

PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE GENERADORES SÍNCRONOS USANDO REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Differential protection for synchronous generators using artificial neural networks

RESUMEN

En este trabajo se presenta una metodología basada en Redes Neuronales Artificiales (RNA) con el fin de implementar una protección diferencial para el generador síncrono cuando se presentan fallas monofásicas con diferentes valores de resistencias de falla, cercanas al punto neutro del devanado del estator. Para verificar la validez de la metodología propuesta se emplearon diversas situaciones operativas. En todos los casos la RNA presentó resultados de gran calidad.

PALABRAS CLAVES: Generador síncrono, protección diferencial, redes neuronales artificiales.

ABSTRACT

This paper presents a methodology based on Artificial Neural Networks (ANN) to implement a synchronous generator differential protection when there are single phase fault with different fault resistance values, close to the neutral of the stator winding. To verify the validity of the methodology involved various operational situations. In all cases, the RNA present results of high quality.

KEYWORDS: Synchronous generator, differential protection, artificial neural networks.

CAROLINA MORENO L.

Estudiante Ingeniería Eléctrica,
Universidad Tecnológica de Pereira
cml@utp.edu.co

IVONNE PANIAGUA G.

Estudiante Ingeniería Eléctrica,
Universidad Tecnológica de Pereira
ivonnep234@gmail.com

RICARDO A. HINCAPIÉ I.

Ingeniero Electricista, M. Sc.
Profesor Auxiliar
Universidad Tecnológica de Pereira
ricardohincapie@utp.edu.co

**Grupo de Investigación en
Planeamiento de Sistemas
Eléctricos, UTP.**

1. INTRODUCCIÓN

Los generadores síncronos constituyen unos de los equipos más importantes en un sistema de potencia y están sujetos, a la vez, a más tipos de fallas que otros elementos. Las fallas en los generadores se consideran de gran importancia, ya que pueden producir fallos severos y costosos al aislamiento, devanados y núcleo; las fallas también pueden producir tensiones bruscas de torsión en los ejes y acoplamiento, ocasionando daños en estos elementos [1].

Para evitar los problemas ocasionados por las fallas que se presentan fuera y dentro del generador y que producen altas corrientes de cortocircuito, se requiere el uso de elementos de protección de alta velocidad que aislen la máquina eléctrica de la red casi de forma instantánea y eviten daños mayores. Uno de esos elementos es la protección diferencial, la cual se encarga de comparar los valores de entrada y salida en cada fase del estator, para detectar fallas internas y disparar las protecciones en el momento de su ocurrencia. Sin embargo dichos relés no protegen el cien por ciento del devanado del estator, pues no son eficientes en la detección de fallas fase-tierra cercanas al neutro, ya que solo proporcionan una protección sensible para aproximadamente el noventa por ciento del devanado del estator, debido a que en el porcentaje restante no hay suficiente tensión y corriente

residual para que el relé entre en operación y menos aún cuando el generador está aterrizado mediante una alta impedancia [2].

Debido a esto se han desarrollado unas técnicas para la detección de fallas a tierra que cubren el cien por ciento del devanado del estator a partir de la medición de tensión de tercer armónico y la inyección de tensión residual o de neutro [2, 3].

Adicionalmente a estas técnicas de protección, en los últimos años han evolucionado metodologías basadas en inteligencia artificial y sistemas expertos como la lógica difusa y las Redes Neuronales Artificiales (RNA), las cuales necesitan una base de datos que describan el funcionamiento del sistema, para que a partir de esto, se realice un análisis del estado del sistema y se facilite la toma de decisiones. Las RNA han sido empleadas en la protección de transformadores y motores con un mejoramiento apreciable en el diagnóstico de las fallas. También han sido usadas en la detección de las fallas internas en el devanado del generador síncrono [4].

Con el fin de mejorar la protección del devanado del estator ante fallas fase-tierra cercanas al punto del neutro, se presenta en este trabajo una metodología basada en redes neuronales artificiales empleando como información de entrada una corriente diferencial, la cual

es obtenida a partir de las corrientes en el neutro y en los terminales del generador.

