

# Protección de sistemas eléctricos mediante reconocimiento de patrones de onda viajera

Ernesto Vázquez Martínez, Jorge Castruita Ávila

Doctorado en Ingeniería Eléctrica, FIME-UANL

evazquez@gama.fime.uanl.mx

Óscar Leonel Chacón Mondragón

Doctorado en Ingeniería de Sistemas, FIME-UANL

ochacon@mail.uanl.mx



## RESUMEN

*En este artículo se presenta un nuevo algoritmo de protección de líneas de transmisión basado en ondas viajeras. El algoritmo usa el primer frente de onda generado por el colapso de voltaje en el punto de aparición de falla para determinar si se encuentra dentro o fuera de la línea protegida. Se propone usar técnicas de reconocimiento de patrones basadas en análisis de componente principal para procesar las señales transitorias de voltaje y corriente, eliminar la redundancia de información y realzar los patrones característicos de fallas internas y externas. Se analizó el desempeño del algoritmo mediante casos de simulación en dos sistemas de potencia de prueba, considerando fallas críticas de detectar, y en todos los casos, el algoritmo discriminó correctamente entre fallas internas y externas.*

## PALABRAS CLAVE

Ondas viajeras, reconocimiento de patrones, análisis de componente principal.

## ABSTRACT

*This article describes a new algorithm for transmission line protection based on traveling waves. The algorithm uses the first wave source caused by voltage collapse during a fault in the power system, in order to discriminate between internal and external faults. A pattern recognition technique using main component analysis are proposed to process the voltage and current traveling waves, to reduce redundancies in the transient information and highlight the characteristic behavior for internal and external faults. The new algorithm was tested through simulation cases using two power system with typical configuration, including critical faults to detect. In all cases, the algorithm discriminates between internal and external faults correctly.*

## KEYWORDS

Traveling waves, pattern recognition, principal component analysis.



Este artículo está basado en el proyecto galardonado con el Premio a la Mejor Tesis de Maestría UANL 2004 en la categoría de Ingeniería, Tecnología y Arquitectura, el cual fue otorgado en ceremonia celebrada el 28 de Septiembre de 2005 en la UANL.

## INTRODUCCIÓN

La creciente tendencia a operar las líneas de transmisión con voltajes cada vez mayores trae consigo nuevos y complicados problemas para el área de protecciones; uno de ellos es la necesidad de reducir el tiempo de detección de las fallas que aparecen en las líneas con el propósito de evitar daños a equipos adyacentes y aumentar la estabilidad transitoria del sistema de potencia.<sup>1</sup>

Actualmente los esquemas de protección de líneas de transmisión utilizan los cambios en las señales de voltaje y corriente a frecuencia fundamental para detectar la presencia de alguna falla en la línea protegida,<sup>2</sup> esto implica la necesidad del uso de filtros digitales los cuales introducen un retardo de tiempo al detectar un cortocircuito. Con el propósito de reducir los tiempos de detección de fallas, algunos investigadores han propuesto el uso de las señales transitorias de alta frecuencia generadas en el punto de aparición de la falla, ya que esas señales contienen toda la información de las características de la falla. Los algoritmos propuestos en<sup>3,4,5</sup> han demostrado que es posible detectar y localizar fallas usando esquemas basados en ondas viajeras (OV); sin embargo estos algoritmos tienen problemas para detectar fallas de alta impedancia o fallas que ocurren cerca del cruce por cero.

El algoritmo aquí propuesto discrimina entre una falla interna o externa a partir del reconocimiento de patrones del contorno del primer frente de onda que arriva a la ubicación de la protección; el problema de reconocimiento se simplifica preprocesando la información con la técnica de análisis de componente principal, usada en análisis multivariable, que en base a la entropía de los datos elimina información redundante y realiza patrones de comportamiento característicos de fallas internas y externas. De esta forma, el reconocimiento de patrones se realiza en un subespacio de 2 dimensiones sin la necesidad de un algoritmo de clasificación. El tiempo de operación del algoritmo es de  $25 \times 10^{-6}$  seg.

Se analizó el desempeño del algoritmo propuesto mediante casos de simulación en dos sistemas de potencia de prueba considerando las condiciones de falla más comunes, y las más críticas de detectar, como son los cortocircuitos cercanos a la ubicación de la protección, cortocircuitos en el extremo de la

línea protegida, cortocircuitos que ocurren cerca del cruce por cero de la onda de voltaje y cortocircuitos que ocurren a través de una alta impedancia. En todos los casos el algoritmo discriminó correctamente entre cortocircuitos internos y externos a la línea protegida. Los resultados ponen de manifiesto que el algoritmo desarrollado satisface los requerimientos de confiabilidad, selectividad, sensibilidad y tiempo de operación impuestos para la protección de líneas de transmisión de alto voltaje, y representa la base para implementar un esquema de protección de líneas de transmisión de alta velocidad basado en ondas viajeras.

## PRINCIPIO DE DETECCIÓN DE FALLAS USANDO ONDAS VIAJERAS

### Ondas viajeras en una línea de transmisión

La solución de D'Alembert<sup>3</sup> de las ecuaciones de onda de voltaje,  $v(x,t)$  y de corriente,  $i(x,t)$ , en una línea de transmisión monofásica con parámetros distribuidos y sin pérdidas, está expresada como:

$$\begin{aligned} v(x,t) &= F_1(x-ut) + F_2(x+ut) \\ i(x,t) &= [F_1(x-ut) + F_2(x+ut)] / Z_0 \end{aligned} \quad (1)$$

donde  $x$  es la posición a lo largo de la línea,  $t$  es el tiempo,  $u$  es la velocidad de propagación y  $Z_0$  es la impedancia característica de la línea. Si  $L$  y  $C$  representan la inductancia serie y la capacitancia paralelo por unidad de longitud respectivamente, entonces:

$$u = \frac{1}{\sqrt{LC}}; Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2)$$

