

# Identificación de oscilaciones de potencia utilizando reconocimiento de patrones

Josué Coutiño O., Ernesto Vázquez M., Óscar Chacón M.\*  
Héctor J. Altuve F.\*\*

## Abstract

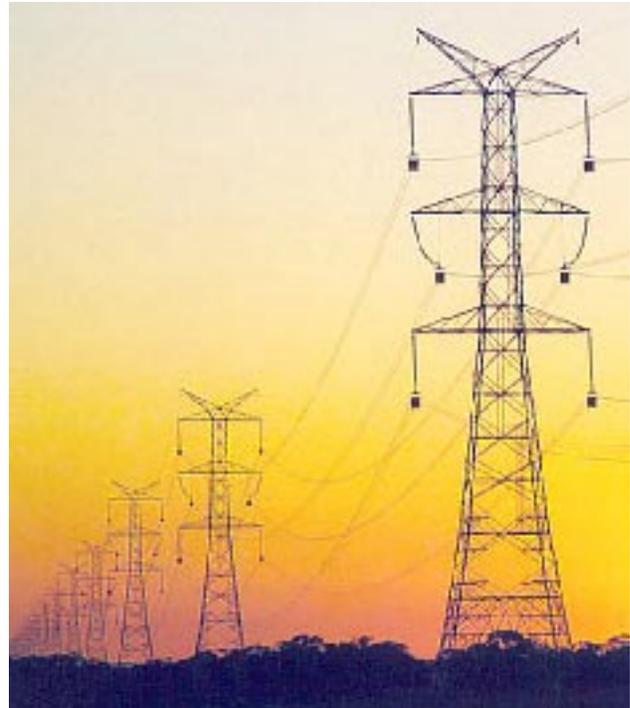
*Any sudden change in the configuration or the load of an electrical power system causes a power swing between groups of generators. In order to avoid distance protection operation during such conditions, a power swing blocking device is often used. Conventional blocking devices may fail for very fast power swings. The method proposed in this paper uses a neural network approach to solve the power swing identification task as a pattern-recognition problem, using information about the dynamic behavior of the apparent impedance measured by the relay. The results obtained are based on transient stability studies on a power system model using MATLAB. These results show that a neural network can identify very fast power swings.*

**Keywords:** Distance protection, protective relaying, power systems, neural networks, pattern recognition.

## I. INTRODUCCIÓN

Una oscilación de potencia es un régimen anormal de operación que provoca alteraciones en los parámetros del sistema en ausencia de fallas. Las oscilaciones de potencia entre las máquinas síncronas de un sistema eléctrico de potencia se originan por lo general, como consecuencia de la desconexión tardía de un cortocircuito, o ya sea por la desconexión de una línea de enlace o una planta generadora. Este régimen se presenta también cuando se utilizan en el sistema dispositivos de recierre automático asíncrono de interruptores.

Como consecuencia de una oscilación de potencia se origina la variación con el tiempo del ángulo de defasaje ( $\delta$ ) entre las fuerzas electromotrices (FEM), la corriente y el voltaje adquieren un carácter pulsante. La frecuencia de estas oscilaciones es del orden de 0.1 a 5 Hz. Las bajas frecuencias son características de sistemas eléctricos fuertes y de los primeros



instantes de la oscilación, y las altas frecuencias son típicas en sistemas débiles y en ciclos de oscilación posteriores al primero.<sup>1</sup>

Una oscilación de potencia no es en general simétrica debido a las asimetrías propias de los elementos del sistema, a las presencias de fallas asimétricas ó a disparos y recierres monopolares, además de que la frecuencia también varía durante la oscilación de potencia.<sup>2</sup>

Durante un cortocircuito la impedancia aparente medida por los relevadores de distancia coincide (en el caso ideal) con la impedancia de la sección de la

\* Programa Doctoral en Ingeniería Eléctrica de la FIME-UANL. jrcoutino@yahoo.com, evazquez@gama.fime.uanl.mx, ochacon@uanl.mx

\*\* Schweitzer Engineering Laboratories Inc. haltuve@hotmail.com

línea comprendida entre el punto de ubicación del relevador y el del cortocircuito,

$$Z_r = \frac{V_r}{I_r} \quad (1)$$

En general la impedancia  $Z_r$  es proporcional a la longitud de la sección de la línea comprendida desde el punto de ubicación del relevador hasta el punto del cortocircuito, es decir, proporcional a la distancia eléctrica hasta la falla. Al ocurrir un cortocircuito la corriente aumenta y el voltaje disminuye, por lo que  $Z_r$  tiende a disminuir. Este efecto puede hacer que el relevador de distancia opere inadecuadamente, debido a que en las oscilaciones de potencia se presenta el mismo efecto, reducciones de voltaje e incrementos de corriente.