El artículo es organizado de la siguiente forma: inicialmente se presentan los aspectos más importantes sobre redes neuronales artificiales. Luego se presentan los conceptos fundamentales sobre protección diferencial. Después se explica la metodología propuesta. Seguidamente se describen la aplicación y los resultados. Finalmente se presentan las conclusiones derivadas de este proyecto.

2. REDES NEURONALES ARTIFICIALES

La RNA empleada es del tipo backpropagación (BP), el cual es un algoritmo de aprendizaje que se puede aplicar en modelos de redes con más de dos capas de neuronas. La importancia de la red BP consiste en su capacidad de autoadaptar los pesos de las neuronas de las capas intermedias para aprender la relación que existe entre un conjunto de patrones dados como ejemplo y sus salidas correspondientes, para poder aplicar esa misma relación, después del entrenamiento, a nuevos vectores de entrada con ruido o incompletas, dando una salida activa si la nueva entrada es parecida a las presentadas durante el aprendizaje [5].

En la figura 1 se observa una RNA típica tipo Backpropagation, la cual está diseñada con tres capas: una capa de entrada M con x neuronas, una capa de salida N con z neuronas y una capa oculta con m neuronas.

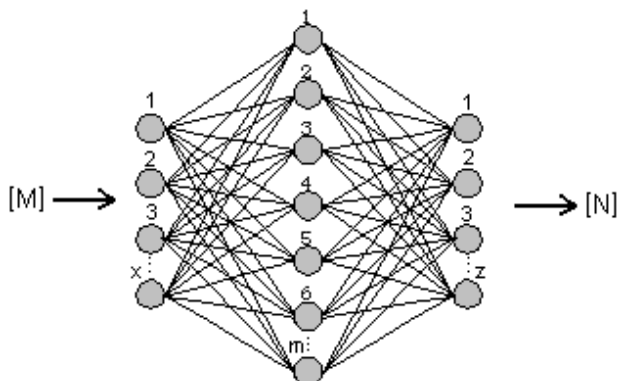


Figura 1. Red neuronal artificial tipo BP.

Para el dimensionamiento de la red no existe una regla general o concreta para determinar el número de capas o de neuronas por capa para resolver un problema dado. Usualmente estos valores son determinados por ensayo y error o de acuerdo a la experiencia del diseñador.

Para inicializar los pesos se parte de un punto cualquiera del espacio con valores pequeños y aleatorios, ya que idealmente no se puede lograr ubicar un punto inicial en cercanías del punto mínimo del error buscado.

La salida de la RNA está dada por:

$$N = f_2\{[W_2] * f_1([W_1] * [M] + [B_1]) + [B_2]\} \quad (1)$$

Donde,

- f_1 : función de transferencia entre la capa de entrada y la capa oculta.
- f_2 : función de transferencia entre la capa oculta y la capa de salida.
- W_1 : matriz de pesos de la capa oculta.
- W_2 : matriz de pesos de la capa de salida.
- B_1 : bias de la capa oculta.
- B_2 : bias de la capa de salida.
- M : entrada a la red.
- N : salida de la red.

3. PROTECCIÓN DIFERENCIAL

La protección diferencial de generadores síncronos tiene como propósito detectar fallas internas mediante la comparación entre las corrientes que circulan por sus extremos. En la figura 2 se observa un esquema de conexión típico de protección diferencial.

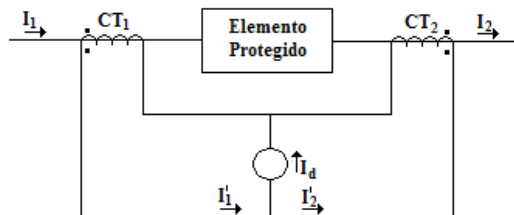


Figura 2. Protección diferencial.

