

## **MÉTODO HÍBRIDO BASADO EN LA ESTRUCTURA DE AGENTES PARA LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

### **RESUMEN**

Los métodos basados en el modelo (MBM), utilizados para localización de fallas en sistemas de distribución estiman la distancia de la falla a partir del fundamental de tensión y corriente, medidos en un extremo de la línea. Como desventajas generales, estos métodos requieren de un buen modelo del sistema y además tienen el problema de la múltiple estimación de la localización de la falla.

En este artículo se presenta una discusión teórica de la conformación de sistemas híbridos a partir de los diferentes tipos de conocimiento de los cuales se dispone al abordar cualquier problema real, y de la combinación de técnicas del campo de la inteligencia artificial o métodos basados en el conocimiento (MBC). A partir de la fundamentación teórica básica, y del análisis de ventajas y desventajas de cada técnica, se presenta una propuesta para abordar el problema de la localización de fallas en sistemas de distribución de energía, como alternativa híbrida basada en los MBM y MBC.

**PALABRAS CLAVES:** Localización de fallas, sistemas híbridos, sistemas de distribución

### **ABSTRACT**

*Model Based Methods (MBM), used for fault location methods in power distribution systems estimate the fault distance based on the fundamental component of single end voltages and currents. As general disadvantages there are two; first, these methods require of a good system model; and second, these methods do not avoid the multiple fault location estimation problem.*

*In this paper, a theoretical discussion about the development of hybrid systems starting from both, different types of knowledge related to a real problem, and the combination of artificial intelligent techniques or Knowledge Based Methods (KBM) is presented. Starting from the theoretical basis, and performing the analysis of disadvantages and advantages of each analyzed technique, a proposal to consider the fault location problem in power distribution systems, as a useful hybrid alternative to take advantage of both, MBM and KBM is proposed.*

**KEYWORDS:** *Fault location, hybrid systems, distribution power systems.*

## **1. INTRODUCCIÓN**

Como consecuencia del aumento en el consumo de electricidad, los sistemas eléctricos de potencia han crecido en número y longitud de las líneas de transmisión y distribución. En caso de fallas, la restauración del servicio puede ser considerablemente más rápida si puede estimar el sitio donde ésta ocurrió [1] [2].

En años recientes, resuelto el problema de localización de fallas paralelas en líneas de transmisión, la investigación se orienta a la localización de fallas en sistemas de distribución, el cual es mucho más complicado debido a su gran complejidad por la presencia de conductores no homogéneos, cargas laterales y desbalance de carga. Adicionalmente, en estos sistemas solo se cuenta con las

medidas en la subestación de distribución, para la localización de la falla y algunas veces, un modelo del sistema.

De otra parte, muchas técnicas y aplicaciones en el campo de la computación suave y la inteligencia artificial (AI), han sido desarrolladas en las últimas décadas. Cada técnica pretende aprovechar sus ventajas para la solución de los problemas reales, generalmente complejos. Sin embargo, la mayoría de investigaciones han demostrado que con la unión de algunas técnicas, se obtiene una mejor respuesta a la necesidad planteada por algún problema específico. Una primera definición de un sistema híbrido es aquel que integra dos o más técnicas diferentes [3].

### **JUAN JOSÉ MORA FLÓREZ**

Ingeniero Electricista, Ph.D.(c)  
Profesor auxiliar,  
Universidad tecnológica de Pereira  
jjmora@ohm.utp.edu.co

### **SANDRA MILENA PÉREZ LONDOÑO**

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

### **Grupo de Planeamiento de Sistemas Eléctricos – GPE**

### **JUAN CARLOS RODRÍGUEZ SUÁREZ**

Ingeniero Electricista, MSc (c)  
jcrodrig@uis.edu.co

### **Universidad Industrial de Santander.**

### **Grupo de Investigación en Sistemas Eléctricos - GISEL**

En este artículo se presenta una aproximación que utiliza tanto las medidas tomadas en la subestación, el modelo del sistema y métodos de computación suave, mediante una aproximación híbrida para la localización de fallas en sistemas de distribución.