En este trabajo se analizan algunos métodos de bloqueo por oscilaciones de potencia y se propone la utilización de una red de neuronas artificiales para identificar la condición anormal que está ocurriendo, y bloquear la operación del relevador si se trata de una oscilación de potencia.

## II. MÉTODOS DE BLOQUEO POR OSCILACIONES DE POTENCIA

### A. Medición de la razón de cambio de la impedancia.

Este método se basa en el hecho de que los puntos que forman la trayectoria de impedancia aparente medida por el relevador se desplazan por el plano complejo con distintas velocidades en los casos de cortocircuitos y de oscilaciones de potencia. En este caso, el elemento de bloqueo tiene una característica que circunda a la del relevador de distancia en el plano complejo (figura 1).

Cuando se origina una oscilación de potencia, el punto comienza a desplazarse de derecha a izquierda

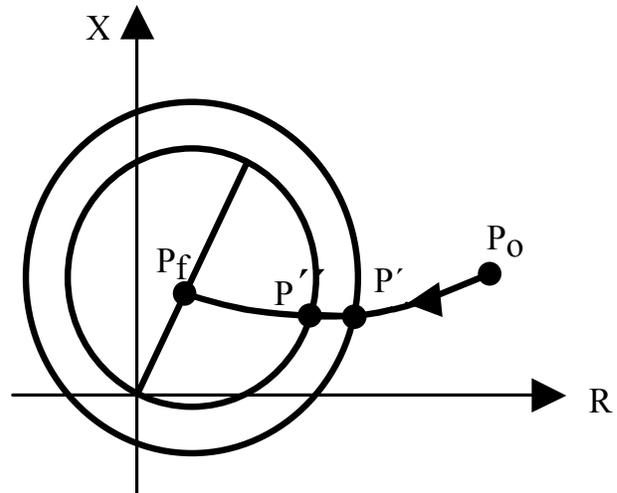


Fig. 1. Principio de operación de un sistema de bloqueo de disparo por oscilaciones de potencia.

por el plano complejo-impedancia (el generador equivalente detrás del relevador se acelera con respecto al sistema), pasa por las posiciones  $P'$  y  $P''$ , y entra en la zona de operación del relevador de distancia. Como el desplazamiento de  $P$  es relativamente lento hay un intervalo de tiempo apreciable entre los momentos en que  $P$  ocupa las posiciones  $P'$  y  $P''$ , lo que da tiempo a que la señal emitida por el relevador de bloqueo impida la puesta en funcionamiento del relevador de distancia. Cuando ocurre un cortocircuito trifásico en el punto  $P_f$  de la línea protegida, el punto  $P$  se desplaza a gran velocidad, por lo que los puntos  $P'$  y  $P''$  son prácticamente simultáneos. La señal de bloqueo no tiene tiempo de originarse y el relevador de distancia está libre para operar, si el cortocircuito lo requiere. Este método tiene dificultades para discriminar entre cortocircuitos y oscilaciones de potencia muy rápidas, como las que ocurren durante las pérdidas de sincronismo en sistemas eléctricos débiles, sobre todo después del primer ciclo de la oscilación.<sup>2</sup> Este esquema de bloqueo funciona correctamente en el primer ciclo de una pérdida de sincronismo, sin embargo

puede llegar a fallar en ciclos posteriores permitiendo la operación incorrecta de relevadores de distancia.