Las funciones  $F_1$  y  $F_2$  dependen de las condiciones de frontera del caso que se esté analizando. En general,  $F_1$  representa una onda que se desplaza en la dirección positiva de  $x$  a una velocidad  $c$  (onda directa), mientras que  $F_2$  es una onda que se desplaza en la dirección negativa de  $x$  a una velocidad  $c$  (onda inversa); la relación entre el voltaje y la corriente en  $F_1$  es  $Z_0$  y en  $F_2$  es  $-Z_0$ . Esta caracterización corresponde a una corriente positiva, representada como una carga positiva, circulando en la dirección positiva de  $x$ . Si el voltaje y la corriente son medidos en una localización  $x$ , es posible identificar la onda directa  $F_1$  e inversa  $F_2$ , formando las señales denominadas  $S_1$  y  $S_2$ :

$$\begin{aligned} S_1 &= v(x,t) + Z_0 i(x,t) = 2F_1(x-ut) \\ S_2 &= v(x,t) - Z_0 i(x,t) = 2F_2(x+ut) \end{aligned} \quad (3)$$

Si la medición del voltaje y la corriente se realizan en la ubicación del relevador ( $x = 0$ ), entonces las señales  $S_1$  y  $S_2$  son:

$$\begin{aligned} S_1 &= 2F_1(-ut) = v(0,t) + Z_0 i(0,t) \\ S_2 &= 2F_2(ut) = v(0,t) - Z_0 i(0,t) \end{aligned} \quad (4)$$

donde  $S_1$  representa el cambio de señal en la ubicación del relevador debido a la onda directa y  $S_2$  representa el cambio de señal en la ubicación del relevador debido a la onda inversa. Así, las señales  $S_1$  y  $S_2$  muestran en forma clara la diferencia entre las ondas viajeras directas (dirección positiva de  $x$ ) e inversas (dirección negativa de  $x$ ) en la ubicación del relevador.

El análisis anterior es válido para un sistema de potencia monofásico. En líneas de transmisión trifásicas los acoplamientos mutuos entre conductores dificultan el análisis del fenómeno de OV en el dominio de fases. Para simplificar los cálculos es necesario descomponer las señales de fase en sus correspondientes modos de propagación, obteniéndose 2 modos aéreos y uno de tierra, cada uno con su propia atenuación y velocidad de propagación. En el caso de líneas transpuestas los modos aéreos tienen la misma impedancia característica y velocidad de propagación. La transformación modal puede expresarse por:

$$\begin{aligned} \Delta v_m(t) &= S^{-1} \Delta v_f(t) \\ \Delta i_m(t) &= Q^{-1} \Delta i_f(t) \end{aligned} \quad (5)$$

donde  $\Delta v_f(t)$ ,  $\Delta i_f(t)$  son los voltajes y corrientes incrementales de fase y  $\Delta v_m(t)$ ,  $\Delta i_m(t)$  son sus correspondientes voltajes y corrientes modales. S y Q son las matrices de transformación, siendo las más comunes las de componentes simétricas, Karrenbauer y Wedephol.<sup>6</sup> La descomposición modal permite analizar un sistema trifásico en función de tres modos de propagación tratándolos como 3 sistemas monofásicos.

### Efecto de coeficientes de reflexión y refracción en los frentes de ondas viajeras

Las ondas viajeras que se generan ante la aparición de un disturbio en la línea de transmisión

se propagan por las líneas hasta que llegan a una discontinuidad (elementos en una subestación, unión de varias líneas, etc); en ese punto las ondas se dividen en una onda reflejada y una onda transmitida (ver figura 1), donde la magnitud de cada una de esas ondas está dada por los coeficientes de reflexión ( $k_R$ ) y refracción ( $k_T$ ) los cuales son de la forma:

$$\begin{aligned} k_R &= \frac{Z_b - Z_a}{Z_a + Z_b} \\ k_T &= \frac{2Z_b}{Z_a + Z_b} \end{aligned} \quad (6)$$

siendo  $Z_a$  y  $Z_b$  a las impedancias características de cada una de las líneas respectivamente.

Los frentes de ondas viajeras propagándose por una línea de transmisión experimentan una modificación en su contorno al atravesar una discontinuidad provocada por un cambio de impedancia. En la figura 1 una onda incidente  $V_i$  propagándose por la línea 2 con impedancia característica  $Z_b$  alcanza la discontinuidad y continúa a través de la línea 1 con una impedancia  $Z_a$  como una onda refractada experimentando una modificación en el contorno de  $V_i$  a  $k_T V_i$ .

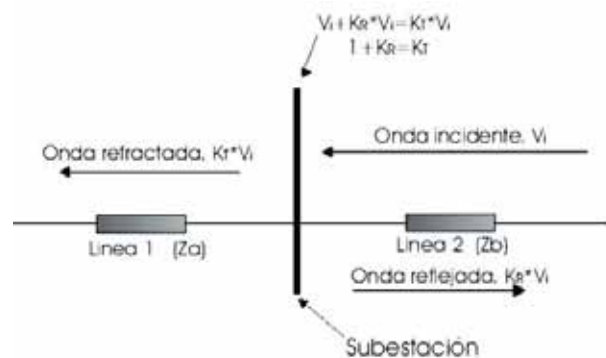


Fig. 1. Comportamiento de OV al alcanzar una discontinuidad en una red eléctrica.

En el caso de que ambas líneas sean idénticas ( $Z_a = Z_b$ ), el contorno de la onda viajera no se ve afectado, y no existe onda reflejada. Esta situación,  $Z_a = Z_b$  es difícil que se presente en sistemas eléctricos de potencia reales. Así mismo las ondas viajeras que se propagan a través de una línea de transmisión homogénea se ven mínimamente afectadas en su contorno aún considerando pérdidas por atenuación.<sup>5</sup>

Por tanto, un frente de onda originado por una falla externa experimenta una modificación en su contorno al pasar por la discontinuidad que representa el cambio de la impedancia característica entre las líneas de transmisión ( $Z_b$  a  $Z_a$  en la figura 1). A diferencia de esto, un frente de onda originado por una falla interna sólo es afectado por la atenuación propia de la línea.<sup>6</sup> Ésta es la base conceptual del nuevo algoritmo que se describe en este artículo.

