

# Selección de descriptores de tensión para localización de fallas en redes de distribución de energía

Juan José  
Mora Flórez<sup>1</sup>

Germán Andrés  
Morales España<sup>2</sup>

Gilberto  
Carrillo Caicedo<sup>3</sup>

## RESUMEN

La interrupción del suministro de energía eléctrica en forma permanente o transitoria, afectan los índices de calidad asociados con la continuidad y ocasionan efectos negativos en usuarios industriales, comerciales y residenciales. Para resolver este problema, las redes de transmisión cuentan con esquemas eficientes de protección y localización de fallas; las empresas de distribución, en razón de sus implicaciones técnicas, económicas y operativas, están limitadas para implementar estrategias de identificación y localización de fallas.

En este artículo se presenta una alternativa de solución al problema de localización de fallas en redes de distribución de energía eléctrica, con un mínimo de inversión por parte de estas empresas y que proporcione la información apropiada para la prevención y atención oportuna de fallas. Mediante la caracterización de la señal de tensión medida en la subestación de distribución y utilizando la técnica de optimización y aprendizaje conocida como Máquinas de Soporte Vectorial (SVM), se localiza la zona probable donde ocurrió la falla. Los resultados obtenidos, permiten con muy bajo costo, mejorar los tiempos de localización de fallas en los sistemas de distribución.

**Palabras clave:** Calidad de Potencia, Interrupciones, Sistemas de Distribución, Localización de fallas, Máquinas de Soporte Vectorial.

## ABSTRACT

Permanent and transient power supply interruption affects power quality indexes related to continuity and causes negative effects in industry, commercial and residential users. As alternative to solve this problem, transmission networks have efficient fault location and protection schemes. Distribution facilities are constrained by technical,

economical and operative aspects to implement fault identification and location strategies.

In this paper an alternative solution of the fault location problem in power distribution systems, having a minimum of investment from utilities and giving appropriate information which helps to prevent and attend faults. By means of voltage signal characterization measured at the distribution substation and using an optimization and learning technique known as Support Vector Machines (SVM), the most probable zone where the fault was happened is located. The obtained results help to reduce time to locate faults in power distribution systems having a relatively low economical investment.

**Key words:** Quality, Interruptions, Power Distribution Systems, Fault Location, Support Vector Machines.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de distribución son el medio principal para el suministro de la energía eléctrica a los usuarios industriales, comerciales y residenciales. Una falla en estos sistemas causa una interrupción del servicio a los usuarios, y consecuentemente pérdidas económicas por detención de procesos, pérdidas de información, daños y detrimentos en maquinarias e insumos, entre otros [1]. A nivel mundial se han realizado diversos estudios en los que se ha establecido que el 80% del total de las interrupciones son originadas por fallas en los sistemas de distribución [2].

La localización de fallas permite restaurar el sistema de una forma más eficiente y por tanto mejorar los índices de frecuencia (FES) y duración (DES) de las interrupciones del servicio. El índice DES se reduce por la rápida localización de fallas de tipo permanente. En caso de fallas transitorias, los localizadores de fallas

<sup>1</sup> Profesor del Programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira

<sup>2</sup> Estudiante de Maestría en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander

<sup>3</sup> Profesor de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander

La localización de fallas permite restaurar el sistema de una forma más eficiente, y por tanto mejorar los índices FES y DES.

permiten detectar puntos débiles del sistema de potencia y tomar acciones correctivas para evitar futuras fallas, reduciendo así el índice FES.

Para los sistemas de transmisión se han desarrollado excelentes algoritmos que permiten la localización precisa del punto de falla [3][4] que normalmente usan medidas en ambos terminales de la línea. Sin embargo, tales algoritmos no son aplicables o presentan una gran incertidumbre en las redes de distribución, debido a que éstas cuentan con características propias, tales como:

- a. La monitorización de tensión y corriente se encuentra sólo en la subestación (o cabecera) del circuito de distribución.
- b. Las redes no son homogéneas, ya que generalmente presenta diferentes calibres de conductor en un circuito.
- c. Existen múltiples derivaciones de circuitos laterales y cargas a lo largo de cada circuito alimentador.
- d. Los circuitos son altamente ramificados.
- e. La operación del sistema es radial (alimentación por una sola terminal).

En los últimos años se han adaptado y diseñado diferentes métodos algorítmicos para su aplicación en las redes de distribución. Los métodos desarrollados utilizan la información del modelo de la red (topología y parámetros de líneas y cargas) y los valores eficaces, de falla y de prefalla, de la componente fundamental de tensión y corriente [2] [5] [6] [7]. Estos métodos permiten establecer la distancia eléctrica desde el sitio de medida hasta la ubicación de la falla mediante la estimación paramétrica de la impedancia, a partir del cálculo fasorial entre las tensiones y corrientes. Estos algoritmos tienen dos problemas principales asociados con: a) la alta dependencia de un buen modelo de la red; y b) la múltiple estimación de posibles localizaciones de falla, debido a la alta ramificación de las redes.