### B. Medición de la razón de cambio de la resistencia aparente.

Este método se basa en la medición de la razón de cambio de la resistencia aparente para identificar oscilaciones de potencia inestables (pérdidas de sincronismo) y proporcionar un medio de bloqueo en condiciones de oscilaciones de potencia estables.<sup>3,4</sup>

La ley de control basada en la razón de cambio de la impedancia se describe como:

donde  $U_1$  es el control de la salida,  $Z$  es la magnitud

$$U_1 = (Z - Z_1) + T_1 \frac{dZ}{dt} \quad (2)$$

de impedancia aparente medida por el relevador,  $Z_1$  y  $T_1$  son parámetros del relevador y  $dZ/dt$  se expresa como (3).

Cuando la impedancia medida por el relevador ( $Z$ ),

$$\frac{dZ}{dt} = \dot{Z} = -\frac{\frac{X}{4}}{\text{sen}^2\left(\frac{\delta}{2}\right)} \dot{\delta} = -\frac{Z^2 + \left(\frac{X}{2}\right)^2}{X} \dot{\delta} \quad (3)$$

es menor que su ajuste ( $Z_1$ ), la salida de control  $U_1$  cambia de un valor positivo a uno negativo. En un plano de fase,  $U_1$  representa la "frontera de decisión". La operación tiene lugar cuando la trayectoria de impedancia aparente cruza la "frontera de decisión" de derecha a izquierda.

El segundo término de la ley de control (2) se refiere a la razón de cambio de la separación angular de los generadores equivalentes en ambos ex-

tremos de la línea, y tiene por objetivo anticipar una probable inestabilidad en el sistema (un  $dZ/dt$  de valor pequeño corresponde a una pequeña razón de cambio angular y viceversa). Para una oscilación de potencia estable o de pequeña magnitud, el término  $dZ/dt$  será muy pequeño, y el esquema operará de forma similar al método anterior. Sin embargo, durante oscilaciones de potencia inestables y pérdidas de sincronismo, el término  $dZ/dt$  adquiere valores negativos de mayor valor que anticipa un disparo intencional por pérdida de sincronismo. El nivel de anticipación está determinada por  $T_1$ , que representa el tiempo total de operación del esquema (relevador e interruptor). Por lo tanto,  $U_1$  se representa con una línea recta en el plano de fase ( $Z, \dot{Z}$ ).

En la práctica, este método se ha implementado utilizando la razón de cambio de la resistencia aparente, con el fin de que el relevador sea insensible a la ubicación del centro eléctrico con respecto al punto donde está instalado el relevador. La discriminación entre fallas y oscilaciones se realiza con dos características de resistencia  $R_{b1}$  y  $R_{b2}$ , separadas en base al mayor valor negativo esperado de  $dR/dt$  durante una oscilación de potencia, a fin de tener al menos dos muestras de resistencia entre  $R_{b1}$  y  $R_{b2}$ . Por lo tanto, si el tiempo transcurrido desde que la resistencia aparente es menor que  $R_{b1}$  hasta que también se vuelve menor que  $R_{b2}$  es mayor que un ajuste  $\Delta T$ , se determina que se trata de una oscilación de potencia y se bloquea la operación del relevador.

Es importante mencionar que el esquema propuesto en este método tiene mayor énfasis en provocar el disparo intencional por pérdida de sincronismo, y que el método para la detección de la oscilación de potencia es similar al método de la razón de cambio de la impedancia (dos características de resistencia separadas un  $\Delta R$ ).

**C. Método de la razón de cambio de una componente de voltaje.**

Este método se basa en la variación abrupta de una componente del voltaje medida en la ubicación del relevador<sup>5</sup>. La componente del voltaje es  $V \cos \varphi$  y tiene la característica que su variación es independiente de la localización del relevador. Considere el sistema de dos máquinas de la figura 2;  $E_A$  y  $E_B$  son las fuerzas electromotrices de cada generador y  $X_A$ ,  $X_B$  las reactancias del circuito, tal que  $X_{AB} = X_A + X_B$ ,  $k_X = X_A / X_B$  y  $k_E = E_A / E_B$ .

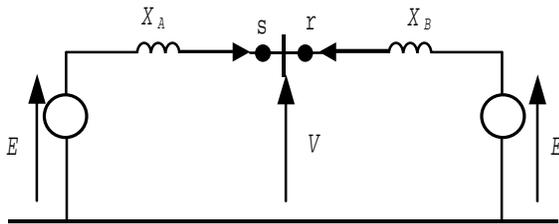


Fig. 2. Circuito equivalente de un sistema de potencia de dos máquinas.