## REPRESENTACIÓN DE FRENTES DE ONDAS VIAJERAS CON ACP

### Análisis de componente principal

El ACP es una técnica estadística de análisis multivariable ampliamente usada para encontrar patrones en datos de alta dimensión. Fue inicialmente estudiada por H. Hotelling<sup>7</sup> y se describe a continuación:

Para un grupo de vectores  $p$ -dimensionales  $\{t^n\}$ ,  $n \in \{1, \dots, N\}$ , los  $q$  ejes principales  $w_j$ ,  $j \in \{1, \dots, q\}$  son aquellos ejes ortonormales en los cuales la máxima varianza es retenida por proyección. Se puede demostrar que los ejes  $w_j$  corresponden a los  $q$  eigenvectores dominantes en:

$$S w_j = \lambda_j w_j \quad (7)$$

asociados a los eigenvalores más grandes de la matriz de covarianza  $S$  formada por:

$$S = \frac{\sum_{n=1}^n (t_n - \bar{t})(t_n - \bar{t})}{n-1} \quad (8)$$

donde  $\bar{t}$  es la media de la muestra. La nueva representación vectorial es:

$$x_n = W^T (t_n - \bar{t}) \quad (9)$$

donde  $W = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_q]$  y  $x_n$  corresponde a la representación reducida  $q$ -dimensional de los vectores  $\{t_n\}$ .

La ventaja de análisis de componente principal es que permite una reducción en dimensiones del problema realzando similitudes y diferencias entre los datos bajo estudio y simplificando el proceso de clasificación entre clases. Este concepto se muestra gráficamente en la figura 2 para un grupo de datos; el eje OA es la dirección de la primera componente principal y el eje OB es la segunda componente



Fig. 2. Representación gráfica del ACP.

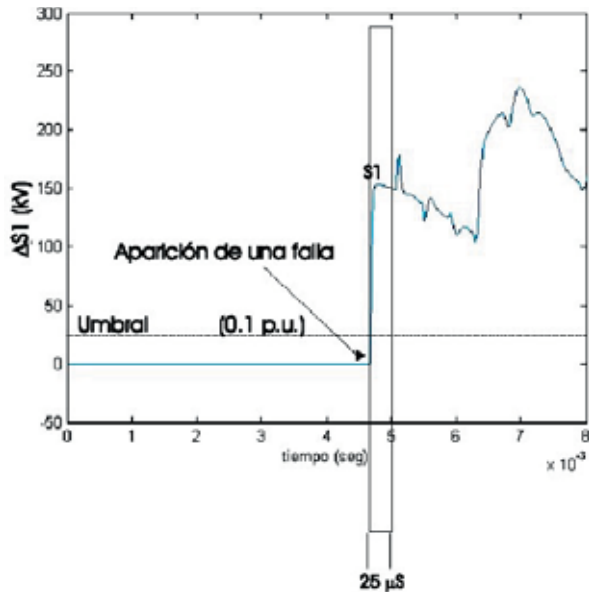
principal. Se puede apreciar que la proyección de los datos sobre OA da mayor información de la estructura de los datos que la proyección sobre OB. Por tanto, la identificación de distintos tipos de datos se puede hacer con la proyección de los datos originales sobre un eje cuya dirección maximice la varianza entre los datos, OA en este caso. En este ejemplo simple, se tiene una reducción de dimensiones de 2D a 1D.

### ACP aplicado a discriminación de fallas en líneas de transmisión

La idea es aplicar ACP con el propósito de identificar rasgos distintivos de los frentes de onda que permita identificar si son debidos a una falla interna o externa. El algoritmo propuesto utiliza el primer frente de onda de la señal incremental  $\Delta S_1$  usando el modo aéreo 1 bajo la matriz de transformación modal de Wedephol. Se asume que los transductores no degradan la forma del frente de onda generado por la falla. Cuando ocurre una falla la señal  $\Delta S_1$  se manifiesta indicando un cortocircuito, de tal forma que:

$$\begin{aligned} \Delta S_1 = 0 & \quad \text{Estado estable} \\ \Delta S_1 > \varepsilon & \quad \text{Cortocircuito} \end{aligned} \quad (10)$$

Un valor aceptable de  $\varepsilon$  es un incremento en magnitud de 0.1 p.u. tomando como base el voltaje de operación de la línea de transmisión. La selección de la ventana de datos se hizo en forma empírica y se forma con 25 muestras de la señal  $\Delta S_1$  con un intervalo de  $1 \times 10^{-6}$  seg. entre muestras, lo que representa una frecuencia de muestreo de 1 MHz. La primera muestra de la ventana de datos corresponde al primer valor de  $\Delta S_1$  que supera el umbral  $\varepsilon$  como lo indica la figura 3.



### Determinación de las componentes principales

Las condiciones de fallas elegidas como patrones de prueba se muestran en la tabla I, considerando el sistema de prueba mostrado en la figura 4, que fue simulado en el programa EMTDC/PSCAD.<sup>8</sup> Los frentes de onda generados por las fallas correspondientes al modo 1 (modo aéreo) fueron representados como vectores  $p$ -dimensionales de la forma  $\Delta S_i = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_p]$ , cuyos valores corresponden al primer frente de onda que alcanza la ubicación del relevador. Con el propósito de que el algoritmo funcione en cualquier sistema de potencia, independientemente de su configuración y voltaje de operación, se normalizaron las señales  $\Delta S_i$

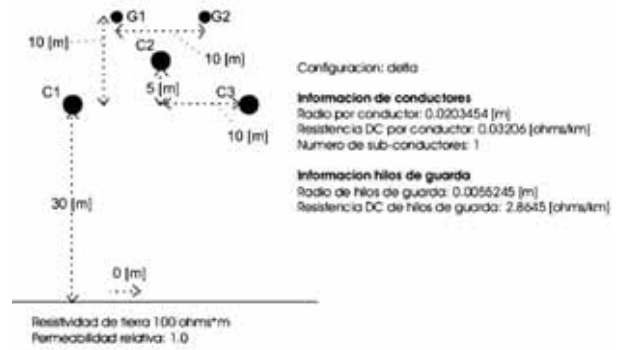
Tabla I. Casos de simulación para determinar las CP.