Como contenido, en la sección 2 se presenta una descripción general de los métodos clásicos de localización de fallas; la presentación teórica de los diferentes tipos de conocimiento y de las formas de representación y aprovechamiento se realiza en la sección 3; la sección 4 presenta la fundamentación de los sistemas híbridos como alternativa para unir técnicas complementarias, buscando el mejor aprovechamiento de la información y la solución más adecuada a un problema particular. En la sección 5 se presenta la instanciación particular al problema de localización de fallas, mientras que en la sección 6 se presentan los resultados de las pruebas realizadas. Finalmente, en la sección 7 se presentan las conclusiones del trabajo.

## 2. MÉTODOS GENERALES DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS

Los métodos usados para la localización de fallas en sistemas de distribución, que usan medidas en un terminal de línea, se clasifican en dos grupos: los métodos basados en el conocimiento (MBC) y los métodos basados en el modelo (MBM) [1].

Los MBC tienen una base de conocimientos con información de los elementos de protección, estado de interruptores, registros de llamadas de los clientes afectados por las fallas, y finalmente, información proveniente del procesamiento de los registros de tensión y corriente medidos en la subestación.

Los MBM usan el valor de la componente fundamental de las señales de tensión y corriente medidas en la subestación y el modelo del sistema de potencia, para calcular la impedancia aparente vista desde la subestación hasta el sitio de falla [2].

Los métodos más documentados para los sistemas de distribución son los MBM, debido a que su implementación y operación no es tan costosa como los basados en el conocimiento. 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), son sus grandes desventajas. Así mismo, las desventajas de los MBC son su costo, debido a la gran cantidad de información que utilizan, y también que su precisión no es tan alta como la de los basados en el modelo.

Debido a lo anterior, en los últimos estudios relacionados con el problema de localización de fallas, reconocen la importancia de desarrollar técnicas híbridas para contar con las ventajas de los dos métodos, atenuando las desventajas individuales [2] [3]. .

## 3. TEORÍA BÁSICA DEL CONOCIMIENTO

La mayoría de las actividades realizadas a diario se fundamentan en la explotación de gran cantidad de información, hechos, experiencias y conocimientos. En consecuencia, una parte importante de las labores de investigación y desarrollo de esta teoría consiste en la concepción de formalismos que permiten el desarrollo de los MBC, y específicamente el estudio de las distintas maneras de definir y crear sus bases [4].

La conversión de conocimiento en un formato particular es denominada "representación de conocimientos". Una vez que el conocimiento haya sido adecuadamente representado, puede utilizarse por un MBC, que con el empleo de herramientas de análisis, tratamiento y manipulación automática pueden inducir o deducir nuevos conocimientos.

### 3.1. Clasificación del conocimiento

Numerosos estudios sobre el análisis de la información y su tratamiento como conocimiento lo clasifica en dos grandes grupos: conocimiento empírico y conocimiento teórico [4]

#### 3.1.1. Conocimientos teóricos

Modelan el saber acerca de un tema a través de una teoría correspondiente con el problema planteado. Son tratados que se desarrollan a partir del análisis de los conocimientos básicos y representan una generalización de lo empírico.

#### 3.1.2. Conocimientos empíricos

Son experimentales, ya que representan el conjunto de casos prácticos observados sobre un tema (conjunto de ejemplos). Son conocimientos puros que no se han tratado, analizado o modificado; representan los resultados de experiencias o los ejemplos de casos prácticos sin transformaciones.

En general, los conocimientos de que se dispone sobre un problema son de tipo empírico y teórico, y forman conjuntos que se intersectan o se complementan. En la mayoría de casos, los conocimientos disponibles sobre un problema en particular, no son totalmente correctos ni completos; por esta razón la información disponible debe explotarse de la mejor forma posible.

### 3.2. Representación del conocimiento con métodos simbólicos

Los métodos simbólicos permiten la representación del conocimiento teórico. Esta representación permite que un algoritmo sea capaz de operar sobre ella, y a la vez generar una representación simbólica como solución [4].

Entre los principales métodos simbólicos se encuentran los árboles de decisión, sistemas expertos, lógica difusa, sistemas basados en casos y los sistemas de base en primeros principios o basados en el modelo (MBM).

### 3.3. Representación del conocimiento con métodos conexionistas

Caracterizan la representación y la adquisición del conocimiento empírico [5]. Entre los más importantes están las redes neuronales, que es el método conexionista más popularizado.

También se encuentran algoritmos de tipo estadístico como el Algoritmo de Aprendizaje para el Análisis de Datos Multivariados (LAMDA, por su nombre en inglés). Éste es un algoritmo de clasificación multivariable que combina la capacidad de generalización de la lógica difusa y la capacidad de interpolación de los conectores de lógica híbrida. Puede realizar aprendizaje supervisado y no supervisado, modela “indistinguibilidades”, y es de fácil implementación [1][6].

