

# Metodología y aplicación en software para la integración de estrategias de localización de fallas paralelas en sistemas de distribución

Ganador primer lugar Premio a la Investigación y Desarrollo 2011 - Asocodis - CNO - CAC

\*Por: J. Mora-Flórez<sup>1</sup>, G. Carrillo-Caicedo<sup>2</sup>, C. Orozco-Henao<sup>1</sup>, I. Serna-Ramírez<sup>3</sup>, H. Vargas-Torres<sup>2</sup> y M. Suárez-Sánchez<sup>3</sup>

## Resumen:

En este artículo se presenta la metodología de desarrollo de la estructura para la integración de estrategias de localización de fallas paralelas en sistemas de distribución de energía eléctrica. La metodología propuesta permite el desarrollo de un software compuesto por dos tipos de estrategias diferentes utilizadas para la localización de fallas: los métodos basados en el modelo (MBM) y los métodos basados en el conocimiento (MBC).

La herramienta de software facilita la utilización de los localizadores de fallas en sistemas de distribución, ya que tiene una interface amigable y de fácil operación para el usuario, en dos modos funcionales: modo configuración y validación y el modo de operación ante una falla en el sistema real.

La metodología de integración propuesta permite el desarrollo de herramientas que posibilitan la atención efectiva del problema de localización de fallas en sistemas de distribución, manteniendo altos índices de continuidad del suministro de energía eléctrica.

**Palabras claves** — Estructura, integración, MBM's, MBC's, sistema de distribución, modelo híbrido, múltiple estimación.

## 1. Introducción:

La desregularización del sector eléctrico cambió la manera de evaluar el servicio de energía eléctrica, ya que ésta se considera un producto al cual debe ir asociada la calidad. La necesidad de determinar la calidad de la energía eléctrica, por la exigencia cada vez mayor de los usuarios, ha conducido a la definición de diversos índices que la permitan cuantificar [1].

Históricamente, la calidad se ha estudiado desde dos enfoques diferentes, la continuidad del servicio y la calidad del producto ofrecido [2]. La localización de fallas paralelas en sistemas de distribución es una temática

correspondiente a la continuidad del servicio y los índices más utilizados a nivel mundial para la cuantificación de calidad de la energía mirada desde este enfoque, han sido el SAIFI (System average interruption frequency index) y el SAIDI (System average interruption duration index). El primero relaciona la frecuencia promedio de interrupción y el segundo, la duración promedio de interrupción en el sistema. Actualmente y mediante la resolución CREG 097 de 2008, se definieron dos índices, el índice de referencia agrupado de la discontinuidad (IRAD) y el índice trimestral agrupado de la discontinuidad (ITAD). Estos índices cuantifican la continuidad del suministro de energía eléctrica, son indicadores para variar los cargos por uso.

La metodología aquí propuesta e implementada en una herramienta computacional para la localización de fallas tal como se presenta en este artículo, aborda una solución para la localización de fallas paralelas en los sistemas de distribución, a partir de un modelo híbrido basado en dos estrategias utilizadas para la localización de fallas, los métodos basados en el modelo (MBM) y los métodos basados en el conocimiento (MBC).

Los MBM son estrategias basadas en el análisis del modelo circuital del sistema en estudio [3-5]. De otra parte, los MBC son estrategias definidas como máquinas de clasificación, debido a que permiten asociar los registros de falla de una base de datos, con una zona en la cual ocurrió la falla [6], [7].

La propuesta que se presenta en este artículo muestra cómo se integran estas estrategias en una estructura que permite su aplicación en sistemas reales, de manera independiente o conjunta. La estructura propuesta se conforma por un módulo de extracción y procesamiento de la información del sistema en estudio, un módulo de caracterización de los registros de falla (descriptores de falla), un módulo de localizadores de falla (MBM y MBC) y un módulo de presentación de resultados.

1. Esta investigación fue financiada en su mayor parte por Codensa, Colciencias y el Sena en Colombia, mediante el contrato número 537-2008

## II. Descripción de la propuesta metodológica

La estructura propuesta para el desarrollo del software de localización de fallas se define desde dos perspectivas: la aplicación como herramienta de configuración y validación de los localizadores y la aplicación directa para localizar fallas en un sistema real. Estas dos perspectivas conforman la estructura general de integración y define sus modos funcionales. En la figura 1 se muestra la estructura general propuesta que integra la estrategias de localización. En los literales A y B se analiza de manera detallada cada uno de sus modos funcionales.

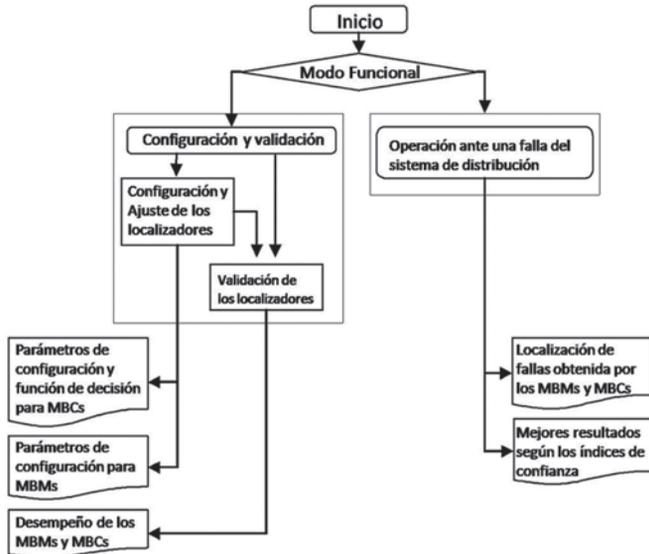


Fig. 1. Estructura general de integración, modos funcionales de la herramienta

### A. Modo funcional configuración y validación

Este modo funcional permite, a un usuario avanzado, configurar los localizadores de fallas basados en MBM y MBCs. Así mismo, permite su evaluación extensiva en un sistema de potencia. En la figura 2 se presenta la estructura general del módulo.

#### 1. Submódulo de configuración

Este sub-módulo contiene dos sub-bloques: un sub-bloque para la configuración y ajuste de MBM y un sub-bloque para la configuración y ajuste de la MBC.