Los puntos  $s$  y  $r$  representan las terminales de envío y recepción de las líneas respectivamente, conectadas a una barra y con la dirección de flujo de potencia opuestas

Del circuito se puede demostrar que para el extremo de envío:

$$q = V \cos \varphi = \frac{P}{I} = \frac{E_A \sin \delta}{\sqrt{k_E^2 + 1 - 2k_E \cos \delta}} \quad (4)$$

Una propiedad importante de esta componente de voltaje es que no depende del coeficiente  $k_X$  que representa la ubicación del relevador en la red.

El criterio de operación de éste método está determinado por el decremento continuo de  $|V \cos \varphi|$ . Cuando ésta disminución alcanza un valor de umbral, se genera una señal de bloqueo.

Para operaciones asíncronas la desviación de ve-

locidad es positiva y para un intervalo amplio de  $\delta$  la señal será negativa con un valor negativo grande en la vecindad de  $\delta = \pi$ :

$$\text{señal} = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt} [V \cos \varphi] \cong \frac{\partial q}{\partial \delta} \Delta w \quad (5)$$

Para oscilaciones de potencia estables la desviación de la velocidad es positiva para un flujo de potencia positivo ( $r$  a  $s$ ), cero cuando el flujo es cero y negativa para un flujo negativo ( $s$  a  $r$ ). Como (5) es negativa para flujo positivo, ésta desaparece cuando el flujo es nulo y se vuelve positiva cuando el flujo es negativo. Cuando la señal desaparece y se vuelve positiva, la señal de bloqueo debe ser sostenida por un detector de falla.

La expresión (4) ha sido derivada para la terminal de envío de la línea, mientras que para la terminal de recepción el signo de  $q$  es opuesto. En general es imposible predeterminar si una terminal es de envío o de recepción, en especial en redes malladas donde la dirección del flujo de potencia no es fijo y puede cambiar de acuerdo a la condición de operación. En estas circunstancias el relevador de bloqueo basado en  $V \cos \varphi$  funciona mal, debido a que  $dq/dt$  tiene un signo erróneo.

**D. Método mejorado de la razón de cambio de una componente de voltaje.**

Un método alternativo para evitar los problemas asociados al signo de la señal  $q = V \cos \varphi$  es utilizar una entrada adicional.<sup>6</sup> La resistencia y la reactancia, en función del ángulo de potencia  $\delta$ , vistas por el relevador de distancia están dadas por:

$$R(t) = \pm X_B \frac{k_E (k_X + 1) \sin \delta}{k_E^2 + 1 + 2k_E \cos \delta} \quad (6)$$

$$X(t) = \pm X_B \frac{k_E^2 - k_X + k_E (k_X - 1) \cos \delta}{k_E^2 + 1 - 2k_E \cos \delta} \quad (7)$$

donde el signo (+) es con respecto a la terminal de envío y el signo (-) es con respecto a la terminal de recepción de la línea.

En base al sistema de la figura 2 la dirección de la trayectoria de impedancia aparente medida por el relevador en una oscilación de potencia está dada por:

$$\frac{dR}{dt} \Big|_{(\delta=\pi)} = \pm X_B \frac{k_E (k_X + 1)}{(k_E + 1)^2} \Delta\omega \quad (8)$$

donde el signo (+) es con respecto a la terminal de envío y el signo (-) es con respecto a la terminal de recepción de la línea. Todos los factores en (8) son positivos y para una desviación de velocidad  $\Delta\omega > 0$ ,  $dR/dt$  es negativa con respecto al extremo de envío y positiva con respecto al extremo de recepción de la línea.