Otro tipo de método conexionista más avanzado son las Máquinas de Soporte Vectorial (SVM) [7]. Debido a su utilización en este artículo, éstas se describen brevemente a continuación.

Las SVM son un algoritmo de estimación (“learning machine”) basado en procedimientos de estimación de parámetros a partir de un conjunto de datos (“Training”), el cálculo del valor de la función (“Testing”), y la evaluación de la precisión (“Performance”) [8].

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 1. La condición básica es que no existan puntos entre H1 y H2, y que la distancia entre H1 y H2 (el margen) sea máxima

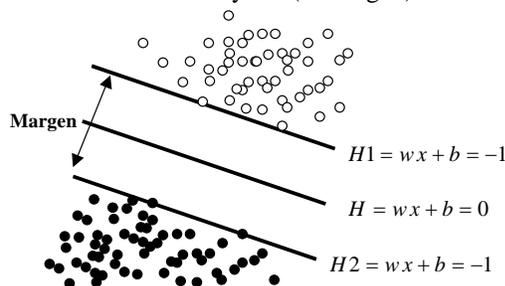


Figura 1. Hiperplanos de decisión generados por una SVM lineal

Las cantidades  $w$  y  $b$  son los parámetros que controlan la función y se denominan vector de pesos y “bias” [8]. 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 sea, 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.

Los problemas con un conjunto pequeño de datos pueden ser resueltos con cualquier paquete de optimización que resuelva programas de optimización cuadrática con restricciones lineales. Para problemas con muchos datos, se han desarrollado técnicas especiales [8].

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. La figura 2 muestra tal transformación [8].

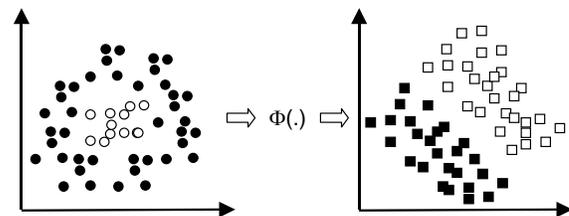


Figura 2. Una región de separación no lineal transformada en una lineal

Este nuevo espacio se define en términos de un vector en el espacio original y una función de transformación  $\Phi(\cdot)$ . No es necesario especificar la transformación  $\Phi(\cdot)$ , que la función kernel es equivalente al producto escalar en algún otro espacio.

## 4. INTEGRACIÓN DEL CONOCIMIENTO EN LOS SISTEMAS HÍBRIDOS

La mayoría de investigaciones han demostrado que se obtienen mejores respuestas ante un problema específico, mediante la unión de algunas de estas técnicas en lo que se conoce como “sistemas híbridos”. Uno de los aspectos más importantes en el diseño de un sistema híbrido es la complementación de los dos tipos de conocimiento (teórico y empírico), de los que normalmente se dispone cuando se aborda un problema [4].

Existen varias combinaciones entre métodos; la utilización de este tipo de sistemas puede tener muchas ventajas, entre ellas [5]:

- La integración de dos técnicas complementarias permite que una supla las deficiencias de la otra, de forma que pueda obtenerse un mejor desempeño
- El uso de diferentes técnicas de representación del conocimiento amplía la capacidad del sistema para recibir nueva información. Un solo método aumenta las restricciones, dificultando la solución del problema.

- Algunos sistemas complejos que no pueden ser tratados empleando una sola técnica. Deben dividirse en subproblemas para su solución, y luego tratarlos como un todo para obtener una solución global óptima.

- El procesamiento en paralelo de la información de diferentes módulos permite un sistema con mayor desempeño, más robusto y con tolerancia a fallos.

#### 4.1. Formas de integración

Existen cuatro formas de integración de técnicas claramente definidas: a) de componente simple, b) fusión-base, c) jerárquicos y d) híbridos.

##### 4.1.1. Sistemas de componente simple.

Emplean una sola técnica y buscan la forma de adaptarla para obtener la mejor solución al problema propuesto.

##### 4.1.2. Sistemas basados en fusión.

Incluyen sistemas que combinan diferentes técnicas en un modelo único de computación. Las ventajas de cada técnica empleada son aprovechadas para realizar un mapeo desde un espacio de entrada hacia uno de salida.