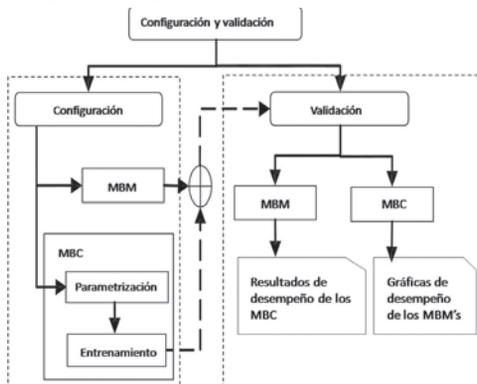


Fig. 2. Estructura para plataforma de configuración y ajuste de MBM's.

Los sistemas en estudio se modelan en el software de simulación para sistemas de potencia Alternative Transient Program (ATP) [8]. No obstante, el aplicativo de software desarrollado ofrece la opción de crear una tarjeta del sistema en estudio en ATP, a partir de información básica del sistema de potencia.

La información para el modelado del sistema se almacena en una base de datos de Excel®, la cual está dividida en dos archivos. El primero contiene toda la información correspondiente a las líneas y el segundo contiene la información de las cargas. Adicionalmente, el archivo de cargas también contiene los parámetros de ajuste para los modelos de carga que se utilice el software ATP, ya sean éstos de impedancia constante, potencia constante o corriente constante o combinaciones de los mismos [9]. El resultado del modelado a partir de los datos básicos de la línea es una tarjeta de ATP del circuito a analizar. Esta tarjeta es necesaria para la configuración de las metodologías MBM's.

La configuración de los MBM's considera la lectura, el ordenamiento y el procesamiento de la información del sistema modelado. Este proceso se realiza por medio de una plataforma de manejo de datos que permite extraer la información de la tarjeta generada por ATP, ordenarla en una estructura en XML y procesarla en el software de programación Matlab®, para obtener un conjunto de subsistemas equivalentes que permitan aplicar fácilmente los MBM [10]. La fig. 3 muestra la estructura de esta plataforma, la cual genera un archivo \*.mat que contiene la topología y los parámetros del sistema en estudio.

De otra parte, la configuración y ajuste de la MBC es un poco más compleja que para los MBM. Para este caso de aplicación, se utiliza una metodología de clasificación llamada máquinas de soporte vectorial (SVM), para la cual su configuración y ajuste se determina en dos etapas comúnmente conocidas como parametrización y entrenamiento.

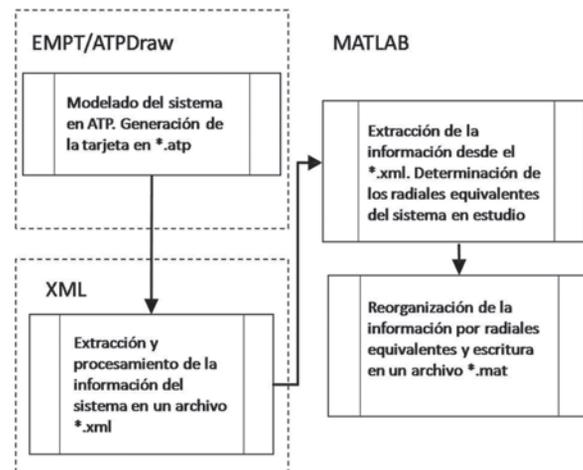


Fig. 3. Estructura genérica para plataforma de configuración de los MBM's

La primera etapa consiste en la búsqueda de los parámetros óptimos para el ajuste de la SVM, por medio de una técnica de optimización conocida como el algoritmo genético de Chu Beasley (AGCB) [7]. Estos son, el parámetro de penalización C y un parámetro de Kernel de base radial y.

La etapa de entrenamiento permite determinar las funciones de decisión para la SVM, utilizando los parámetros óptimos de ajuste determinados en la etapa de parametrización. Estas funciones son compuestas por vectores de decisión que permiten la clasificación de nuevos datos. El algoritmo general para la configuración de la MBC se muestra en la fig. 4.

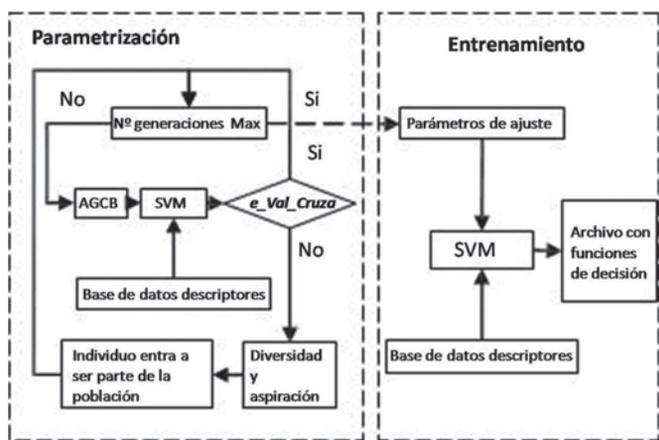


Fig. 4. Estructura genérica para configuración de MBC.

## 2. Validación de metodologías

El sub-módulo de validación se diseñó con el fin de evaluar el desempeño de los localizadores de fallas e el sistema en estudio. Este sub-módulo lo conforman tres sub-bloques: un sub-bloque de ingreso de información general, un sub-bloque de ejecución de los localizadores de fallas y un sub-bloque de visualización de resultados. En la fig. 5 se muestra la estructura general del sub-módulo de validación.

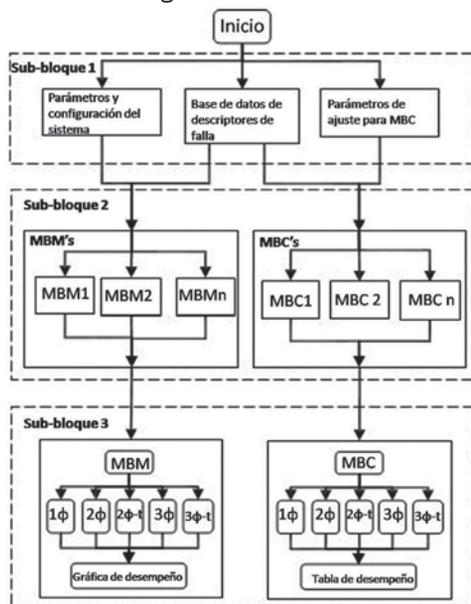


Fig. 5. Estructura general del sub-módulo de validación y ajuste.