Los aspectos anteriores hacen que cada una de las técnicas por separado no se desempeñen correctamente, bajo condiciones reales de operación. Por ello, la mezcla o combinación de la información proveniente de la medición

de las tensiones puede ser de mayor utilidad, en conjunto con técnicas de análisis más complejas entre las que se destacan las técnicas computacionales y de optimización [8] [9][10]. Este artículo presenta la localización de fallas mediante el uso de solo las señales de tensión y una técnica de optimización y aprendizaje de máquinas, sin importar el modelo del sistema.

Este documento se estructura en seis secciones. En la primera sección, se realiza una breve introducción sobre la localización de fallas en los sistemas de distribución. En la segunda se presenta la caracterización propuesta para las señales de tensión utilizada en la aplicación de la técnica computacional máquinas de soporte vectorial, descrita en la tercera sección. La cuarta sección describe la metodología propuesta para localización de fallas utilizando la técnica desarrollada. La quinta, expone un ejemplo de aplicación de la metodología propuesta y los resultados obtenidos. Finalmente en sexta sección se presenta el trabajo para desarrollar a futuro y las conclusiones de esta investigación.

## 2. CARACTERIZACIÓN DE SEÑALES DE TENSIÓN

Cuando ocurre una falla de cortocircuito en el sistema de distribución, se produce un incremento en la corriente del sistema y la reducción en los valores de tensión medidos en la subestación. Aunque los aparatos de medida en las subestaciones pueden proveer las muestras de las señales de tensión y la corriente, a una frecuencia de muestreo determinada por el medidor, en esta aplicación sólo se utilizará la caracterización de las señales de tensión y la obtención de los «descriptores». Se propone la utilización de solo los valores eficaces de tensión, debido a que son medidas disponibles en la mayor parte de las subestaciones de distribución y éstas tienen una variación pequeña con respecto a los cambios de carga [11]. Lo anterior hace que esta alternativa sea viable para implementación real en cualquier subestación de distribución, con un mínimo costo.

La caracterización propuesta se basa en el análisis de la forma de la tensión eficaz medida durante la falla, la cual es conocida como hueco de tensión. Según el estándar IEEE Std 1159, un hueco de tensión se define como la

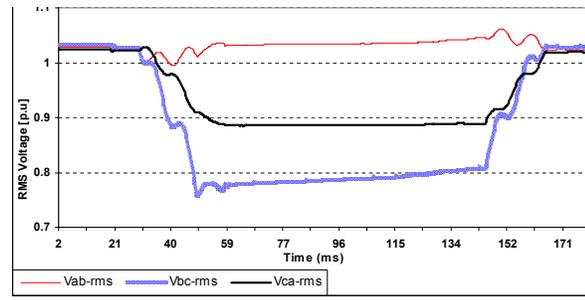
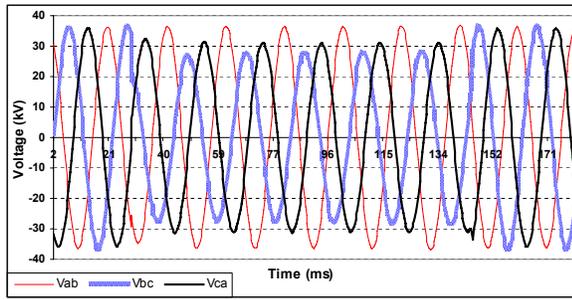


Figura 1. Huevo de tensión trifásico medido en la subestación de distribución.

reducción del valor eficaz de la tensión entre el 0,9 y 0,1 p.u. de su valor nominal, durante 8,33ms a 1 minuto, caracterizada a frecuencia industrial [1][12].

Un ejemplo de un hueco de tensión se presenta en la figura 1. A través de la caracterización por descriptores del hueco de tensión medido en la subestación, es posible describir una falla y encontrar su probable localización en el sistema de distribución. Los descriptores son entonces patrones que contienen las características relevantes de la señal.

Los descriptores propuestos para la caracterización de fallas, basados en el análisis de la señal en estado estable antes, durante y después de la falla se presentan a continuación. En la figura 2 se presenta de una manera gráfica cada uno de los descriptores.