##### 4.1.3. Sistemas jerárquicos.

Se conforman de varios módulos y el sistema se diseña de tal forma que cada función es ejecutada por la técnica que brinde mejores resultados para el subproblema particular, en una estructura como la presentada en la figura 3. Su correcto funcionamiento depende de la operación de las partes que lo conforman; así, un posible error en una de las partes tiende a propagarse afectando el desempeño general. El sistema no tiene lazos de realimentación o de atenuación de errores y cada técnica trabaja de manera aislada

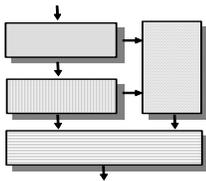


Figura 3. Esquema del sistema jerárquico

##### 4.1.4. Sistemas híbridos.

Tienen una arquitectura en la cual interaccionan todas o algunas de las técnicas empleadas como la presentada en la figura 4. La interacción permite explotar la integración de técnicas y su mutualidad. De esta forma se aprovechan las ventajas de diferentes técnicas para la solución de tareas específicas.

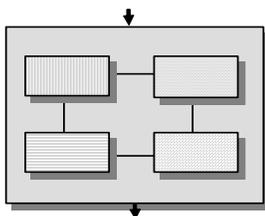


Figura 4. Esquema del sistema híbrido

## 4.2. Propuesta de arquitectura híbrida modular a partir del paradigma de agentes

La propuesta de arquitectura híbrida se fundamenta en la estructura propia de los agentes inteligentes, por considerar que estos son elementos que combinan diferentes técnicas que interactúan entre sí y con el medio externo, tal como se presenta en la figura 5 [9].

Los agentes tienen una arquitectura basada en la interacción de varios módulos con un sistema de realimentación que permite su mejor desempeño interno, así como la medición y adaptación de las acciones de acuerdo con el efecto de ellas sobre el medio.

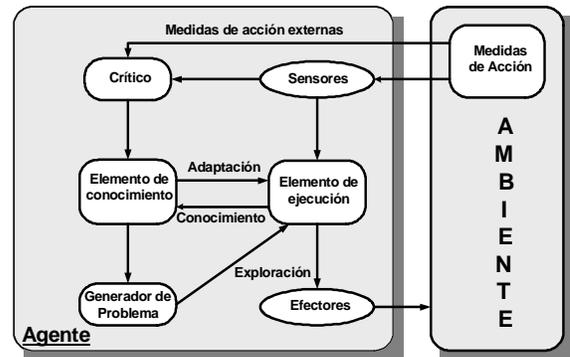


Figura 5. Arquitectura funcional de un agente.

Las partes que interactúan en la arquitectura son:

- Ambiente. En él se encuentra el proceso por controlar, el espacio de decisión por analizar o el problema de aprendizaje por resolver. Entra en contacto con el agente a través de los sensores; asimismo, los efectores se constituyen en el medio de acción del agente.
- Elemento de desempeño. Tiene el conocimiento necesario para controlar los efectores y, por tanto, las diferentes acciones sobre el ambiente.
- Elemento de aprendizaje. Actualiza el conocimiento representado en el elemento de desempeño para optimizar las acciones del agente. Tiene acceso a los estados del ambiente, a las acciones anteriores y a una señal de refuerzo inmediato de las acciones, que indica la idoneidad de la última acción sobre el medio. Después de recibir la información, el elemento de desempeño se adapta para que las futuras acciones sean más pertinentes.
- Crítico. Se encarga de transformar una señal externa de refuerzo en una interna. El problema general es que la señal externa es muy leve o puede indicar algún tipo de fallo complejo, y debe traducirse en una señal de refuerzo útil como elemento de aprendizaje, con el propósito de resolver el problema en forma adecuada. La señal de refuerzo indica cuándo una acción es o no adecuada.
- Generador del problema. Su función es contribuir a la exploración del espacio del problema. En forma abstracta, propone diferentes acciones que pueden permitir descubrir nuevas y mejores soluciones. En

muchos de los sistemas existentes esto se logra mediante la adición de ruido a la acción de salida; si el sistema aún se desempeña bien puede decidirse que no se necesita una nueva solución; en caso contrario es necesario buscar mejores alternativas para la solución del problema.

### 5. PROPUESTA DE ARQUITECTURA HÍBRIDA DE UNA SISTEMA DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS

La estructura del sistema híbrido de localización de fallas en sistemas de distribución, se fundamenta en la propuesta general basada en agentes, tal como se presenta en la figura 6.

