

REDUCCIÓN DE CARACTERÍSTICAS ASOCIADAS AL PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN.

Feature reduction associated to the fault location problem in power distribution systems

RESUMEN

Este artículo presenta la técnica de búsqueda de proyección (PP) para la reducción de la dimensionalidad de las muestras de un conjunto de variables. Se aplica esta técnica a las características extraídas de las señales de tensión y corriente medidas en la subestación de un sistema de distribución con el fin de identificar y localizar fallas usando la técnica de inteligencia artificial ANFIS.

PALABRAS CLAVES: ANFIS, búsqueda de proyección, localización de fallas, reducción de dimensionalidad.

ABSTRACT

This paper shows the projection pursuit technique (PP) to reduce the space of the samples of a set of variables. This technique is applied to the extracted features of the current and voltage signal measured from the utility in order to identify and locate faults using the artificial intelligence technique ANFIS.

KEYWORDS: ANFIS, projection pursuit, fault location, space reduction.

LUCAS PAÚL PÉREZ HERNÁNDEZ

Ingeniero Electricista, M.Sc. (c)
Profesor Catedrático
Universidad Tecnológica de Pereira
lucaspaulp@gmail.com.

SANDRA MILENA PÉREZ

Ingeniero Electricista, M.Sc.
Profesor Asistente
Universidad Tecnológica de Pereira
saperez@utp.edu.co

JUAN CARLOS BEDOYA

Ingeniero Electricista, M.Sc.(c)
Jefe de Diseño y Asistencia
Técnica, CENTELSA.
juanbedo@centelsa.com.co

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y ESTABILIDAD - ICE³

1. INTRODUCCIÓN

El tema de localización de fallas en sistemas de distribución se ha identificado de vital importancia para los operadores de red y para los usuarios, ya que este es un aspecto de estudio de una temática de mayor generalidad que es la calidad de la energía, en lo referente con la continuidad del servicio [1], [2].

Con el fin de mejorar la prestación del servicio las empresas operadoras de red tienen la necesidad de localizar fallas en sistemas de distribución, pues esto permite dar mayor continuidad y evitar penalizaciones en caso de violación de los límites establecidos por los entes de regulación [2]. La localización oportuna del sitio de falla está asociada a la reducción del tiempo de las interrupciones o pérdida de la continuidad del servicio [3].

El problema de la localización de fallas en sistemas de distribución es complejo debido a que éstos presentan un alto número de ramificaciones y un bajo número de elementos de medición y monitoreo de la red. Dentro de las metodologías usadas para la localización de fallas en sistemas de distribución existen dos grandes grupos: Las metodologías basadas en el modelo eléctrico de la red (MBM), y los métodos que aprovechan otro tipo de información conocidos como métodos basados en el conocimiento (MBC) [4].

En las investigaciones desarrolladas con los MBC, existen una gran cantidad de variables que deben ser manipuladas, haciendo de estos procesos una tarea difícil de implementar no sólo por la cantidad de información sino también porque puede existir dependencia o redundancia entre dichas variables. Por lo tanto es necesario hacer un tratamiento previo de las variables para determinar un nuevo conjunto de variables de menor dimensión, que elimine la redundancia y que represente adecuadamente toda la información disponible.

En este artículo se muestra la importancia de los MBC como herramienta fundamental para la solución del problema de localización de fallas; también se presentan el tipo de información de mayor importancia que puede ser extraída de las señales de tensión y corriente medidas en la cabecera del sistema de distribución bajo falla. Adicionalmente, se plantea una técnica de reducción de dimensionalidad para ser implementada en un MBC aplicado a la solución del problema de localización de fallas. La reducción de dimensionalidad es una herramienta de alto poder que puede ser utilizada en la mayoría de los problemas donde el número de variables dificulta la implementación de una metodología basada en el conocimiento.

Como contenido, en la sección 2 se tratan tanto las generalidades del problema de localización de fallas como las metodologías usadas. En la sección 3 se presenta la información extraída de las señales de tensión

y corriente que describen el sistema de distribución bajo estado de falla. En la sección 4 se trata el problema de la reducción de dimensionalidad y en la sección 5 se presentan las pruebas realizadas y el análisis de los resultados. Finalmente, se muestran las conclusiones más importantes de este trabajo en la sección 6.

2. LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Debido a la gran cantidad de laterales y el relativamente bajo número de equipos de monitoreo en sistemas de distribución, el problema de localización de fallas en estos sistemas es una tarea difícil.

Para la solución de este problema se han utilizado diferentes metodologías. Los métodos basados en el modelo (MBM), son los más comúnmente usados para localización de fallas, y utilizan el valor eficaz de la componente fundamental de tensión y de corriente de prefalla y postfalla para estimar la impedancia vista desde la subestación del sistema de distribución hasta el lugar donde se encuentra localizada la falla. Esta impedancia es convertida a una distancia equivalente a partir de los parámetros de la red. Sin embargo, debido a la presencia de laterales existe una múltiple estimación de la sección que se encuentra bajo falla, y además presentan el inconveniente de la alta dependencia del modelo del sistema [3]. Los métodos que aprovechan otro tipo de información se conocen como basados en el conocimiento (MBC), y usan la señal en el tiempo de tensión y corriente, como el tipo de carga conectada en cada nodo, ubicación de las protecciones e información de las fallas ocurridas anteriormente en la red. Estos métodos son un excelente complemento de los MBM y permiten reducir el problema de la múltiple estimación del sitio de falla [4].

Para una eficiente implementación de los MBC, se necesita una gran cantidad de información de fallas ocurridas en los diferentes nodos del sistema. Normalmente, las empresas distribuidoras de energía no poseen esta información y por lo tanto se tiene que recurrir a las técnicas de simulación que permitan obtener una base de datos con registros de fallas.

Existen diferentes algoritmos que pueden reproducir el conocimiento a partir de ejemplos. Para ello es necesario un aprendizaje ó entrenamiento, que consiste en presentarle al algoritmo el conjunto de datos organizados en forma Entrada-Salida (para el caso que se requiera hacer un aprendizaje supervisado). Después de este entrenamiento viene una etapa de validación en la que se busca comprobar la efectividad del MBC. El error se estima por la comparación entre el valor de salida del algoritmo, ante una entrada específica, y el valor de salida esperado. Una vez verificado la efectividad del algoritmo, este podrá dar un valor acertado de salida para una entrada en particular.

Algunos de los MBC empleados comúnmente son: El método LAMDA (Learning Algorithm for Multivariate Data Analysis) que es un algoritmo de aprendizaje el cual permite el análisis de datos multivariantes mediante una metodología de clasificación estadística [5]; las Redes Neuronales Artificiales (RNA); los Sistemas de Inferencia Difusa (FIS) que permiten codificar el conocimiento de un problema específico a través de reglas o etiquetas lingüísticas del tipo IF-THEN; los Sistemas Adaptativos de Inferencia Neuro-Difusa (ANFIS) envuelven las ventajas de las RNA y los FIS [6]; las Máquinas de Soporte Vectorial, (SVMs, Support Vector Machines), son una evolución de las RNA, utilizan un modelo de optimización para la clasificación de datos mediante un hiperplano óptimo de separación [7], [8].

3. INFORMACIÓN REQUERIDA POR LOS MBC PARA LOCALIZACIÓN DE FALLAS

Aunque la mayor parte de la información que describe al sistema de distribución bajo estado de falla, pertenece básicamente a los registros en el dominio del tiempo de tensión y corriente medidos en el nodo de la subestación, existe información adicional que es útil para resolver el problema de localización de fallas. El registro de llamadas telefónicas de los clientes informando sobre fallas en la red, la tipificación de la carga (tipo de carga que existe en cada nodo, industrial comercial y residencial, y para este último la estratificación social) y las condiciones climáticas, son ejemplos de este tipo de información [4].

Esta información que permite caracterizar el sistema bajo falla, se conoce como descriptores. Entre las más importantes estrategias para la obtención de características se tienen:

3.1 Análisis de la señal transitoria

Las componentes de frecuencia y duración del transitorio, se pueden relacionar con la localización de la falla tal como se muestra en [9].

El análisis de transitorios se realiza con el objetivo de extraer estas componentes de frecuencia de las señales y asociarlas a una distancia. Para lograrlo se utilizan dos herramientas de análisis de señales: la transformada Wavelet (TW) y la transformada de Fourier (TF) [10] [11].