Tipo de falla	Resistencia de falla	Línea 1	Línea 2	Instante de inserción de falla POW (ms)
Fallas AG	$R_F = 0$	10, 20, 30, 40,	1, 5, 10, 20,	Cada 1 ms en un ciclo de la onda de voltaje
Fallas AG	$R_F = 50$	50, 60, 70, 80, 90, 95 y 99%	30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90%	
Fallas ABC	$R_F = 0$			

(correspondientes a los frentes de onda medidos en la ubicación del relevador) para que estén entre 0 y 1; con el propósito de no modificar el contorno de los frentes de onda, estos se escalaron de la forma:

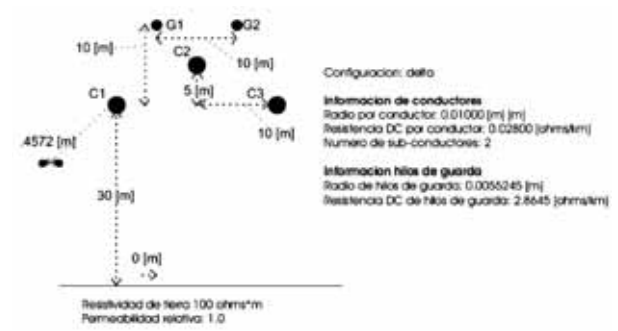
$$t = \begin{cases} \frac{\Delta S_i}{\max(\Delta S_i)} & \text{si } |\max(\Delta S_i)| > |\min(\Delta S_i)| \\ \frac{\Delta S_i}{\min(\Delta S_i)} & \text{si } |\max(\Delta S_i)| < |\min(\Delta S_i)| \end{cases} \quad (11)$$

En las figuras 4 y 5, se describe la configuración física de los conductores de las líneas de transmisión en el sistema de potencia de prueba que se muestra en la figura 6. Se puede apreciar como las configuraciones son virtualmente las mismas, con la diferencia



$$Z_0 = 391.77 \text{ ohms}, \tau = 0.341 \text{ ms}$$

Fig. 4. Configuración de línea A en los sistemas de prueba.



$$Z_0 = 313.15 \text{ ohms}, \tau = 0.338 \text{ ms}$$

Fig. 5. Configuración de línea B en los sistemas de prueba.

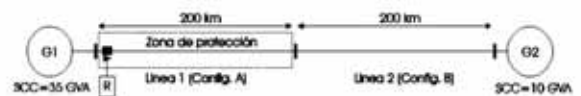


Fig. 6. Sistema de potencia de prueba 1.

de que en una de las líneas se consideran dos conductores por fase. Esto hace que las impedancias características y tiempos de propagación de ambas líneas sean extremadamente similares, con lo cual se pretende evaluar la sensibilidad del algoritmo ante el caso crítico en que ambas líneas sean casi idénticas.

Los vectores  $\mathbf{t}$  corresponden a las versiones normalizadas de los frentes de onda usados como patrones de prueba. La ventaja del uso de la ecuación 11 es que facilita el proceso de clasificación para discriminar entre fallas internas y externas, al mismo tiempo resuelve el problema de signo en la rotación de los ejes que representan las componentes principales.<sup>9</sup> Los vectores  $\mathbf{t}$  se pueden acomodar de la forma:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} t(1,1) & \dots & t(1,p) \\ \vdots & & \vdots \\ t(n,1) & \dots & t(n,p) \end{bmatrix} \quad (12)$$

El vector renglón conteniendo la media de cada columna de T es de la forma:

$$\bar{\mathbf{t}} = \left[ \frac{\sum_{k=1}^n t(k,1)}{n} \quad \frac{\sum_{k=1}^n t(k,2)}{n} \quad \dots \quad \frac{\sum_{k=1}^n t(k,p)}{n} \right] \quad (13)$$

y la matriz de covarianza de T es de la forma:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} cov(\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_1) & cov(\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2) & \dots & cov(\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_p) \\ cov(\mathbf{s}_2, \mathbf{s}_1) & cov(\mathbf{s}_2, \mathbf{s}_2) & \dots & cov(\mathbf{s}_2, \mathbf{s}_p) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ cov(\mathbf{s}_p, \mathbf{s}_1) & cov(\mathbf{s}_p, \mathbf{s}_2) & \dots & cov(\mathbf{s}_p, \mathbf{s}_p) \end{bmatrix} \quad (14)$$

donde  $\mathbf{s}_p$  es el p-ésimo vector columna de la matriz T.

A partir de S en (14) se obtienen los eigenvectores V y los eigenvalores D.

$$\mathbf{V} = [ eig_1 \quad eig_2 \quad \dots \quad eig_p ]$$

$$\mathbf{D} = diag [\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \dots \quad \lambda_p ] \quad (15)$$

Con el propósito de visualizar la relación entre los diferentes frentes, es deseable hacer una proyección a un subespacio de menor dimensión. Para ello se escogieron los eigenvectores dominantes (asociados a los eigenvalores más grandes) de la matriz de covarianza S, que por lo general corresponden a los dos primeros eigenvectores dominantes.

