



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO  
CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**DETECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE FALLAS  
EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA  
UTILIZANDO EL MÉTODO DE LA  
TRANSFORMADA S**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: ALVARO ISRAEL LUCERO YANACALLO  
TUTOR: ING. MILTON GONZALO RUIZ MALDONADO

Quito - Ecuador  
2024

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

Yo, Alvaro Israel Lucero Yanacallo con documento de identificación N° 1722631270 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 21 de marzo del 2024

Atentamente,



---

Alvaro Israel Lucero Yanacallo

1722631270

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Alvaro Israel Lucero Yanacallo con documento de identificación No. 1722631270, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico “Detección y clasificación de fallas en líneas de transmisión eléctrica utilizando el método de la transformada S”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 21 de marzo del 2024

Atentamente,



---

Alvaro Israel Lucero Yanacallo

1722631270

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Milton Gonzalo Ruiz Maldonado con documento de identificación N° 1714409065, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DETECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE FALLAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA UTILIZANDO EL MÉTODO DE LA TRANSFORMADA S, realizado por Alvaro Israel Lucero Yanacallo con documento de identificación N° 1722631270, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 21 de marzo del 2024

Atentamente,



---

Ing. Milton Gonzalo Ruiz Maldonado, Msc  
1714409065

## ÍNDICE GENERAL

1	Introducción .....	2
2	Marco teórico.....	4
2.1	Extracción de características con la transformada S.....	4
2.2	Tipos de fallas .....	5
3	Formulación del problema.....	6
4	Análisis de resultados .....	9
4.1	Caso 1: falla BG.....	10
4.1.1	Análisis con EMTP/MATLAB .....	10
4.1.2	Análisis con Power Factory.....	12
4.2	Caso 2: falla BC .....	14
4.2.1	Análisis con EMTP/MATLAB .....	14
4.2.2	Análisis con Power Factory.....	17
4.3	Caso 3: falla ABG .....	19
4.3.1	Análisis con EMTP/MATLAB .....	19
4.3.2	Análisis con Power Factory.....	22
4.4	Caso 4: falla ABC .....	24
4.4.1	Análisis con EMTP/MATLAB .....	24
4.4.2	Análisis con Power Factory.....	27
5	Conclusiones.....	29
5.1	Trabajos futuros .....	30
6	Referencias.....	30
6.1	Matriz de Estado del Arte .....	33
6.2	Resumen de Indicadores .....	38
7	Anexos.....	39

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Arquitectura de la ANN para identificación y clasificación de fallas.....	8
Figura 2. Sistema de testeo, 9 nodos. ....	9
Figura 3. Indicadores de la ANN.....	9
Figura 4. Falla BG, voltaje fase A.....	10
Figura 5. Falla BG, voltaje fase B.....	10
Figura 6. Falla BG, voltaje fase C.....	10
Figura 7. Falla BG, corriente fase A.....	11
Figura 8. Falla BG, corriente fase B.....	11
Figura 9. Falla BG, corriente fase C.....	11
Figura 10. Falla BG, transformada S – fase A.....	12
Figura 11. Falla BG, transformada S – Fase B.....	12
Figura 12. Falla BG, transformada S – Fase C.....	12
Figura 13. Falla BG, respuesta del clasificador de fallas.....	12
Figura 14. Falla BG, voltaje fase A – Power Factory.....	13
Figura 15. Falla BG, voltaje fase B – Power Factory.....	13
Figura 16. Falla BG, voltaje fase C – Power Factory.....	13
Figura 17. Falla BG, corriente fase A – Power Factory.....	13
Figura 18. Falla BG, corriente fase B – Power Factory.....	14
Figura 19. Falla BG, corriente fase C – Power Factory.....	14
Figura 20. Falla BG, transformada S - Power Factory.....	14
Figura 21. Falla BG, respuesta de clasificador de fallas – Power Factory.....	14
Figura 22. Falla BC, voltaje fase A.....	15
Figura 23. Falla BC, voltaje fase B.....	15
Figura 24. Falla BC, voltaje fase C.....	15
Figura 25. Falla BC, corriente fase A.....	16
Figura 26. Falla BC, corriente fase B.....	16
Figura 27. Falla BC, corriente fase C.....	16
Figura 28. Falla BC, transformada S – fase A.....	16
Figura 29. Falla BC, transformada S – Fase B.....	16
Figura 30. Falla BC, transformada S – Fase C.....	17
Figura 31. Falla BC, respuesta del clasificador de fallas.....	17
Figura 32. Falla BC, voltaje fase A – Power Factory.....	17
Figura 33. Falla BC, voltaje fase B – Power Factory.....	18
Figura 34. Falla BC, voltaje fase C – Power Factory.....	18
Figura 35. Falla BC, corriente fase A – Power Factory.....	18
Figura 36. Falla BC, corriente fase B – Power Factory.....	18
Figura 37. Falla BC, corriente fase C – Power Factory.....	19
Figura 38. Falla BC, transformada S – Power Factory.....	19
Figura 39. Falla BC, respuesta de clasificador de fallas.....	19
Figura 40. Falla ABG, voltaje fase A.....	20
Figura 41. Falla ABG, voltaje fase B.....	20
Figura 42. Falla ABG, voltaje fase C.....	20
Figura 43. Falla ABG, corriente fase A.....	21
Figura 44. Falla ABG, corriente fase B.....	21
Figura 45. Falla ABG, corriente fase C.....	21
Figura 46. Falla ABG, transformada S – fase A.....	21

Figura 47. Falla ABG, transformada S – Fase B.....	21
Figura 48. Falla ABG, transformada S – Fase C.....	21
Figura 49. Falla ABG, respuesta de clasificador de fallas.....	22
Figura 50. Falla ABG, voltaje fase A – Power Factory.....	22
Figura 51. Falla ABG, voltaje fase B – Power Factory.....	22
Figura 52. Falla ABG, voltaje fase C – Power Factory.....	23
Figura 53. Falla ABG, corriente fase A – Power Factory.....	23
Figura 54. Falla ABG, corriente fase B – Power Factory.....	23
Figura 55. Falla ABG, corriente fase C – Power Factory.....	23
Figura 56. Falla ABG, transformada S.....	24
Figura 57. Falla ABG, respuesta de clasificador de fallas.....	24
Figura 58. Falla ABC, voltaje fase A.....	24
Figura 59. Falla ABC, voltaje fase B.....	25
Figura 60. Falla ABC, voltaje fase C.....	25
Figura 61. Falla ABC, corriente fase A.....	25
Figura 62. Falla ABC, corriente fase B.....	26
Figura 63. Falla ABC, corriente fase C.....	26
Figura 64. Falla ABC, transformada S – fase A.....	26
Figura 65. Falla ABC, transformada S – Fase B.....	26
Figura 66. Falla ABC, transformada S – Fase C.....	26
Figura 67. Falla ABC, respuesta de clasificador de fallas.....	27
Figura 68. Falla ABC, voltaje fase A – Power Factory.....	27
Figura 69. Falla ABC, voltaje fase B – Power Factory.....	27
Figura 70. Falla ABC, voltaje fase C – Power Factory.....	28
Figura 71. Falla ABC, corriente fase A – Power Factory.....	28
Figura 72. Falla ABC, corriente fase B – Power Factory.....	28
Figura 73. Falla ABC, corriente fase C – Power Factory.....	28
Figura 74. Falla ABC, transformada S.....	29
Figura 75. Falla ABC, respuesta de clasificador de fallas.....	29
Figura 76. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.....	38
Figura 77. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....	38
Figura 78. Indicador de solución - Estado del arte.....	38

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Lógica para técnica de inteligencia artificial.....	8
Tabla 2. Escenarios de prueba para la detección y clasificación de fallas.....	10
Tabla 3. Matriz de estado del arte.....	33

# DETECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE FALLAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA UTILIZANDO EL MÉTODO DE LA TRANSFORMADA S

## Resumen

La presente investigación se enfoca en la detección y clasificación de fallas en el sistema de transmisión. Para lo cual, se emplea un criterio de asociación que se basa en un método de inteligencia artificial y en el cálculo de estudios de cortocircuitos de varios tipos. En este sentido, se construye una base de datos que contiene las magnitudes de voltajes y corrientes generados por los estudios de cortocircuito. Posteriormente, se calcula la transformada S para el análisis de las ondas en el dominio de la frecuencia y, de forma consecuente, se asocia los valores obtenidos con el vector binario correspondiente. El arreglo binario consta de 4 elementos, uno por cada fase. Por último, se entrena a la ANN con los datos obtenidos y se procede a la evaluación bajo diferentes condiciones de falla. Por consiguiente, el sistema de prueba de 9 nodos se elige para comprobar la metodología propuesta. Los resultados demuestran que la ANN junto con la transformada S describen un 97% de eficiencia para la clasificación de fallas.

**Palabras Clave:** Transformada S, detección de fallas, Recursos clasificación de fallas, red neuronal artificial, fallas.

## Abstract

The present research focuses on the detection and classification of faults in the transmission system. For this purpose, an association criterion based on an artificial intelligence method and on the calculation of short-circuit studies of various types is used. In this sense, a database containing the magnitudes of voltages and currents generated by the short-circuit studies is built. Subsequently, the S-transform is calculated for the analysis of the waves in the frequency domain and, consequently, the values obtained are associated with the corresponding binary vector. The binary array consists of 4 elements, one for each phase. Finally, the ANN is trained with the obtained data and proceeds to the evaluation under different fault conditions. Therefore, the 9-node test system is chosen to test the proposed methodology. The results show that the ANN together with the S-transform describes 97% efficiency for fault classification.

**Keywords:** S-transform, fault detection, fault classification resources, artificial neural network, faults.



# 1 Introducción

La identificación, clasificación y localización de averías en las líneas de transmisión eléctrica son pasos esenciales que deben tenerse en cuenta para iniciar medidas de reparación y corrección en un tiempo mínimo. Con los rápidos avances en la tecnología de los ordenadores digitales, se han desarrollado muchas técnicas para el reconocimiento de eventos defectuosos. Las técnicas de estimación de fallas descritas en la literatura se dividen en tres grupos. Se trata de las técnicas basadas en la medición de la impedancia, las basadas en la información extraída de las ondas viajeras y los métodos basados en la inteligencia artificial o en el procesamiento de señales [1]. Existen investigaciones dirigidas a desarrollar enfoques rápidos y precisos para la identificación y clasificación de fallas en líneas de transmisión eléctrica mediante el uso de métodos de procesamiento de señales. El uso de las funciones combinadas extraídas por el uso de dos técnicas podría mejorar el rendimiento del algoritmo para la detección de fallas, que se considera un problema principal y para diseñar los esquemas de protección primarios y de respaldo. En el estudio propuesto en [2], los autores incorporan un algoritmo para identificar eventos defectuosos en la línea de transmisión. Esto se logra mediante el uso de impedancias piloto y datos sincronizados. Lo que da como resultado en la mejora de la sensibilidad, así como también en la confiabilidad del esquema de protección.

En la investigación descrita en [3], el autor propone un método para identificar, clasificar y localizar las condiciones de falla tanto en la línea de transmisión aérea como en el cable subterráneo. Este método aplica el concepto de entropía calculada por combinación híbrida. Es decir, se emplea la transformada de Stockwell (ST) ortogonal discreta rápida (FDOST) para extraer las características e identificar las fallas. La clasificación de estos eventos defectuosos

se logra mediante el uso de una técnica Máquina de Soporte Vectorial (SVM) y una regresión de vectores de soporte (SVR).

En el estudio descrito en [4], los autores establecen un algoritmo que utiliza la transformada wavelet y los coeficientes de alienación para diseñar un esquema de protección para la línea de transmisión multiterminal (MTTL). Esto se logra mediante la aplicación de coeficientes de aproximación de señales de tensión y corriente soportados por la transformada wavelet (WT). Estos se computan sobre un periodo de tiempo de un cuarto de ciclo para identificar, clasificar y localizar las fallas en la MTTL.

En la referencia [5], los autores introducen un enfoque para estimar la localización del punto de incidencia de la falla en las líneas de transmisión eléctrica. Para implementar el esquema de protección propuesto, se utilizan las magnitudes de tensión. Estas se obtienen mediante el Sistema de monitoreo y área amplia (WAMS). También se calcula una matriz de admitancia de bus de red para reconocer las anomalías en la línea de transmisión. El reconocimiento de la línea defectuosa y la localización de la avería se consiguen con gran precisión en un solo paso.

En el estudio descrito en [6], se introduce un enfoque para la identificación de fallas, el cual es rápido e implica una baja carga computacional. Este se basa en el cálculo del error medio. Además, para evitar falsas detecciones, los autores emplean un método guiado en la optimización de enjambre de partículas con selección de umbral óptimo.

En el estudio descrito en [7], se propone una técnica basada en la estimación de la distancia euclídea entre muestras sucesivas, para el diseño de un algoritmo rápido y eficiente que detecte y clasifique fallas en la red de transporte de energía eléctrica. Las magnitudes de las componentes fundamentales, para las corrientes, se evalúan mediante la transformada discreta de

Fourier, considerando como señales actuantes para el algoritmo propuesto.

En el estudio propuesto en [8], se plantea un enfoque de reconocimiento de fallos eficaz para proporcionar protección a la línea de transmisión. Este algoritmo utiliza una combinación de WT y análisis discriminante lineal (LDA). El método propuesto utiliza las señales de corriente para la identificación de las fases defectuosas, mientras que, las corrientes de secuencia cero se utilizan para la identificación de la tierra implicada en la falta.

En el estudio presentado en [9], los autores aportan un estudio para investigar el efecto de los pararrayos aislantes multicámara (MCIA) en el paso inverso del rayo. Esto se obtiene mediante el modelado transitorio de la línea de transmisión. Además, se implementa el software de diseño asistido por ordenador de sistemas eléctricos (PSCAD) para la línea de transmisión eléctrica de 132 kV de Matugama a Kukule. Los resultados de la simulación se obtienen con y sin MCIA para la evaluación de las mejoras en la caída de rayos debido a la instalación de MCIA en la línea. Esto aumenta la fiabilidad de la red eléctrica de Sri Lanka.

En la investigación presentada en [10], los autores proponen un algoritmo que utiliza la transformada ortogonal discreta de Stockwell (DOST) para detectar, clasificar y localizar (SFDCL) fallas en los sistemas de transmisión, que tiene multigeneradores integrados. El método se implementa con la ayuda de mediciones de corriente sincronizadas desde unidades remotas de telemetría (RTU) disponibles en ambos extremos de la línea de transmisión. Los coeficientes de energía calculados a partir de transitorios de señales de corriente, que se generan debido a la incidencia de fallas con la ayuda de DOST, se aplican para la identificación y clasificación de fallas. La estimación de la ubicación de fallas se logra utilizando la máquina de vectores de

soporte (SVM), puesto que se considera los coeficientes de energía como entradas. En el estudio descrito en [11], se propone la detección y clasificación de fallas en una línea de transmisión de doble circuito, donde un circuito está equipado con un compensador estático síncrono (STATCOM). El esquema de protección de relés diferenciales basado en WT discreto (DWT) se desarrolla para la detección y clasificación del patrón de falla en la línea de transmisión de energía. El esquema se basa en el uso de señales de corriente medidas en los dos extremos de la línea de transmisión de energía.