Los relés diferenciales operan cuando la corriente que circula por el relé (corriente diferencial - I_d) supera un valor determinado. Este valor es obtenido por la diferencia entre las corrientes que circulan por los extremos del elemento referidas al lado secundario de los transformadores de corriente (CT). Por lo tanto:

$$I_d = I_1' - I_2' = K_1 I_1 - K_2 I_2 \quad (2)$$

Donde,

- I_d : corriente diferencial (circula por el relé).
- I_1 : corriente que circula por uno de los terminales del elemento protegido.
- I_2 : corriente que circula por el otro terminal del elemento protegido.
- I_1' : corriente que circula por el lado secundario del CT_1 .
- I_2' : corriente que circula por el lado secundario del CT_2 .
- K_1 : relación de transformación del CT_1 .
- K_2 : relación de transformación del CT_2 .

4. METODOLOGÍA PROPUESTA

A continuación se describe la metodología planteada en este proyecto para proteger el 100 % del devanado del estator, cuando se presenten fallas monofásicas con diferentes valores de resistencias cercanas al punto neutro.

Paso 1. Determinar las características del generador síncrono.

Paso 2. Obtener los datos para entrenamiento y prueba de la RNA.

Paso 3. Definir la arquitectura de la RNA.

Paso 4. Realizar el entrenamiento de la RNA, con un porcentaje de las simulaciones realizadas en el paso 2.

Paso 5. Verificar el comportamiento de la RNA ante diferentes condiciones de operación. Se debe probar la red con el porcentaje restante de simulaciones. Es importante que los valores de prueba no hayan sido empleados en el entrenamiento, con el fin de garantizar la generalización y un adecuado comportamiento de la red.

Paso 6. Comparar la salida de la red en cada una de las pruebas, con los valores de salida deseados. Esto con el fin de verificar el nivel de precisión y el comportamiento de la RNA ante las condiciones operativas requeridas.

5. APLICACIÓN Y RESULTADOS

A continuación se describe la aplicación de la metodología propuesta.

Paso 1. El generador síncrono fue modelado de acuerdo a los parámetros descritos en [2]. Las características se presentan en la tabla 1.

Paso 2. Para la implementación de la RNA fue necesario obtener los valores de corrientes en el neutro y en terminales del generador síncrono bajo operación normal y bajo fallas fase-tierra. Se decidió emplear este tipo de fallas debido a que es objeto de estudio por su mayor ocurrencia y su difícil detección para sistemas de aterrizaje de alta resistencia a tierra [3]. Las simulaciones se realizaron en el software Matlab [6].

Bajo condiciones de operación normal la cargabilidad se varió en un rango del 1 al 6% de la tensión nominal del generador, con pasos de 1.66×10^{-4} , para obtener un total de 300 muestras. Las simulaciones se hicieron con pasos de tiempo de 0.03 segundos. En la tabla 2 se muestran los parámetros que se tuvieron en cuenta en las simulaciones bajo condiciones de operación normal.

DESCRIPCIÓN	VALOR
Potencia nominal (S_n)	850 [MVA]
Velocidad síncrona (W)	3000 [rpm]
Frecuencia de operación (f_o)	50 [Hz]
Tensión nominal (U_n)	11.4 [kV]
Reactancia síncrona (X_d)	2.44 [p.u]
Reactancia transitoria (X'_d)	0.43 [p.u]
Reactancia subtransitoria (X''_d)	0.25 [p.u]
Reactancia de secuencia cero (X_0)	0.13 [p.u]
Reactancia de secuencia negativa (X_2)	0.24 [p.u]
Resistencia de secuencia cero (R_0)	0.0025 [p.u]
Resistencia de secuencia positiva (R_1)	0.0034 [p.u]
Resistencia de secuencia negativa (R_2)	0.04 [p.u]
Resistencia de aislamiento (R_a)	10 [M Ω]
Capacitancia a tierra del estator del generador (C_g)	0.385 [μ F/fase]
Factor de potencia (f_p)	0.88 (en atraso)
Capacitancia del bus (C_{bus})	1887 [pF/fase]
Capacitancia entre el transformador elevador y el interruptor (C_{source})	0.129 [μ F/fase]
Capacitancia del transformador auxiliar (C_{trafo})	1092 [pF/fase]
Efecto capacitivo total aportado por los equipos (C_p)	0.132 [μ F/fase]
Resistencia de aterrizaje (R_n)	2052.3 [Ω]

Tabla 1. Características del generador síncrono.

