (1).

$$Z_{m,app} = \left( \frac{V_m}{I_{m,r}} \right) = S_T Z_{L1} + R_f \left( \frac{I_f}{I_{m,r}} \right) \quad (1)$$

Donde  $Z_{m,app}$  es la impedancia aparente,  $V_m$  es la tensión en el nodo M, e  $I_{m,r}$  es la corriente del nodo M al nodo R. Para resolver el circuito se plantea uno nuevo con las componentes superimpuestas que reflejan el cambio de prefalla a falla, tal como se muestra en la figura 2.

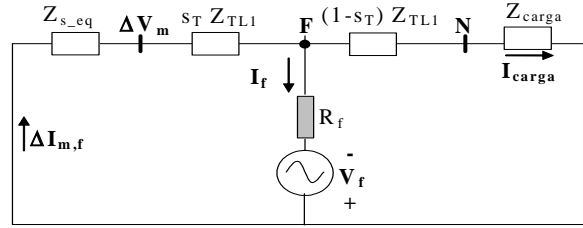


Figura 2. Circuito de las componentes superimpuestas.

La impedancia de la fuente del circuito de la figura 2 está dada por la ecuación (2).

$$Z_{s,eq} = - \frac{\Delta V_m}{\Delta I_{m,f}} = - \frac{V_{m,falla} - V_{m,prefalla}}{I_{r,f,falla} - I_{m,f,prefalla}} \quad (2)$$

En (2) se usa la secuencia positiva. A partir de los valores de impedancia de la fuente y la carga, se estima la localización de la falla ya sea con el método iterativo o con el directo. La corriente de prefalla de la fuente es igual a la corriente de la carga, como se muestra en (3).

$$\Delta I_{m,f} = I_{m,f,falla} - I_{carga} \quad (3)$$

Los cambios en la corriente de la fuente se pueden modelar como se presenta en (4), donde  $ds$  es el factor de distribución que describe el cambio de la corriente de la fuente y la corriente de carga de posfalla.

$$ds = \frac{\Delta I_{m,f}}{I_f} \quad (4)$$

Adicionalmente, se define el factor  $ns$  en (5).

$$ns = \frac{I_{m,f,falla}}{\Delta I_{m,f}} = |ns| \angle \gamma_s \quad (5)$$

Reemplazando (4) y (5) en (1) se obtiene (6).

$$Z_{med} = S_T Z_{L1} + R_f \left( \frac{1}{ds} \right) \left( \frac{1}{ns} \right) \quad (6)$$

Para considerar diferentes tipos de fallas, los valores de tensión y de corriente se presentan en la tabla 1.

Tipo de falla	Tensión de falla en M (Vm falla)	Corriente de falla en M (Im,f falla)	Corriente Superimpuesta ΔIm,f
a-g	Va	Ia+kI0	3*ΔIla
b-g	Vb	Ib+kI0	3*ΔIlb
c-g	Vc	Ic+kI0	3*ΔIlc
b-c	Vb-Vc	Ib-Ic	ΔIb-ΔIc
a-b	Va-Vb	Ia-Ib	ΔIa-ΔIb
c-a	Vc-Va	Ic-Ia	ΔIc-ΔIa
b-c-g	Vb-Vc	Ib-Ic	ΔIb-ΔIc
a-b-g	Va-Vb	Ia-Ib	ΔIa-ΔIb
c-a-g	Vc-Va	Ic-Ia	ΔIc-ΔIa
a-b-c	Vb-Vc	Ib-Ic	ΔIb-ΔIc
a-b-c-g	Vb-Vc	Ib-Ic	ΔIb-ΔIc

Tabla 1. Tensiones y corrientes para diferentes tipos de falla El valor de  $k$  está dado por la ecuación 7.

$$k = \frac{Z_0 + Z_1}{Z_1} \tag{7}$$

El método se fundamenta en la solución de la ecuación (6) que depende de la distancia a la falla, la resistencia de la falla y la corriente por la falla incluida en el término  $ds$ . La solución iterativa parte de suponer que el ángulo de  $ns$  es igual a cero. Para la solución directa se propone una ecuación cuadrática en términos de la distancia  $s_T$ . La carga se tiene en cuenta mediante un modelo de impedancia constante.