En la referencia [12], los autores detallan un algoritmo para la identificación y clasificación de las fallas en la línea de transmisión utilizando DWT, así como una red neuronal de retropropagación (BPNN) respaldada por la transformada de Clarke. Los coeficientes WT basados en la corriente (WTC), así como el coeficiente de energía wavelet (WEC), se utilizan para el reconocimiento de fallas. En este sentido, Daubechies4 (Db4) se toma como wavelet madre para la descomposición de componentes de señales de alta frecuencia.

La investigación propuesta en [13], plantea una técnica para identificar la sección defectuosa del convertidor de línea conmutada equipado con una línea de transmisión de corriente continua de alto voltaje (HVDC). El método propuesto se implementa extrayendo la señal actual en el extremo del rectificador de la línea de transmisión. La actividad de protección se logra mediante el uso de tres módulos separados del sistema de inferencia difusa. El primer módulo difuso detecta fallas en las secciones de CA y CC. El segundo módulo difuso tiene como objetivo discriminar la sección defectuosa. El tercer módulo difuso identifica el polo defectuoso de la línea HVDC. En este sentido, se constata que el método propuesto presenta una efectividad del 100% en la detección de fallas en un tiempo inferior a un ciclo,

además, se elimina el requisito de enlaces de comunicación.

El estudio propuesto en [14] propone un esquema basado en la resistencia y el componente de frecuencia industrial de la corriente diferencial, con el fin de identificar fallas en la línea de transmisión. El esquema es eficaz para evitar la influencia de la característica dependiente de la frecuencia de los parámetros de la línea de transmisión. El enfoque propuesto también es eficaz para la reducción de la corriente diferencial desequilibrada. Esto mejora la selectividad de la protección.

En la literatura se detallan técnicas que utilizan enfoques de procesamiento de señales para la detección, clasificación y localización de fallas en líneas de transmisión. Sin embargo, estos métodos utilizan características individuales, que tienen sus desventajas. Es así como se ha prestado especial atención al diseño de esquemas de protección inteligentes que sean rápidos, precisos y fiables. Esto se puede lograr combinando varias características. Por consiguiente, este es un factor clave para la presente investigación, que se centra de forma prioritaria en el desarrollo de una técnica mediante la combinación de diferentes características de las señales de tensión y corriente para detectar y clasificar las fallas.

En contraste, este trabajo de investigación trata de diseñar un algoritmo que utilice el procesamiento de las señales de corriente mediante análisis de las frecuencias de la transformada de Fourier de tiempo adicional para la identificación de fallas en líneas de transmisión eléctrica. En este sentido, la clasificación de las fallas se consigue mediante una red neuronal artificial (ANN).

El contenido de la investigación se divide en cuatro secciones. La primera sección detalla la introducción del trabajo de investigación, los trabajos de investigación relacionados y la contribución del capítulo. En el apartado 2 se describe la

teoría relacionada con el reconocimiento de fallas y transformada de Fourier de tiempo adicional. En el apartado 3 se precisa la metodología propuesta para el reconocimiento de fallas y el sistema de prueba que se emplea para el estudio. Los resultados y las conclusiones se incluyen en las secciones 4 y 5 respectivamente. Por último, en la sección 6 se incluyen los trabajos futuros.

## 2 Marco teórico

En este apartado se detalla de forma secuencial toda la teoría relacionada a la identificación y clasificación de fallas mediante la transformada S.

### 2.1 Extracción de características con la transformada S

Esta técnica es una versión mejorada de la Transformada Wavelet continua. La CWT,  $W(\tau, d)$  de una función  $h(t)$  se define mediante la Ecuación 1 [15]. [16]

$$W(\tau, d) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t)w(t - \tau, d)dt \quad (1)$$

En este contexto,  $W(\tau, d)$  es una réplica a escala de la ondícula madre fundamental. En la ecuación (1), el factor de dilatación  $d$  es el inverso de la frecuencia  $f$ . La dilatación determina la anchura de la ondícula y controla la resolución. La transformada S se obtiene multiplicando la CWT por un factor de fase, como se define en la Ecuación 2.

$$S(\tau, f) = e^{-i2\pi f\tau}W(d, \tau) \quad (2)$$

En este sentido, la ondícula madre para este caso particular se define por medio de la Ecuación 3.

$$w(t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{t^2 f^2}{2}\right)} e^{-j2\pi f t} \quad (3)$$

Así, la forma final de la transformación continua S se obtiene aplicando por la Ecuación 4.

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}} e^{-j2\pi f t} dt \quad (4)$$

Asimismo, la anchura de la ventana gaussiana se obtiene mediante la Ecuación 5.

$$\sigma(f) = T = \frac{1}{|f|} \quad (5)$$

La transformada S de una serie discreta de datos genera una matriz compleja (matriz ST) en la que la fila corresponde a la frecuencia y la columna al tiempo.

La transformada S se emplea para extraer características significativas de las señales de corriente y tensión medidas en los extremos emisor (B1) y receptor (B2) de la línea de transmisión. La transformada S de la señal de corriente de cada fase genera una matriz compleja. El valor absoluto del arreglo S (STA) se utiliza para extraer las siguientes características de cada fase:

- Relación (Q) del valor máximo de las matrices STA de las señales de corriente medidas en B1 y B2.
- Energía (E) de la señal de tensión medida en B1.

La relación Q se obtiene a partir de la diferencia de tensión entre los extremos emisor y receptor de la red.

La energía de la señal se calcula en base al Teorema de Parseval [17]. Este teorema establece que la energía de una señal sigue siendo la misma tanto si se calcula en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, como se indica en la Ecuación (6).

$$E_{signal} = \frac{1}{T} \int_0^T |v(t)|^2 dt = \sum_{n=0}^N |V[n]|^2 \quad (6)$$

En este sentido, T y N son el periodo de tiempo y la longitud de la señal, respectivamente, y  $V[n]$  es la transformada de Fourier de la señal.

En el caso de la ST, la señal bruta se descompone en términos de sus frecuencias y, por tanto, a partir de la matriz ST se puede obtener un conjunto de señales descompuestas en cada una de las frecuencias instantáneas de la señal bruta. Así, en base al Teorema de Parseval, la energía de una señal distorsionada puede obtenerse mediante la Ecuación 7 [18].

$$E_{ST} = \left[ \frac{n}{NT} \right] = \sum_{k=1}^N \left( S \left[ kT, \frac{n}{NT} \right] \right)^2 \quad (7)$$

En estas condiciones,  $n = 1 \dots \frac{N}{2}, N$  es la longitud de la señal, y  $E_{ST} = \left[ \frac{n}{NT} \right]$  es el vector de energía del instante a la frecuencia  $n/NT$ .

En contraste, la energía máxima de cada frecuencia instantánea se calcula mediante la Ecuación (8)

$$E = \sum_{i=1}^M Y(i)^2 \quad (8)$$

Así pues,  $Y(i) =$  amplitud pico de la matriz STA en la fila  $i^{\text{th}}$  de la matriz STA, y M se refiere al número de frecuencias muestreadas en la matriz S. Cada fila de la matriz STA representa la frecuencia instantánea [19].

## 2.2 Tipos de fallas

En los sistemas eléctricos, existen diversas fallas que pueden surgir y afectar su correcto funcionamiento. Estas fallas pueden clasificarse en seis categorías principales: sobrecorriente, baja tensión, desequilibrio, potencia invertida, sobretensiones y corrientes de cortocircuito.

La sobrecorriente se produce cuando hay un exceso de corriente en el circuito, lo que

puede causar daños en los componentes eléctricos. Esta falla puede ser provocada por cortocircuitos, fugas o efectos coronales, así como por sobrecarga en el sistema de alimentación [20].

La baja tensión se debe a fallas en el campo del alternador o a cortocircuitos en las máquinas y líneas, lo que provoca una disminución en la tensión eléctrica [21].

El desequilibrio ocurre cuando hay una diferencia de tensión entre las fases, lo que hace que la corriente fluya de manera desproporcionada por las diferentes fases. Este problema puede ser causado por una falla en uno de los conductores o en la puesta a tierra de un cortocircuito de dos fases [22].

La potencia invertida se produce en sistemas interconectados, donde un generador funciona como un motor y absorbe energía en lugar de suministrarla. Esto puede ocurrir cuando hay una falla en el campo o en los alimentadores conectados en paralelo [23].

Las sobretensiones se dan cuando hay una avería grave o un rayo impacta en los circuitos vecinos, lo que provoca una formación de ondas de corta duración de tensión y corrientes muy elevadas. Estas ondas pueden considerarse como altas tensiones de alta frecuencia y pueden causar daños significativos en los equipos [24].

Finalmente, las corrientes de cortocircuito se producen cuando la corriente encuentra un camino menos resistivo y fluye a través de él, generando una corriente muy fuerte que puede dañar el equipo. Es importante desconectar la sección defectuosa para evitar la interrupción completa del suministro y minimizar los daños [25].

En un sistema eléctrico trifásico, los fallos pueden ser monofásicos a tierra, fase a fase, dos fases a tierra, fase a fase y al mismo tiempo la tercera fase a tierra, las tres fases a tierra y las tres fases en cortocircuito. Los cuatro primeros tipos de fallo se denominan fallos asimétricos, mientras que

los dos últimos se llaman simétricos. Aunque el fallo simétrico provoca una mayor carga en el disyuntor, los fallos asimétricos son los más frecuentes. Para determinar los valores nominales de los disyuntores, es importante realizar cálculos de cortocircuito simétrico [25].

### **3 Formulación del problema**

Las líneas de transmisión desempeñan un papel fundamental en la infraestructura del sistema energético al facilitar el transporte de energía desde su fuente hasta la carga correspondiente. Estas infraestructuras están expuestas a una variedad de fallas que impactan negativamente en su capacidad para transportar energía de manera eficiente. Además, los sistemas de transmisión experimentan una diversidad de fenómenos que desencadenan diferentes tipos de fallas [26].

Las fallas eléctricas tienen su origen en fenómenos físicos diversos, que abarcan desde incendios en áreas de trabajo hasta efectos del viento, fallos estructurales en las torres, descargas atmosféricas y errores humanos en la operación. Estos fenómenos son los responsables de generar una amplia gama de fallas que pueden manifestarse en las líneas de transmisión [27].

Cuando se presentan fallas en las líneas de transmisión, éstas impactan de manera significativa en la integridad del sistema de potencia, interrumpiendo la continuidad del suministro eléctrico y causando daños a los equipos. Este impacto se traduce en consecuencias directas para los usuarios finales, generando aumentos en los costos de mantenimiento. Por consiguiente, se vuelve imperativo identificar y resolver la falla de manera ágil con el objetivo de restaurar la operatividad del sistema [28].

Como respuesta a esta problemática, se propone la implementación de un modelo que permita la identificación y clasificación de las fallas en el sistema de transmisión. Este modelo se vale de un algoritmo basado en la transformada S (Algoritmo 1), el cual

se emplea para llevar a cabo la extracción de características necesarias en este proceso.

---

**Algoritmo 1.** Cálculo de la transformada-S

---

- Paso 1 Entradas  
 $x[n]$ : señal de entrada discretizada  
 $N$ : número de muestras  
 $M$ : número de ventanas  
 $a$ : ancho de banda ( $0 < a < 1$ )
- Paso 2 Inicialización  
**Para**  $0 \leq n < N, 0 \leq k < M + 1$   
 $ST[n, k] = 0$
- Paso 3 Estimación del ancho de ventana gaussiana  
**Para**  $k = 0$  hasta  $M$   

$$W = \frac{M + 1 - k}{M} * N$$
**Para**  $n = 0$  hasta  $N - 1$   

$$sinc = \sin\left(\frac{\pi \frac{n - n_c}{W}}{\pi \frac{n - n_c}{W}}\right)$$

$$ST[n, k] = ST[n, k] + x[n] * sinc$$
- Paso 4 Aplicar las derivadas de fase  
**Para**  $k = 0$  hasta  $M$   
**Para**  $n = 0$  hasta  $N - 1$   

$$phi = \pi \left( \frac{k}{M} + \frac{1 - a}{2} \right)$$

$$ST[n, k] = ST[n, k] + \exp(j * phi * n)$$
- Paso 5 Salida  
 $ST[n, k]$ : transformada de stockwell de  $x[n]$ .
- Paso 6 Terminar proceso
- 

La extracción de características implica cuantificar la transformada S y, posteriormente, procesar el arreglo obtenido. Esto permite calcular la energía presente en cada onda, tanto en corriente como en voltaje (Algoritmo 2). Como resultado, se genera una base de datos de fallas que contiene las características individuales de cada una.

---

**Algoritmo 2.** Extracción de características

---

- Paso 1 Entradas  
 $x(t)$ : señal de onda a analizar
- Paso 2 Inicialización  
 $M$ : longitud de cada frame  
 $N$ : número de frames  
 $B$ : número de bandas de frecuencia  
 $f[b1, b2]$ : límites de cada banda de frecuencia  $b = 1, \dots, B$   
 $w(n)$ : ventana de ponderación
- Paso 3 Segmentación de frames  
**Hacer para todo**  $n$  hasta  $M - 1$   
**Hacer para todo**  $i$  hasta  $N - 1$   

$$xf_i(n) = x(n + i * M)$$
- Paso 4 Aplicar ventana  $w(n)$  a cada Frame  
**Hacer para todo**  $n$  hasta  $M - 1$   

$$xw_{i(n)} = xf_i(n) * w(n)$$
- Paso 5 Calcular la Transformada Discreta de Fourier (DWT)  
**Hacer para todo**  $n$  hasta  $M - 1$   
**Hacer para todo**  $k$  hasta  $M - 1$   

$$xw_{i(k)} = \sum xw_{i(n)} * e^{-\frac{j2\pi kn}{m}}$$
- Paso 6 Cálculo de periodograma  
**Hacer para todo**  $k$  hasta  $M - 1$   

$$Pw_{i(k)} = \left(\frac{1}{M}\right) |xw_{i(k)}|^2$$
- Paso 7 Integrar  $Pw_{i(k)}$  en cada banda de frecuencia  
**Hacer para todo**  $k$  hasta  $M - 1$   

$$Pw_{ib} = \sum_{f(b1)}^{f(b2)} Pw_{i(k)}$$
- Paso 8 Guardar el vector de características  
 $Pw_{i(b)}$
- Paso 9 Terminar proceso
- 

Los tipos de fallas consideradas son los siguientes: Línea a tierra (AG, BG, CG), Línea a línea (AB, BC, AC), Doble línea a tierra (ABG, BCG, ACG), Cortocircuito trifásico (ABC) y tres fases a tierra (ABCG). Cada uno de estos escenarios se modela para 20 valores de resistencia de falla, que van desde 0.001 hasta 100,

distribuidos de manera uniforme. Por consiguiente, el número total de simulaciones para los 11 tipos de fallas es de  $20 * 11 = 220$ .