Cuando ocurre una perturbación en el sistema de distribución, se presenta una fuerte oscilación de carácter transitorio, en las señales de tensión y corriente, las cuales tienen una frecuencia y una duración asociadas fundamentalmente a los parámetros L, C del circuito equivalente desde el nodo de la subestación hasta el sitio donde ocurre la falla. En la figura 1 se presenta un diagrama de bloques que explica el proceso de extracción de la frecuencia.

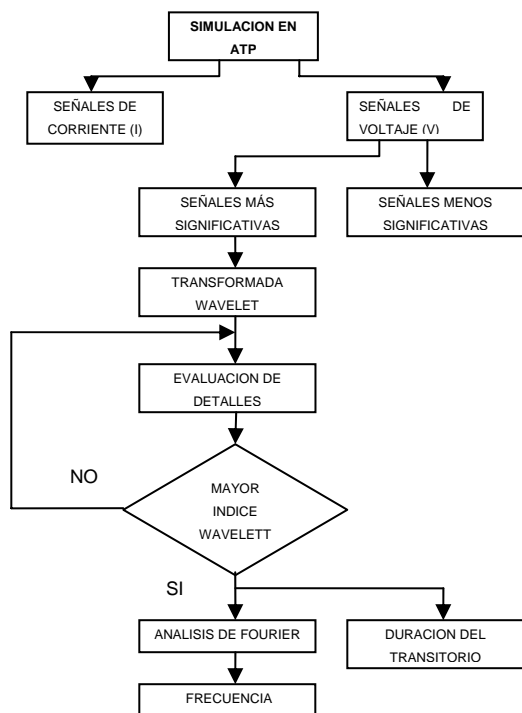


Figura. 1 Procedimiento para extraer la frecuencia de las señales transitorias.

3.2 Análisis de coeficientes α y β

Esta metodología se fundamenta en la transformación de las muestras de las tres señales de corriente de falla, utilizando la transformada de Clark-Concordia [12]. El primer paso de la metodología consiste en transformar las corrientes de falla en componentes $\alpha\beta$, aplicando una versión simplificada de la transformación Clarke-Concordia en la cual no se incluye la componente de secuencia cero. Luego se obtienen los valores propios de la matriz de correlación de los datos muestreados y se usa el mayor de los valores propios obtenidos para describir el sitio de falla.

3.3 Análisis de los patrones de la corriente de carga

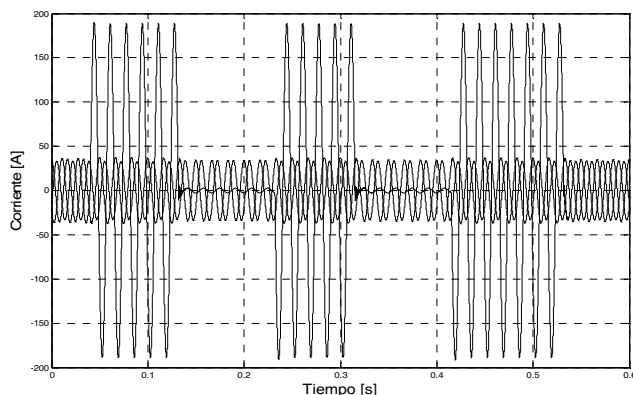


Figura 2 Procedimiento para extraer la frecuencia de las señales transitorias.

Esta metodología permite caracterizar los registros de conmutación de los elementos de protección del sistema de distribución. La actuación de reconectores, seccionadores, interruptores en conjunto con relés de sobrecorriente instantáneos y de relación inversa tiempo corriente y fusibles, depende de su tiempo de calibración [13] [14].

La figura 2 muestra las señales de corriente medidas en el nodo de la subestación cuando se ha presentado una falla fase tierra; la conexión de las protecciones está dispuesta en el esquema de salvamento de fusibles, de modo que ante una falla aguas abajo de un fusible actúa primero el reconector respectivo y finalmente el fusible.

Por medio de la identificación de los tiempos de operación de los elementos de protección se puede asociar una zona de falla, determinada por la localización en el circuito del elemento de protección respectivo.