### 3. MÉTODOS PARA EXPLOTACIÓN DE BASES DE DATOS-MEB

La mayoría de procesos tienen sistemas de información con bases que almacenan gran cantidad de datos, hechos, experiencias y conocimientos más o menos específicos de un ámbito [8]. Estas bases de datos contienen información que se debe extraer para que sea útil, y algunas de las técnicas usadas son los métodos conexionistas. Éstos se requieren de datos para el entrenamiento tomados como descriptores de la base de datos y el posterior análisis, usando métodos basados en técnicas de clasificación [3][9].

Para el caso del problema de localización de fallas, las bases de datos se componen de registros de tensión y corriente medidos durante la falla y de los cuales se extraen los descriptores que sirven de entrada a los métodos conexionistas. Son muchos los métodos que pertenecen a este grupo, pero sólo se presentan los fundamentos de cuatro de ellos, dado que posteriormente servirán para la implementación del método híbrido.

#### 3.1. Redes neuronales (NN)

Es el método conexionista más conocido y permite la solución de problemas complejos, como la evolución de una los conocimientos que se actualizan con cada ejemplo. Las redes neuronales son combinaciones de elementos simples, interconectados, que operan de forma paralela para resolver problemas relacionados con análisis de formas o patrones, predicción, codificación, control y optimización, entre otras aplicaciones [10].

En el entrenamiento a partir de ejemplos, si la salida no se adecua a la esperada, se ajustan los pesos de cada neurona o “aprende” hasta obtener las respuestas adecuadas del sistema.

#### 3.2. k vecinos más cercanos (k-NN)

Esta técnica se basa, simplemente, en “recordar” todos los ejemplos presentados en la etapa de entrenamiento. Cuando entra un nuevo dato al sistema de aprendizaje, éste lo clasifica según el comportamiento del dato más cercano [10].

Si se tienen los datos pertenecientes al conjunto de entrenamiento, tal como se muestra en la figura 3 (triángulos y cuadrados), y se quiere conocer la etiqueta de un nuevo dato (asterisco), el procedimiento a seguir

consiste en buscar el ejemplo que esté más cerca de este nuevo dato, y asignarle su etiqueta (triángulo). Ahora, si se considera el caso donde hay un cuadrado dentro de los datos correspondientes a los triángulos (ruido), y se desea clasificar el nuevo dato (asterisco), utilizando el ejemplo más cercano tal como se muestra en la figura 4, se tiene un posible error (cuadrado).

Para considerar el problema del ruido, se mejora el algoritmo de clasificación utilizando un mayor número de vecinos para obtener la etiqueta del nuevo dato usando mayoría simple, y no un sólo dato. Esta generalización del método se llama k-vecinos más cercanos [10].

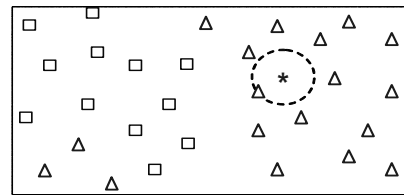


Figura 3: Predicción de la clase de un dato nuevo con respecto al vecino más cercano.

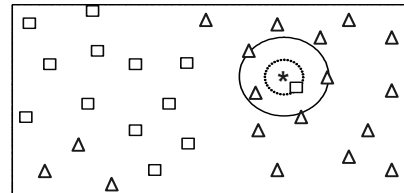


Figura 4: Predicción de la clase de un dato nuevo con respecto al vecino más cercano, los datos conocidos contienen ruido.

### 3.3. Algoritmo de aprendizaje para el análisis de datos multivariables -LAMDA

LAMDA es un algoritmo de clasificación multivariable que combina la capacidad de naturaleza estadística. Puede realizar aprendizaje supervisado y no supervisado, y es de fácil implementación [5]. La estructura del clasificador es similar a la de una red neuronal (figura 5), e igualmente requiere de una etapa de entrenamiento donde se crean y modifican las clases, y una etapa de reconocimiento de patrones para la asignación de individuos a clases fijas.

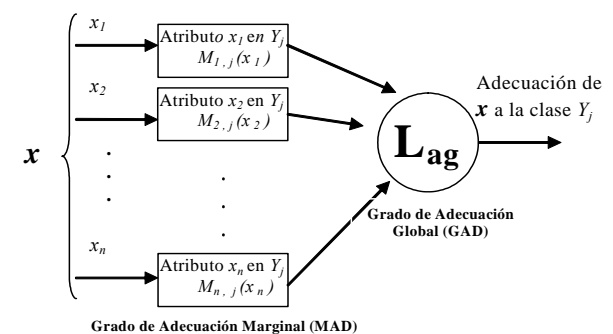


Figura 5: Estructura básica de reconocimiento de un elemento en el clasificador LAMDA

Para que se pueda identificar la clase de un individuo, es necesario que individuo y clase sean representados como un conjunto de descriptores. De la comparación de cada

uno de estos descriptores resulta un índice relacionado con el grado de adecuación del descriptor-individuo al descriptor-clase (Marginal Adequacy Degree- MAD).