En el sub-bloque de ingreso de información general se lee y procesa tres tipos de información: a) La información de los parámetros de configuración del sistema necesarios para la configuración de los MBM, que se obtiene en la fase de configuración y ajuste; b) La base de datos de descriptores de fallas, que corresponde a una base de datos de fallas simuladas en algunos o todos los nodos del sistema a diferentes condiciones de carga y resistencias de falla; y c) La información sobre la configuración y ajuste de la MBC dados por las funciones de decisión y parámetros de ajuste obtenidos en la etapa de parametrización y entrenamiento.

En validación, los resultados de localización de la falla entregados la estrategia basada en MBM son dos tipos de curvas de desempeño; la primera es una curva de error relativo contra distancia real a la falla, la segunda es una curva de error absoluto contra distancia real a la falla. Las ecuaciones (1) y (2) corresponden al cálculo del error relativo y el error absoluto, respectivamente.

$$error_{relativo} = \frac{|d_{estimada} - d_{real}|}{d_{real}} \quad (1)$$

$$error_{absoluto} = \frac{|d_{estimada} - d_{real}|}{d_{total}} \quad (2)$$

Donde,

- $d_{estimada}$ : Distancia estimada al punto en falla
- $d_{real}$ : Distancia real al punto de falla
- $d_{total}$ : Distancia total del radial equivalente donde ocurrió la falla.

Los resultados de validación para la estrategia MBC, son presentados en tablas de desempeño o matrices de confusión, las cuales se obtienen por cada tipo de falla. La información almacenada en las tablas es el tipo de falla, la combinación de descripciones utilizada y el porcentaje de acierto.

## B. Modo funcional operación ante una falla en el sistema de distribución

Este modo funcional se diseñó para aplicar fácilmente los localizadores de fallas instalados en una subestación de distribución. Este modo permite la localización de una falla a partir de un registro de falla real almacenado en un relé. Como se muestra en la figura 6, la estructura del modo está compuesta por cuatro sub-bloques: un sub-bloque de ingreso de información, un sub-bloque de lectura, procesamiento y generación de descriptores de falla, un sub-bloque de ejecución de estrategias de localización de falla y por último, el sub-bloque de ordenamiento y visualización de resultados.

El programa integrador de las estrategias de localización requiere de tres tipos de información: la configuración

de los MBM y MBC y ajuste de las metodologías, la información georeferenciada del sistema para visualización en Google Earth® y el registro de falla que se desea localizar. La información para la configuración y ajuste de los localizadores es la misma que se utiliza para el modo funcional validación de metodologías. El software está diseñado para leer los registros de falla generados por relés de sobrecorriente marca SEL, aunque también admite el ingreso de los descriptores de la falla directamente.

Los resultados de localización se presentan de manera individual para cada estrategia, en una plataforma de visualización. A su vez, se presenta una solución global que se determina por medio del procesamiento e intersección de los resultados de ambas estrategias. Este resultado junto con el sistema en estudio, se imprime en la plataforma de Google Earth® por medio de sus coordenadas georeferenciadas, para ofrecer una mejor indicación de la localización de la falla al equipo de mantenimiento que está en campo.

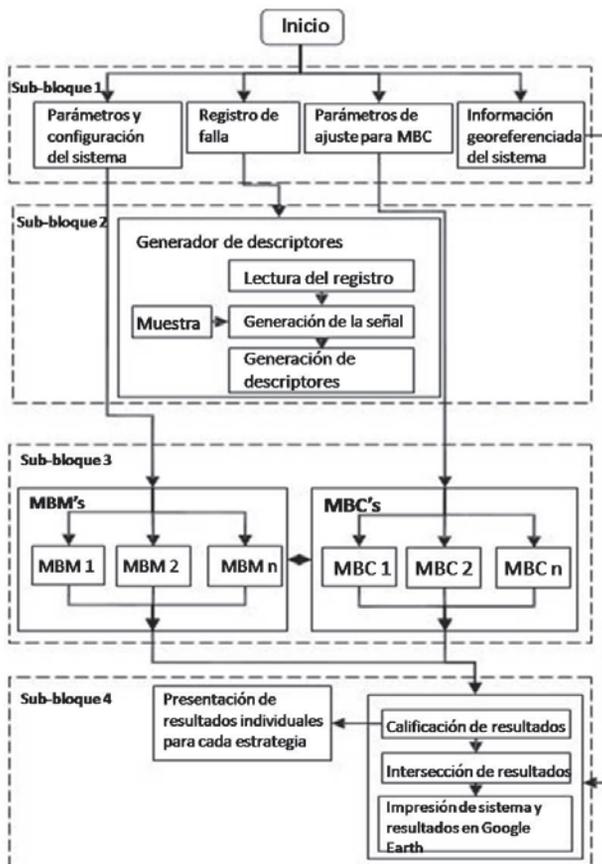


Fig. 6. Estructura general del modo funcional operación de red.

### III. Aplicación de la metodología propuesta en un circuito prototipo real

La metodología propuesta para la integración de estrategias de localización de fallas se materializa en el software FLOAT (Fault Location Analysis Toolbox), que facilita el desarrollo

de las tareas de sus módulos funcionales de configuración y de operación ante falla del sistema de distribución.

El sistema real seleccionado para la aplicación de la metodología propuesta es un circuito de la empresa Codensa S.A. E.S.P., conocido como Albán. Este es alimentador de 34.5 kV y aproximadamente 31 km de longitud de su ramal más largo, ubicado en la zona rural de Cundinamarca, hacia la región de La Vega en Colombia. Para propósito de prueba, el circuito se modela en ATPDraw, donde se simulan fallas monofásicas, bifásicas y trifásicas, sobre un rango de resistencias de falla de 0 Ω a 40Ω. La fig. 7 muestra el circuito de prueba en el entorno del ATPDraw.