Una vez que se obtienen las características de los parámetros eléctricos (voltaje y corriente), se emplea una técnica de inteligencia artificial siguiendo una lógica específica. Esta técnica consiste en asignar una variable binaria a cada fase (A-B-C-G), de modo que, al presentarse una falla, el resultado se represente mediante un vector binario de 4 elementos (Tabla 1). En este arreglo, los valores binarios indican la presencia (1) o ausencia (0) de falla en la fase correspondiente. Este procedimiento se aplica a todas las fallas disponibles en la base de datos.

Tabla 1. Lógica para técnica de inteligencia artificial

Falla	AG	BG	CG	AB	BC	AC	ABG	BCG	ACG	ABC	ABCG
A	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1
B	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
C	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1
G	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1

Un aspecto de gran importancia es la tasa de muestreo de los datos, dado que el tiempo de simulación para todos los casos es de 0.25 segundos, con un intervalo de muestreo de  $5e-6$  segundos, lo que genera un total de 5001 datos para cada señal, sumando un total de 30006 datos. Esta cantidad resulta considerable para su procesamiento, por lo que se hace necesario seleccionar una segunda tasa de muestreo que capture las características requeridas. Por consiguiente, se opta por una tasa de muestreo de 0.001 segundos, lo que proporciona 251 datos para cada onda, tanto de voltaje como de corriente.

En contraste, con los datos obtenidos de la transformada S y su correspondiente vector lógico asociado, se aplica la técnica de inteligencia artificial. En este caso, el

número de entradas es de  $251 * 6 = 1506$ , mientras que las salidas se representan mediante un arreglo binario de 4 elementos (Figura 1).

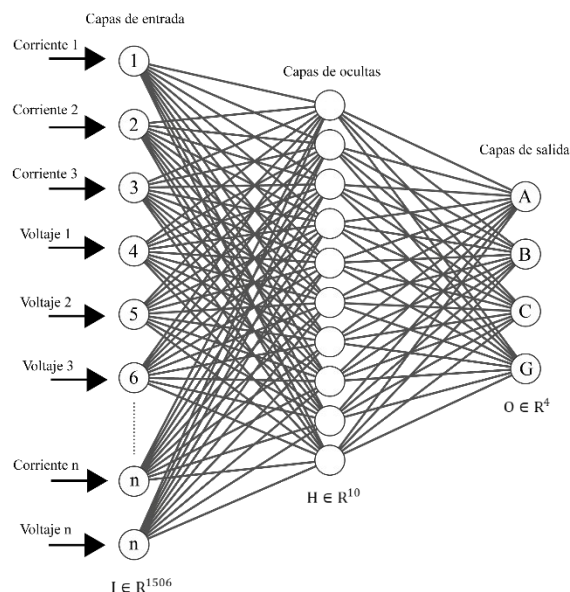


Figura 1. Arquitectura de la ANN para identificación y clasificación de fallas.

La ANN diseñada para detectar y clasificar fallas en líneas de transmisión está compuesta por 1506 neuronas en la capa de entrada, 10 capas ocultas y 4 neuronas en la capa de salida. En consecuencia, el proceso de entrenamiento de la ANN se realiza dividiendo la base de datos en tres conjuntos (70%, 15% y 15%). El primer conjunto se destina al entrenamiento, el segundo a la validación y el tercero al testeo. Además, el procedimiento detallado para el entrenamiento de la ANN se describe en el Algoritmo 3.

**Algoritmo 3.** Entrenamiento de la ANN

- Paso 1 Datos de entrada  
 $x$ : matriz de datos de entrada  
 $n_{muestras} * n_{caracteristicas}$   
 $y$ : vectores de salida deseados  
 $n_{muestras} * 1$
- Paso 2 Parametrización de la ANN  
 $n_{capas} = \# \text{ de capas}$   
 $n_{neu}(i)$ : # de neuronas en la capa  $i$   
 $w(i)$ : matriz de pesos para la capa  $i$

- Paso 3 Inicialización  
Función de activación

$$\sigma(x) = \frac{1}{(1 + e^{-x})}$$

**Hacer para cada capa i**  
**Hacer para cada epoca e**  
**Hacer para cada muestra j**

$$\begin{aligned} x(i) &= x \\ z(i) &= w(i) * x(i) + b(i) \\ y(i) &= \sigma(z(i)) \\ x(i + 1) &= y(i) \end{aligned}$$

**Fin para**

Cálculo de error

$$E = \text{FunciónDePérdida}(y, \hat{y})$$

Propagación hacia atrás

$$w(i) = w(i) - \alpha * \frac{\partial E}{\partial w}(i)$$

**Fin para**

**Fin para**

- Paso 4 Dividir los datos para la formación, validación y pruebas

- Paso 5 Terminar proceso

Como resultado, se logra la clasificación e identificación de fallas aplicando secuencialmente los tres algoritmos previamente mencionados. Por último, se emplea el sistema de prueba utilizado para obtener la base de datos, el cual corresponde al sistema de testeo de 9 nodos (Figura 2).

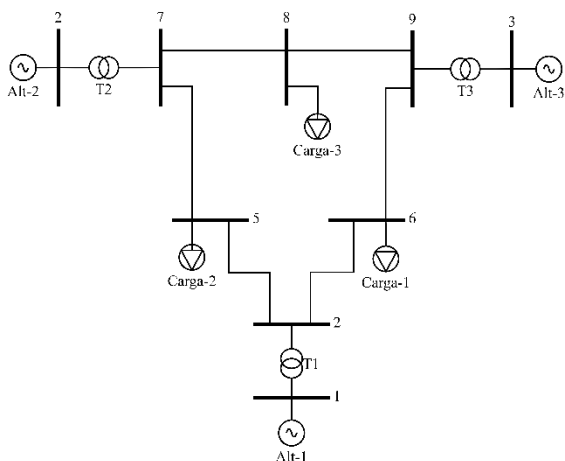


Figura 2. Sistema de testeo, 9 nodos.

## 4 Análisis de resultados

Se analiza los resultados obtenidos del software MATLAB usando la caja de herramientas EMTP, del software Power

Factory y se termina con el cálculo de la confiabilidad del sistema de transmisión considerando el sistema de clasificación de fallas.

Para obtener el predictor de fallas proporcionado por la ANN, se hace uso de la herramienta nftool de MATLAB, donde se ingresa la arquitectura de la ANN descrita en la anterior sección junto con los datos de todas las fallas ejecutadas para obtener la base de datos. Seguido se entrena la red aplicando el algoritmo de Levenberg Marquadt, de lo cual se obtuvo que el porcentaje de efectividad con los datos de entrenamiento y validación es del 97%, mientras que, con los datos de testeo adopta el 98%. Por consiguiente, el grado de efectividad general de la ANN se ubica en 97%. (Figura 3)

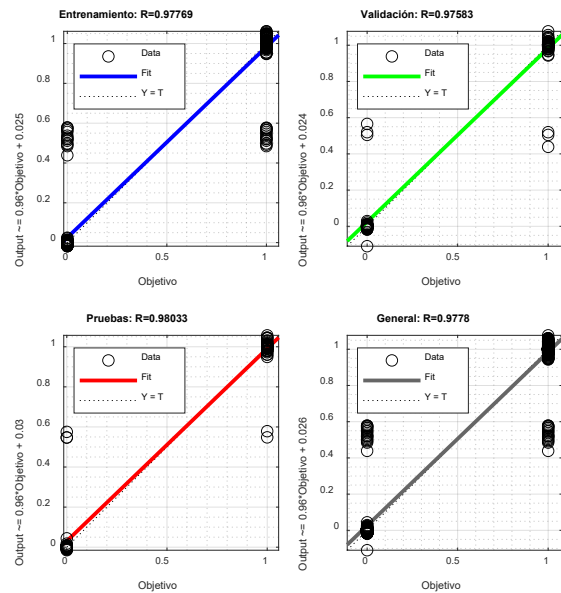


Figura 3. Indicadores de la ANN.

El resultado que muestra la Figura 3 se obtiene de una gran cantidad de datos de fallas de diferentes tipos que fueron sometidos a prueba, no obstante, para ilustrar un análisis más detallado se ha seleccionado 4 tipos de fallas al azar (Tabla 2) donde se pretende analizar las variables de voltaje, corriente, transformada-S y respuesta del detector.



Tabla 2. Escenarios de prueba para la detección y clasificación de fallas

Caso	Falla
1	BG
2	BC
3	ABG
4	ABC

#### 4.1 Caso 1: falla BG

El primer escenario corresponde a una falla monofásica, donde la fase B se cortocircuita con tierra (G). En este sentido, la falla se efectúa en el tiempo 0.2 - 0.25 s. Además, la resistencia de falla es de  $0.001 \Omega$ .

##### 4.1.1 Análisis con EMTP/MATLAB

Se observa que el voltaje de la fase A (Figura 4) presenta una magnitud RMS de 125.674 kV desde el instante inicial hasta que se produce la falla a los 0.2 s. Durante el evento de falla, se registra una ligera variación en el voltaje, alcanzando una magnitud mínima de 123.459 kV. Sin embargo, una vez superada la falla, el voltaje vuelve a su valor inicial, tal como se encontraba previamente al incidente.

De manera similar, se observa que la magnitud RMS del voltaje en la fase B (Figura 5) se mantiene constante en 125.674 kV desde el inicio hasta el momento de la falla a los 0.2 s. Sin embargo, al producirse la falla, el voltaje disminuye gradualmente hasta llegar a cero, permaneciendo en este estado durante el tiempo de duración de la falla, es decir, hasta los 0.25 s. Después de este período, la onda del voltaje vuelve a adquirir la magnitud que tenía antes de que ocurriera la falla.

En cuanto a lo que se refiere a la fase C (Figura 6), el voltaje se mantiene con una magnitud de 125.674 kV desde el segundo 0 hasta 0.2, a partir de este momento se observa que la onda presenta una deformación momentánea que se mantiene durante la falla, posteriormente la onda de voltaje adopta su amplitud normal.

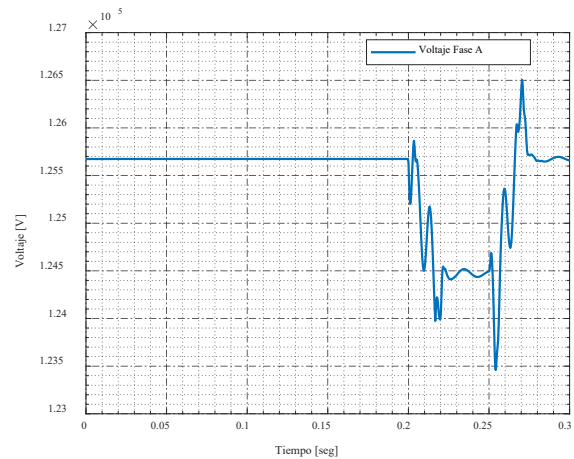


Figura 4. Falla BG, voltaje fase A.

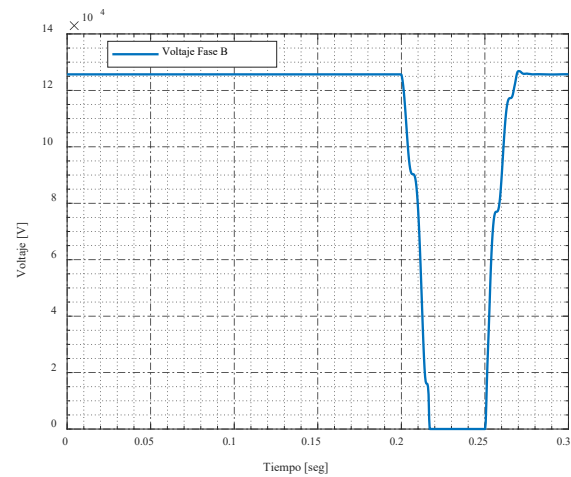


Figura 5. Falla BG, voltaje fase B.

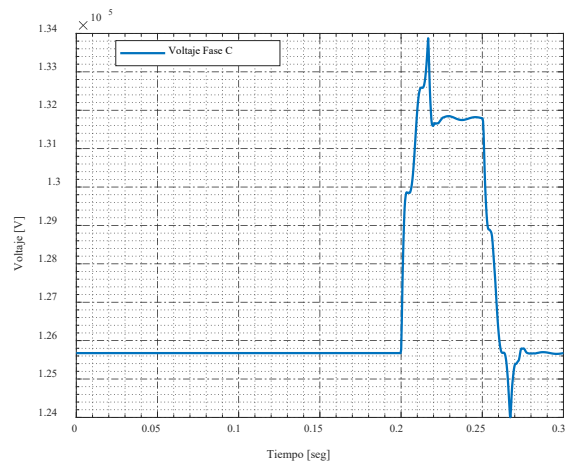


Figura 6. Falla BG, voltaje fase C.

Por otro lado, se constata que el comportamiento de la onda de corriente de la fase A (Figura 7) se mantiene constante con una magnitud de 131.118 A, desde el segundo 0 hasta 0.2. Posterior a este

intervalo de tiempo, la onda de corriente se desplaza ligeramente hacia el eje positivo y mantiene este comportamiento durante el tiempo que dura la falla (0.25 s). Posterior a este tiempo la magnitud de la onda de corriente de la fase A vuelve a su estado normal.

Asimismo, la onda de corriente de la fase B (Figura 8) desde el segundo 0 hasta 0.2 describe un comportamiento normal con una magnitud de 131.118 A. Posterior a este intervalo de tiempo, la magnitud de la fase B presenta un valor pico importante de 3306.11 A, la cual se mantiene durante una milésima de segundo, para luego adoptar una magnitud de 972.661 A, valor que prevalece hasta los 0.25 segundos. Luego de este tiempo, la onda de corriente recupera su valor normal de manera paulatina.