3.4 Variación de la corriente de carga

Cuando se presenta una falla en el sistema, ésta es clarificada por alguno de los elementos de protección, lo cual implica la desconexión de usuarios ocasionando una disminución de la corriente de carga. Dependiendo de la cantidad de carga desconectada se puede estimar cual de los dispositivos de protección actuó. En la figura 2 se aprecia que durante la acción rápida del reconector es desconectada gran parte de la carga en la fase fallada, pero finalmente cuando el fusible es quien libera la falla la carga desconectada en la fase fallada no es tan importante.

3.5 División por zonas del sistema de distribución

Quizás una de las partes más importantes del proceso para la localización de fallas es la clasificación o zonificación del sistema de distribución. Comúnmente, este procedimiento consiste en asociar cada uno de los nodos pertenecientes a un lateral del sistema de distribución con una clase específica, de modo que existirán tantas clases en el MBC como laterales posea el circuito. Estas zonas o clases servirán como el patrón de entrenamiento “Salida” para el MBC. De modo que, una vez entrenado el algoritmo, cuando se detecte la zona fallada, exista plena certeza de donde ocurrió el evento, así se deja de lado el problema de la múltiple estimación inherente a los MBM.

4. REDUCCIÓN DE LA DIMENSIONALIDAD

El objetivo de esta sección es utilizar las variables descritas anteriormente para que sirvan como datos de entrenamiento para uno de los métodos basados en el conocimiento descritos en el numeral 2. Sin embargo, como se ha aclarado con anterioridad, el número de variables aquí mostrado es grande; (para la frecuencia del transitorio se tienen medidas de las tres fases, al igual que

para la variación de la corriente de carga y para los tiempo de operación de las protecciones, para la variación de los coeficientes α y β se aporta solo una variable, en total se tienen 10 variables). El alto número de variables puede ocasionar que el entrenamiento del MBC requiera de un esfuerzo considerable y es por esta razón que se hace importante la reducción de dimensionalidad de las variables, sin perder la información que cada una de ellas contiene. La búsqueda de la proyección (del inglés *projection pursuit* [PP]) [15], el análisis de la matriz de correlación, y el análisis de componentes principales [16], son metodologías que permiten la reducción de la dimensionalidad de un experimento para su mejor análisis.

La PP se realiza a través de la proyección de las variables en diferentes hiperplanos para encontrar el más interesante según el índice de proyección Chi-cuadrado [16]. Este procedimiento se realiza a través de dos etapas:

4.1 Búsqueda de la No-normalidad de los datos.

El plano es dividido en 48 regiones distribuidas en anillos (figura 3), cada una con un ancho angular de 45° y ancho radial a_r dado por la ecuación (1).

$$a_r = \sqrt{2 \log 6} / 5 \tag{1}$$

El a_r garantiza que cada región tenga aproximadamente la misma probabilidad (1/48) para la distribución normal bivalente. El índice de proyección está dado por (2).

$$PI_{\chi^2}(\alpha, \beta) = \frac{1}{9} \sum_{j=1}^8 \sum_{k=1}^{48} \frac{1}{C_k} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{B_k} (Z_i^{\alpha(\eta_j)}, Z_i^{\beta(\eta_j)}) - C_k \right]^2 \tag{2}$$

Donde C_k es la probabilidad evaluada sobre una región k usando distribución normal bivariada; n es el número de datos; I_{B_k} es la función indicadora de la región del plano; B_k es cada una de las particiones del plano; Z_i^{α} son las observaciones proyectadas de cada uno de los datos sobre los vectores α y β , que son dos vectores ortonormales base del plano de proyección; η_j es el ángulo por el cual el dato es rotado en el plano antes de ser asignado a una de las regiones B_k .

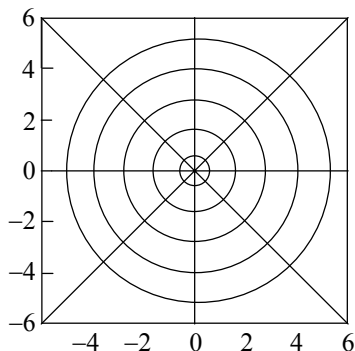


Figura. 3. División del plano donde serán proyectados los puntos del experimento.

Una de las ventajas del uso del índice Chi-cuadrado es que no se ve afectado en gran forma por datos que se encuentran fuera de la tendencia del grupo conocidos como *outliers*.