Los eigenvectores dominantes, los nuevos ejes sobre los que se van a proyectar los frentes de onda, se establecen a partir de la transformación:

$$CP_{12} = [ eig_1 \quad eig_2 ]^T \cdot [\mathbf{t} \quad -\bar{\mathbf{t}}]^T \quad (16)$$

donde  $\bar{\mathbf{t}}$  corresponde al vector columna con las medias de cada dimensión de los datos de prueba y  $CP_{12}$  son las proyecciones de los vectores  $\mathbf{t}$  en el subespacio de los dos primeros componentes principales.

Con el propósito de eliminar el efecto del instante de inserción de falla<sup>3</sup> se repitió el ACP para tiempos de inserción de 1 a 16 ms con paso de 1 ms en la onda de voltaje, obteniéndose al final 16 pares de componentes principales, correspondiéndole un par de CP a cada instante de inserción. Por tanto, antes de determinar la ubicación de una falla, se debe determinar en que instante de tiempo ocurrió; este problema se resuelve con el uso de un detector, que se describe en la siguiente sección.

### ALGORITMO

#### Detección y discriminación de fallas

Al aparecer una falla la señal  $\Delta S_i$  supera el valor umbral  $\epsilon$  indicando su existencia, a partir de ese instante la señal  $\Delta S_p$ , correspondiente al modo aéreo 1, es almacenada durante  $25 \times 10^{-6}$  seg. La señal  $\Delta S_i$  será representada en el sub-espacio de las dos primeras CP con el objetivo de determinar la ubicación de la falla. Para ello debe conocerse previamente el instante de inserción, y esta información puede obtenerse a partir de un detector. Este detector consiste en un contador que reinicia cada vez que se detecta un cruce por cero (ver figura 7);<sup>10</sup> cuando aparece una falla las señales incrementales obtenidas

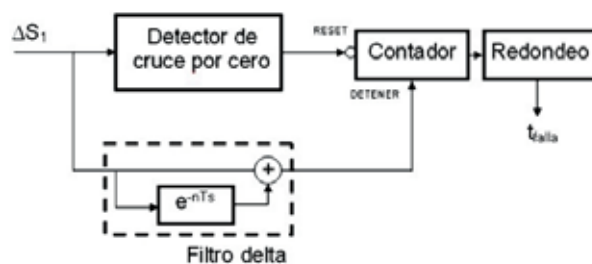


Fig. 7. Diagrama del detector del instante de inserción de falla.

por medio de un filtro delta<sup>11</sup> detienen el contador, el cual dependiendo del semi-ciclo en el que ocurrió la falla indican el instante de inserción de la misma. La señal redondeada es usada por el algoritmo para elegir el par de vectores de transformación, de los 16 disponibles.

En las figuras 8 y 10 se muestra el contorno de la señal  $\Delta S_1$  para las fallas A-G (con  $R_F = 50$  ohms) y ABC (sólidas,  $R_F = 0$  ohms) en las líneas L1 y en L2 (todas con un ángulo de inserción de  $90^\circ$ ); las tablas II y III describen las situaciones en que se simuló cada cortocircuito. Así mismo, las figuras 9 y 11 muestran sus correspondientes proyecciones en el subespacio de los dos primeros componentes principales.

Tabla II. Fallas A-G con  $R_F = 50$  ohms, con instante de inserción a  $90^\circ$ .

Fallas en línea L1 (distancia en %)
10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95 y 99%
Fallas en línea L2 (distancia en %)
1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90%

Tabla III. Fallas ABC con  $R_F=0$  ohms, con instante de inserción a  $90^\circ$ .

Fallas en la línea L1 (distancia en %)
10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95 y 99%
Fallas en la línea L2 (distancia en %)
1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90%

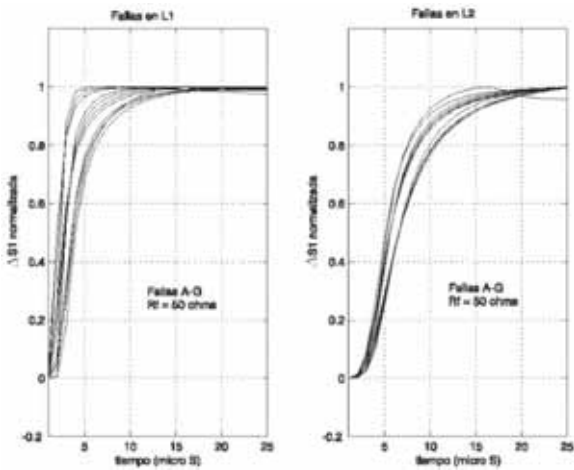


Fig. 8. Frentes de onda de fallas A-G con  $POW=90^\circ$  y  $R_F = 50$  ohms.

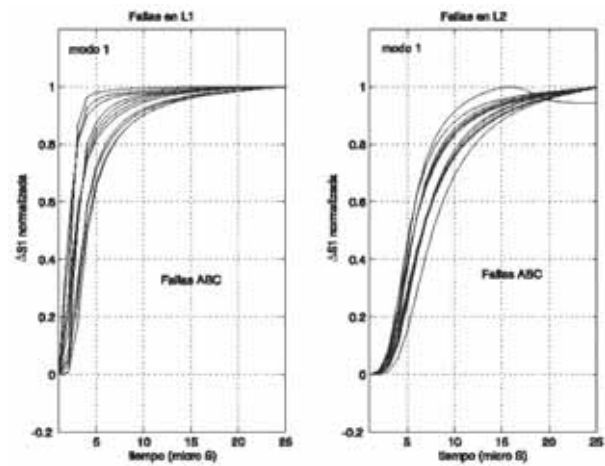


Fig. 10. Frentes de onda de fallas ABC sólidas con  $POW=90^\circ$ .