La conclusión de la consideración anterior es que el signo de la derivada con respecto al tiempo  $dR / dt \equiv \Delta R / \Delta t$  o simplemente el signo del incremento  $\Delta R$  determina el signo de la señal de bloqueo. Por lo tanto, (5) se modifica como:

$$señal = \frac{dq}{dt} sign FD \quad (9)$$

donde FD es la señal del detector de falla y *sign* está determinado de la siguiente forma:

$$sign = \begin{cases} +1, & \Delta R < 0 \\ 0, & \Delta R = 0 \\ -1, & \Delta R > 0 \end{cases} \quad (10)$$

Esta modificación provoca que en operaciones asíncronas (9) sea negativa para ambos tipos de nodos de envío y de recepción. Por otra parte para oscilaciones de potencia síncronas la señal es negativa para direcciones de flujo en ambos sentidos, ya que el signo de  $\Delta R$  para flujo negativo (*s a r*) es opuesto al signo del flujo positivo y compensa los cambios de signo de la desviación de la velocidad.

### III. MÉTODO PROPUESTO

El problema de identificación de oscilaciones de potencia para funciones de bloqueo de relevadores de distancia tiene características que sugieren su posible solución mediante técnicas de inteligencia artificial, y, en particular, utilizando redes de neuronas artificiales (RNA). En este sentido, la discriminación entre cortocircuitos y oscilaciones de potencia puede concebirse como un problema de reconocimiento de patrones, área donde las RNA han probado ser adecuadas.<sup>7</sup>

El enfoque propuesto en este artículo consiste en entrenar una red de neuronas artificial (RNA) utilizando como información de entrada las variables eléctricas correspondientes a oscilaciones de potencia (condición de bloqueo, identificada como una salida +1 de la RNA) y cortocircuitos (condición de no bloqueo, que se identifica como una salida -1) en el sistema eléctrico de potencia. A fin de evaluar el impacto del procesamiento digital de señales utilizado en los modernos relevadores de distancia, se simuló el filtrado analógico anti-aliasing, el proceso de muestreo y el filtrado digital<sup>8</sup> como etapas previas a la RNA. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la capacidad de generalización de la RNA para discriminar entre las trayectorias de impedancia correspondientes a oscilaciones de potencia y fallas, lo que representa la base de un nuevo método de bloqueo de disparo por oscilaciones de potencia que no es afectado por la frecuencia de oscilación.

#### A. Estructura de la RNA.

Las neuronas de la red fueron implementadas utilizando funciones de activación sigmoideas bipolares que en previos trabajos de investigación han demostrado tener un mejor comportamiento para el mapeo no lineal.<sup>9</sup>

Con respecto a la arquitectura de la red, se decidió utilizar una estructura de propagación hacia delante (no recurrente) con dos capas de perceptrones (figura 3).

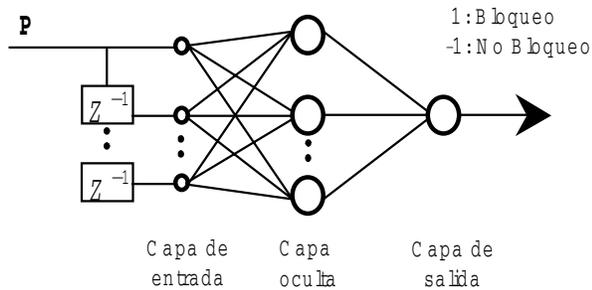


Fig. 3. Estructura de la RNA propuesta.

La estructura propuesta consiste en una RNA con dos capas de neuronas, cinco neuronas en la capa oculta y una en la capa de salida, debido a que se trata de una decisión binaria (bloqueo, no bloqueo).

La estructura de la RNA fue determinada por regularización;<sup>10</sup> esta técnica permite, a partir de la información de entrada, determinar el número mínimo de conexiones entre neuronas que asegure el entrenamiento de la red.

### B. Entrenamiento de la RNA.

Para la generación de patrones de entrenamiento de la RNA se hizo la simulación en MATLAB del sistema de potencia de prueba mostrado en la figura 4. Está compuesto por un generador conectado a un sistema infinito a través de una línea de transmisión. El período de integración utilizado es de 1 ms, de modo que se obtienen valores fasoriales de voltaje y corriente espaciados 1 ms. Esto equivale a la información que se obtiene en un relevador digital con una frecuencia de muestreo de 960 Hz (16 muestras por ciclo), que es muy utilizada en relevadores comerciales.

La perturbación aplicada al sistema fue un cortocircuito trifásico al final de la línea, el cual era liberado posteriormente. Las trayectorias de la impedancia aparente correspondientes a fallas y oscilaciones de potencia vistas por el relevador se generaron con diferentes tiempos de liberación de la falla.