El MAD se calcula para cada individuo, en cada descriptor de cada una de las clases predefinidas. Los resultados de estos índices se agrupan por medio de distribuciones y funciones de probabilidad en índices globales llamados GAD (Global Adequacy Degree). El GAD indica el grado de adecuación del individuo a la clase. La clasificación se realiza según el índice GAD, el cual puede ser analizado con criterios de valores máximos y mínimos, técnicas de análisis estadístico, etc. En [5] se presentan algunas aplicaciones de LAMDA en la clasificación de perturbaciones eléctricas.

### 3.4. Máquinas de Soporte Vectorial-SVM

Las SVM son un algoritmo de clasificación basado en procedimientos de estimación de parámetros a partir de un conjunto de datos, el cálculo del valor de la función, y la evaluación de la precisión [11]. Asumiendo que existen dos estados que se quieren separar (operación=1 o falla=-1), la idea principal es obtener dos hiperplanos paralelos a una distancia de margen que separe los estados de falla de los estados de operación, tal como se presenta en la figura 6. La condición básica es que no existan puntos entre H1 y H2, y que la distancia entre H1 y H2 (el margen) sea máxima

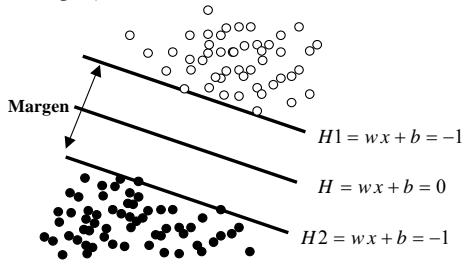


Figura 6: Hiperplanos de decisión generados por una SVM lineal

Las cantidades  $w$  y  $b$  son los parámetros que controlan la función y se denominan vector de pesos y “bias” [11]. Este es un problema de programación cuadrática, convexo, en un conjunto convexo  $(w, b)$ . Al determinar el máximo margen (hiperplanos que maximizan el margen), sólo los puntos que se encuentren más cercanos a los hiperplanos tendrán valores de  $w_i$  positivos. Estos puntos constituyen los vectores de soporte (VS) o los elementos críticos del conjunto de datos. Todos los demás puntos tendrán  $w_i = 0$ . Esto significa que si se repite el proceso de entrenamiento conservando sólo los VS, se obtendrán los mismos hiperplanos.

Si la superficie que separa las dos clases no es lineal, se puede transformar el conjunto de datos en un nuevo espacio dimensional, tal que los puntos sean separables linealmente. Este nuevo espacio puede definirse en términos de un vector en el espacio original y una función kernel de transformación.

## 4. DISEÑO CONCEPTUAL Y ARQUITECTURA HÍBRIDA DEL LOCALIZADOR DE FALLAS

Las ventajas de los sistemas híbridos son: a) la integración de dos técnicas complementarias permite que una supla las deficiencias de la otra; b) El uso de diferentes técnicas de representación del conocimiento amplía la capacidad del sistema para recibir nueva información; c) Algunos sistemas complejos que no pueden ser tratados empleando una sola técnica, se dividen en subproblemas para luego obtener una solución global óptima; d) El procesamiento en paralelo de la información de diferentes módulos permite diseñar un sistema con mayor desempeño, más robusto y con mayor tolerancia a fallos [8].

### 4.1. Propuesta de sistema híbrido para localización de fallas

La estructura propuesta del sistema híbrido de localización de fallas en sistemas eléctricos, involucra los métodos basados en el análisis de circuitos (MAC), y los métodos basados en la explotación de las bases de datos (MEB). Como MAC se utiliza el método propuesto por D Novosel [7] y como MEB se prueban cuatro métodos: redes neuronales (NN), LAMDA, las SVM y el método del vecino más cercano (kNN). La estructura general del localizador se muestra en la figura 7.