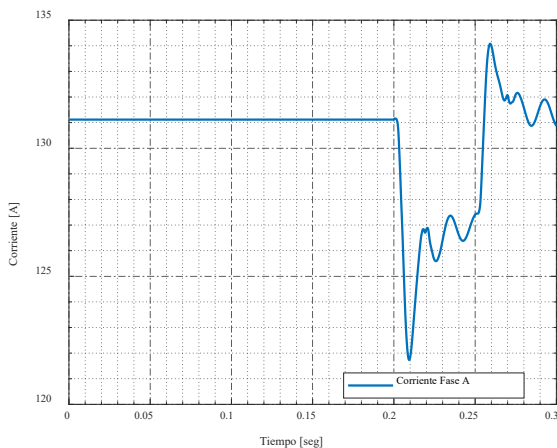


Figura 7. Falla BG, corriente fase A.

En lo que se refiere a la fase C (Figura 9), el comportamiento de la onda de corriente desde el segundo 0 hasta 0.2 se mantiene constante con una magnitud de 131.118 A. Posterior a este intervalo de tiempo, la onda de corriente se deforma adoptando una magnitud máxima de 138.868 A, este comportamiento se mantiene hasta los 0.25 segundos. Luego de este periodo, la onda de corriente regresa a su estado normal.

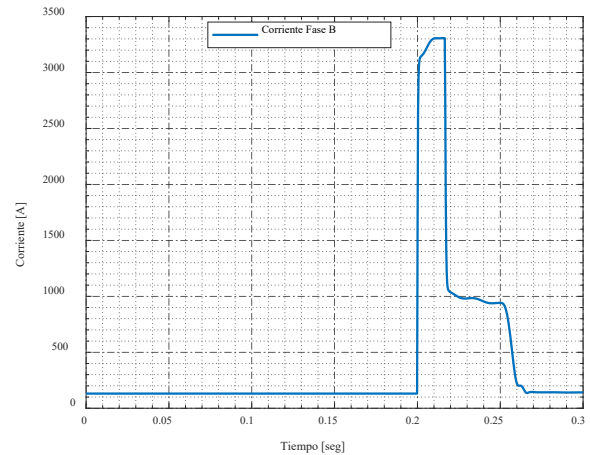


Figura 8. Falla BG, corriente fase B.

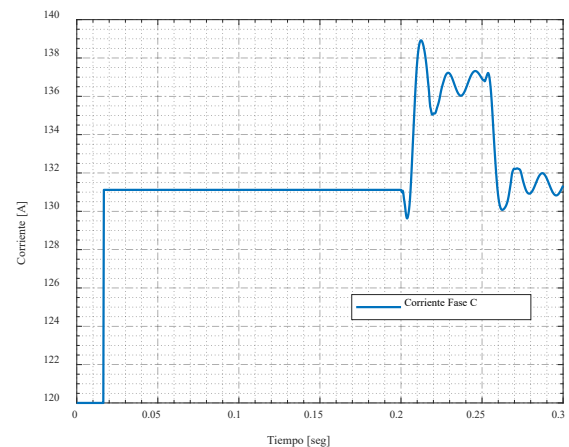


Figura 9. Falla BG, corriente fase C.

El análisis de la Transformada S se realiza por fase, comparando la señal sin falla con la señal durante la falla. Al obtener la Transformada S de la fase A (Figura 10), se observa que la señal sin falla tiene una magnitud máxima de 3076.48, mientras que durante la falla alcanza una magnitud de 4172.63. Es decir, se registra un aumento de 1096.15 puntos en su magnitud.

En el caso de la Transformada S de la fase B (Figura 11), se aprecia que la magnitud máxima asociada a la señal sin falla es de 3076.48, mientras que durante la falla aumenta significativamente a 13459.47.

Asimismo, la Transformada S de la fase C (Figura 12) revela una magnitud de 3076.48 en ausencia de falla, y durante la falla alcanza una magnitud de 4226.19.

De este modo, se evidencia que la fase en la que la magnitud experimenta un aumento considerable es la fase B, lo que indica la presencia de una falla en dicha fase.

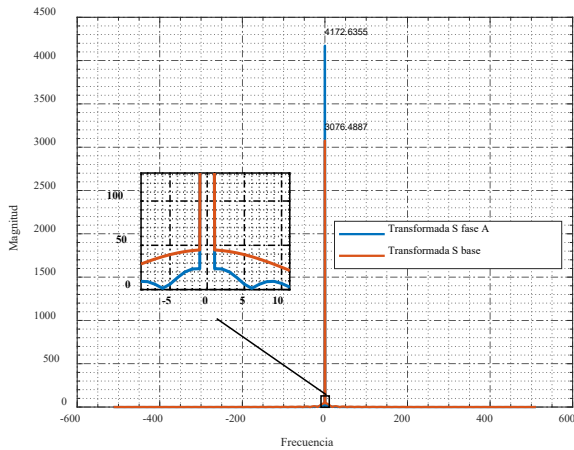


Figura 10. Falla BG, transformada S – fase A.

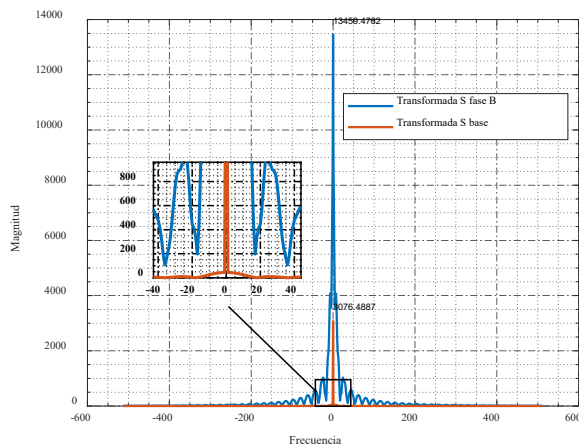


Figura 11. Falla BG, transformada S – Fase B.

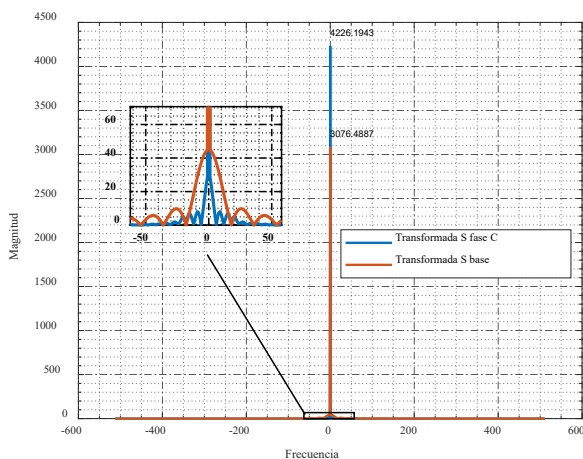


Figura 12. Falla BG, transformada S – Fase C.

En relación con la respuesta del clasificador de fallas (Figura 13), se observa un gráfico individual para cada fase. Se nota que la fase B y el neutro se activan a partir de los 0.2 segundos y se desactivan a los 0.25 segundos. Por lo tanto, se puede concluir que la ANN identificó exitosamente la presencia de la falla.

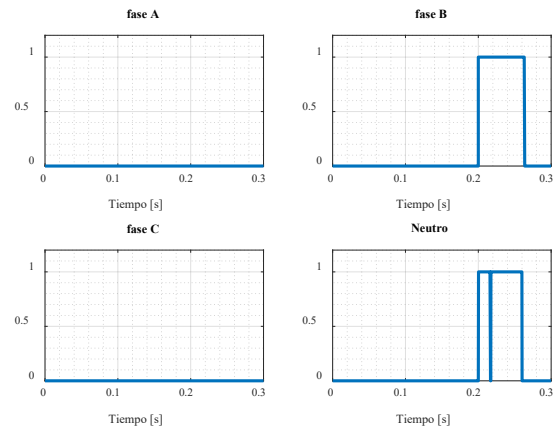


Figura 13. Falla BG, respuesta del clasificador de fallas.

#### 4.1.2 Análisis con Power Factory

Para llevar a cabo este análisis, es fundamental mencionar que el cálculo de la falla se efectuó en Power Factory. Los resultados obtenidos se introducen en el clasificador de fallas programado en MATLAB. Por tanto, se procede a analizar directamente los gráficos de la falla y la respuesta del clasificador.

La forma de onda del voltaje en la fase A (Figura 14) muestra una magnitud eficaz de 1,02 por unidad desde el inicio hasta los 0,2 segundos, momento en el que ocurre la avería. Tras la falla, el voltaje desciende a 0,91 por unidad y luego a 0,85 por unidad. A los 0,25 segundos, el voltaje se recupera, primero aumentando a 0,96 por unidad para luego alcanzar su valor previo al fallo.

Por otro lado, la magnitud de la forma de onda en la fase B (Figura 15) se mantiene en 1,03 por unidad desde el inicio hasta los 0,2 segundos. No obstante, cuando ocurre la falla a los 0,2 segundos, el voltaje cae a 0 y permanece así durante la anomalía hasta los 0,25 segundos. Pasado este tiempo, la forma

de onda recupera su magnitud anterior a la ocurrencia del fallo.

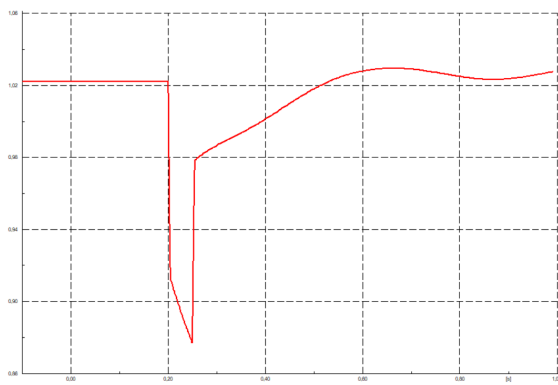


Figura 14. Falla BG, voltaje fase A – Power Factory.

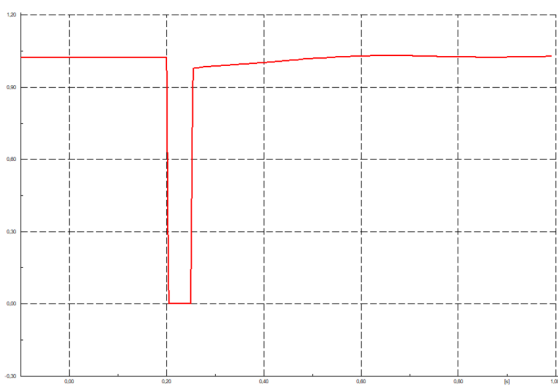


Figura 15. Falla BG, voltaje fase B – Power Factory.

La forma de onda del voltaje en la fase C (Figura 16) exhibe una magnitud eficaz de 1,02 por unidad desde el inicio hasta los 0,2 segundos, momento en el cual se produce la avería. Como resultado de la falla, el voltaje disminuye a 0,91 por unidad y luego a 0,90 por unidad. Al llegar a los 0,25 segundos, el voltaje se recupera, comenzando con una magnitud de 0,98 por unidad para luego alcanzar su valor previo a la falla.

Por otra parte, se observa que el comportamiento de la onda de corriente en la fase A (Figura 17) permanece constante con una magnitud de 180 A desde el inicio hasta los 0.2 segundos. Después de este lapso, la onda de corriente se aproxima al valor cero y se mantiene en este nivel durante la duración de la falla (0.25 s). Transcurrido este tiempo, la magnitud de la

onda de corriente en la fase A vuelve gradualmente a su estado normal.

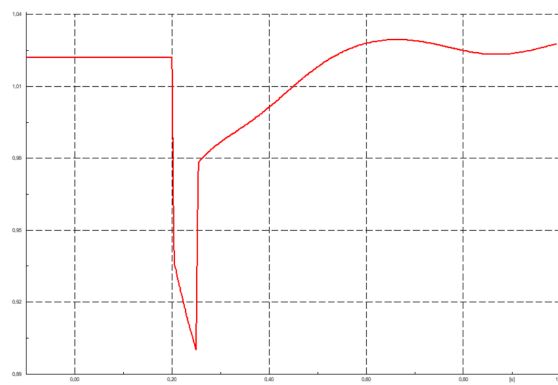


Figura 16. Falla BG, voltaje fase C – Power Factory.

En cuanto a la onda de corriente en la fase B (Figura 18), desde el inicio hasta los 0.2 segundos muestra un comportamiento normal. Posteriormente a este período, la magnitud de la fase B experimenta un pico importante de 3.184 kA que dura una milésima de segundo, para luego estabilizarse en 3.059 kA hasta los 0.25 segundos. Después de este tiempo, la onda de corriente vuelve progresivamente a su valor normal.

En relación con la fase C (Figura 19), la onda de corriente se mantiene constante con una magnitud de 184 A desde el inicio hasta los 0.2 segundos. Después de este intervalo, la onda de corriente tiende a cero y se mantiene así hasta los 0.25 segundos. Posteriormente a este periodo, la onda de corriente retorna de manera gradual a su estado normal.

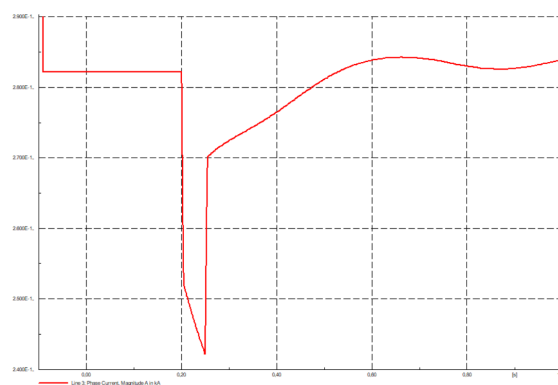


Figura 17. Falla BG, corriente fase A – Power Factory.

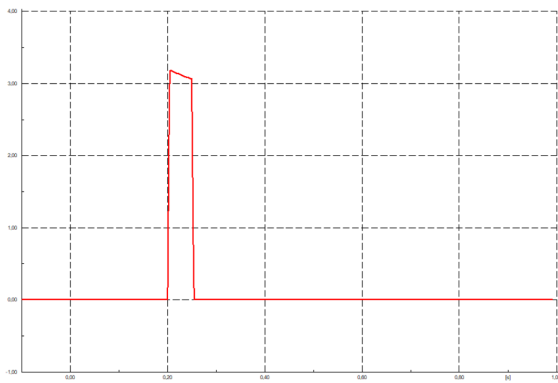


Figura 18. Falla BG, corriente fase B – Power Factory.

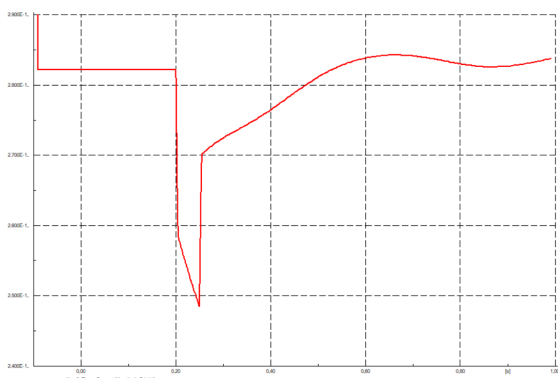


Figura 19. Falla BG, corriente fase C – Power Factory.