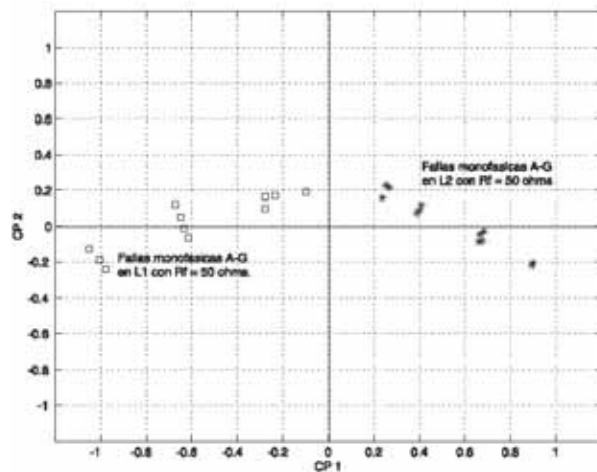


Fig. 9. Proyección de fallas A-G con  $POW=90^\circ$  y  $R_F = 50$  ohms.

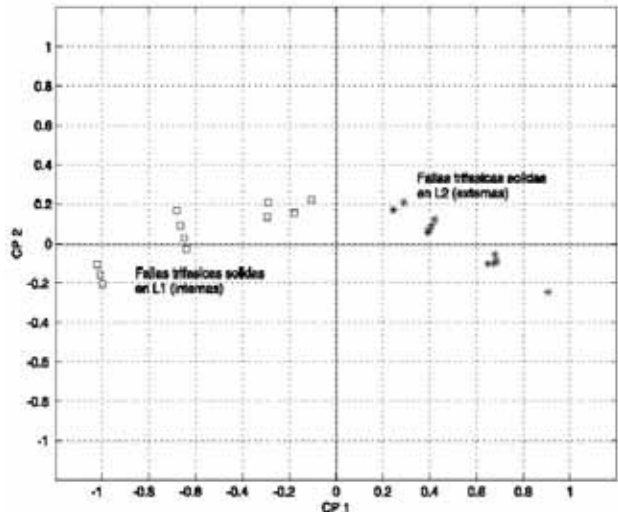


Fig. 11. Proyección de fallas ABC sólidas con  $POW=90^\circ$ .

### Diagrama de flujo

En la figura 12 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo; se observa como las señales de voltajes y corriente de fase se obtienen por medición en un extremo de la línea protegida a través de los transductores ópticos de corriente y potencial, posteriormente esas señales son desacopladas por medio de la transformación de Wedephol, y se obtiene la señal incremental  $\Delta S_i$  correspondiente al modo de propagación aéreo 1. Cuando una falla ocurre en la línea el frente de onda es almacenado durante  $25 \times 10^{-6}$  seg, y una vez que se calcula el ángulo de inserción de falla y se han elegido el par de vectores de transformación adecuado, el vector que contiene la señal  $\Delta S_i$  es proyectado en el subespacio de sus CP. En el caso de que la falla se detecte en un instante de tiempo que no coincida con los 16 utilizados para la obtención de las CP, el algoritmo considera que la falla ocurrió en el instante de tiempo inmediato superior, y utiliza las CP para ese tiempo.

Así, cuando ocurre una falla interna (la proyección aparece en el semi-plano izquierdo de CP) se genera una señal de disparo al interruptor; el bloque detector de señales de falla tiene como función detectar las señales de disparo en caso de un análisis multi-modal. El algoritmo cuenta con un detector direccional el cual no se aborda en este trabajo, que genera una señal de bloqueo para fallas que ocurren detrás de la línea protegida.<sup>5</sup>

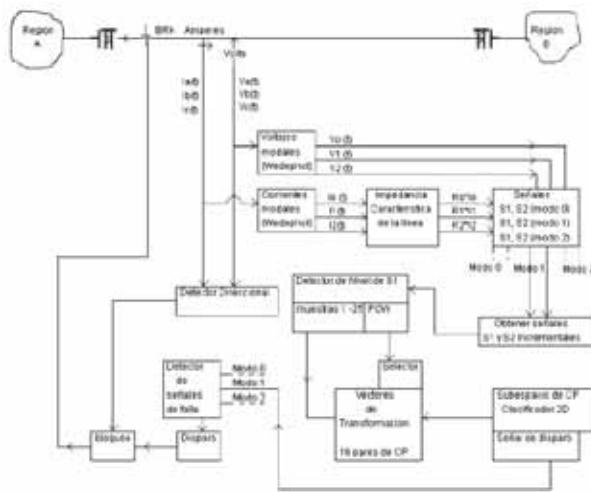


Fig. 12. Diagrama de flujo del algoritmo propuesto.

### RESULTADOS

#### Simulaciones en el sistema de prueba 1

Las tablas IV y V muestran casos de fallas monofásicas y trifásicas a los que se sometió el algoritmo para el sistema de prueba 1 (ver figura 4); sus correspondientes proyecciones se muestran en las figuras 13 y 14; se aprecia como el algoritmo discrimina correctamente entre fallas internas (semiplano izquierdo) y fallas externas (semi-plano derecho). A diferencia de las pruebas anteriores, estas fallas son simuladas en instantes de tiempo distintos a los utilizados para el cálculo de las CP; por ejemplo, para la primera falla en la tabla IV, el POW es de 10.48 ms, lo que significa que el algoritmo utilizará el par de CP correspondientes a un POW de 11 ms.

Tabla IV. Fallas ABC sólidas, sistema de prueba 1.

Tipo de falla	Distancia (km)	POW (ms)
ABC (interna)	81.80	10.48
ABC (interna)	122.18	5.94
ABC (interna)	62.85	9.51
ABC (interna)	35.00	11.46
ABC (interna)	9.19	12.42
ABC (interna)	193.21	2.97
ABC (externa)	8.28	11.21
ABC (externa)	80.36	4.82
ABC (externa)	82.31	3.18
ABC (externa)	78.82	1.05
ABC (externa)	144.39	6.80
ABC (externa)	22.43	13.40

Tabla V. Fallas A-G con  $R_f > 0$ , sistema de prueba 1.