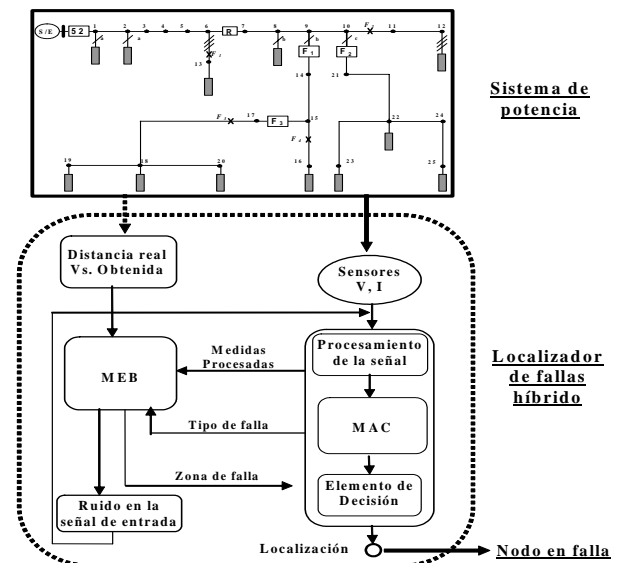


Figura 7: Sistema híbrido basado en MAC y MEB para localización de fallas

En este caso, el elemento de validación es usado para determinar la distancia real a la cual ocurrió la falla, y la distancia estimada. Esta herramienta únicamente actúa en el periodo de entrenamiento, con el fin de incluir en la base de aprendizaje solo los ejemplos que conducen a resultados aceptables dentro de un margen de tolerancia.

El elemento de aprendizaje está constituido por los MEB y tiene como entradas las señales preprocesadas en forma de descriptores y la señal de refuerzo del aprendizaje

definida por el crítico; las salidas de este elemento son parámetros de ajuste para que los MAC reduzcan su dependencia del modelo; ellas determinan una región probable en la cual ocurrió la falla.

El elemento de ejecución está conformado principalmente por los MAC, que a partir de las señales de entrada de tensión y corriente y del ajuste de parámetros propuesto por el MEB, estima un valor de distancia probable de la falla. Las otras partes que conforman el elemento de ejecución son el elemento de decisión y el de procesamiento de la señal; mediante una estrategia de resolución de conflictos (simple intersección o ajuste de pesos), el elemento de decisión obtiene unas salidas con un margen de incertidumbre asociado. El elemento generador de problema es el ruido que puede tener la señal introducida por los sensores, o que se desprende del procesamiento de la señal por la pérdida de información significativa.

Básicamente los sensores son los transformadores de tensión y de corriente, así como los registradores de eventos existentes en las subestaciones.

#### 4.2. Diseño conceptual para la integración de métodos de localización de fallas

En la estructura híbrida propuesta, las señales preprocesadas en forma de descriptores constituyen las entradas del localizador de fallas basado en NN, LAMDA, SVM ó kNN. Los fasores de tensión y corriente de prefalla y falla, son usados por el método propuesto por D. Novosel (MEB), para estimar las posibles localizaciones de la falla a partir de la estimación de la distancia. Adicionalmente, el localizador basado MEB tiene como entrada el tipo de la falla estimado por el método de D. Novosel (MAC) y un conjunto de descriptores que caracterizan cada falla. Posteriormente, el MEB estima la zona en falla, en la cual se busca la distancia dada por el método de MAC.

En la figura 8 se presenta gráficamente el principio de solución aplicado. Para una falla ( $F$ ), el MAC estima cuatro posibles localizaciones ( $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  y  $F_4$ ), que corresponden todas a la misma reactancia vista desde la subestación y que luego se convierten a distancias equivalentes para cada una de las ramificaciones, tal como se presenta en la figura 8. Adicionalmente, se presenta la división de zonas, las cuales deben ser identificadas con el MEB. Para este caso, la zona determinada como en falla es la 4.

La intersección con la zona y los diferentes puntos identificados como bajo falla por el MAC, elimina el problema de la múltiple estimación, tal como se presenta en la figura 8. Para este caso y por la presencia de laterales en el circuito, a partir de la activación de la zona 4, se reduce el problema de la múltiple localización del sitio de falla, disminuyendo así el tiempo de restauración del circuito. Para el ejemplo gráfico aquí presentado, el equipo de mantenimiento debe buscar una distancia medida desde la subestación y que está localizada entre

los nodos 17 y 18.

Según el ejemplo, se muestra la importancia de la adecuada selección de zonas. Éstas, en lo posible, deben contener un solo circuito radial; sin embargo esto no siempre es viable por la necesidad de suficientes datos para entrenar el MEB, ya que hay una relación entre el tamaño de la zona y la precisión deseada.