DESCRIPCIÓN	OBSERVACIÓN	VALOR
Tensión de tercer armónico de las fases A, B y C (E_3)	Variable	1% al 6%
Efecto capacitivo total aportado por los equipos (C_p)	Constante	0.1320 [μ F/fase]
Efecto capacitivo del estator (C_g)	Constante	0.385 [μ F/fase]
Resistencia de aterrizaje (R_n)	Constante	2052.3 [Ω]
Impedancia del neutro (Z_n)	Constante	0.667 a 41.8° [Ω]
Impedancia del terminal (Z_t)	Constante	3269.7 a 90° [Ω]

Tabla 2. Parámetros y nomenclatura en operación normal.

Bajo condiciones de cortocircuito se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones: la aplicación de la falla fase tierra se realizó en la fase C, la cargabilidad se varió en un rango del 1 al 6% (con pasos de 1.66×10^{-3}), y la posición de la falla se consideró entre el 0% y el 10% del devanado del estator (con pasos de 1%). Por lo tanto para cada valor de cargabilidad se obtuvieron 10 datos de posiciones de falla. La resistencia de falla se consideró constante para cada una de las pruebas, es decir, un valor de resistencia de falla para cada uno de los cinco casos planteados. Se realizaron un total de 300 simulaciones para cada uno de los casos de prueba. En la tabla 3 se muestran los parámetros que se tuvieron en cuenta en las simulaciones bajo condiciones de falla.

DESCRIPCIÓN		VALOR
Tensión de tercer armónico de las fases A y B (E_{3A} y E_{3B})	Variable	1% al 6%
Tensión del tercer armónico en el neutro (E_{3n})	Variable	$E_{3n} = k E_3$
Tensión del tercer armónico en terminales de la fase fallada (E_{3t})	Variable	$E_{3t} = (1-k) E_3$
Capacitancia a tierra del estator del generador (C_g)	Constante	0.385 [μ F/fase]
Efecto capacitivo total aportado por los equipos (C_p)	Constante	0.132 [μ F/fase]
Resistencia de aterrizaje (R_n)	Constante	2052.3 [Ω]
Capacitancia respecto al neutro (C_n)	Variable	$C_n = k C_{estator}$
Capacitancia respecto al terminal (C_t)	Variable	$C_t = (1-k) C_{estator}$
Resistencia de falla (R_f)	Constante	Caso 1 1 [Ω]
		Caso 2 100 [Ω]
		Caso 3 1000 [Ω]
		Caso 4 3000 [Ω]
		Caso 5 5000 [Ω]
Posición de la falla (k)	Variable	1% al 10%

Tabla 3. Parámetros y nomenclatura bajo condiciones de falla

Una vez obtenidas las muestras de corrientes en el neutro y en los terminales del generador síncrono bajo condiciones de operación normal y bajo falla, se calcularon las corrientes diferenciales empleando la ecuación (2), las cuales se dividen en dos grupos: uno para entrenamiento y el otro para la prueba de la red. Estos conjuntos de datos se ilustran en la tabla 4. Las muestras fueron reordenadas aleatoriamente para obtener una mejor generalización de la red. Todos los valores de las simulaciones se encuentran en [7].

Paso 3. La RNA tipo Backpropagation está diseñada con tres capas, todas con una función de transferencia tangencial hiperbólica. La capa de entrada tiene una neurona, la capa oculta posee cuatro neuronas y la capa de salida cuenta con una neurona. La salida de la red puede ser -1 ó 1, lo cual indica que el generador está bajo la presencia de una falla o bajo condiciones de operación normal, respectivamente. De acuerdo a esto, una salida de -1 permite la operación de la protección y una salida de 1 bloquea la protección para evitar una operación incorrecta.