Tipo de falla	Dist. (km)	POW (ms)	$R_f$ (ohms)
AG (interna)	61.24	9.10	74.6
AG (interna)	10.60	10.10	20.0
AG (interna)	57.18	3.75	22.8
AG (interna)	61.53	8.78	71.5
AG (interna)	68.35	14.90	60.4
AG (interna)	188.46	3.90	5.36
AG (externa)	22.43	11.48	36.40
AG (externa)	144.39	6.27	15.7
AG (externa)	78.82	8.03	67.81
AG (externa)	82.31	1.18	56.14
AG (externa)	80.36	6.35	75.26
AG (externa)	108.28	4.61	10.47



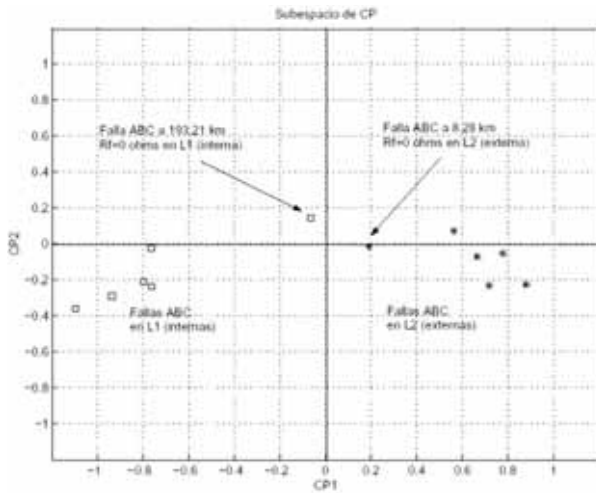


Fig. 13. Proyección de fallas ABC sólidas simuladas en el sistema de prueba 1.

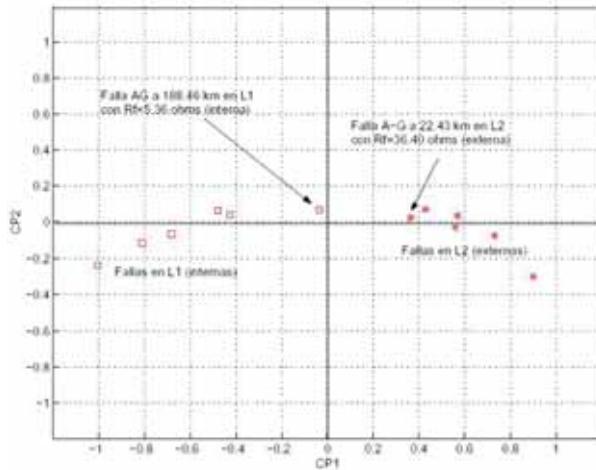


Fig. 14. Proyección de fallas A-G simuladas en el sistema de prueba 1.

### Simulaciones en el sistema de prueba 2

Se realizaron pruebas en el sistema de prueba 2 (ver figura 15) con la finalidad de demostrar que el algoritmo puede detectar fallas en la línea protegida independientemente de la topología del sistema de potencia, esto es posible ya que las señales de entrada son normalizadas antes de ser procesadas.

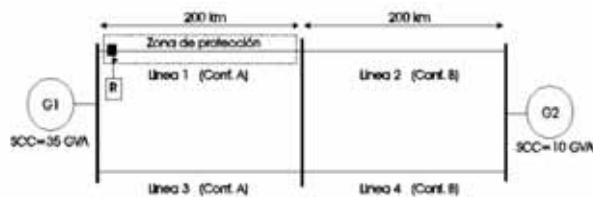


Fig. 15. Sistema de potencia de prueba 2.

Tabla VI. Fallas trifásicas sólidas, sistema de prueba 2.

Tipo de falla	POW (ms)	Distancia (km)
ABC(interna)	14	8
ABC(interna)	7	88
ABC(interna)	6	70
ABC(interna)	13.4	24
ABC(interna)	9.0	190
ABC(interna)	5.9	143
ABC(externa)	9.9	30
ABC(externa)	14.3	135
ABC(externa)	13.1	192
ABC(externa)	12	6
ABC(externa)	11	95
ABC(externa)	4	110

Tabla VII. Fallas monofásicas con resistencia de falla, sistema de prueba 2.

Tipo de falla	POW (ms)	Distancia (km)	R <sub>F</sub> (ohms)
A-G(interna)	9	90	20
A-G(interna)	4	88	40
A-G(interna)	3	70	60
A-G(interna)	10.9	24	20
A-G(interna)	4.8	190	40
A-G(interna)	8.6	143	60
A-G(externa)	2.4	30	20
A-G(externa)	11.1	135	40
A-G(externa)	6.0	139	60
A-G(externa)	13	145	20
A-G(externa)	9	95	40
A-G(externa)	3	195	60

Las simulaciones de falla se hicieron en un sistema de prueba más complejo usando las componentes principales generadas para el sistema de prueba 1, los casos de falla simulados se muestran en las tablas VI y VII, las figuras 16 y 17 muestran sus proyecciones en el subespacio de las dos primeras CP; se aprecia como el algoritmo discrimina correctamente entre fallas internas (semi-plano izquierdo) y fallas externas (semiplano derecho).

El algoritmo no tuvo problemas para clasificar las fallas independientemente del semi-ciclo en el que ocurren, su ubicación, la resistencia de falla

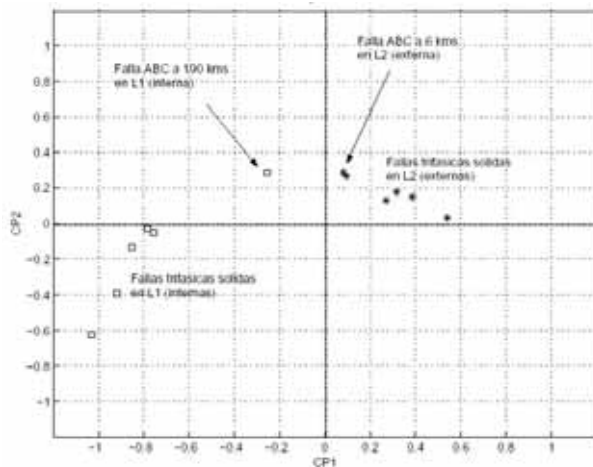


Fig. 16. Proyección de fallas ABC simuladas en el sistema de prueba 2 (Tabla VI).