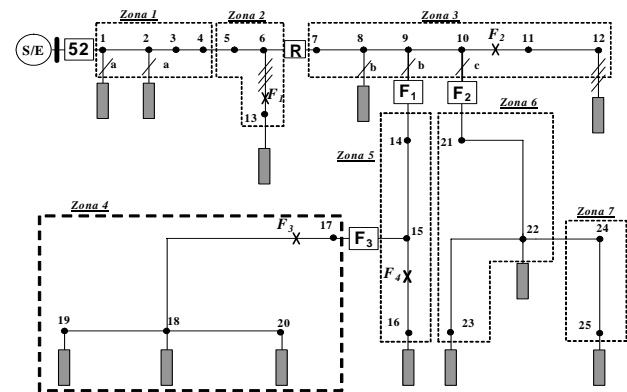


Figura 8. Principio de intersección para resolver el problema de la múltiple estimación de la localización de la falla.

## 5. PRUEBAS Y RESULTADOS

Para la prueba de la estructura híbrida, se presenta un caso de algunas fallas en diferentes zonas, como ejemplo de la localización. Estos resultados se obtienen a partir del uso de la estructura propuesta en la figura 7, donde se integra el método propuesto por D. Novosel como MAC y con varias técnicas de clasificación como NN, SVM, LAMDA y kNN. El sistema de prueba es un sistema típico de distribución de 25 kV y 36 km de largo del alimentador principal [12] y mostrado en la figura 8.

Como entradas al MAC se tienen los valores eficaces de la tensión y la corriente medidos en la subestación, así como el modelo simplificado del circuito. Las entradas o descriptores para los MEB se obtienen a partir de las señales de tensión y corriente y del producto de ellas como: la variación en la tensión entre los estados estables de falla y prefalla ( $\Delta V$ ), la variación de la corriente ( $\Delta I$ ), y la variación de la potencia aparente ( $\Delta S$ ). A partir de la simulación automática de fallas usando el Alternative Transient Program (ATP) [13], se obtuvo una base de fallas con 954 casos, de los cuales el mismo conjunto de datos correspondiente al 50 % del total, se utilizó para entrenar los todos los clasificadores.

Los resultados de la estructura híbrida para cada uno de los métodos de clasificación y bajo diferentes circunstancias de prueba se presentan en la tabla 2. Según los resultados, se puede demostrar que la estructura híbrida propuesta, permite la solución de problemas mediante la integración del conocimiento teórico y empírico. En este caso, se particulariza para uno de los problemas no resueltos del sector eléctrico, la localización de fallas en sistemas de distribución.

El problema de la múltiple estimación, para el ejemplo de aplicación es plenamente resuelto, ya que a partir de la

adecuada definición de las zonas se permite identificar correctamente la zona bajo falla.

Se aprecia que para una falla en el nodo 6 con una resistencia de falla de 25 Ω, existe un error en la determinación de la zona por parte de LAMDA y kNN. La zona identificada es la zona 3, cuando debería ser la 2, pero el error es previsible dada la proximidad del nodo.

Tipo de falla	Resistencia de falla [Ω]	Nodo de falla	Localización real		Resultado del híbrido				
			Distancia [km]	Zona	Distancia [km]	Zona			
						NN	LAMDA	SYM	kNN
Monofásica	0,05	2	2,414	1	2,411	1	1	1	1
	10	2	2,414	1	2,425	1	1	1	1
	25	2	2,414	1	2,414	1	1	1	1
	0,05	6	18,507	2	18,505	2	2	2	2
	10	6	18,507	2	18,531	2	2	2	2
	25	6	18,507	2	18,378	2	3*	2	3*
	0,05	19	34,922	4	35,232	4	4	4	4
	10	19	34,922	4	35,270	4	4	4	4
	25	19	34,922	4	35,334	4	4	4	4
Bifásica	0,05	25	38,946	7	39,522	7	7	7	7
	10	25	38,946	7	39,689	7	7	7	7
	25	25	38,946	7	39,775	7	7	7	7
	0,05	3	6,437	1	6,431	1	1	1	1
	10	3	6,437	1	6,457	1	1	1	1
	25	3	6,437	1	6,369	1	1	1	1
	0,05	8	22,530	3	22,514	3	3	3	3
	10	8	22,530	3	22,611	3	3	3	3
	25	8	22,530	3	22,544	3	3	3	3
Bifásica a tierra	0,05	12	37,014	3	37,038	3	3	3	3
	10	12	37,014	3	37,081	3	3	3	3
	25	12	37,014	3	37,154	3	3	3	3
	0,05	2	2,414	1	2,415	1	1	1	1
	10	2	2,414	1	2,316	1	1	1	1
	25	2	2,414	1	2,384	1	1	1	1
	0,05	7	18,507	2	18,510	2	2	2	2
	10	7	18,507	2	18,560	2	2	2	2
	25	7	18,507	2	18,464	2	2	2	2
Trifásica	0,05	11	34,600	3	34,565	3	3	3	3
	10	11	34,600	3	34,929	3	3	3	3
	25	11	34,600	3	34,918	3	3	3	3
	0,05	4	10,461	1	10,201	1	1	1	1
	10	4	10,461	1	10,216	1	1	1	1
	25	4	10,461	1	10,294	1	1	1	1
	0,05	9	27,680	3	27,467	3	3	3	3
	10	9	27,680	3	27,281	3	3	3	3
	25	9	27,680	3	27,356	3	3	3	3
Trifásica	0,05	12	37,014	3	36,910	3	3	3	3
	10	12	37,014	3	37,218	1	1	1	1
	25	12	37,014	3	37,430	1	1	1	1