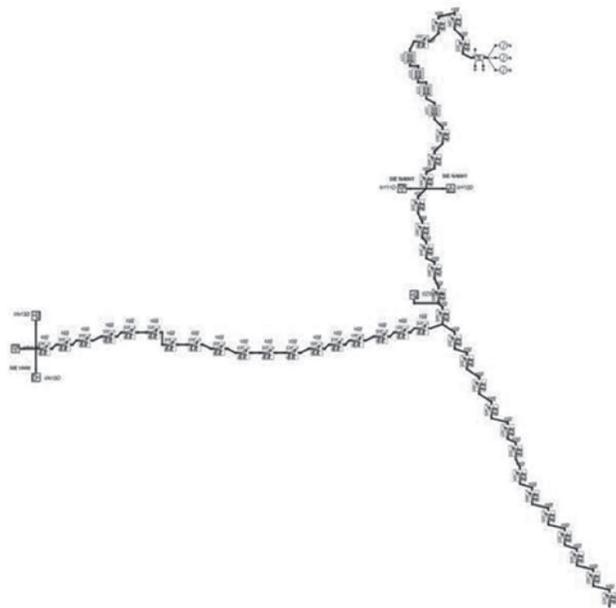


Fig. 7. Circuito Alban de Codensa editado en el entorno de ATPDraw.

La validación de la metodología propuesta se realiza en a partir del análisis de sus modos funcionales. En la fig. 8 se muestra el ambiente de la interface principal de la plataforma computacional, desde la cual se tiene acceso a los modos funcionales “configuración y validación” y “operación ante falla del sistema de distribución”.

A. Modo funcional de configuración y validación Este modo funcional permite realizar el ajuste, configuración y validación de las metodologías utilizadas por el software para la localización de fallas. Este ajuste es único para cada sistema en estudio y por lo tanto, se debe realizar cada vez que se apliquen las metodologías de localización de fallas a un nuevo sistema. Este modo se compone por dos etapas, una etapa de configuración de metodologías y una etapa de validación.

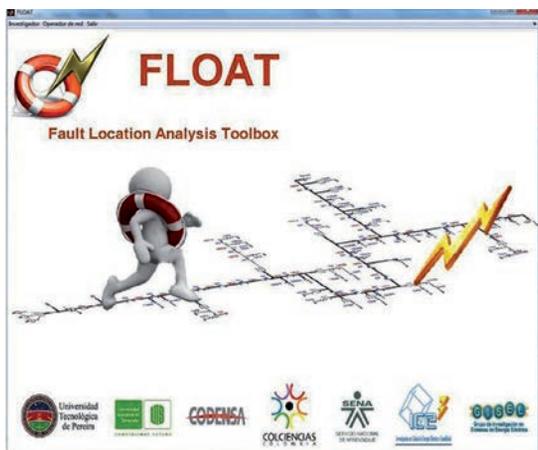


Fig. 8. Ambiente gráfico principal de FLOAT.

### 1. Configuración

A partir del modelado del sistema en estudio en ATPDraw como se muestra en la figura 8, u obtener el modelo circuital del sistema a través del sub-módulo de modelamiento del software, se obtiene la tarjeta generada por ATP con la información del sistema. Con la tarjeta del sistema generada en ATP y la base de datos de descriptores de falla se realiza la configuración de los MBM y MBC. La configuración para ambas estrategias se realiza para todos los tipos de fallas, monofásicas a tierra, bifásicas, bifásicas a tierra, trifásicas y trifásicas a tierra, con resistencias de falla entre 0 y 40 Ω.

### Configuración de las estrategias basadas en MBM

La configuración y ajuste de los MBM consiste en la ejecución de la plataforma de extracción, ordenamiento y procesamiento de información, que se encuentra en el sub-módulo de configuración. La información que genera esta plataforma se almacena en un archivo de extensión \*.mat y contiene la información de los subsistemas equivalentes que posee el sistema en estudio. Para el caso específico del circuito Alban, parte de la información de configuración de los MBMs se presenta en la Tabla I. Además de esta información, la configuración de los MBM's, cuenta con tres estructuras, más: una estructura adicional donde se almacena la información correspondiente a las líneas, una estructura que contiene la información de las cargas y una estructura que contiene la información de los ramales que se derivan del subsistema equivalente. Las Tablas II, III y IV ilustran a manera de ejemplo como se almacena la información en cada estructura, para el caso del sistema bajo estudio.

La información presentada en la tablas I a IV posibilita la aplicación de las metodologías MBM's, debido a que éstas permitan la localización un punto de falla por cada parte del circuito, por lo tanto, pueden ser aplicadas a cada ramal equivalente de manera independiente. Finalmente, la configuración para los MBM no depende del tipo de falla, como si ocurre para el caso de las estrategias MBC1

### Configuración de las estrategias MBC

TABLA I. INFORMACION DEL DE LOS NODOS QUE CONFORMAN EL CIRCUITO ALBÁN, PARA CONFIGURACIÓN DE LOS MBM.

Subsistema 1	Subsistema 2	Subsistema 3	.....	Subsistema 5
'N171' 'N172' 171	'N183' 'N184' 183	'N185' 'N186' 185		'N290' 'N291' 290
'N170' 'N171' 170	'N182' 'N183' 182	'N140' 'N185' 184		'N289' 'N290' 289
'N169' 'N170' 169	'N181' 'N182' 181	'N139' 'N140' 139		'N288' 'N289' 288
'N168' 'N169' 168	'N180' 'N181' 180	'N138' 'N139' 138		'N287' 'N288' 287
'N167' 'N168' 167	'N179' 'N180' 179	'N137' 'N138' 137		'N286' 'N287' 286
.....	.....	.....	.....	.....
'N012' 'N013' 12	'N012' 'N013' 12	'N012' 'N013' 12		'N012' 'N013' 12
'N011' 'N012' 11	'N011' 'N012' 11	'N011' 'N012' 11		'N011' 'N012' 11
'N010' 'N011' 10	'N010' 'N011' 10	'N010' 'N011' 10		'N010' 'N011' 10
'N009' 'N010' 9	'N009' 'N010' 9	'N009' 'N010' 9		'N009' 'N010' 9
'N008' 'N009' 8	'N008' 'N009' 8	'N008' 'N009' 8		'N008' 'N009' 8
'N007' 'N008' 7	'N007' 'N008' 7	'N007' 'N008' 7		'N007' 'N008' 7
'N006' 'N007' 6	'N006' 'N007' 6	'N006' 'N007' 6		'N006' 'N007' 6
'N005' 'N006' 5	'N005' 'N006' 5	'N005' 'N006' 5		'N005' 'N006' 5
'N004' 'N005' 4	'N004' 'N005' 4	'N004' 'N005' 4		'N004' 'N005' 4
'N003' 'N004' 3	'N003' 'N004' 3	'N003' 'N004' 3		'N003' 'N004' 3
'N002' 'N003' 2	'N002' 'N003' 2	'N002' 'N003' 2		'N002' 'N003' 2
'N001' 'N002' 1	'N001' 'N002' 1	'N001' 'N002' 1		'N001' 'N002' 1