Al aplicar la transformada S de corriente a cada fase (Figura 20), se observa que la forma de onda de la fase A tiene una amplitud de 1500 en los ejes de frecuencia positivo y negativo, sin deformación significativa. Por el contrario, la forma de onda de la fase B muestra una deformación significativa y tiene una magnitud superior a 2000. Esto se debe a que la fase B es la fase implicada en el fallo. Por otro lado, la forma de onda de la fase C presenta un comportamiento similar al de la fase A, ya que esta fase no está implicada en la falla. Del análisis de la transformada S por fase, se puede concluir que las formas de onda de las fases involucradas en la falla se deforman en comparación con las fases sin falla presente.

En relación con la respuesta del clasificador de fallas (Figura 21), se observa un gráfico individual para cada fase, donde la fase B y el neutro se activan desde el

segundo 0.2 y se desactivan a los 0.25 segundos. Por lo tanto, se puede concluir que la ANN identificó exitosamente la presencia de la falla.

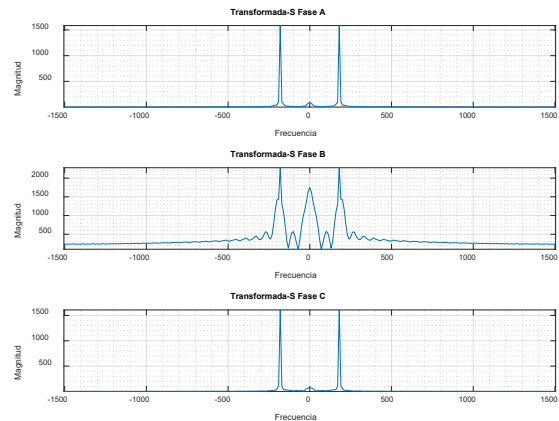


Figura 20. Falla BG, transformada S - Power Factory

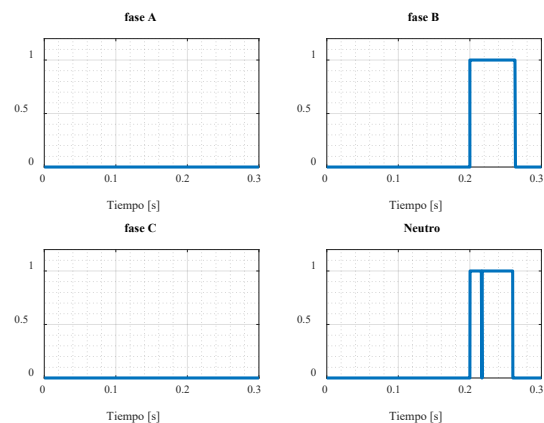


Figura 21. Falla BG, respuesta de clasificador de fallas – Power Factory

## 4.2 Caso 2: falla BC

El segundo escenario corresponde a una falla bifásica, donde la fase B se cortocircuita con la fase C. En este sentido, la falla se efectúa en el tiempo 0.2 - 0.25 segundos. Además, la resistencia de falla es de  $0.001 \Omega$ .

### 4.2.1 Análisis con EMTP/MATLAB

Se observa que el voltaje de la fase A (Figura 22) presenta una magnitud RMS de 125.674 kV desde el instante inicial hasta que se produce la falla a los 0.2 s. Durante el evento de falla, se registra una ligera

variación en el voltaje, alcanzando una magnitud mínima de 125.671 kV. Sin embargo, una vez superada la falla, el voltaje vuelve a su valor inicial, tal como se encontraba previamente al incidente.

De manera similar, se observa que la magnitud RMS del voltaje en la fase B (Figura 23) se mantiene constante en 125.674 kV desde el inicio hasta el momento de la falla a los 0.2 s. Sin embargo, al producirse la falla, el voltaje disminuye gradualmente hasta llegar a 62.83 kV, permaneciendo en este estado durante el tiempo de duración de la falla, es decir, hasta los 0.25 s. Después de este período, la onda del voltaje vuelve a adquirir la magnitud que tenía antes de que ocurriera la falla.

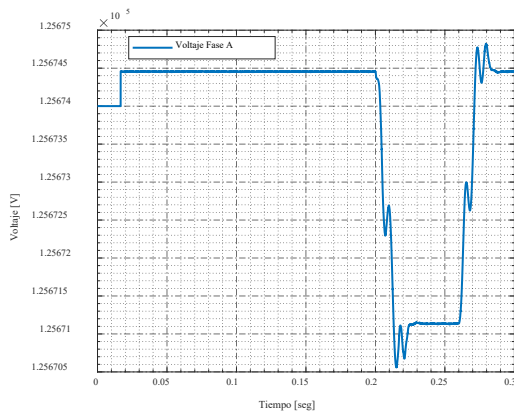


Figura 22. Falla BC, voltaje fase A.

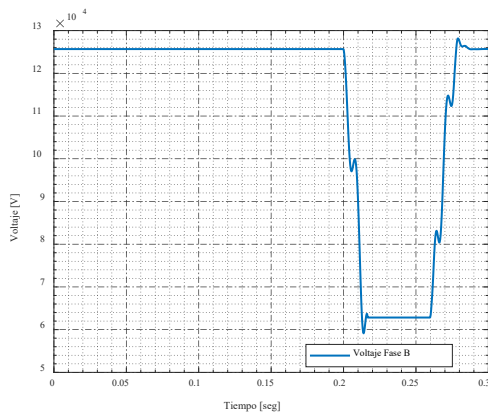


Figura 23. Falla BC, voltaje fase B.

En cuanto a lo que se refiere a la fase C (Figura 24), el voltaje se mantiene con una

magnitud de 125.674 kV desde el segundo 0 hasta 0.2, a partir de este momento se observa que la onda presenta una deformación momentánea con una magnitud de 62.83 kV que se mantiene durante la falla, posteriormente la onda de voltaje adopta su amplitud normal.

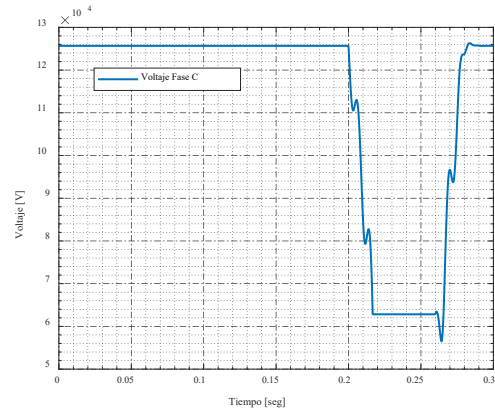


Figura 24. Falla BC, voltaje fase C.

Por otro lado, se constata que el comportamiento de la onda de corriente de la fase A (Figura 25) se mantiene constante con una magnitud de 131.118 A, desde el segundo 0 hasta 0.2. Posterior a este intervalo de tiempo, la onda de corriente se desplaza adopta una magnitud de 131.15 A y mantiene este comportamiento durante el tiempo que dura la falla (0.25 s). Posterior a este tiempo la magnitud de la onda de corriente de la fase A vuelve a su estado normal.

Asimismo, la onda de corriente de la fase B (Figura 26) desde el segundo 0 hasta 0.2 describe un comportamiento normal con una magnitud de 131.118 A. Posterior a este intervalo de tiempo, la magnitud de la fase B presenta un valor pico importante de 16808.3 A, la cual se mantiene durante una milésima de segundo, para luego adoptar una magnitud de 762.41 A, valor que prevalece hasta los 0.25 segundos. Luego de este tiempo, la onda de corriente recupera su valor normal de manera paulatina.

En lo que se refiere a la fase C (Figura 27), el comportamiento de la onda de corriente desde el segundo 0 hasta 0.2 se

mantiene constante con una magnitud de 131.118 A. Posterior a este intervalo de tiempo, la onda de corriente se deforma adoptando una magnitud máxima de 16842.8 A, este comportamiento se mantiene hasta los 0.25 segundos. Luego de este periodo, la onda de corriente regresa a su estado normal.

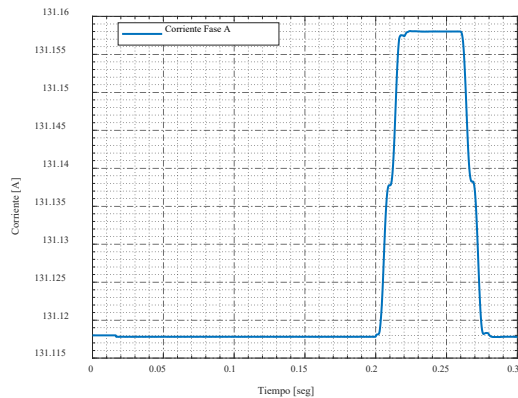


Figura 25. Falla BC, corriente fase A.

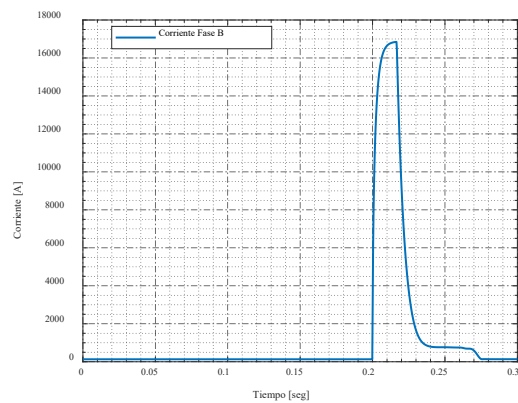


Figura 26. Falla BC, corriente fase B.

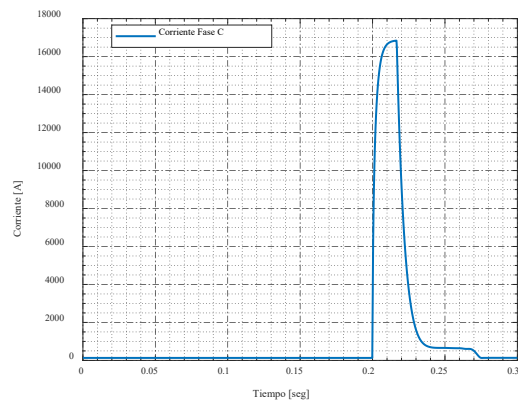


Figura 27. Falla BC, corriente fase C.

El análisis de la Transformada S se realiza por fase, comparando la señal sin falla con la señal durante la falla. Al obtener la Transformada S de la fase A (Figura 28), se observa que la señal sin falla tiene una magnitud máxima de 3076.48, mientras que durante la falla alcanza una magnitud de 4196.02.

En el caso de la Transformada S de la fase B (Figura 29), se aprecia que la magnitud máxima asociada a la señal sin falla es de 3076.48, mientras que durante la falla aumenta significativamente a 42888.41.

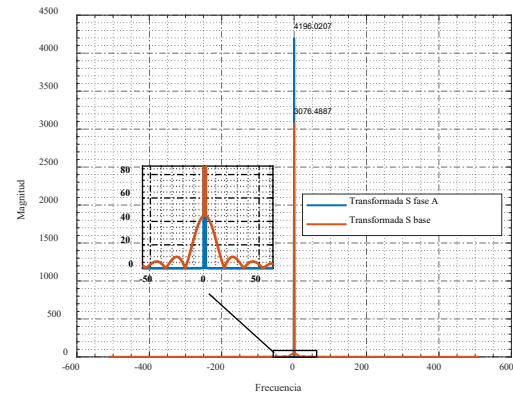


Figura 28. Falla BC, transformada S – fase A.

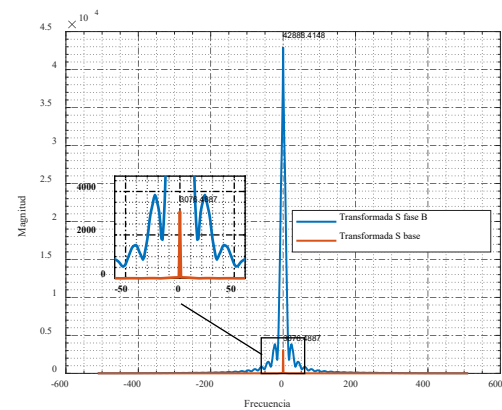


Figura 29. Falla BC, transformada S – Fase B.

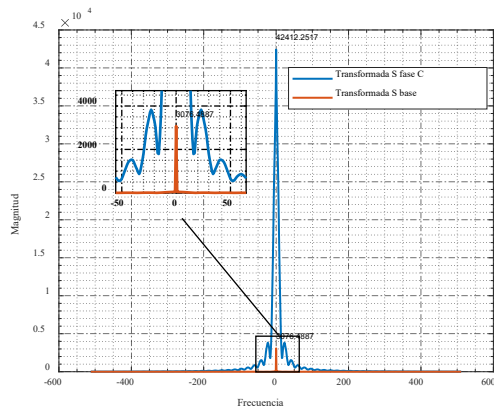


Figura 30. Falla BC, transformada S – Fase C.

Asimismo, la Transformada S de la fase C (Figura 30) revela una magnitud de 3076.48 en ausencia de falla, y durante la falla alcanza una magnitud de 42412.25.

De este modo, se evidencia que las fases con una magnitud inusual son la fase B y C, lo que indica la presencia de una falla en dichas fases.

En relación con la respuesta del clasificador de fallas (Figura 31), se observa un gráfico individual para cada fase. Se nota que la fase B y C se activan a partir de los 0.2 segundos y se desactivan a los 0.25 segundos. Por lo tanto, se puede concluir que la ANN identificó exitosamente la presencia de la falla.

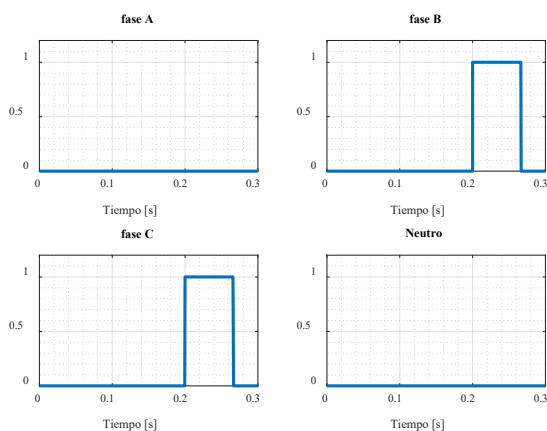


Figura 31. Falla BC, respuesta del clasificador de fallas.