- Magnitud ( $V_h$ ): Es la medida, en estado de falla, de la máxima reducción o elevación del valor eficaz de las señales de tensión del sistema. Si la tensión eficaz es menor a uno en p.u, representa una reducción y se calcula por  $1 - V_{min}$ . Si es mayor a uno en p.u, representa una elevación y se calcula mediante  $1 - V_{max}$
- Duración del hueco ( $d_s$ ): Tiempo máximo durante el cual el valor eficaz de la tensión está por debajo de 0.9 p.u.
- Duración de estado mínimo ( $d_{ms}$ ): Tiempo durante el cual el valor eficaz de la tensión permanece en una banda de amplitud  $\alpha$  sobre el valor de la magnitud de tensión.  $\alpha = 0,2 * V_h$ .
- Pendiente de descenso ( $V_{mf}$ ): Tasa de variación inicial de cada señal de tensión, al ocurrir la falla. Ésta se calcula mediante la

linealización de la señal desde la detección del hueco de tensión ( $V < 0.9$  p.u), hasta el punto de estabilidad de la señal en falla.

- Pendiente de ascenso ( $V_{ms}$ ): Tasa de variación final que presenta cada una de la señales de tensión al ocurrir la falla. Se calcula de manera análoga a la pendiente de descenso.

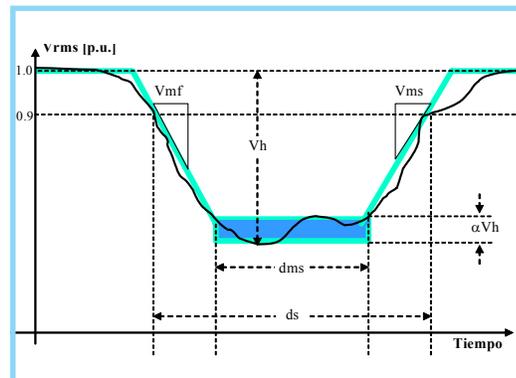


Figura 2. Descriptores del hueco de tensión.

Los descriptores mencionados son sencillos de obtener debido a que solamente es necesario el valor eficaz de tensión y un algoritmo simple de procesamiento. Los descriptores serán utilizados para el aprendizaje de la técnica de computacional de optimización y aprendizaje conocida como Máquinas de Soporte Vectorial, para la clasificación y localización de las fallas.

### 3. MÁQUINAS DE SOPORTE VECTORIAL (SVM)

Nuevas técnicas de aprendizaje están siendo utilizadas como herramientas alternativas para la detección, localización e identificación de las fallas en los sistemas de energía eléctrica [13]. Éstas ofrecen un aporte importante, ya que permite utilizar información adicional de la res-

La SVM es una técnica de clasificación, que combina la teoría de optimización con el aprendizaje de máquinas.

puesta del sistema ante situaciones de falla. Las principales técnicas empleadas son: sistemas expertos, lógica difusa y redes neuronales. En los últimos años el avance de estas técnicas ha dado origen a nuevos métodos más óptimos y eficaces, como las máquinas de soporte vectorial (SVM).

La SVM es una técnica de clasificación binaria resultado del avance de metodologías de aprendizaje y su combinación con la teoría de optimización [14] [15]. En la técnica de las SVM se establecen dos casos:

### 3.1. Caso linealmente separable

Para este caso se consideran  $n$  datos de entrenamiento  $N$  dimensional ( $\vec{x}_i$ ) con su respectiva etiqueta ( $y_i$ ):

$$x_i \in \mathbb{R}^N \quad y_i \in \{+1, -1\} \quad (1)$$

Se estima una función  $f$  que para una entrada cualquiera en  $\mathbb{R}^N$  tenga una salida en  $\{\pm 1\}$ . Esto significa, encontrar el hiperplano  $H: y = \mathbf{w} \cdot \mathbf{X} - b = 0$  y dos hiperplanos paralelos,  $H1: y = \mathbf{w} \cdot \mathbf{X} - b = +1$  y  $H2: y = \mathbf{w} \cdot \mathbf{X} - b = -1$ , con la condición que no existan puntos entre  $H1$  y  $H2$ , y que la distancia entre ellos (el margen), sea máxima. El hiperplano  $H$  se denomina *hiperplano de separación óptimo* (OSH). La Figura 3 ilustra este requerimiento. Las cantidades  $\mathbf{w}$  y  $b$  son los parámetros que controlan la función y se denominan vector de pesos y «bias» [16].

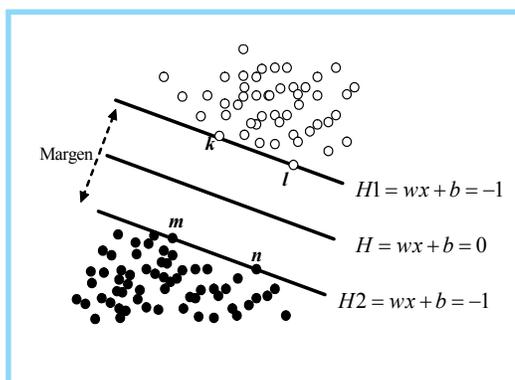


Figura 3. Hiperplanos de separación de datos.