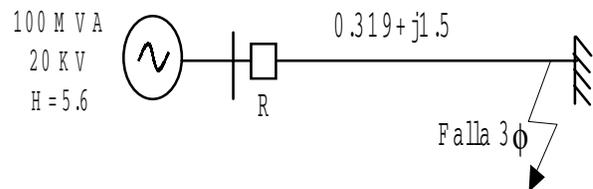


Fig. 4. Sistema de Potencia.

Los patrones de entrada (**P**) se formaron a partir de las muestras de la impedancia medida por el relevador (figura 4) de manera que cada uno está compuesto por 5 muestras de resistencia y 5 muestras de reactancia como  $P_i = [R_{1p}, \dots, R_{1+4p}, X_{1p}, \dots, X_{1+4p}]^t$  (ver figura 5). La salida de la RNA se seleccionó como +1 para oscilaciones de potencia (bloqueo) y -1 para fallas (no bloqueo). En total se generaron 906 patrones de entrenamiento, de los cuales 311 fueron de fallas y 595 de oscilaciones. El proceso de entrenamiento redujo el error a los valores límite de  $2 \times 10^{-8}$  en un tiempo aproximado de 2.5 segundos utilizando el método de Levenberg-Marquardt.<sup>11</sup>

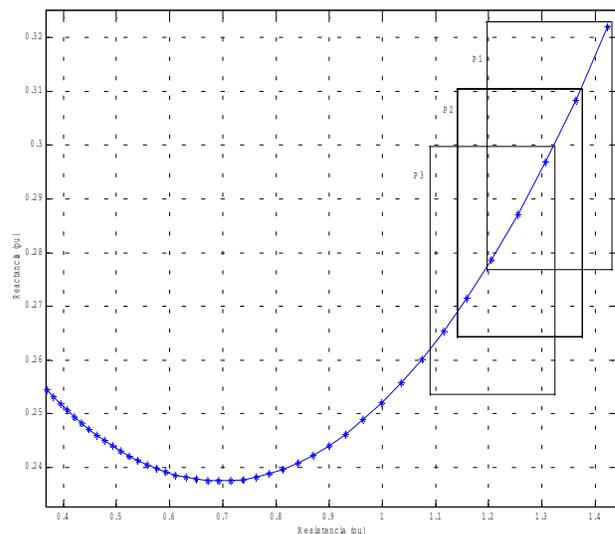


Fig. 5. Patrones de entrenamiento.

El retardo de tiempo introducido por las etapas de filtrado de un relevador digital ocasiona que la impedancia aparente medida por el relevador presente una variación más lenta de lo que en realidad es. Este comportamiento puede ocasionar que la RNA confunda un cortocircuito con una oscilación de potencia, provocando la operación incorrecta del esquema de bloqueo. Para evaluar este efecto se simularon las etapas de filtrado analógico anti-aliasing, el proceso de muestreo y el filtrado digital, tal y como se muestra en la figura 6.

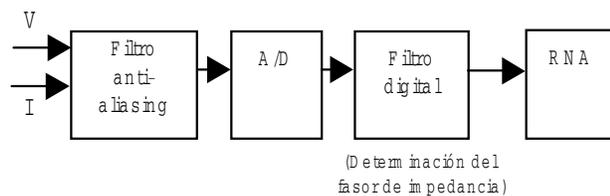


Fig. 6. Proceso de filtrado de señales en un relevador digital.

La información de voltaje y corriente se obtiene (por simulación) como una secuencia de muestras correspondiente a una frecuencia de muestreo de 28.8 KHz. Esta señal “analógica” es aplicada al modelo digital de un filtro anti-aliasing (Butterworth de cuarto orden y 90 Hz. de frecuencia de corte) y posteriormente es diezmada (razón 1/30), para simular el proceso de muestreo a una frecuencia de 960 Hz., típica en relevadores digitales de distancia. Los fasores de voltaje y corriente así como la impedancia medida se obtienen con un filtro digital tipo coseno, con una ventana de datos rectangular de 16 muestras.<sup>12</sup>

Es importante hacer énfasis en que la RNA fue entrenada sin considerar el retardo de tiempo introducido por las etapas de filtrado y se analizó su comportamiento en la discriminación entre oscilaciones de potencia y cortocircuitos tomando en cuenta este efecto.