TABLA II. ESTRUCTURA PARA ALMACENAMIENTO DE LA INFORMACIÓN DE LÍNEAS

Línea	Tipo	Longitud [km]	Matriz de impedancia de línea [ohms]		
2	"Trifásica"	0,250309	0.06031 - 0.24881i	0.00238 - 0.01258i	0.00228 - 0.01239i
			0.00231 - 0.01258i	0.06021 - 0.24899i	0.00238 - 0.01258i
			0.00228 - 0.01239i	0.00238 - 0.01258i	0.06030 - 0.24881i
124	"Trifásica"	0,067023	0.34661 - 0.89231i	0.05716 - 0.50671i	0.05719 - 0.46399i
			0.05716 - 0.50671i	0.34654 - 0.89238i	0.05716 - 0.50671i
			0.05719 - 0.46399i	0.05716 - 0.50671i	0.34661 - 0.89231i

TABLA III. ESTRUCTURA PARA ALMACENAMIENTO DE INFORMACIÓN DE CARGAS

Nodo	Matriz de admitancia de la carga		
'N184'	0.00019 - 0.000104i	-9.7547e-05 + 5.1934e-05i	-9.7547e-05 + 5.193364e-05i
	-9.7547e-05 + 5.193364e-05i	0.00019 - 0.000104i	-9.7547e-05 + 5.193364e-05i
	-9.7547e-05 + 5.193364e-05i	-9.7547e-05 + 5.193364e-05i	0.00019 - 0.000104i
'N114'	0.00042 - 0.00019i	-0.00021 + 9.4869e-05i	-0.00021 + 9.4869e-05i
	-0.00021 + 9.4869e-05i	0.00042 - 0.00019i	-0.00021 + 9.4869e-05i
	-0.00021 + 9.4869e-05i	-0.00021 + 9.4869e-05i	0.00042 - 0.00019i

TABLA IV. ESTRUCTURA PARA ALMACENAMIENTO DE INFORMACIÓN RAMALES DERIVADOR DEL SUBSISTEMA

Subsistema	Nodo	Tipo	Admitancia equivalente del ramal que se deriva del Nodo		
1	'N140'	Trifásico	1.6762e-09 + 3.622e-05i	-7.9234e-10 - 1.1707e-05i	-3.59145e-10 - 7.3187e-06i
			-7.9234e-10 - 1.1707e-05i	1.9267e-09 + 3.8411e-05i	-7.9234e-10 - 1.1707e-05i
			-3.59145e-10 - 7.3187e-06i	-7.9234e-10 - 1.1707e-05i	1.68039e-09 + 3.622e-05i
5	'N185'	Trifásico	1.4301e-16 + 1.7475e-07i	-6.692e-17 - 5.6116e-08i	-3.112e-17 - 3.5528e-08i
			-6.692e-17 - 5.6116e-08i	1.6343e-16 + 1.848e-07i	-6.692e-17 - 5.6116e-08i
			-3.112e-17 - 3.5528e-08i	-6.692e-17 - 5.6116e-08i	1.4301e-16 + 1.748e-07i

La configuración de la estrategia MBC presenta dos fases: parametrización y entrenamiento. Para la parametrización se debe realizar un paso previo, el cual consiste en la zonificación del sistema.

La zonificación se realiza distribuyendo el sistema por zonas y etiquetando cada nodo con la zona a la que

pertenece. Esta división cumple un papel fundamental en la configuración de la estrategia MBC, ya que define la precisión de la metodología al igual que el número de máquinas de soporte vectorial a configurar.

Además, la localización de la falla se obtiene en función de la zona en falla, por lo tanto, si se seleccionan zonas muy extensas, la localización realizada por la MBC no resulta un aporte significativo para el operador de red, debido a que la región determinada en falla podría ser muy extensa. Para el caso del circuito prototipo seleccionado en este documento, Albán se dividió en 20 zonas procurando que la longitud del alimentador en cada zona no sea mayor a dos kilómetros.

Después de realizar la zonificación del sistema inicia la fase parametrización. Para la búsqueda de los mejores parámetros se usa el algoritmo genético de Chu Beasley. Los mejores parámetros que se obtienen en la fase de parametrización para el circuito Albán se muestran en la Tabla V.

Después de estimar los parámetros de ajuste para la MBC, se realiza la fase de entrenamiento. Los resultados que se obtienen en esta etapa son los vectores de decisión para cada combinación de descriptores utilizada.

**Validación de estrategias de localización de fallas**

El aplicativo de software FLOAT facilita la validación de las estrategias utilizadas para localización de fallas en cada sistema de potencia en estudio. Esta opción se implementó dentro de la metodología, con el fin de realizar un análisis más exhaustivo del comportamiento de la estrategia de localización ante un conjunto de fallas, ya sean éstas simuladas o de una base de datos real. Como resultado de la validación, se obtienen las gráficas