Para encontrar el OSH se debe maximizar el margen, equivalente a resolver la siguiente función objetivo:

$$\min_{\mathbf{w}, b} \frac{1}{2} (\vec{\mathbf{w}} \cdot \vec{\mathbf{w}}) \quad (2)$$

$$\text{Sujeto a } y_i (\vec{\mathbf{w}} \cdot \vec{\mathbf{x}}_i + b) \geq 1, \forall i$$

Este es un problema de optimización cuadrática con restricciones, convexo, en un conjunto convexo  $(\mathbf{w}, b)$ , es decir, con una única solución. Para esta clase de problemas, se introducen los *multiplicadores de Lagrange*  $\alpha_i \in \mathbb{R}$ , de tal modo que la función primal (2) se transforma en:

$$L(\vec{\mathbf{w}}, b, \vec{\alpha}) = \frac{1}{2} \|\vec{\mathbf{w}}\|^2 - \sum_{i=1}^n \alpha_i [y_i (\vec{\mathbf{w}} \cdot \vec{\mathbf{x}}_i + b) - 1] \quad (3)$$

La función dual (3) se minimiza con respecto a las variables primarias  $\mathbf{w}$  y  $b$ , y luego se maximiza sobre los  $\alpha_i$  (se encuentra el punto de silla) [17]. Los puntos para los cuales el correspondiente  $\alpha_i$  es diferente de cero, constituyen los Vectores de Soporte (VS). Estos son los elementos críticos del conjunto de datos, de modo que si se repite el proceso de entrenamiento conservando sólo los VS, se obtendrán los mismos hiperplanos. Todos los demás puntos tendrán  $\alpha_i = 0$ . En la figura 3, los puntos  $k, l, m$ , y  $n$  son ejemplos de vectores de soporte.

### 3.2. Caso linealmente no separable

Hasta el momento se ha descrito la manera en la cual funcionan la SVM para el caso lineal y suponiendo que los datos para su entrenamiento son todos correctos y sin ruido. Por esta razón se cambia un poco la perspectiva y se busca el mejor hiperplano que pueda tolerar el ruido en los datos de entrenamiento. Esto se denomina *margen débil*. Para permitir la posibilidad de datos que violen la restricción de la función (2), se introducen las variables de relajación  $\xi$  (slack), para formular una nueva restricción:

$$y_i (\vec{\mathbf{w}} \cdot \vec{\mathbf{x}}_i + b) \geq 1 - \xi_i, \forall i \quad (4)$$

$$\xi_i \geq 0, \forall i$$

El nuevo clasificador se halla controlando su capacidad de clasificación (con  $\|\mathbf{w}\|$ ), y el límite superior del número de errores de entrenamiento  $\sum \xi_i$ . El hiperplano óptimo con margen débil se encuentra con (5)

$$\min_{\mathbf{w}, b} \frac{1}{2} (\vec{\mathbf{w}} \cdot \vec{\mathbf{w}}) + C \sum_{i=1}^n \xi_i \quad (5)$$

$$\text{Sujeto a } y_i (\vec{\mathbf{w}} \cdot \vec{\mathbf{x}}_i + b) \geq 1 - \xi_i, \forall i$$

El parámetro  $C$  se denomina *constante de penalización de errores*. Éste se elige a priori por el

usuario de tal manera que un valor grande significa una alta penalización a los errores. Si se emplean los multiplicadores de Lagrange el problema se transforma en (6), sujeto a (7).

$$\max_{\alpha} \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j (\bar{x}_i \cdot \bar{x}_j) \quad (6)$$

$$0 \leq \alpha_i \leq C, \forall i \text{ y } \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0 \quad (7)$$

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 4 muestra tal transformación.

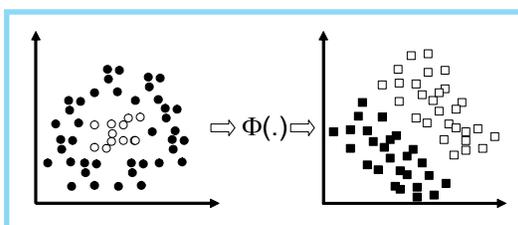


Figura 4. Transformación de los datos a un espacio de mayor dimensión, para posibilitar una separación lineal.

El nuevo espacio se define como una función de transformación  $\Phi(x)$ , pero en términos de los productos punto de los datos de entrada en el espacio original. En otras palabras, no es necesario especificar la transformación  $\Phi(x)$ , puesto que la función *kernel*,  $K(X_i, X_j)$  es equivalente al producto escalar en algún otro espacio [14][15]. El teorema de Mercer se utiliza para probar si una función puede ser definida como función *kernel* [15].