4.2 Búsqueda la proyección que tiene como resultado el mayor de los índices Chi-Cuadrado.

El algoritmo inicializa aleatoriamente los vectores α y β , para crear un primer mejor plano (α^* y β^*), luego se genera dos planos vecinos dados por las ecuaciones (3) y se evalúa el índice Chi-cuadrado para ellos. Si uno de ellos presenta una mejoría en el índice éste será el nuevo mejor plano de lo contrario se generan dos nuevos planos vecinos; si después de cierto número de iteraciones no ha habido mejoría entonces se reduce el tamaño del vecindario de búsqueda a través de la disminución del parámetro c .

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{\alpha^* + cv}{\|\alpha^* + cv\|} & b_1 &= \frac{\beta^* - (a_1^T \beta^*) a_1}{\|\beta^* - (a_1^T \beta^*) a_1\|} \\ a_2 &= \frac{\alpha^* - cv}{\|\alpha^* - cv\|} & b_2 &= \frac{\beta^* - (a_2^T \beta^*) a_2}{\|\beta^* - (a_2^T \beta^*) a_2\|} \end{aligned} \tag{3}$$

Donde: α^*, β^* denotan el plano ortogonal donde el índice Chi-cuadrado es máximo; C es un escalar que determina el tamaño del vecindario alrededor de (α^*, β^*) que es visitado en la búsqueda de planos con el fin de encontrar mejores valores del índice de proyección; V es un vector uniformemente distribuido sobre la región donde se proyectan los datos; a_1, b_1, a_2, b_2 son los nuevos planos candidatos para evaluar si presentan mejor índice de proyección.

5. PRUEBAS Y RESULTADOS

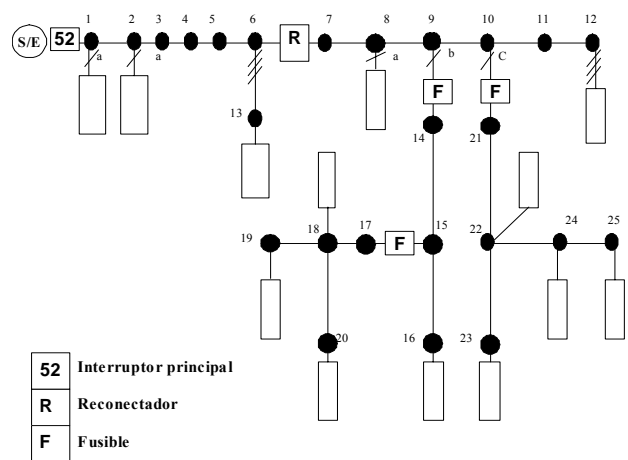


Figura 4. Sistema de prueba de 25kV proporcionado por Sask Power&Light.

Las pruebas se realizaron mediante la simulación en el ATP [17] del sistema de Distribución de 25 kV Sask Power&Light de la ciudad de Saskatoon, Canadá [18]. Este sistema es mostrado en la figura 4, contiene 25 nodos, 13 de ellos son nodos trifásicos, en los cuales se simularon 11 tipos de fallas con seis valores diferentes de resistencia de falla, lo cual da como resultado 858 simulaciones. Los 12 nodos restantes son monofásicos, siete de ellos pertenecen a un lateral conectado a la fase B, y el resto pertenecen a otro lateral conectado a la fase C; en ellos se simuló un solo tipo de falla con seis valores de resistencia diferentes, lo cual da como resultado 72 simulaciones.

De cada una de las simulaciones se extrajeron las señales, en el dominio del tiempo, de tensión y corriente medidas en el nodo de la subestación. Además se extrajeron los valores RMS de dicha señal. La base de datos para el almacenamiento de esta información ocupa un tamaño en disco de 575 Mb. El tamaño de la base de datos es relativamente grande, esto se debe a que la frecuencia de muestreo de la señal (10 kHz) y el tiempo total de simulación (650 ms) para cada falla.

La frecuencia de 10 kHz está determinada por la máxima frecuencia de muestreo de los elementos de protección modernos usados en distribución [13]. El tiempo total de la simulación debe ser tal que muestre la operación completa de los elementos de protección para cualquier tipo de falla en el sistema; 650 ms son suficientes para el sistema de pruebas y la coordinación de protecciones empleados.