TABLA V. INFORMACIÓN DE ,LOS PARÁMETROS OBTENIDOS PARA LA MBC EN EL CASO DEL CIRCUITO ALBÁN

Tipo de fallas	Combinación de descriptores	Mejores parámetros	
		C	γ
Fase A- Tierra	$\Delta V \Delta \theta V \Delta \theta I$	118367.35	2.1931
	$\Delta I \Delta \theta V \Delta \theta I$	61428.57	2.8383
Fase B- Tierra	$\Delta V \Delta I \Delta \theta V \Delta \theta I$	981632.65	0.0962
	$\Delta V \Delta \theta V \Delta \theta I$	26530.61	1.6286
Fase C- Tierra	$\Delta I \Delta \theta V \Delta \theta I$	6877.55	1.8705
	$\Delta V \Delta I \Delta \theta V \Delta \theta I$	96326.53	2.1125
Fase AB (AB-Tierra)	$\Delta V \Delta \theta V \Delta \theta I$	595918.36	7.6773
	$\Delta I \Delta \theta V \Delta \theta I$	57755.10	2.3544
Fase BC (BC- Tierra)	$\Delta V \Delta I \Delta \theta V \Delta \theta I$	32040.81	2.2738
	$\Delta V \Delta \theta V \Delta \theta I$	779591.83	5.7417
Fase CA (CA- Tierra)	$\Delta I \Delta \theta V \Delta \theta I$	797959.18	7.8386
	$\Delta V \Delta I \Delta \theta V \Delta \theta I$	669387.75	1.9512
Fase ABC (ABC- Tierra)	$\Delta V \Delta \theta V \Delta \theta I$	779591.83	4.5320
	$\Delta I \Delta \theta V \Delta \theta I$	834693.87	3.7255
Fase A- Tierra	$\Delta V \Delta I \Delta \theta V \Delta \theta I$	742857.14	2.5964
	$\Delta V \Delta \theta V \Delta \theta I$	797959.18	4.2900
Fase B- Tierra	$\Delta I \Delta \theta V \Delta \theta I$	559183.67	7.3547
	$\Delta V \Delta I \Delta \theta V \Delta \theta I$	1000000.00	6.2256
Fase C- Tierra	$\Delta V \Delta \theta V \Delta \theta I$	85306.12	0.9027
	$\Delta I \Delta \theta V \Delta \theta I$	5040.81	3.3222
Fase AB (AB-Tierra)	$\Delta V \Delta I \Delta \theta V \Delta \theta I$	981632.65	0.3822

de error relativo y error absoluto de los MBM, las cuales permiten evaluar como es el comportamiento de las estrategias de localización en cualquier tramo del sistema y de esta manera, identificar posibles falencias de los localizadores y/o cuales son las áreas en las que tiene mayor confianza de la localización de una falla. Para el caso particular del circuito Albán, y a manera de ejemplo de aplicación de las estrategias de localización de fallas, se utilizan el método propuesto en [7] para validar el circuito con un MBC y el propuesto en [13] para validar el circuito con un MBM. Los resultados se presentan en un entorno gráfico como el de la Fig. 9, el cual muestra las curvas de error relativo y absoluto para determinar el desempeño para el MBM, y una tabla con un resumen de los resultados de la validación realizada con el MBC.

En la figura 10 se muestran, de manera más detallada, las curvas de error relativo y absoluto, que permiten determinar el desempeño, para la falla monofásica en el circuito Albán. El comportamiento del error relativo es bueno, y su mayor valor es de 13%, el cual es más grande, si se compara con curvas similares para los otros tipos de fallas. La segunda curva representa el error absoluto y su valor máximo se presenta también en caso de la falla monofásica (12.6%). El error máximo para los otros tipos de fallas es de 4.6%. En la Tabla 6 se muestra de manera detallada, el resumen de

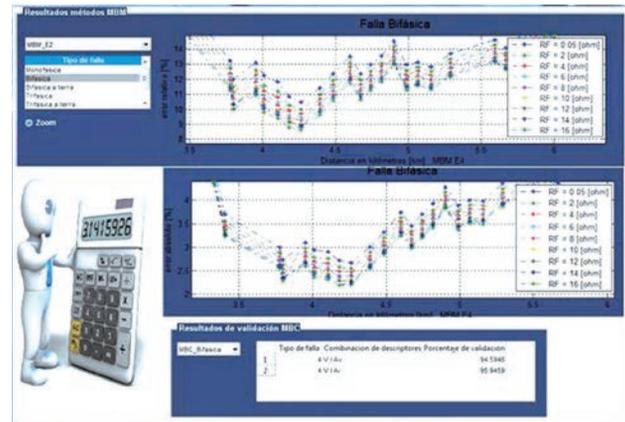


Fig. 9. Entorno gráfico para visualización de resultados.

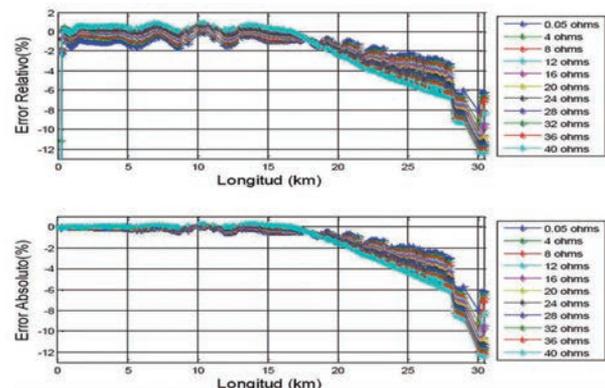


Fig. 10. Curvas de desempeño, falla monofásica.

los resultados de la validación realizada con la MBC sobre el circuito Albán, para cada uno de los tipos de fallas paralelas. Esta tabla permite observar un elevado desempeño para la localización de fallas para todos los tipos de fallas y utilizando como entrada varias combinaciones de descriptores, ya que su precisión de acierto está por encima del 80% (de cada 100 fallas evaluadas, 80 se localizan adecuadamente) para el peor de los casos. A su vez, se puede observar que la falla que mejor se localiza es la tipo monofásica, la cual según la experiencia y la literatura especializada, es la más frecuente y a la vez la más difícil de localizar.

TABLA VI. RESULTADOS DE VALIDACIÓN DE LA ESTRATEGIA MBC PARA CIRCUITO ALBÁN

Tipo de fallas	Combinación de descriptores	Precisión (%)
Fase A- Tierra	$\Delta V \Delta \theta V \Delta \theta I$	89.28
	$\Delta I \Delta \theta V \Delta \theta I$	96.60
	$\Delta V \Delta I \Delta \theta V \Delta \theta I$	92.85
Fase B- Tierra	$\Delta V \Delta \theta V \Delta \theta I$	100.00
	$\Delta I \Delta \theta V \Delta \theta I$	100.00
	$\Delta V \Delta I \Delta \theta V \Delta \theta I$	100.00
Fase C- Tierra	$\Delta V \Delta \theta V \Delta \theta I$	92.08
	$\Delta I \Delta \theta V \Delta \theta I$	99.79
	$\Delta V \Delta I \Delta \theta V \Delta \theta I$	92.29
Fase AB (AB-Tierra)	$\Delta V \Delta \theta V \Delta \theta I$	100
	$\Delta I \Delta \theta V \Delta \theta I$	96.04
	$\Delta V \Delta I \Delta \theta V \Delta \theta I$	100
Fase BC (BC- Tierra)	$\Delta V \Delta \theta V \Delta \theta I$	87.50
	$\Delta I \Delta \theta V \Delta \theta I$	87.50
	$\Delta V \Delta I \Delta \theta V \Delta \theta I$	87.50
Fase CA (CA- Tierra)	$\Delta V \Delta \theta V \Delta \theta I$	92.08
	$\Delta I \Delta \theta V \Delta \theta I$	89.58
	$\Delta V \Delta I \Delta \theta V \Delta \theta I$	91.66
Fase ABC (ABC- Tierra)	$\Delta V \Delta \theta V \Delta \theta I$	87.30
	$\Delta I \Delta \theta V \Delta \theta I$	89.94
	$\Delta V \Delta I \Delta \theta V \Delta \theta I$	80.42