Existen varias funciones *kernel* que pueden utilizarse, tales como: Base radial Gausiana:  $K(X_i, X_j) = e^{-||X_i - X_j||^2 / 2s^2}$ ; Kernel polinómico:  $K(X_i, X_j) = (X_i \cdot X_j + m)^p$ ; y el Sigmoid:  $K(X_i, X_j) = \tanh(k (X_i \cdot X_j) + n)$

Con una función *kernel* apropiada, la SVM puede separar el conjunto de datos que en el espacio original era no separable. Esto significa que con estas funciones es posible construir algoritmos no lineales a partir de métodos que permiten la separación lineal [15].

Las principales propiedades de las SVM son: La generalización mediante la maximización del margen; resolución de un problema de optimización cuadrática en un espacio convexo; se obtiene la solución como un mínimo global;

tiene la propiedad de la dualidad mediante el uso de *kernels*; y finalmente tiene la propiedad de la esparcidad pues sólo son necesarios los puntos cerca del margen (vectores soporte)

## 4. METODOLOGÍA DESARROLLADA

En este numeral se presenta la metodología utilizada para localizar la región probable de falla, a partir del uso de los descriptores del hueco de tensión medidos en la subestación y la posterior aplicación de las SVM. El proceso esta dividido en cinco etapas que se explican a continuación:

### 4.1. Zonificación de la red

Se utiliza para ubicar la zona más probable de localización de la falla. El criterio de zonificación se basa en la topología, protecciones, longitudes de las redes, usuarios, estrato, entre otras, del sistema de distribución. Se recomienda utilizar una zona por cada circuito ramal y se pueden agrupar varios circuitos en una zona.

### 4.2. Adquisición de datos de falla

Se crea una base de datos que contiene las señales medidas en la subestación cuando ha ocurrido una falla en el sistema de distribución. Esta puede ser obtenida del historial de fallas existente en la subestación o por la simulación del sistema fallado con algún software especializado.

Debido que se utiliza un estimador de estado estable para determinar los valores eficaces de la señal, ésta no requiere de condicionamientos especiales en cuanto a la frecuencia de muestreo. Medidores clásicos de 64 o 128 muestras por ciclo, pueden ser perfectamente utilizados para el registro de señales de tensión durante la falla [1]. Como las magnitudes de la tensión en los sistemas de distribución son mayores a 5 kV, no se aprecian efectos indeseados por causa de ruido.

### 4.3. Pre-procesamiento de la señal

Se obtiene el valor eficaz del fundamental de las tensiones de fase, línea y secuencia cero. Seguidamente se obtienen los descriptores para cada falla y se guardan como vectores. Estos a su vez son agrupados y etiquetados depen-

La metodología propuesta permite localizar la región de falla, mediante el uso de descriptores tensión y las SVM.

diendo de la zona a la cual pertenece la falla. Además se realiza un escalamiento simple de los vectores (entre  $[-1,1]$ ), este paso es muy importante para evitar dificultades numéricas durante los cálculos.

#### 4.4. Entrenamiento de la SVM

Como se presentó la sección III, las SVM necesitan la definición a priori tanto del parámetro de penalización  $C$ , como de la función *kernel* y sus respectivos parámetros. Para el presente estudio, se realizaron diversas pruebas para encontrar los parámetros más adecuados. El modelo de mejores resultados se logró con el Kernel RBF. Para el entrenamiento se toma el 70% - 80% de los datos simulados.

#### 4.5. Pruebas de precisión

Se realiza una prueba final con datos desconocidos, para obtener la precisión del modelo. Éstos son generalmente el 20% de la base de datos y son extraídos antes de la etapa de entrenamiento de la SVM. En caso de no estar preprocesados estos datos, deben recibir exactamente el mismo tratamiento dado a los datos de entrenamiento en el pre-procesamiento.

### 5. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 5.1. Definición del sistema de prueba

El sistema de distribución seleccionado para las pruebas de la metodología propuesta es el modelo de sistema utilizado en [2]. Este circuito ha sido utilizado para pruebas de distintos métodos de localización de fallas, como el encontrado en [13]. El sistema de la figura 5 corresponde a uno de los circuitos de distribución de 25kV de la ciudad de SaskPower que contiene 21 nodos distribuidos para ramales monofásicos y trifásicos. En las tablas 1 y 2 se presentan los datos del circuito.