#### 4.2.2 Análisis con Power Factory

Para llevar a cabo este análisis, es fundamental mencionar que el cálculo de la

falla se efectuó en Power Factory. Los resultados obtenidos se introducen en el clasificador de fallas programado en MATLAB. Por tanto, se procede a analizar directamente los gráficos de la falla y la respuesta del clasificador.

La forma de onda de la tensión de la fase A (Figura 32) tiene una magnitud eficaz de 1,03 por unidad desde el segundo 0 hasta los 0,2 segundos, cuando se produce la avería. Como consecuencia de la falla, la tensión disminuye a 1 por unidad y después a 0,97 por unidad. A los 0,25 segundos, la tensión se recupera, adoptando primero una magnitud de 0,98 por unidad hasta alcanzar su valor anterior a la falla.

Por otro lado, la magnitud de la forma de onda de la fase B (Figura 33) se mantiene en 1,03 por unidad desde el segundo 0 hasta los 0,2 segundos. Sin embargo, cuando se produce la falla a los 0,2 segundos, la tensión cae a 0.5 pu y se mantiene así mientras dura la anomalía, hasta los 0,25 segundos. Transcurrido este tiempo, la forma de onda recupera la magnitud que tenía antes de producirse el fallo.

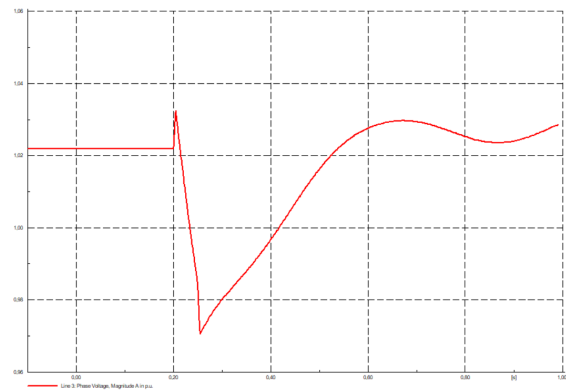


Figura 32. Falla BC, voltaje fase A – Power Factory.

La forma de onda de la tensión de la fase C (Figura 34) tiene una magnitud eficaz de 1,03 por unidad desde el segundo 0 hasta los 0,2 segundos, cuando se produce la avería. Como consecuencia de la falla, la tensión disminuye a 0,51 por unidad y después a 0,50 por unidad. A los 0,25 segundos, la tensión se recupera, adoptando primero una



magnitud de 0,98 por unidad hasta alcanzar su valor anterior a la falla.

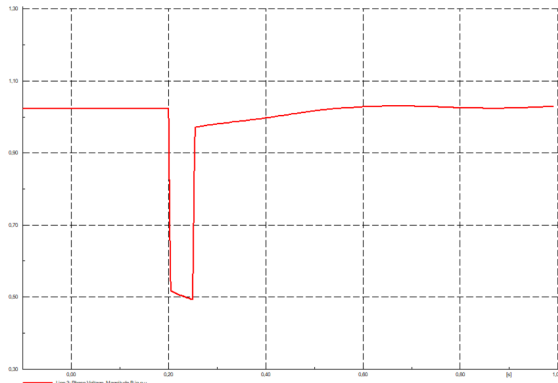


Figura 33. Falla BC, voltaje fase B – Power Factory.

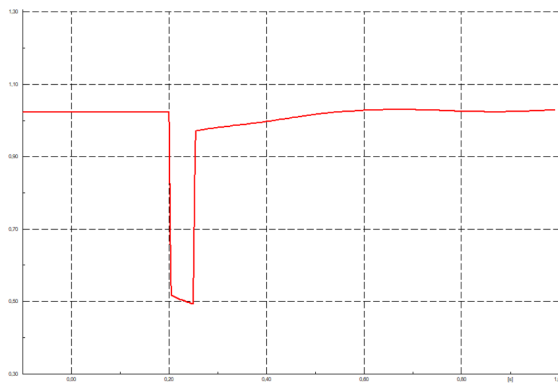


Figura 34. Falla BC, voltaje fase C – Power Factory.

Por otro lado, se constata que el comportamiento de la onda de corriente de la fase A (Figura 35) se mantiene constante con una magnitud de 185 A, desde el segundo 0 hasta 0.2. Posterior a este intervalo de tiempo, la onda de corriente se desplaza muy próximo a cero y mantiene este comportamiento durante el tiempo que dura la falla (0.25 seg). Posterior a este tiempo la magnitud de la onda de corriente de la fase A vuelve a su estado normal de manera progresiva.

Asimismo, la onda de corriente de la fase B (Figura 36) desde el segundo 0 hasta 0.2 describe un comportamiento normal. Posterior a este intervalo de tiempo, la magnitud de la fase B presenta un valor pico importante de 2.18 kA que se mantiene durante una milésima de segundo, para luego adoptar una magnitud de 2.079 kA,

valor que prevalece hasta los 0.25 segundos. Luego de este tiempo, la onda de corriente recupera su valor normal de manera paulatina.

En lo que se refiere a la fase C (Figura 37), el comportamiento de la onda de corriente desde el segundo 0 hasta 0.2 se mantiene constante con una magnitud de 184 A. Posterior a este intervalo de tiempo, la onda de corriente presenta un valor pico importante de 2.18 kA que se mantiene durante una milésima de segundo, para luego adoptar una magnitud de 2.079 kA, valor que prevalece hasta los 0.25 segundos. Luego de este tiempo, la onda de corriente recupera su valor normal de manera paulatina.

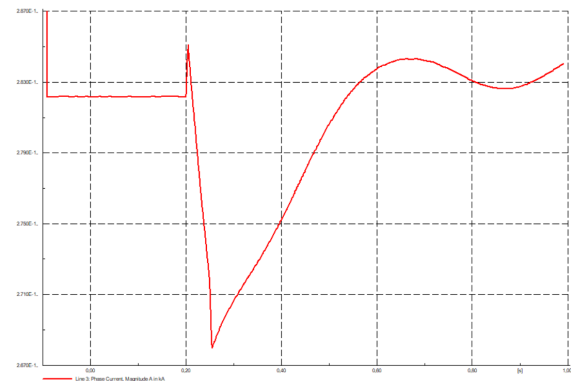


Figura 35. Falla BC, corriente fase A – Power Factory.

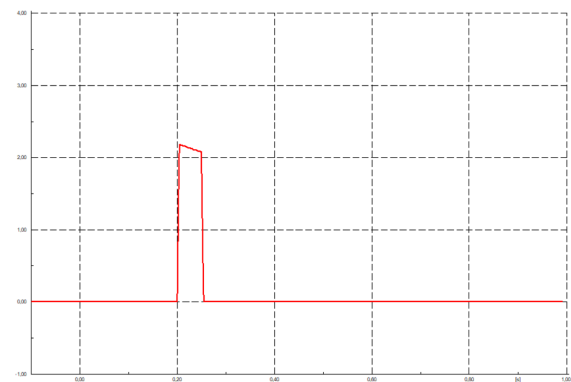


Figura 36. Falla BC, corriente fase B – Power Factory.

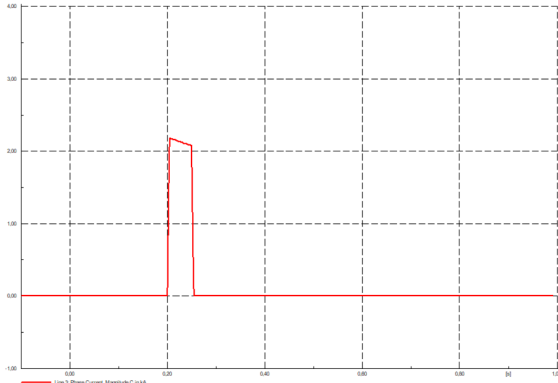


Figura 37. Falla BC, corriente fase C – Power Factory.

Al aplicar la transformada S de corriente para cada fase (Figura 34), se comprueba que la forma de onda de la fase A posee una amplitud de 1500 tanto en el eje positivo y negativo de frecuencias, además, no existe una deformación importante. Por el contrario, la forma de onda de la fase B presenta una deformación importante y describe una magnitud superior a los 60000. Esto se debe a que esta es la fase que se involucra en la falla. Asimismo, la forma de onda de la fase C presenta una deformación importante con una magnitud superior a los 60000, dado que esta es la fase que se involucra en la falla.

En contraste, del análisis de la transformada S por fase se concluye que las formas de onda de las fases que se involucran en la falla se deforman a comparación de las fases sin falla.

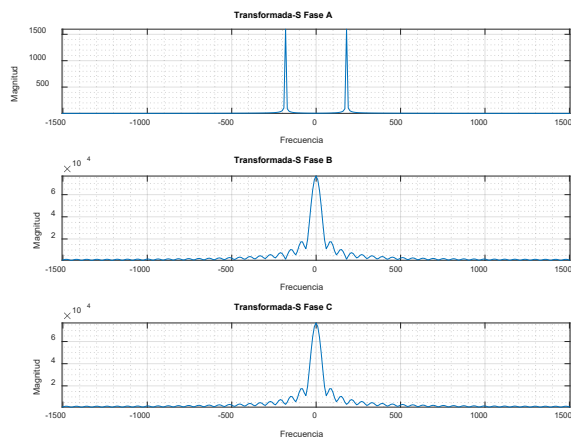


Figura 38. Falla BC, transformada S – Power Factory.

En lo que respecta a la respuesta del clasificador de fallas (Figura 35), se constata que existe un gráfico por cada fase, donde se activa la fase B y C a partir del segundo 0.2, y se desactivan a los 0.25. Por consiguiente, se concluye que la ANN identificó la falla de forma exitosa.

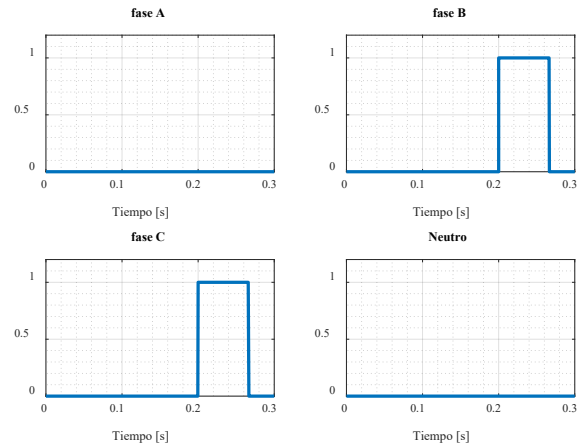


Figura 39. Falla BC, respuesta de clasificador de fallas.

### 4.3 Caso 3: falla ABG

El segundo escenario corresponde a una falla bifásica a tierra, donde la fase A se cortocircuita con la fase B y tierra. En este sentido, la falla se efectúa en el tiempo 0.2 - 0.25 segundos. Además, la resistencia de falla es de  $0.001 \Omega$ .

#### 4.3.1 Análisis con EMTP/MATLAB

Se observa que el voltaje de la fase A (Figura 40) presenta una magnitud RMS de 125.674 kV desde el instante inicial hasta que se produce la falla a los 0.2 s. Durante el evento de falla, se registra una variación en el voltaje, alcanzando una magnitud mínima de 10.17 kV. Sin embargo, una vez superada la falla, el voltaje vuelve a su valor inicial, tal como se encontraba previamente al incidente.

De manera similar, se observa que la magnitud RMS del voltaje en la fase B (Figura 41) se mantiene constante en 125.674 kV desde el inicio hasta el momento de la falla a los 0.2 s. Sin embargo, al producirse la falla, el voltaje

disminuye gradualmente hasta llegar a 10.24 kV, permaneciendo en este estado durante el tiempo de duración de la falla, es decir, hasta los 0.25 s. Después de este período, la onda del voltaje vuelve a adquirir la magnitud que tenía antes de que ocurriera la falla.

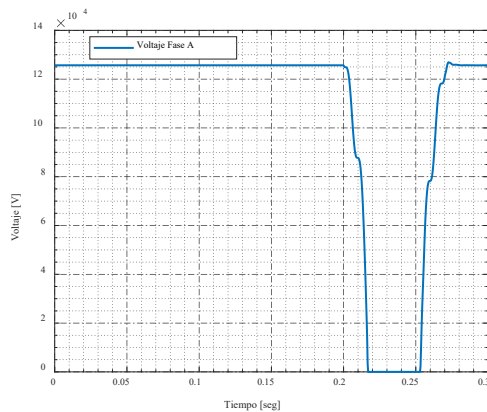


Figura 40. Falla ABG, voltaje fase A.

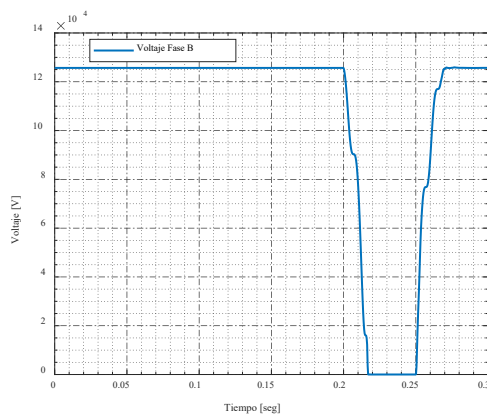


Figura 41. Falla ABG, voltaje fase B.

En cuanto a lo que se refiere a la fase C (Figura 42), el voltaje se mantiene con una magnitud de 125.674 kV desde el segundo 0 hasta 0.2, a partir de este momento se observa que la onda presenta una deformación momentánea con una magnitud de 132.85 kV que se mantiene durante la falla, posteriormente la onda de voltaje adopta su amplitud normal.

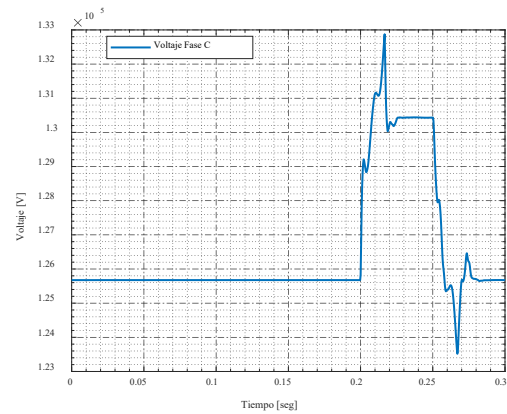


Figura 42. Falla ABG, voltaje fase C.

Por otro lado, se constata que el comportamiento de la onda de corriente de la fase A (Figura 43) se mantiene constante con una magnitud de 131.118 A, desde el segundo 0 hasta 0.2. Posterior a este intervalo de tiempo, la onda de corriente se desplaza adopta una magnitud máxima de 2128.05 A y mantiene este comportamiento durante el tiempo que dura la falla (0.25 s). Posterior a este tiempo la magnitud de la onda de corriente de la fase A vuelve a su estado normal.