El modo de operación ante una falla real en el sistema de potencia permite al usuario, localizar una falla a partir de un registro real entregado por el relé de la subestación que haya operado. Al igual que para el modo funcional de configuración y validación, el software que implementa la metodología propuesta, permite visualizar los resultados obtenidos con cada estrategia de localización por medio de un ambiente gráfico individual como se muestra en la fig. 11. Los resultados mostrados en la fig. 11, corresponden a la localización de una falla a partir de las señales de tensión y

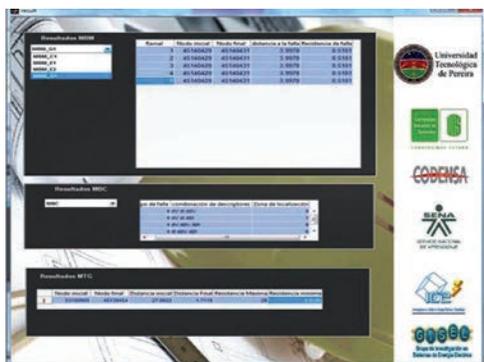


Fig. 11. Entorno gráfico para visualización de resultados en el modo funcional de operación ante falla en el sistema de distribución.

corriente reales registradas en el circuito Alban. La falla bajo análisis es de naturaleza bifásica y ocurrió a 3.72177 km de la subestación Villeta del circuito Albán. Su localización se realiza a 3.997 km por medio de las diferentes estrategias de localización desarrolladas e implementadas en el aplicativo de software, entre las cuales se encuentra la propuesta en [13]. Adicionalmente a los resultados en forma de texto mostrados en la Fig 11, el aplicativo de software entrega una localización en entorno gráfico, la cual se muestra por medio de la plataforma de Google Earth, tal como se muestra en la Fig. 12, para la localización de la falla bifásica sobre el circuito Albán. Para la indicación de la parte o zona del sistema identificada como bajo falla y obtenida por la estrategia

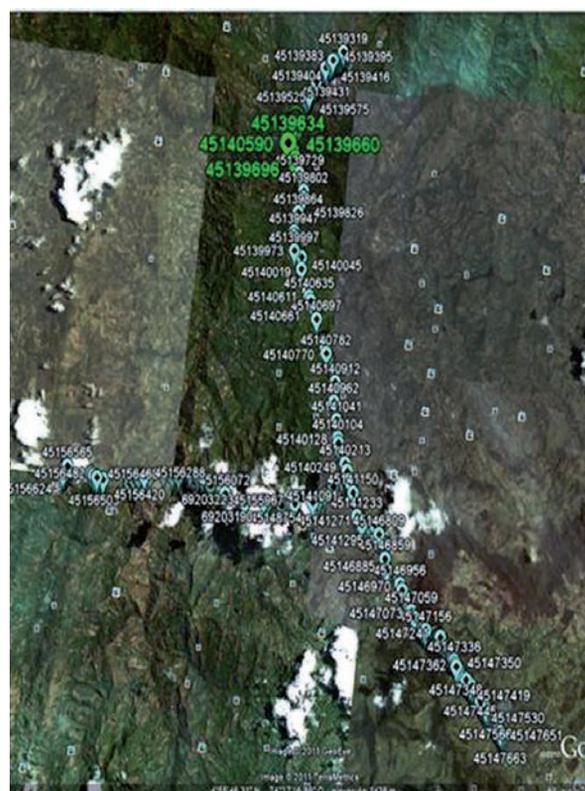


Fig. 11. Representación de un sistema eléctrico en Google Earth.

MBC, las coordenadas geográficas de las estructuras que se encuentran en esta región se imprimen en un color diferente a las del resto de las estructuras (Verde limón para este caso). Para el caso de la localización de la falla estimada por la estrategia MBM, la coordenada que coincide con la distancia a la falla obtenida se imprime en color rojo. En la fig. 12, corresponde a una ampliación de la figura 11 sobre la zona de interés, se muestra de manera clara la ubicación de una falla sobre el sistema Albán.

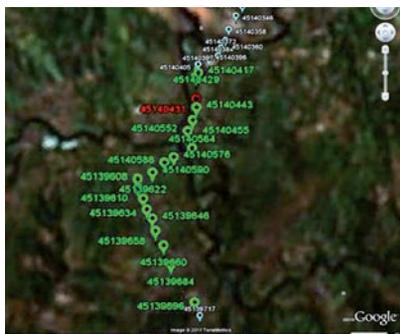


Fig. 11. Representación de un sistema eléctrico en Google Earth.

#### IV. Conclusiones y recomendaciones

La metodología de integración de las estrategias de localización de fallas, que facilitó el desarrollo estructural de un aplicativo de software, permite contar con una herramienta de fácil aplicación tanto para el ingeniero como para el operador de subestaciones. La rápida determinación de las fallas permanentes, permitirá disminuir la duración de las interrupciones, mientras que la continua monitorización y determinación de las permanentes y transitorias, permite determinar las debilidades del sistema, y de esa forma fortalecer la red para que la ocurrencia de fallas sea cada vez menor. Adicionalmente, y como consecuencia de las acciones operativas posteriores a la determinación de la falla (conmutación de seccionadores), es posible reducir el área afectada y restablecer prontamente zonas aledañas, sin que la pérdida transitoria del servicio alcance a ser contabilizada como interrupción. Lo anterior impacta directamente a los índices ITAD e IRADV.