#### IV. RESULTADOS

Se realizaron diversas pruebas para analizar el comportamiento de la RNA utilizando el sistema trifásico que se muestra en la figura 7, el cual fue simulado con el programa EMTDC.<sup>13</sup> Una de estas pruebas consistió en analizar la respuesta de la RNA ante una oscilación inestable (pérdida de sincronismo) provocada por la liberación tardía de una falla. Para ello se simuló una falla trifásica en el nodo del transformador  $T_2$  a los 0.1 segundos, sostenida durante 20 ciclos y liberada con la apertura de la línea  $L_1$ .

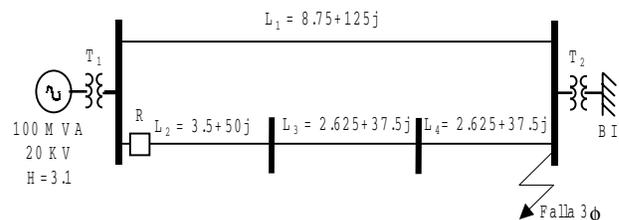


Fig. 7. Sistema de prueba.

En la figura 8 se puede apreciar el comportamiento transitorio de la impedancia aparente durante la falla y la oscilación de potencia originada por la apertura

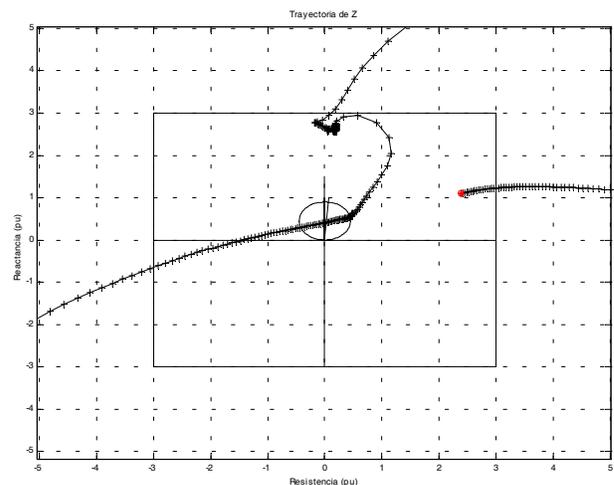


Fig. 8. Trayectoria de impedancia aparente medida por el relevador.

de  $L_1$ . Los valores de impedancia están normalizados con respecto a la impedancia de la línea  $L_2$ , donde está conectado el relevador.

A fin de restringir la función de bloqueo a las oscilaciones de potencia (estables o inestables) que crucen por la impedancia de la línea, se definió una ventana en el plano complejo impedancia en forma de un cuadrado de 3 pu de lado (ver figura 8), centrado en el origen de coordenadas. La suposición en este caso es que si la línea protegida tiene 1 pu de impedancia, la acción de bloqueo puede restringirse a esa área solamente. Esto significa que cuando la impedancia aparente está fuera de la zona de bloqueo, la RNA permanece desactivada (la salida es -1).

En la figura 9 se muestra la salida de la RNA. En este caso se puede observar como la RNA inhibe el bloqueo cuando la impedancia aparente medida por el relevador penetra en la zona de bloqueo, ya que se trata de un cortocircuito. Una vez que el

corto circuito es liberado con la apertura de la línea  $L_1$ , inicia la oscilación de potencia, (que posteriormente deriva en pérdida de sincronismo); en la figura 9 se puede apreciar como la RNA identifica el cambio de condición y habilita la función de bloqueo para evitar la operación incorrecta del relevador. No obstante, este proceso retarda 5 ms después de liberada la falla, que es el tiempo que transcurre para que la RNA procese la información completa de la oscilación de potencia.

Se aprecia también como la RNA activa el bloqueo cuando la impedancia aparente penetra por segunda vez en la zona de bloqueo durante la pérdida de sincronismo en el sistema.

Este caso es una evidencia clara de cómo la RNA es capaz de discriminar entre un cortocircuito y una oscilación de potencia, aun cuando ambos fenómenos ocurren dentro de la zona de bloqueo.