Asimismo, la onda de corriente de la fase B (Figura 44) desde el segundo 0 hasta 0.2 describe un comportamiento normal con una magnitud de 131.118 A. Posterior a este intervalo de tiempo, la magnitud de la fase B presenta un valor pico importante de 2517.06 A, la cual se mantiene durante una milésima de segundo, para luego adoptar una magnitud de 1033.4 A, valor que prevalece hasta los 0.25 segundos. Luego de este tiempo, la onda de corriente recupera su valor normal de manera paulatina.

En lo que se refiere a la fase C (Figura 45), el comportamiento de la onda de corriente desde el segundo 0 hasta 0.2 se mantiene constante con una magnitud de 131.118 A. Posterior a este intervalo de tiempo, la onda de corriente se deforma adoptando una magnitud mínima de 128.6 A, este comportamiento se mantiene hasta los 0.25 segundos. Luego de este periodo, la onda de corriente regresa a su estado normal.

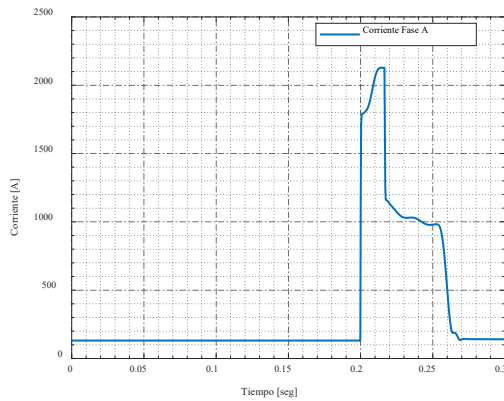


Figura 43. Falla ABG, corriente fase A.

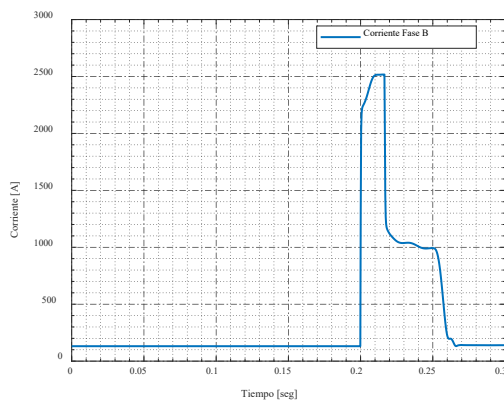


Figura 44. Falla ABG, corriente fase B.

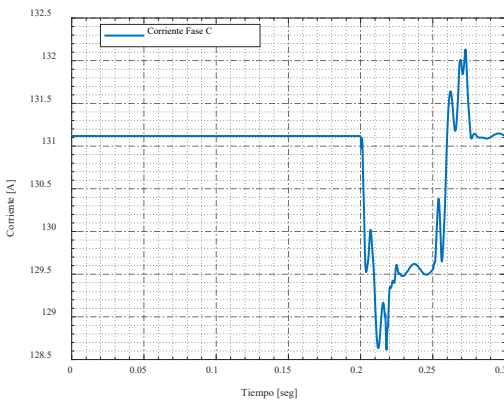


Figura 45. Falla ABG, corriente fase C.

El análisis de la Transformada S se realiza por fase, comparando la señal sin falla con la señal durante la falla. Al obtener la Transformada S de la fase A (Figura 46), se observa que la señal sin falla tiene una magnitud máxima de 3076.48, mientras que durante la falla alcanza una magnitud de 11626,94.

En el caso de la Transformada S de la fase B (Figura 47), se aprecia que la magnitud máxima asociada a la señal sin falla es de 3076.48, mientras que durante la falla aumenta significativamente a 12209,30.

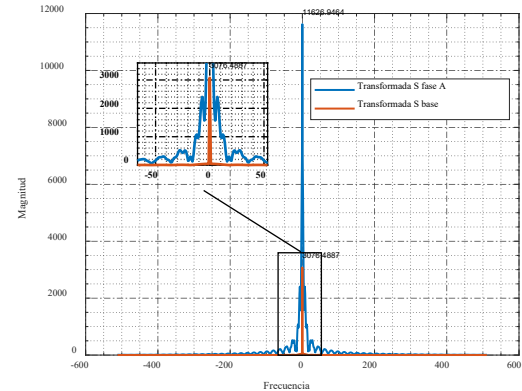


Figura 46. Falla ABG, transformada S – fase A.

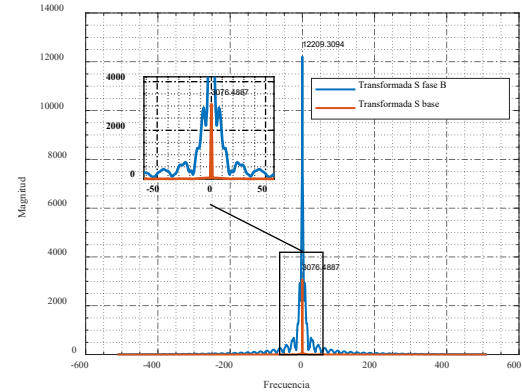


Figura 47. Falla ABG, transformada S – Fase B.

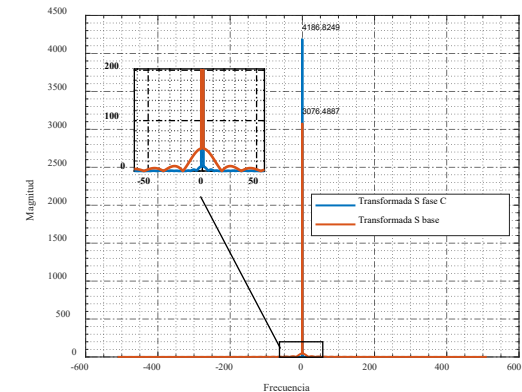


Figura 48. Falla ABG, transformada S – Fase C.

Asimismo, la Transformada S de la fase C (Figura 48) revela una magnitud de 3076.48 en ausencia de falla, y durante la falla alcanza una magnitud de 4186,82.

De este modo, se evidencia que las fases con una magnitud inusual son la fase A y B, lo que indica la presencia de una falla en dichas fases.

En relación con la respuesta del clasificador de fallas (Figura 49), se observa un gráfico individual para cada fase. Se nota que la fase A, B y N se activan a partir de los 0.2 segundos y se desactivan a los 0.25 segundos. Por lo tanto, se puede concluir que la ANN identificó exitosamente la presencia de la falla.

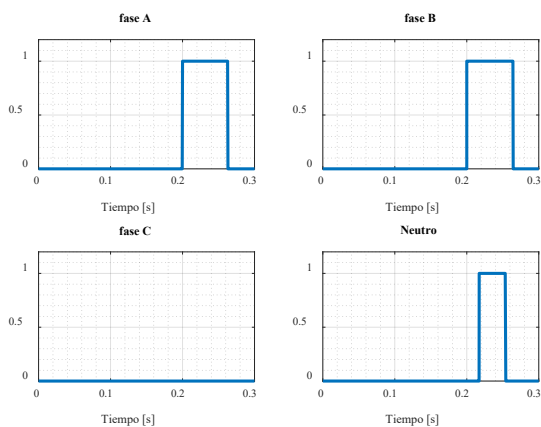


Figura 49. Falla ABG, respuesta de clasificador de fallas.

### 4.3.2 Análisis con Power Factory

Para llevar a cabo este análisis, es fundamental mencionar que el cálculo de la falla se efectuó en Power Factory. Los resultados obtenidos se introducen en el clasificador de fallas programado en MATLAB. Por tanto, se procede a analizar directamente los gráficos de la falla y la respuesta del clasificador.

La forma de onda de la tensión de la fase A (Figura 50) tiene una magnitud eficaz de 1,02 por unidad desde el segundo 0 hasta los 0,2 segundos, cuando se produce la avería. Como consecuencia de la falla, la tensión disminuye a 0,95 por unidad y después a 0 por unidad. A los 0,25 segundos, la tensión

se recupera, adoptando primero una magnitud de 0,93 por unidad hasta alcanzar su valor anterior a la falla.

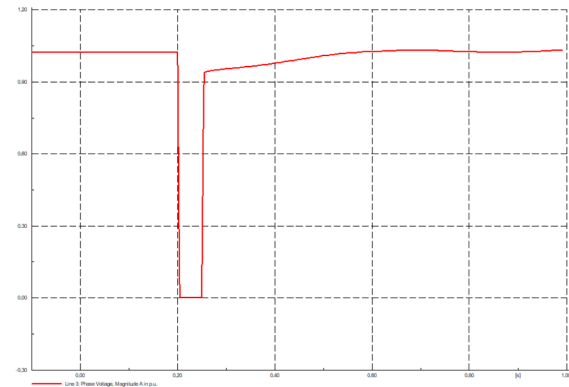


Figura 50. Falla ABG, voltaje fase A – Power Factory.

Por otro lado, la magnitud de la forma de onda de la fase B (Figura 51) se mantiene en 1,02 por unidad desde el segundo 0 hasta los 0,2 segundos. Sin embargo, cuando se produce la falla a los 0,2 segundos, la tensión cae a 0 pu y se mantiene así mientras dura la anomalía, hasta los 0,25 segundos. Transcurrido este tiempo, la forma de onda recupera la magnitud que tenía antes de producirse el fallo.

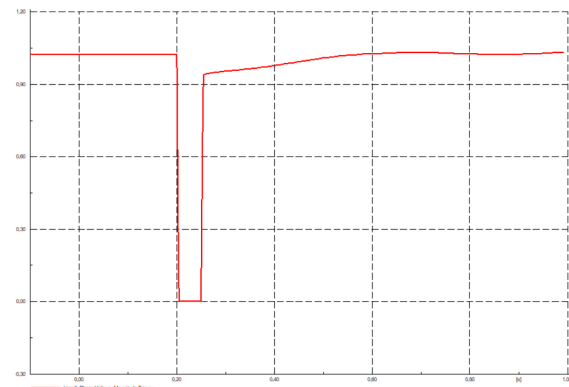


Figura 51. Falla ABG, voltaje fase B – Power Factory.

La forma de onda de la tensión de la fase C (Figura 52) tiene una magnitud eficaz de 1,02 por unidad desde el segundo 0 hasta los 0,2 segundos, cuando se produce la avería. Como consecuencia de la falla, la tensión disminuye a 0,66 por unidad y después a 0,61 por unidad. A los 0,25 segundos, la tensión se recupera, adoptando primero una

magnitud de 0,94 por unidad hasta alcanzar su valor anterior a la falla.

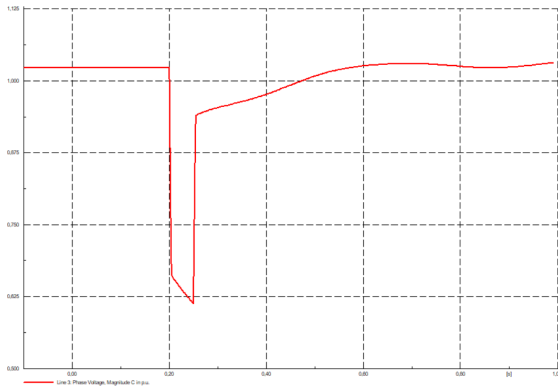


Figura 52. Falla ABG, voltaje fase C – Power Factory.

Por otro lado, se constata que el comportamiento de la onda de corriente de la fase A (Figura 53) se mantiene constante con una magnitud de 185 A, desde el segundo 0 hasta 0.2. Posterior a este intervalo de tiempo, la onda de corriente adopta una magnitud de 3.06 kA y mantiene este comportamiento durante el tiempo que dura la falla (0.25 seg). Posterior a este tiempo la magnitud de la onda de corriente de la fase A vuelve a su estado normal de manera progresiva.

onda de corriente recupera su valor normal de manera paulatina.

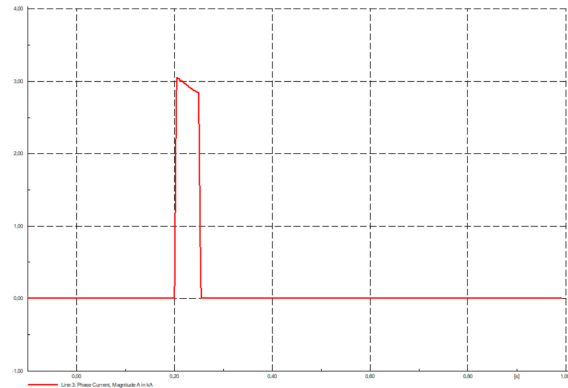


Figura 53. Falla ABG, corriente fase A – Power Factory.

Asimismo, la onda de corriente de la fase B (Figura 54) desde el segundo 0 hasta 0.2 describe un comportamiento normal. Posterior a este intervalo de tiempo, la magnitud de la fase B presenta un valor pico importante de 3.13 kA que se mantiene durante una milésima de segundo, para luego adoptar una magnitud de 2.90 kA, valor que prevalece hasta los 0.25 segundos. Luego de este tiempo, la onda de corriente recupera su valor normal de manera paulatina.

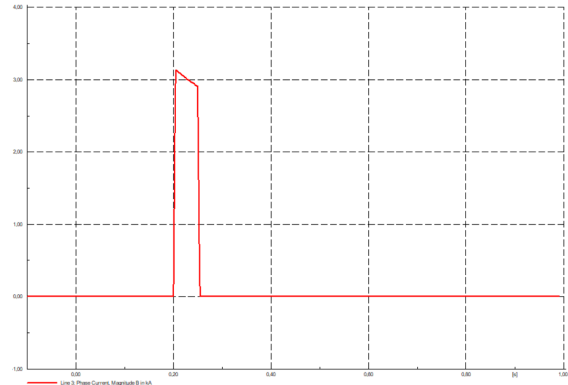


Figura 54. Falla ABG, corriente fase B – Power Factory.

En lo que se refiere a la fase C (Figura 55), el comportamiento de la onda de corriente desde el segundo 0 hasta 0.2 se mantiene constante con una magnitud de 184 A. Posterior a este intervalo de tiempo, la onda de corriente presenta un valor muy cercano a cero, valor que prevalece hasta los 0.25 segundos. Luego de este tiempo, la

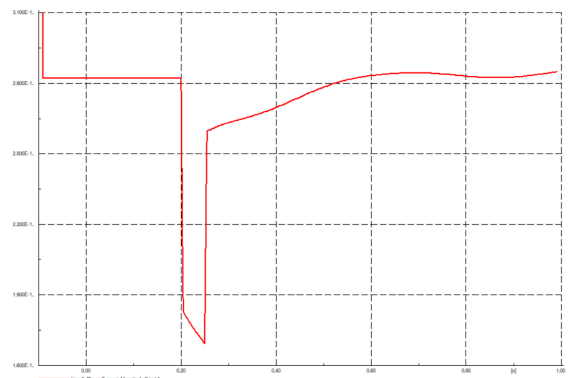


Figura 55. Falla ABG, corriente fase C – Power Factory.