El circuito fue simulado mediante EMTP/ATP para fallas monofásicas, bifásicas y trifásicas, sobre un rango de resistencias de fallo de 0,05 a 50 $\Omega$ . El circuito se divide en cuatro zonas de localización, como se muestra en la figura 5, tal como se presenta a continuación: Zona 1 (nodos 1,2,3,4,5,6,7 y 12), Zona 2 (nodos 8,9,10 y 11), Zona 3 (nodos 13,14,15,16 y 17) y Zona 4 (nodos 18,19,20 y 21).

#### 5.2. Definición de grupos de descriptores

Se definen 31 grupos de descriptores para pruebas de localización de fallas. Se usan las tensiones de fase, de línea y de secuencia cero y combinaciones entre ellas. Se realizó una comparación entre los resultados obtenidos por tipo de falla, como el presentado en la tabla III, para la falla monofásica.

El desempeño de la SVM se estima con la ecuación (8), con datos que no se han usado en el entrenamiento. La precisión mide el desempeño de la SVM ante datos desconocidos.

$$P_{\text{precisión}} = \frac{N^{\circ} \text{ datos clasificados correctamente}}{N^{\circ} \text{ total de datos}} \quad (8)$$

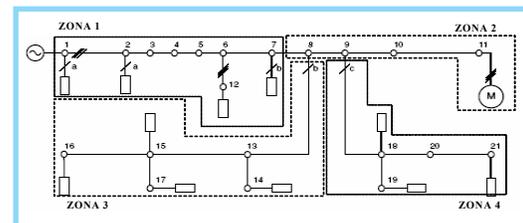


Figura 5. Diagrama unifilar del sistema de prueba tomado de un circuito de distribución de Saskatoon Power and Light, Saskatchewan, Canada.

#### 5.3. Análisis de resultados

Según la tabla III, para la falla monofásica, con los grupos 6, 18 y 28 se obtiene buena precisión tanto de entrenamiento como de prueba. Sin embargo, el grupo 6 presenta gran ventaja por las siguientes razones:

- Sólo son necesarios dos descriptores ( $V_h$  y  $V_{mf}$ ), facilitando el procesamiento de la información.
- Los descriptores sugeridos son calculados con la primera parte del evento, lo cual tiene ventaja de tiempo de adquisición de la información, que facilitará su implementación en tiempo real.

Un resultado similar se presentó para los demás tipos de fallas. El resultado final es presentado en la tabla IV. La ventaja de obtener estos resultados es que con muy poca información tomada de los valores eficaces de la tensión, es posible localizar fallas en los sistemas de distribución. Adicionalmente, sólo es requerida la señal de tensión para la obtención de la información.

Tabla I. Datos de las líneas del sistema de distribución.

Sección	Longitud (km.)	Impedancia serie ( $\Omega$ /km)		Admitancia paralelo (Mho/km)	
		Sec +/-	Sec. cero	Sec +/-	Sec. cero
1-2	2.414	0.3480 + j0.5166	0.5254 + j1.704	j3.74E-6	j2.49E-6
2-6	16.092	0.3480 + j0.5166	0.5254 + j1.704	j3.74E-6	j2.49E-6
6-7	4.023	0.3480 + j0.5166	0.5254 + j1.704	j3.74E-6	j2.49E-6
7-8	5.150	0.5519 + j0.5390	0.7290 + j1.727	j3.59E-6	j2.39E-6
8-9	2.414	0.5519 + j0.5390	0.7290 + j1.727	j3.59E-6	j2.39E-6
9-10	4.506	0.5519 + j0.5390	0.7290 + j1.727	j3.59E-6	j2.39E-6
10-11	2.414	0.3480 + j0.5166	0.7290 + j1.727	j3.74E-6	j2.49E-6
6-12	2.414	0.3480 + j0.5166	0.7290 + j1.727	j3.74E-6	j2.49E-6
8-13	2.414	7.3977 + j0.8998	7.3977+ j0.8998	j2.51E-6	j2.51E-6
13-14	2.414	7.3977 + j0.8998	7.3977+ j0.8998	j2.51E-6	j2.51E-6
13-15	2.414	7.3977 + j0.8998	7.3977+ j0.8998	j2.51E-6	j2.51E-6
15-16	2.414	7.3977 + j0.8998	7.3977+ j0.8998	j2.51E-6	j2.51E-6
15-17	2.414	7.3977 + j0.8998	7.3977+ j0.8998	j2.51E-6	j2.51E-6
9-18	2.414	7.3977 + j0.8998	7.3977+ j0.8998	j2.51E-6	j2.51E-6
18-19	2.414	7.3977 + j0.8998	7.3977+ j0.8998	j2.51E-6	j2.51E-6
18-20	3.219	7.3977 + j0.8998	7.3977+ j0.8998	j2.51E-6	j2.51E-6
20-21	3.219	7.3977 + j0.8998	7.3977+ j0.8998	j2.51E-6	j2.51E-6

La importancia de este estudio radica en mostrar como, con muy poca información tomada de los valores eficaces de la tensión, es posible localizar fallas en los sistemas de distribución.