Tabla 2. Resultados de las pruebas de localización con el híbrido propuesto sobre un sistema de 25 kV.

Adicionalmente a las pruebas presentadas en al tabla 1, se realizaron pruebas extensivas de los MEB con el 50% de los datos restantes, para los cuales se obtuvo un índice promedio de acierto en las zonas del 98,9%.

### 6. CONCLUSIONES

En este artículo presenta una alternativa de integración de técnicas de basadas en diferente principio, para resolver el problema de la localización de fallas. La alternativa

propuesta se probó con cuatro diferentes métodos de reconocimiento de la zona en falla y con un método clásico basado en el análisis de circuitos. Los resultados obtenidos muestran un alto nivel de confianza para las diferentes circunstancias de falla, en las cuales se varió la distancia y la resistencia de contacto a tierra.

Finalmente, la puesta en funcionamiento de la arquitectura para la localización de fallas, permitirá mantener altos estándares de continuidad del servicio en las redes de distribución. La propuesta es de fácil implementación y su costo económico no es elevado.

### 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE Std C37.114 “IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines” *Power System Relaying Committee* 2004.
- [2] T. A. Short. “*Electric Power Distribution Handbook*”. CRC press, 2003.
- [3] J. Mora, “*Localización de Fallas en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica usando Métodos Basados en el Modelo y Métodos Basados en el Conocimiento*”, Tesis Doctoral. University of Girona, España. 2006
- [4] G. Caicedo, J. Mora, J. Meléndez, “Comparison of impedance based fault location methods for power distribution systems”. *Electric Power System Research*. doi:10.1016/j.epsr.2007.05.010.
- [5] J. Mora, G. Carrillo, B. Barrera. “Fault Location in Power Distribution Systems Using a Learning Algorithm for Multivariable Data Analysis”. *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 22. 2007.
- [6] C. Gross, “*Power system analysis*”, John Willey and Sons, Auburn University, 1979.
- [7] D. Novosel, D. Hart, and Myllymaki, J. “*System for locating faults and estimating fault resistance in distribution networks with tapped loads*”. 1998. US Patent number 5,839,093.
- [8] F. Santos. “*Un Système Hybride Neuro-Symbolique pour l’Apprentissage Automatique Constructif*”. Tesis Doctoral. Laboratoire LEIBNIZ – IMAG / INPG, Grenoble – França., 1998
- [9] T. Mitchell. “*Machine Learning*”, McGraw Hill. USA. 1997
- [10] S. Russell, P. Norvig. “*Artificial Intelligence: A Modern Approach*” (2nd Ed.) Prentice Hall. 2002
- [11] N. Cristianini, J. Shawe-Taylor. “*An introduction to Support Vector Machines*”, Cambridge University Press. 2000
- [12] R. Das, “*Determining the Locations of Faults in Distribution Systems*”. Doctoral Thesis, University of Saskatchewan Saskatoon, Canada. 1998.
- [13] J. Mora, J. Bedoya, J. Melendez, “ Extensive Events Database Development using ATP and Matlab to Fault Location in Power Distribution Systems”. *T&D. Conference and Exposition: Latin America*, 2006. TDC '06. IEEE/PES