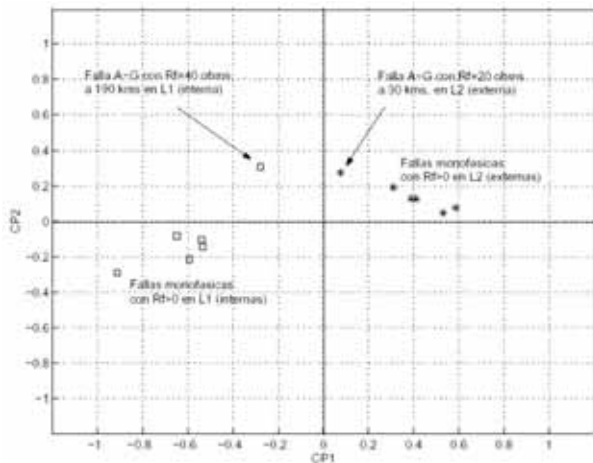


Fig. 17. Proyección de fallas A-G simuladas en el sistema de prueba 2 (Tabla VII).

o el instante de inserción; incluso, el algoritmo resuelve el problema de clasificación, por lo que no es necesario utilizar ninguna otra técnica de clasificación de información. Esto es posible ya que para cada falla se calcula el instante de inserción, lo que permite elegir el par de vectores de transformación adecuados. Esto incrementa la confiabilidad del algoritmo para una discriminación correcta de la ubicación de la falla.

El uso de la ventana de datos impone restricciones al detectar y discriminar fallas que ocurren cerca del bus local. Esto se debe a que una onda viajera generada por una falla cercana, llegará rápidamente a

la ubicación del relevador reflejándose continuamente entre el bus y el punto de falla. Estas reflexiones sucesivas provocan distorsiones en el frente de onda originalmente generado por la falla. La distancia mínima a la que el frente de onda no es afectado es  $x = uT_v$  donde  $u$  es la velocidad de propagación de la onda viajera y  $T_v$  es el tamaño de la ventana de datos; si  $u=300,000 \text{ km/s}$ , y  $T_v = 25 \times 10^{-6}$  segundos entonces  $x = 7.5 \text{ km}$ .

## CONCLUSIONES

El algoritmo de protección propuesto usa la técnica de ACP con el propósito de obtener una representación en un subespacio de 2 dimensiones de los frentes de onda originados por un cortocircuito; esto permite simplificar el proceso de discriminación de la ubicación del cortocircuito ya que no se requiere el uso de técnicas de clasificación.

La dependencia en el instante de inserción de fallas se eliminó obteniendo 16 pares de componentes principales, correspondiéndole un par para cada ángulo de inserción en un ciclo de 60 Hertz; para fallas que ocurran entre esos instantes se redondea al inmediato superior, esto permite que cualquier falla pueda ser clasificada sin importar el instante en que ocurrió ni su ubicación.

Los resultados obtenidos en las pruebas muestran la capacidad del algoritmo propuesto para distinguir entre fallas internas y externas usando solamente el primer frente de onda, independientemente de la configuración de la red eléctrica. Esto implica una disminución considerable en el tiempo de detección y liberación de fallas en líneas de transmisión, que tiene como consecuencia una reducción de los tiempos de interrupción del servicio eléctrico a los consumidores.

## REFERENCIAS

1. Stanley H. Horowitz, Power System Relaying, Second edition, Research Studies Press LTD. John Wiley and Sons inc. 1995
2. J. Lewis Blackburn, Protective Relaying, principles and applications, Marcel Dekker Inc., Bothell, Washington 1987.
3. Ernesto Vázquez Martínez, Application of Pattern Recognition with Principal Component Analysis

- for Travelling Wave Protection, <http://www.ipst.org/TechPapers/2001/IPST01Paper105.pdf>, IPST '01 - Rio de Janeiro, Brazil, June 24-28, 2001.
4. P. A. Crossley and P. G. McLaren, "Distance protection based on travelling waves," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, no. 9, September 1983, pp. 2971-2983.
  5. A. T. Johns and S. K. Salman, Digital Protection for Power Systems. Peter Peregrinus LTD, England, 1995.
  6. Iván de Jesús Rivas Cambero, Tesis: análisis y evaluación de dos métodos de protección modal de distancia, CINVESTAV Guadalajara, Jalisco, Mayo 2002.
  7. Stefan Van Aelst, Principal Component Analysis, Ghent University, Faculty of Sciences, Department of Applied Mathematics and Computer Science, Krijgslaan 281, S9 B-9000 Gent Belgium.
  8. PSCAD/EMTDC - Tool for power system simulation, Manitoba Hydro, The Manitoba HVDC Research Centre, website [www.pscad.com](http://www.pscad.com), Canada.
  9. Christopher Chatfield and Alexander J. Collins, Introduction to Multivariate Analysis, School of Mathematics, Bath University, Chapman and Hall, London-New York 1980.
  10. E. H. Shehab-Eldin, P. G. McLaren, Travelling wave distance protection problem areas and solution, University Engineering Department, Trumpington Street, Cambridge, U.K. July 1988.
  11. Gabriel Benmouy, Jeff Roberts, Superimposed Quantities: Their true nature and application in relays, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Pullman, WA USA, SEL USA 1999.

Anúnciese en

# Ingenierías

Informes:  
Tel: (52) (81) 8329-4020 Ext. 5854  
Fax: (52) (81) 8332-0904  
Correo Electrónico: [fjelizon@mail.uanl.mx](mailto:fjelizon@mail.uanl.mx)  
Página en Internet:  
<http://ingenierias.uanl.mx>