Tabla II. Datos de la carga del sistema de distribución

Nodo	Fase	Carga (KVA)	Composición [%]		
			Calefacción	Alumbrado	Motores
1	A	15.0	99.8	0.1	0.1
2	A	15.0	99.8	0.1	0.1
6	B	15.0	99.8	0.1	0.1
11	A,B,C	1000.0	0.1	0.1	99.8
12	A,B,C	67.5	99.8	0.1	0.1
14	B	15.0	99.8	0.1	0.1
15	B	15.0	99.8	0.1	0.1
16	B	7.5	99.8	0.1	0.1
17	B	15.0	99.8	0.1	0.1
18	C	25.0	99.8	0.1	0.1
19	C	15.0	99.8	0.1	0.1
21	C	15.0	99.8	0.1	0.1

Tabla III. Resultados comparativos de de precisión en la prueba y entrenamiento para diferentes descriptores de los huecos de tensión, ante falla monofásica.

Grupo	Descriptores					Precisión Entrena'to	Precisión Prueba	Grupo	Descriptores					Precisión Entrena'to	Precisión Prueba
	Vh	Vmf	Vms	ds	dms				Vh	Vmf	Vms	ds	dms		
1	•					0.67532	0.62	17	•	•		•		0.77056	0.805
2		•				0.64935	0.575	<b>18</b>	•	•			•	<b>0.77922</b>	<b>0.81</b>
3			•			0.95238	0.685	19	•			•	•	0.96537	0.69
4				•		0.47619	0.68	20	•			•	•	0.9697	0.685
5					•	0.45455	0.675	21	•				•	0.73593	0.695
<b>6</b>	•	•				<b>0.77489</b>	<b>0.815</b>	22		•	•	•		0.95671	0.715
7	•		•			0.93939	0.7	23		•	•		•	0.97403	0.705
8	•			•		0.70996	0.66	24		•		•	•	0.72727	0.66
9	•				•	0.70563	0.665	25				•	•	0.97403	0.705
10		•	•			0.93939	0.7	26	•	•	•	•		0.9697	0.685
11		•		•		0.70996	0.65	27	•	•	•		•	0.94805	0.72
12		•			•	0.67532	0.625	<b>28</b>	•	•		•	•	<b>0.79221</b>	<b>0.83</b>
13			•	•		0.96104	0.685	29	•			•	•	0.96104	0.71
14			•		•	0.93506	0.695	30		•	•	•	•	0.96537	0.67
15				•	•	0.50216	0.72	31	•	•	•	•	•	0.95238	0.705
16	•	•	•			0.95671	0.68								

**Tabla IV. Descriptores que presentan mejores resultados para cada tipo de falla**

Tipo de falla	Descriptores
Monofásica	Profundidad y pendiente de descenso de las tensiones de fase, línea y secuencia cero
Bifásica	Profundidad y pendiente de descenso de las tensiones de fase y línea
Bifásica a tierra	Profundidad y pendiente de descenso de las tensiones de fase, línea y secuencia cero
Trifásica	Profundidad y pendiente de descenso de las tensiones de fase y línea

## 6. CONCLUSIONES

La técnica de las máquinas de soporte vectorial es una buena alternativa del problema de localizar fallas en los sistemas de distribución. La metodología planteada se desarrolla con base en la información monitorizada en los alimentadores de los circuitos. La señal de tensión medida en un solo terminal de la línea se caracteriza por medio de descriptores, los cuales determinan patrones de zonas de posible ubicación de fallas. Su potencial aplicación propone una forma relativamente sencilla y económica de determinar la localización de las fallas en el sistema de distribución.

Los resultados obtenidos muestran una alta eficiencia del método, como un paso inicial para la formulación e implementación real de estrategias que combinen técnicas computacionales con métodos convencionales. Esto permite la reducción del conjunto de posibles localizaciones de la falla en un sistema de potencia, reduciendo así los índices DES y FES.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Mora «Voltage Sag Characterization and Classification for Diagnosis in Electric Power Quality Domain», Master Thesis. University of Girona, Spain – 2003
- [2] R. Das, «Determining the Locations of Faults in Distribution Systems», Doctoral Thesis, University of Saskatchewan Saskatoon, Canada, Spring 1998.
- [3] T. Takagi, Y. Yamakoshi, J. Baba, K. Uemura and T. Sakaguchi «A new algorithm of an accurate fault location for EHV/UHV transmission lines: Part—Fourier transform method,» IEEE Transactions Power App. Syst., vol. PAS-100, Mar 1981. Pages. 1316–1323.
- [4] A. Phadke, S. Horowitz «Power System Relaying». Research studies press. Baldock, England 1995.
- [5] R. K Aggarwal, Y. Aslan, and A.T. Johns. «An interactive approach to fault location on overhead distribution lines with load taps». IEE Developments in Power System Protection. Conference Publication No. 434.1997, pp 184-187.
- [6] D. Novosel, D. Hart, J. Myllymaki «System for locating faults and estimating fault resistance in distribution networks with tapped loads». 1998. US Patent number 5,839,093.