#### V. Reconocimientos

Los autores del artículo reconocen la contribución de todos los estudiantes de maestría y de pregrado en Ingeniería Eléctrica, tanto de la Universidad Tecnológica de Pereira, como de la Universidad Industrial de Santander, quienes contribuyeron en el desarrollo de herramientas y de estrategias de localización de fallas. También se agradece de forma especial, la invaluable colaboración de los ingenieros A. Escobar, H. Salazar, D. Rodas, G. Ordóñez y C. Ríos, profesores del área de ingeniería eléctrica por su invaluable labor como asesores del proyectador.

Finalmente, los autores desean expresar sus agradecimientos especiales para las dos instituciones de educación superior antes mencionadas, por apoyar este tipo de proyectos y brindar los medios logísticos necesarios para la realización del proyecto.

#### VI. Referencias

[1]. Philipson L, Lee Willis H, "Understanding electric utilities and deregulations". CRC Press. 2 Edition. ISBN. 9780824727734, 2005.

[2]. Dugan R. McGranaghan M. "Electrical Power Systems Quality". McGraw-hillcompanies. 2 Edition. ISBN 007138622X, Copyright © 2004.

[3]. Girgis A, Fallon C, Lubkerman R. "A fault location technique for rural distribution feeders" IEEE Transactions on Industry and Applications. Vol 26, ISSN 0093-9994, 1993. Pages 1170-1175.

[4]. Novosel D., Hart D., Myllymaki J. "System for locating faults and estimating fault resistance in distribution networks with tapped loads". 1998. US Patent number 5,839,093.

[5]. Mora-Flórez J. "Elimination of Multiple Estimation for Fault Location in Radial Power Systems by Using Fundamental Single-End Measurements". IEEE Transactions on power delivery, Vol. 24, No. 3, ISBN 0885- 8977, July 2009.

[6]. Zapata A. "Desarrollo de un método híbrido de localización de fallas en sistemas de distribución, utilizando una técnica de clasificación basada en k-nn y la estimación de la impedancia de falla". Proyecto de grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniero Electricista. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. 2010

[7]. Gutierrez J. Mora-Flórez J, Perez-Londoño S. "Strategy based on genetic algorithms for an optimal adjust of a support vector machine used for locating faults in power distribution systems" Revista facultad de ingenierias, Universidad de Antioquia N.º 53 pp. 174-184. Junio, 2010

[8]. ATP(2002) "Alternative transient program rulebook". Comité Argentino de Usuarios del EMTP/ATP\_CAUE. 2002.

[9]. Dubé L. Bonfanti I. "MODELS: A new simulation tool in the EMTP", European Transactions on Electrical Power Engineering, Vol. 2, no. 1, pp. 45-50, Jan/Feb 1992.

[10]. Bedoya A. "Desarrollo de un modelo para intercambio de datos entre ATP y Matlab aplicado al problema de localización de fallas en sistemas eléctricos de distribución". Proyecto de grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniero Electricista. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, 2010.

[11]. Pérez-Hernández L. Mora-Flórez J, Perez-Londoño S. "Design of an efficient and automated fault simulation tool applied to electric power systems" Dyna, Año 77, Nro. 164, pp. 178188. ISSN 00127353. Medellín, Diciembre de 2010.

[12]. IEEE Distribution System Analysis Subcommittee "Radial Test Feeders". 2000. <http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/sacom/testfeeders.html>.

[13]. Mora-Flórez, J., Meléndez, J., Carrillo-Caicedo, G. "Comparison of impedance based fault location methods for power distribution systems". Electric Power Systems Research. Vol. 78, issue 4, 2008, pp. 657 - 666.

<sup>1,2</sup>Programa de ingeniería eléctrica, <sup>3</sup>Profesional Dpto. zona centro Universidad Tecnológica de Pereira, <sup>2</sup>Universidad Industrial de Santander, <sup>3</sup>Codensa Pereira, <sup>2</sup>Bucaramanga, <sup>3</sup>Bogotá - Colombias  
 jjmora@utp.edu.co, gilberto@uis.edu.co,  
 corozcoh@utp.edu.co, iserna@ius.edu.co,  
 hrvargas@uis.edu.co, msuarez@endesacolombia.com.co  
 (6) 3213492 - 300 678 59 32

# Autonics

## Sensores y Controladores

### Sensores de Proximidad

Autonics diseña y crea desde hace más de 10 años las mejores alternativas en sensores de proximidad, convirtiéndose en líder de los procesos industriales que requieren funcionalidad para su aplicación y montaje.

Como resultado; una excelente combinación de tecnología y alto desempeño que le permiten obtener:

- ❖ Alto rendimiento, velocidad de respuesta y mejora en la calidad de detección
- ❖ Variedad en la detección de materiales como metales, plástico, agua, piedra, madera entre otros.
- ❖ Inmunidad frente ambientes adversos (Grados de protección IP66 e IP67)
- ❖ Protección contra polaridad inversa
- ❖ Protección contra sobre corriente
- ❖ Estabilidad, precisión y confiabilidad
- ❖ Fácil ajuste de sensibilidad (Consulte modelos)
- ❖ Larga vida útil
- ❖ Reducción tiempos de mantenimiento

#### Modelos Disponibles

- Capacitivos - Inductivos
- Salientes - Rasantes
- Cilíndricos - Rectangulares
- Cableados - Tipo Conector (Cables 3 hilos DC/ 2hilos DC/ 2 hilos AC)
- Tipos de salida seleccionables de acuerdo al modelo



Siganos en  [www.facebook.com/electricasbogota](http://www.facebook.com/electricasbogota)  @electricasbta



**ELECTRICAS BOGOTA LTDA.**  
MUEVE LAS INDUSTRIAS

**ELECTRICAS BC**  
Move the Industries

Carrera 12 No. 16-73 (Punto de venta) PBX: 3365411 Fax: 2433124  
[www.electricasbogota.com](http://www.electricasbogota.com) E-mail: [mostrador@electricasbogota.com](mailto:mostrador@electricasbogota.com)  
Bogotá D.C. Colombia, Sur América.

10800 NW 21 Street Unidad 160, 33172, Miami FL. U.S.A  
Tel: 305-4772586 305-4775553 Fax: 305 - 4775535  
[www.electricasbc.com](http://www.electricasbc.com) [sales@electricasbc.com](mailto:sales@electricasbc.com)