SIMULACIONES		CANTIDAD	
Operación normal	Entrenamiento	270	
	Prueba	30	
Operación bajo falla	Caso 1	Entrenamiento	270
		Prueba	30
	Caso 2	Entrenamiento	270
		Prueba	30
	Caso 3	Entrenamiento	270
		Prueba	30
	Caso 4	Entrenamiento	270
		Prueba	30
	Caso 5	Entrenamiento	270
		Prueba	30

Tabla 4. Datos de las simulaciones.

Paso 4. El conjunto de patrones de las simulaciones para entrenar la red neuronal se seleccionó aleatoriamente a partir de 600 muestras para cada caso de prueba (300 de operación normal y 300 bajo falla). Se empleó como técnica de entrenamiento el algoritmo Levenberg-Marquadt, el cual se implementó utilizando el Neural Network Toolbox de Matlab [6]. Los pesos iniciales de la red fueron seleccionados aleatoriamente.

Paso 5. A continuación se ilustra el comportamiento de la red ante cinco casos de prueba diferentes.

• **Caso de prueba 1.**

Esta prueba se realizó para una resistencia de falla de 1 Ω y con las características mencionadas en las tablas 1, 2 y 3. En las figuras 3 y 4 se observa el comportamiento de la RNA bajo condiciones de operación normal y bajo falla, respectivamente.

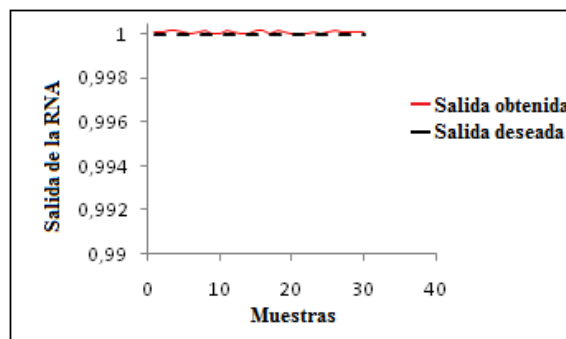


Figura 3. Respuesta del caso 1 en operación normal.

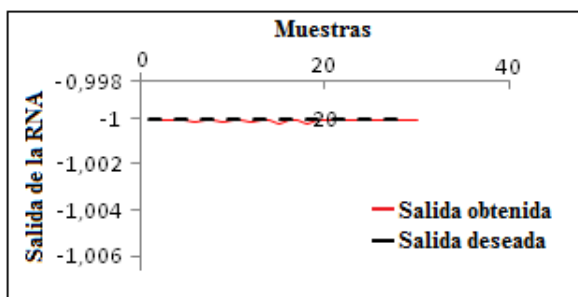


Figura 4. Respuesta del caso 1 en operación bajo falla.

• **Caso de prueba 2.**

Esta prueba se realizó para una resistencia de falla de 100 Ω y con las características mencionadas en las tablas 1, 2 y 3. En las figuras 5 y 6 se observa el comportamiento de la RNA bajo condiciones de operación normal y bajo falla, respectivamente.

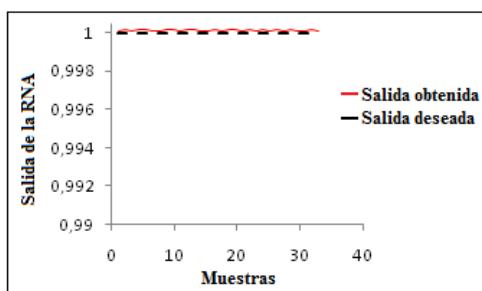


Figura 5. Respuesta del caso 2 en operación normal.