A manera de ejemplo, se muestran los descriptores del sistema obtenidos para una falla trifásica a tierra en el nodo 6 con una resistencia de 40 Ω. Las frecuencias obtenidas para el transitorio en cada fase debido a la falla son 3740 Hz, 3780 Hz y 3760 Hz; y las duraciones del transitorio son 8.05 ms, 8.35 ms y 9.35 ms. En cuanto al descriptor de los patrones de la corriente de carga, se obtuvieron los tiempos de detección de fallas y de conmutación de las distintas protecciones así: [40 - 255 - 360 - 580] ms. Al nodo seis sólo está asociada la acción del interruptor principal de la cabecera del circuito. El vector anterior indica que a los 40 ms de simulación ocurrió la falla, 215 ms después el interruptor principal la libera, 105 ms después el interruptor hace un recierre, pero como la falla es permanente, 220 ms después el interruptor principal abre de nuevo el circuito, hasta el final de la simulación (650 ms).

El circuito de distribución fue dividido en zonas para las pruebas de localización. Cada una de esas zonas posee una cantidad de datos para el entrenamiento y otros para la validación. Las zonas son Zona 1: Nodos 1 al 6 y 13; Zona 2: Nodos 7 al 12; Zona 3: Nodos 14 al 16; Zona 4: Nodos 17 al 20; Zona 5 Nodos 21 al 25.

El modelo basado en el conocimiento que fue usado en esta aplicación, combina el conocimiento experto plasmado en reglas difusas, con la capacidad de aprendizaje que poseen las redes neuronales artificiales;

esto es conocido como un sistema de inferencia neuro difuso llamado ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System)[19] [20]. El sistema Neurodifuso, a partir de su entrenamiento, tiene la capacidad de entregar la zona de falla. El conjunto de entrenamiento entrada-salida usado, tiene como entradas la proyección de los datos conseguida con PP y como salida las zonas de falla definidas anteriormente.

De los 930 datos disponibles se utilizaron el 80% de los datos en la etapa de entrenamiento, y el porcentaje restante en la etapa de validación. Para comprobar la efectividad del PP se realizaron pruebas con subconjuntos de descriptores y sus proyecciones determinando luego el error en la clasificación usando la ecuación (4).

$$Error [\%] = \frac{Datos\ de\ validación - Datos\ bien\ clasificados}{Datos\ de\ validación} * 100 \quad (4)$$

La tabla 1 ofrece información acerca del desempeño del clasificador usado para localización de la zona de falla cuando se usan los descriptores, descritos en el numeral 2. Adicionalmente, en la última columna se presenta los resultados del error para la misma información pero tratada usando la técnica de búsqueda de proyección.

Descriptor	Error porcentual [%]	
	Datos originales	Datos con PP
Frecuencia del transitorio	6.62	4.32
Análisis de componentes α y β	27.35	12.33
Variación de I carga	10.68	6.98
Tiempo de operación de las protecciones	0.85	0.72
Todas los descriptores	30.47	12.68

Tabla 1. Resultados de localización de fallas.

Considerando el descriptor de tiempo de operación de los dispositivos de protección, se obtienen unos resultados que validan el uso del sistema ANFIS como MBC adecuado para resolver el problema de localización de fallas en sistemas de distribución, ya que con esta característica se obtienen errores de clasificación bajos. Se observa también que el uso de la técnica de búsqueda de proyección ofrece la posibilidad de incrementar el desempeño del clasificador, porque al reducir el espacio original de las variables se tienen errores de clasificación menores. Se realizó de forma adicional una prueba donde se involucraron todas las variables, y el error calculado para este caso es grande con respecto de los otros casos, pero al usar la técnica de PP se tiene un error de clasificación bajo.

6. CONCLUSIONES

El tratamiento de los datos a través del PP es una buena herramienta para enfrentar el problema de la dimensionalidad, sin embargo existe una pequeña pérdida de información entre los datos originales y los datos proyectados. Debe hacerse entonces un balance entre el costo computacional en el entrenamiento de un MBC y la pérdida de información a la hora de validar los datos.