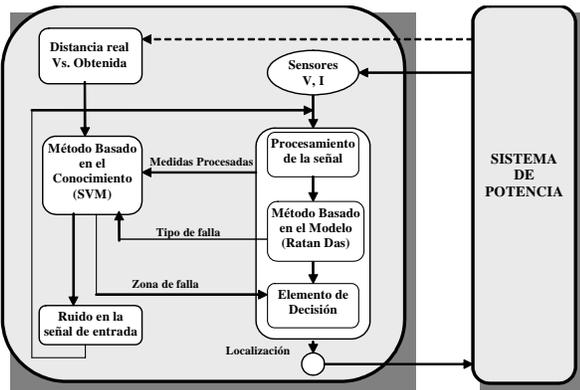


Figura 6. Sistema híbrido basado en MBC y MBC para localización de fallas

En este caso de instanciación, el crítico es solo un elemento de validación que determina la distancia real a la cual ocurrió la falla, y la distancia estimada. Esta herramienta solo debe actuar 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 métodos basados en el conocimiento (MBC) y tiene como entradas las señales preprocesadas en forma de descriptores y la señal de refuerzo del aprendizaje definida por el crítico. El elemento de conocimiento del sistema híbrido de localización de fallas son las Máquinas de Soporte Vectorial [8]. Éstas mediante el reconocimiento de características de las señales de tensión, determinan la zona de ocurrencia de la falla.

El elemento de ejecución está conformado principalmente por el método basado en el modelo (MBM). Como MBM se implementó el algoritmo de localización de fallas de Ratan Das [11], el cual basado en las medidas de tensión y corriente, encuentra el tipo de falla y la distancia probable al punto de ocurrencia del evento.

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 la salida; 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.

Dado que no se efectúa ninguna acción sobre el sistema no existe un elemento actuador propiamente dicho<sup>1</sup>. Básicamente los sensores son los transformadores de tensión y de corriente, así como los registradores de eventos existentes en las subestaciones.

### 6. PRUEBAS Y RESULTADOS

El sistema de distribución seleccionado para las pruebas de la arquitectura propuesta es el modelo de sistema de 25kV utilizado en [11]. Además, este circuito ha sido utilizado para pruebas de distintos métodos de localización de fallas, como los encontrados en [2] y [7]. El diagrama unifilar de este sistema se presenta en la figura 7.

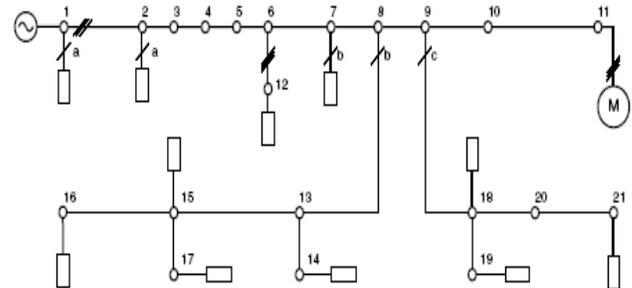


Figura 7. Diagrama unifilar del modelo del sistema de pruebas

El circuito se dividió en 6 zonas, para ubicar el punto más probable de localización de falla. Básicamente se busca discriminar la sección donde se encuentra la falla. Las zonas en que se dividió el circuito son:

- Zona 1: barras 1, 2, 3, 4
- Zona 2: barras 5, 6, 7, 12.
- Zona 3: barras 8, 9, 10, 11.
- Zona 4: barras 13, 14.
- Zona 5: barras 15, 16, 17.
- Zona 6: barras 18, 19, 20, 21.

Se realizaron pruebas para 816 fallas, incluyendo todos los nodos y los distintos tipos de fallas (monofásicas, bifásicas, bifásicas a tierra y trifásicas). La resistencia de falla osciló entre 0,05Ω y 25Ω. Para la obtención de los datos, el sistema se implementó en el Arterative Transient Program – ATP [12].

El número de aciertos en la localización fue de 768 eventos. Las fallas mal localizadas corresponden a

<sup>1</sup> Desarrollos posteriores podrán considerar alguna alternativa de acción al respecto, dado que el trabajo futuro será aplicado al desarrollo de elementos de protección para líneas de distribución

eventos en los cuales el método de localización de Ratan Das no converge a una respuesta o estima la distancia con grandes errores. Sin embargo, para este tipo de circunstancias, el sistema híbrido siempre determinará una zona probable de falla.