- [7] J. Mora, S. Muñoz, G. Carrillo «Técnicas algorítmicas de localización de fallas como alternativa para reducir el efecto de las salidas en sistemas de potencia – Una revisión». III International Symposium of Power Quality. Colombia, Bogotá, CD proceedings. Nov. 2005.
- [8] C. Cortes, V. Vapnik. «Support vector networks». Machine learning. 1995. Pags: 273-297
- [9] E. Rich, K. Knight. «Inteligencia artificial», Madrid, McGraw-Hill, 1994.
- [10] M. Corredor «Principios de inteligencia artificial y sistemas expertos». Universidad Industrial de Santander. Departamento de Ingeniería de Sistemas. Facultad de Ciencias Físico Mecánicas. Bucaramanga, 1992.
- [11] M. Bollen Understanding Power Quality Problems: Voltages Sags and Interruptions. IEEE Press. 2000.
- [12] IEEE recommended practice for monitoring electric power quality. IEEE Std 1159-1995, 2 Nov. 1995
- [13] B.G Jin, D.S Lee, M.S Choi, S.H Kang, «Intelligent Fault Location and Diagnosis System on Radial Distribution Systems,» Next-Generation Power Technology Center, Myongji University, Yongin, Korea, 2002.
- [14] C Burges «A tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition», <http://www.kernel-machines.org/>.
- [15] C. Campbell, «An Introduction to Kernel Methods», In R.J. Howlett and L.C. Jain, editors, Radial Basis Function Networks: Design and Applications, page 31. Springer Verlag, Berlin, 2000.
- [16] N. Cristianini, J. Shawe-Taylor, «An introduction to Support Vector Machines», Cambridge University Press, 2000.
- [17] A. Smola, S. Bernhard «Learning with Kernels Support Vector Machines, Regularization, Optimization and Beyond». The MIT Press, Cambridge. 2002.

### Juan José Mora Flórez

Nació en Concepción, Santander, Colombia. Ingeniero Electricista de la Universidad Industrial de Santander (UIS), Bucaramanga, Colombia. Obtuvo su título de Maestría en Ingeniería Eléctrica en la UIS. Maestría en Tecnologías de la Información de la Universidad de Girona (UdG) de Cataluña, España- Actualmente es estudiante de doctorado de la UdG. Actualmente se desempeña como profesor en el área de Sistemas de transmisión y distribución de energía en la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, y pertenece como investigador al grupo Planeamiento eléctrico GPE y al grupo de Investigación en Calidad de Energía Eléctrica y Estabilidad ICE<sup>3</sup>, donde realiza estudios sobre calidad de energía eléctrica y estabilidad de sistemas de potencia. e-mail: [jjmora@utp.edu.co](mailto:jjmora@utp.edu.co)

### Germán Andrés Morales España

Nació en Florencia, Caquetá, Colombia. Ingeniero Electricista de la Universidad Industrial de Santander (UIS), Bucaramanga, Colombia. Actualmente es estudiante de la Maestría en Ingeniería Eléctrica en la UIS. Se desempeña como ingeniero de investigación en el Grupo de Investigación de Sistemas Eléctricos (GISEL), de la UIS, donde desarrolla su tesis en el proyecto «Desarrollo de métodos basados en Máquinas de Soporte Vectorial para localización de fallas en sistemas de potencia radiales» financiado por Colciencias e ISA. e-mail: [german\\_yacko@yahoo.com.mx](mailto:german_yacko@yahoo.com.mx)

### Gilberto Carrillo Caicedo

Nació en Málaga, Santander, Colombia. Ingeniero Electricista de la Universidad Industrial de Santander (UIS), Bucaramanga, Colombia. Obtuvo su título de Maestría en Ingeniería en el Renselarch Polytechnic Institute de Nueva York, EEUU. Obtuvo su título de Doctor en la Universidad Pontificia Comillas de Madrid, España Actualmente se desempeña como profesor en el área de Sistemas de Potencia y Calidad de Energía en la Universidad Industrial de Santander, Colombia, y es miembro fundador y pertenece como investigador al grupo GISEL donde realiza estudios sobre calidad de potencia y desarrollo tecnológico. e-mail: [gilberto@uis.edu.co](mailto:gilberto@uis.edu.co)