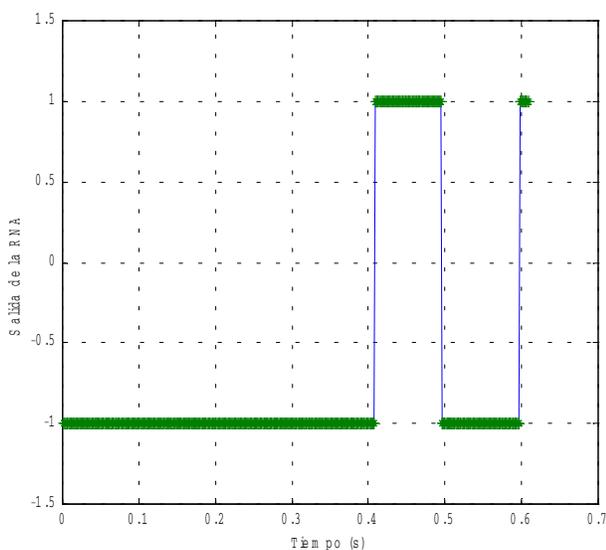


Fig. 9. Respuesta de la RNA a la perturbación mostrada en la fig. 8.

## V. CONCLUSIONES

La identificación de oscilaciones de potencia es primordial debido a que éstas, en sistemas débiles, pueden alcanzar frecuencias altas en el cual el proceso puede confundirse con un cortocircuito.

El método propuesto se basa en la identificación de oscilaciones de potencia mediante RNA. La información de entrada está formada por valores de resistencia y reactancia que corresponden a trayectorias de impedancia aparente que se describen en el plano complejo como resultado de oscilaciones y cortocircuitos; este método a diferencia de otros, no requiere de ningún ajuste para su buen desempeño.

Los resultados obtenidos de las simulaciones demuestran el buen desempeño de las RNA para detectar las oscilaciones e impedir la operación incorrecta de los relevadores de distancia durante estas condiciones.

## VI. AGRADECIMIENTO

Los autores desean agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) el apoyo para la realización de este trabajo a través del proyecto 28562-A.

## VII. REFERENCIAS

1. E. W. Kimbark, *Power System Stability: Synchronous Machines*, NY: Dover Publications, 1956.
2. H. J. Altuve, *Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia*, Monterrey: DIE-UANL, 1996.
3. J. M. Haner, T. D. Laughlin and C. W. Taylor, "Experience with the R-Rdot out-of-step relay," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. PWRD-1, no. 2, April 1986, pp. 35-39.
4. C. W. Taylor, J. M. Haner, L. A. Hill, W. A. Mittelstadt and R. L. Cresap, "A new out-of-step relay with rate of change of apparent resistance augmentation," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, no. 3, March 1983, pp. 631-639.
5. F. Ilar, "Innovations in the detection of power swings in electrical networks," *Brown Boveri Review*, no. 68, 1981.
6. J. Machowski and D Nelles, "New power swing blocking method," *Proceedings of the Developments in Power System Protection*, March 1997, pp. 218-221.
7. E. Vázquez, O. Chacón, H. Altuve y J. Ramírez, "Nuevo método de bloqueo de relevadores de distancia por oscilaciones de potencia utilizando redes de neuronas artificiales," *Memoria Técnica de la XI Reunión de Verano de Potencia del IEEE Sección México*, Acapulco, México, Tomo III, Julio 1998, pp. 215-222.
8. Y. H. Pao, *Adaptive Pattern Recognition and Neural Networks*, Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.
9. J. M. Zurada, *Artificial Neural Systems*, USA: West Publishing Co., 1992.
10. Mackay, D. J. C., "Bayesian interpolation," *Neural Computation*, vol. 4, no. 3, pp. 415-447, 1992.
11. The MathWorks, Inc, *Neural Network Toolbox 2.0*, MA: MathWorks, 1998.
12. E. O. Schweitzer and Daqing Hou, "Filtering for protective relays," *19<sup>th</sup> Annual Western Protective Relay Conference*, Spokane, Washington, October 1992.
13. Manitoba HVDC Research Centre, *PSCAD/EMTDC Getting started*, Winnipeg, 1999.