Algunos resultados de las pruebas realizadas se presentan en la Tabla 1. Los resultados corresponden a fallas en las cuales el MBM presenta varios puntos probables de ocurrencia del evento. El sistema híbrido encuentra una única ubicación del punto de falla. La distancia estimada corresponde al porcentaje de la longitud de la sección fallada.

Sección en falla	Tipo de falla	Distancia estimada por el MBM	Número de posibles secciones en falla	Zona dada por MBC	Porcentaje de reducción de la incertidumbre
10-11	Monofásica Fase A	2.0154	2	3	50%
8-13	Monofásica Fase B	1.8254	2	4	50%
15-16	Monofásica Fase B	0.3905	3	5	66,6%
18-20	Monofásica Fase C	2.6059	3	6	66,6%

Tabla 1. Resultados modelo híbrido de localización de fallas basado en arquitectura de agentes.

## 7. CONCLUSIONES

En este artículo se analizan las fuentes de información disponibles cuando se aborda un problema, y transformación en conocimiento del tipo empírico y teórico. Cada tipo de conocimiento se representa y utiliza con técnicas específicas, de tal forma que a partir de un análisis se determinan las ventajas y desventajas de cada representación, obteniéndose como conclusión la importancia de desarrollar técnicas híbridas para aprovechar la información completa del problema.

La estructura híbrida presentada a partir del análisis, permite la solución de problemas mediante la integración del conocimiento teórico y empírico, y por tanto se particulariza para uno de los problemas no resueltos del sector eléctrico, la localización de fallas en sistemas de distribución.

La estructura propuesta para el algoritmo híbrido, está fundamentada en un análisis teórico detallado y por lo tanto es una base fuerte para su posterior implementación y prueba, en el ámbito del problema del sector eléctrico aquí esbozado. Los resultados obtenidos hasta el momento reducen la incertidumbre de la ubicación del punto de falla.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Mora. J. "Voltage Sag Characterization and Classification for Diagnosis in Electric Power Quality Domain", Master Thesis. University of Girona, España. 2003.
- [2] Mora J., Muñoz S., Carrillo G. "Técnicas algorítmicas de localización de fallas como alternativa para reducir el efecto de las salidas en sistemas de potencia - Una revisión". III Internacional Symposium of Power Quality. IEEE Branch - Colombia, Bogotá, Nov. 2005.
- [3] Mora J., Meléndez J., Carrillo G. "Una Arquitectura Genérica para el Desarrollo de Sistemas Híbridos. Propuesta de localizador de fallas para mejorar los índices de calidad". III Internacional Symposium of Power Quality. IEEE Branch - Colombia, Bogotá, Noviembre 2005.
- [4] Santos F. "Un Système Hybride Neuro-Symbolique pour l'Apprentissage Automatique Constructif". Tesis Doctoral. Laboratoire LEIBNIZ / INPG, Grenoble - França. 1998.
- [5] Invancic F. "Modeling Análisis of Hybrid Systems". Tesis doctoral. University of Pennsylvania. 2003.
- [6] Waissman J. "Construction d'un Modele Comportemental pour la Supervision de Procedes: Application a une Station de Traitement des Eaux", Thèse, Institut National Polytechnique de Toulouse. France. 2000.
- [7] Rodríguez J., Mora J., Vargas H., Ordoñez G., Carrillo G. "Localización de Fallas en Sistemas de Distribución Mediante Máquinas de Soporte Vectorial". III Internacional Symposium of Power Quality. IEEE Branch - Colombia, Bogotá, Noviembre 2005.
- [8] Cristianini, N. Shave-Taylor, J. "An introduction to Support Vector Machines", Cambridge University Press. 2000.
- [9] Russell S., Norvig P. "Artificial Intelligence: A Modern Approach". (Second Edition) Prentice Hall. 2002.
- [10] Van Lith P. "Hybrid Fuzzy-First Principles Modeling". Doctoral these. University of Twente. Holand. 2002.
- [11] Das, R. "Determining the Locations of Faults in Distribution Systems". Tesis doctoral, University of Saskatchewan. Saskatoon, Canada. 1998.
- [12] Leuven EMTP Center (LEC), "Alternative Transients Program, ATP", Rule Book, 1987.