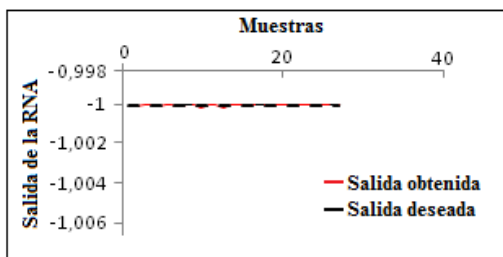


Figura 6. Respuesta del caso 2 en operación bajo falla.

• **Caso de prueba 3.**

Esta prueba se realizó para una resistencia de falla de 1000 Ω y con las características mencionadas en las tablas 1, 2 y 3. En las figuras 7 y 8 se observa el comportamiento de la RNA bajo condiciones de operación normal y bajo falla, respectivamente.

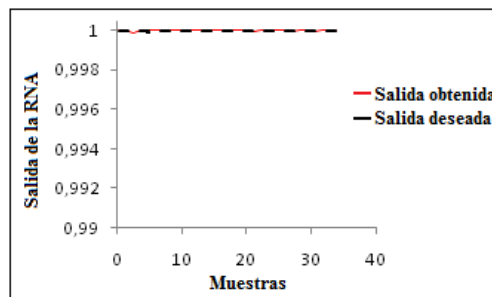


Figura 7. Respuesta del caso 3 en operación normal.

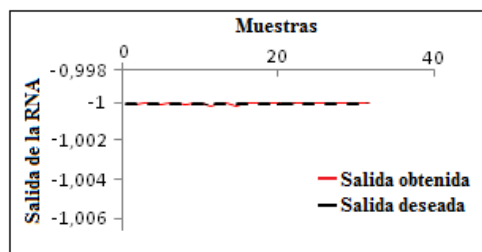


Figura 8. Respuesta del caso 3 en operación bajo falla.

• **Caso de prueba 4.**

Esta prueba se realizó para una resistencia de falla de 3000 Ω y con las características mencionadas en las tablas 1, 2 y 3. En las figuras 9 y 10 se observa el comportamiento de la RNA bajo condiciones de operación normal y bajo falla, respectivamente.

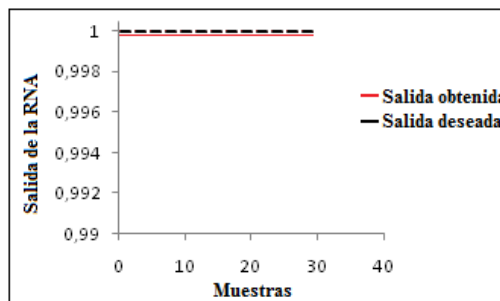


Figura 9. Respuesta del caso 4 en operación normal.

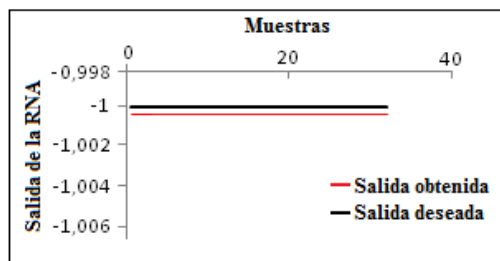


Figura 10. Respuesta del caso 4 en operación bajo falla.

• **Caso de prueba 5.**

Esta prueba se realizó para una resistencia de falla de 5000 Ω y con las características mencionadas en las

tablas 1, 2 y 3. En las figuras 11 y 12 se observa el comportamiento de la RNA bajo condiciones de operación normal y bajo falla, respectivamente.

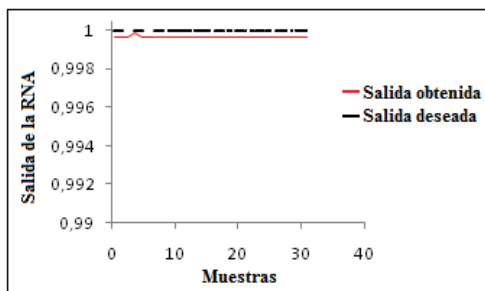


Figura 11. Respuesta del caso 5 en operación normal.