Dado que los diferentes descriptores obtenidos son características extraídas de variables eléctricas asociadas a una misma falla, puede existir redundancia entre ellas, es decir varias variables explican de forma similar el fenómeno; el PP en su reducción de dimensionalidad retira dicha redundancia haciendo los procesos de entrenamiento y clasificación más eficientes desde el punto de vista computacional.

El uso de información diferente a la de la topología de la red, junto con el MBC utilizado permite resolver el problema de múltiple estimación de la zona de falla debido a que para un conjunto de datos solo existe una zona en común que los representa

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Bollen "Understanding Power Quality Problems: Voltages Sags and Interruptions". IEEE PRESS. 2000.
- [2] Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG (CREG 1998-2002). Resoluciones CREG 070 de 1998, CREG 096 de 2000, CREG 084 de 2002, CREG 084 de 2002.
- [3] J. Mora, G. Carrillo, J. Meléndez "Comparison of impedance based fault location methods for power distribution systems". Electric Power Systems Research. Doi:10.1016/j.epsr.2007.05.010, available online 20 July 2007.
- [4] J. Mora, "Localización de faltas en sistemas de distribución". Tesis Doctoral, Universitat de Girona, España, 2006
- [5] J. Waissman, M. Aguilar, y B. Dahhou, "Construction d'un Modele Comportemental pour la Supervision de Procèdes: Application a une Station de Traitement des Eaux". Doctoral Thèse, Institut National Polytechnique de Toulouse. France. (Cap. 2), 2001
- [6] W. Li-Xing, "A Course in Fuzzy Systems and Control". Prentice Hall, Inc, 2002
- [7] C. Burges, "A tutorial on Support Vector Machines for Patter Recognition. Knowledge Discovery and Data Mining", 2(2), 2003
- [8] G. Morales, A. Alvaro "Estudio e implementación de una herramienta basada en Máquinas de Soporte Vectorial aplicada a la localización de fallas en sistemas de distribución" Tesis de pregrado, UIS. 2005
- [9] J. Cormane, H. Vargas, y G. Ordóñez, "Modelo Estadístico para la Localización de Fallas en Sistemas de Distribución". III Simposio Internacional sobre Calidad de la Energía Eléctrica SICEL 2005 Bogotá, Colombia.
- [10] 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, no. 3, July 2007.
- [11] J. Martínez, y J. Castro, "Análisis de la teoría de ondículas orientada a las aplicaciones en ingeniería eléctrica: Fundamentos". E.T.S. Industriales Departamento de Ingeniería Eléctrica, Madrid. 1995
- [12] J. Martins, y L. Martins, "A Network Distribution Power System Fault Location Based on Neural Eigenvalue Algorithm". IEEE Bologna PowerTech Conference. 3003
- [13] J. Lewis, "Protective Relaying Principles and Applications". Marcel Dekker Inc. 1996
- [14] L. Seung-Jae, C. Myeon-Song, y K. Sang-Hee, "An Intelligent and Efficient Fault Location and Diagnosis Scheme for Radial Distribution Systems". IEEE Transactions on Power Delivery. 19 (2). 524 - 532
- [15] O. Jiménez Luis, L. David, "High Dimensional Faure Reuction via Projection Pursuit". Doctoral Thesis. School of Electrical Engineering, Perdue University. 2001
- [16] L. Jimenez and D. A. Landgrebe, "Projection Pursuit in High Dimensional Data Reduction: Initial Conditions, Feature Selection and the Assumption of Normality," presented at the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Vancouver Canada, October 1995.
- [17] ATP (2002). Alternative Transient Program Rulebook. Comité Argentino de Usuarios del EMTP/ATP-CAUE.
- [18] R. Das, "Determining the Locations of Faults in Distribution Systems". Doctoral Thesis, University of Saskatchewan Saskatoon, Canada. 1998
- [19] J. Mora, L. Pérez, S. Pérez. "Utilización de redes ANFIS y señales de corriente para localización de fallas en sistemas de distribución de energía eléctrica". Revista ingeniería e investigación, Vol. 26, 2007, pp. 93-99.
- [20] J. Mora, G. Carrillo, L. Pérez, "Fault location in power distribution systems using ANFIS nets and current patterns", in Proc. 2006 IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conf.