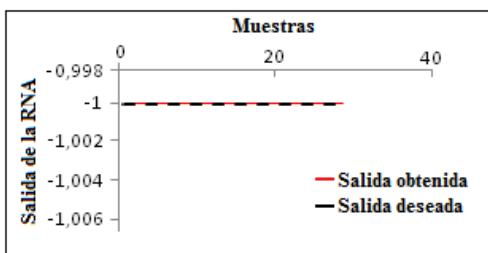


Figura 12. Respuesta del caso 5 en operación bajo falla.

En los cinco casos de prueba presentados anteriormente se puede observar que el comportamiento de la red fue adecuado, pues al comparar los valores de la salida con el valor deseado se obtienen valores bastante pequeños. Estos valores se ilustran a continuación:

CASO DE PRUEBA	MÁXIMA DIFERENCIA EN LA SALIDA DE LA RED	
	Operación normal	Bajo falla
1	Operación normal	1,88E-04
	Bajo falla	1,17E-04
2	Operación normal	1,63E-04
	Bajo falla	6,97E-05
3	Operación normal	8,31E-05
	Bajo falla	6,36E-05
4	Operación normal	2,92E-04
	Bajo falla	3,11E-04
5	Operación normal	1,88E-04
	Bajo falla	2,68E-05

Tabla 5. Máxima diferencia en la salida de la red para cada caso

6. CONCLUSIONES

- En este proyecto se presentó una metodología basada en Redes Neuronales Artificiales (RNA) para proteger el devanado del estator de un generador síncrono ante fallas fase-tierra cercanas al neutro. Para probar el funcionamiento de la red se consideraron cinco casos de prueba bajo condiciones de falla, en los cuales se tuvo en cuenta un valor diferente de resistencia de falla para cada caso. Los valores obtenidos a la salida de la red son de gran

calidad al compararlos con los valores deseados de salida, pues se aprecia en los resultados que la diferencia entre ellos es bastante pequeña.

- Las RNA son una gran alternativa para proteger elementos de un sistema de potencia, pues debido a su gran capacidad de generalización y adaptabilidad a un problema, y a los grandes avances en la tecnología actual, se puede garantizar que su operación sea adecuada y los tiempos de respuesta ante condiciones no deseadas de operación sean pequeños. La arquitectura de la RNA propuesta en este trabajo describe la capacidad que tiene la red neuronal backpropagation de discriminar eficientemente en el generador síncrono, un estado de operación normal ante uno de falla.
- Después de verificar el comportamiento de la metodología propuesta, se puede concluir que las redes neuronales artificiales tienen las condiciones adecuadas para actuar como protección diferencial de generadores síncronos, utilizando como variables de operación las corrientes tomadas en el neutro y en los terminales del generador.
- Con la red neuronal se garantiza la protección del 100% del devanado del estator contra fallas a tierra del generador síncrono, lo cual es fundamental para el óptimo desempeño del sistema de potencia.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] P.M. Anderson, *Power System Protection*. New York: Wiley, 1999, p.718.
- [2] Ruiz, B. "Protección del 100% del estator del generador síncrono ante fallos fase-tierra utilizando el método del tercer armónico". Tesis de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, 2009.
- [3] Giraldo, L., Mora, J.J., Olguín, G. "Evaluación de la protección del estator del generador síncrono ante fallas a tierra por medio del método de inyección subarmónica". Revista Ingeniería y Competitividad, Vol. 10, No. 10, 2008.
- [4] Villada, F., Muñoz, W., Henao, M.A. "Aplicación de las redes neuronales en ingeniería y economía". Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia, 2004.
- [5] M.T. Hagan, H.B. Demuth, M. Beale, *Neural Network Design*". PWS Publishing Company, Boston, USA, 2006.
- [6] <http://www.mathworks.com>
- [7] Moreno, C., Paniagua, I. "Protección diferencial de generadores síncronos usando redes neuronales artificiales". Tesis de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, 2010.