Al aplicar la transformada S de corriente para cada fase (Figura 56), se comprueba que la forma de onda de la fase A posee una amplitud superior a 2000 tanto en el eje positivo y negativo de frecuencias, además, existe una deformación importante a comparación de las fases sin falla. Asimismo, la forma de onda de la fase B

presenta una deformación importante y describe una magnitud superior a los 2000. Esto se debe a que las fases A y B se involucra en la falla. Asimismo, la forma de onda de la fase C no presenta deformación y describe una amplitud de 1500, dado que esta es la fase que no se involucra en la falla.

En contraste, del análisis de la transformada S por fase se concluye que las formas de onda de las fases que se involucran en la falla se deforman a comparación de las fases sin falla.

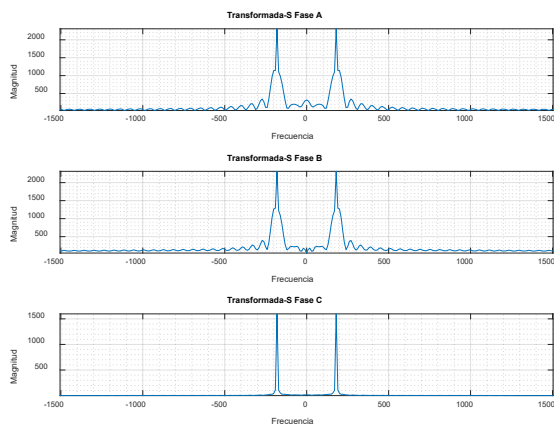


Figura 56. Falla ABG, transformada S.

En lo que respecta a la respuesta del clasificador de fallas (Figura 57), se constata que existe un gráfico por cada fase, donde se activa la fase A, B y neutro a partir del segundo 0.2, y se desactivan a los 0.25. Por consiguiente, se concluye que la ANN identificó la falla de forma exitosa.

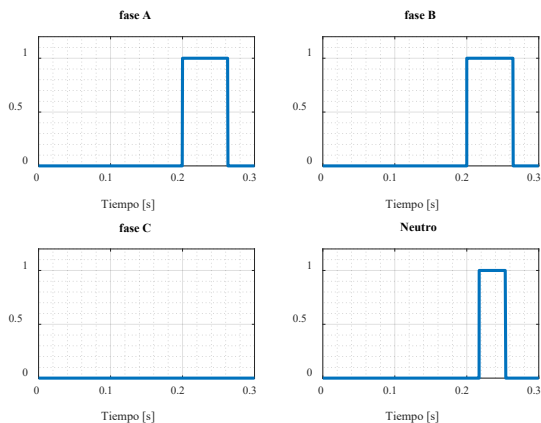


Figura 57. Falla ABG, respuesta de clasificador de fallas.

#### 4.4 Caso 4: falla ABC

El segundo escenario corresponde a una falla trifásica, donde la fase A se cortocircuita con la fase B y C. En este sentido, la falla se efectúa en el tiempo 0.2 - 0.25 segundos. Además, la resistencia de falla es de  $0.001 \Omega$ .

##### 4.4.1 Análisis con EMTP/MATLAB

Se observa que el voltaje de la fase A (Figura 58) presenta una magnitud RMS de 125.674 kV desde el instante inicial hasta que se produce la falla a los 0.2 s. Durante el evento de falla, se registra una variación en el voltaje, alcanzando una magnitud mínima de 1.482 kV. Sin embargo, una vez superada la falla, el voltaje vuelve a su valor inicial, tal como se encontraba previamente al incidente.

De manera similar, se observa que la magnitud RMS del voltaje en la fase B (Figura 59) se mantiene constante en 125.674 kV desde el inicio hasta el momento de la falla a los 0.2 s. Sin embargo, al producirse la falla, el voltaje disminuye gradualmente hasta llegar a 1.40 kV, permaneciendo en este estado durante el tiempo de duración de la falla, es decir, hasta los 0.25 s. Después de este período, la onda del voltaje vuelve a adquirir la magnitud que tenía antes de que ocurriera la falla.

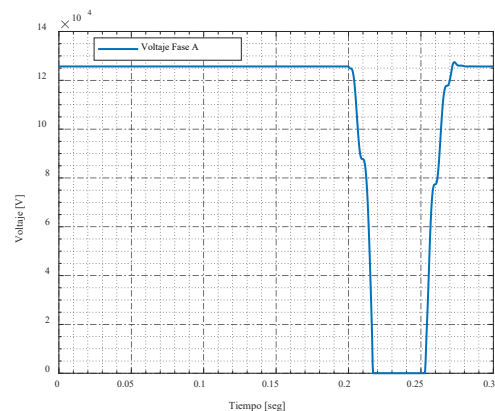


Figura 58. Falla ABC, voltaje fase A.

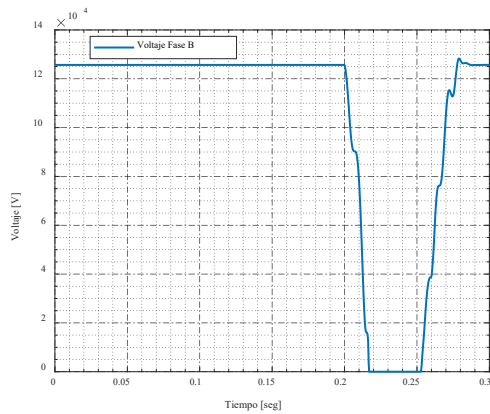


Figura 59. Falla ABC, voltaje fase B.

En cuanto a lo que se refiere a la fase C (Figura 60), el voltaje se mantiene con una magnitud de 125.674 kV desde el segundo 0 hasta 0.2, a partir de este momento se observa que la onda presenta una deformación momentánea con una magnitud de 1.08 kV que se mantiene durante la falla, posteriormente la onda de voltaje adopta su amplitud normal.

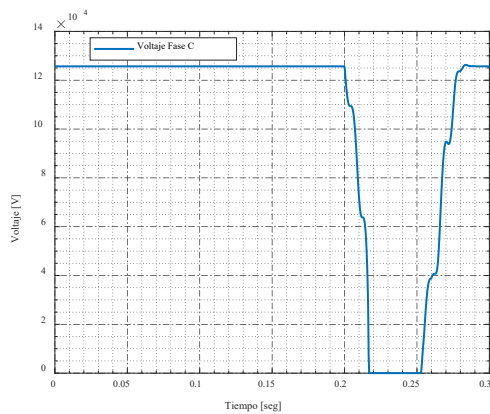


Figura 60. Falla ABC, voltaje fase C.

Por otro lado, se constata que el comportamiento de la onda de corriente de la fase A (Figura 61) se mantiene constante con una magnitud de 131.118 A, desde el segundo 0 hasta 0.2. Posterior a este intervalo de tiempo, la onda de corriente se desplaza adopta una magnitud máxima de 10669.8 A y mantiene este comportamiento durante el tiempo que dura la falla (0.25 s). Posterior a este tiempo la magnitud de la

onda de corriente de la fase A vuelve a su estado normal.

Asimismo, la onda de corriente de la fase B (Figura 62) desde el segundo 0 hasta 0.2 describe un comportamiento normal con una magnitud de 131.118 A. Posterior a este intervalo de tiempo, la magnitud de la fase B presenta un valor pico importante de 11576.2 A, la cual se mantiene durante una milésima de segundo, para luego adoptar una magnitud de 985.89 A, valor que prevalece hasta los 0.25 segundos. Luego de este tiempo, la onda de corriente recupera su valor normal de manera paulatina.

En lo que se refiere a la fase C (Figura 63), el comportamiento de la onda de corriente desde el segundo 0 hasta 0.2 se mantiene constante con una magnitud de 131.118 A. Posterior a este intervalo de tiempo, la onda de corriente se deforma adoptando una magnitud mínima de 22126.7 A, este comportamiento se mantiene hasta los 0.25 segundos. Luego de este periodo, la onda de corriente regresa a su estado normal.

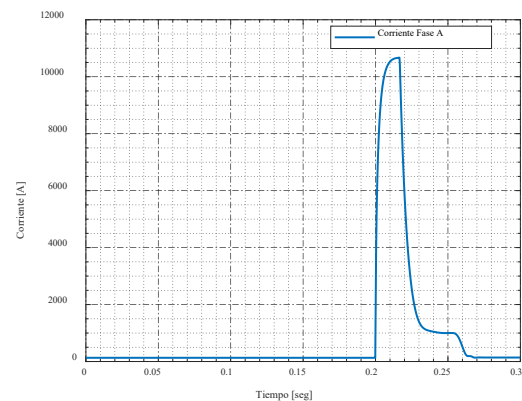


Figura 61. Falla ABC, corriente fase A.



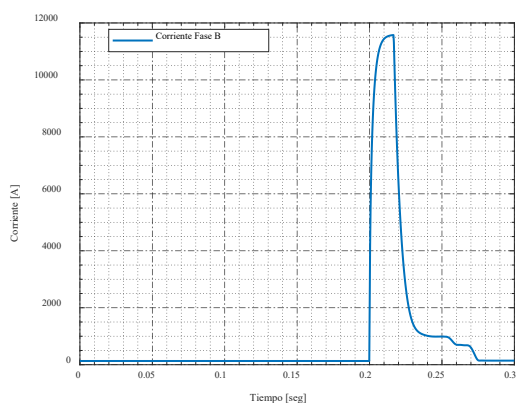


Figura 62. Falla ABC, corriente fase B.

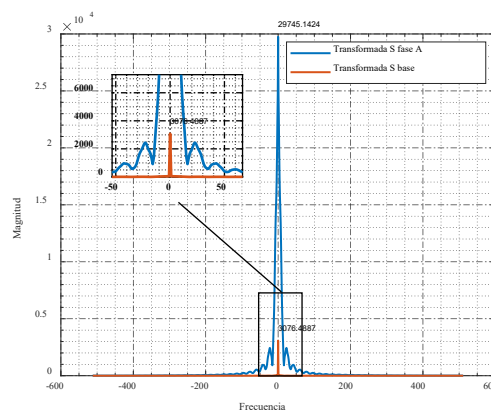


Figura 64. Falla ABC, transformada S – fase A.

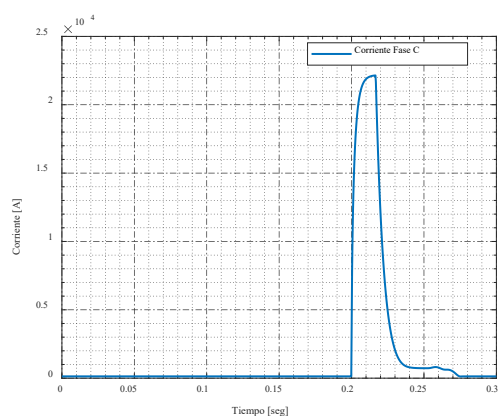


Figura 63. Falla ABC, corriente fase C.

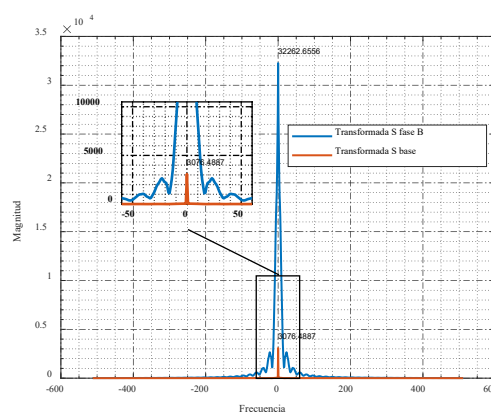


Figura 65. Falla ABC, transformada S – Fase B.

El análisis de la Transformada S se realiza por fase, comparando la señal sin falla con la señal durante la falla. Al obtener la Transformada S de la fase A (Figura 64), se observa que la señal sin falla tiene una magnitud máxima de 3076.48, mientras que durante la falla alcanza una magnitud de 29745,14.

En el caso de la Transformada S de la fase B (Figura 65), se aprecia que la magnitud máxima asociada a la señal sin falla es de 3076.48, mientras que durante la falla aumenta significativamente a 32262,65.

Asimismo, la Transformada S de la fase C (Figura 66) revela una magnitud de 3076.48 en ausencia de falla, y durante la falla alcanza una magnitud de 54160,90.

De este modo, se evidencia que todas las fases describen magnitudes muy elevadas, lo que indica la presencia de una falla en dichas fases.

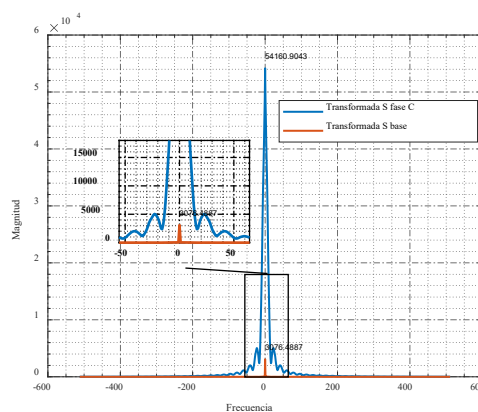


Figura 66. Falla ABC, transformada S – Fase C.

En relación con la respuesta del clasificador de fallas (Figura 67), se observa un gráfico individual para cada fase. Se nota que la fase A, B y C se activan a partir de los 0.2 segundos y se desactivan a los 0.25 segundos. Por lo tanto, se puede concluir que la ANN identificó exitosamente la presencia de la falla.

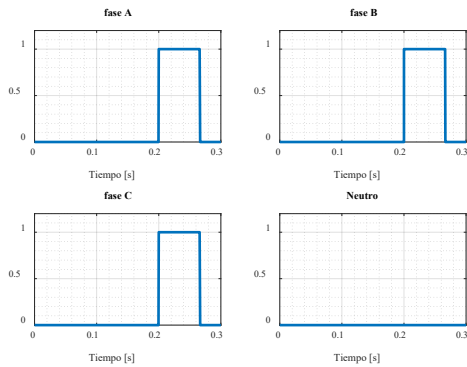


Figura 67. Falla ABC, respuesta de clasificador de fallas.

#### 4.4.2 Análisis con Power Factory

Para llevar a cabo este análisis, es fundamental mencionar que el cálculo de la falla se efectuó en Power Factory. Los resultados obtenidos se introducen en el clasificador de fallas programado en MATLAB. Por tanto, se procede a analizar directamente los gráficos de la falla y la respuesta del clasificador.

La forma de onda de la tensión de la fase A (Figura 68) tiene una magnitud eficaz de 1,02 por unidad desde el segundo 0 hasta los 0,2 segundos, cuando se produce la avería. Como consecuencia de la falla, la tensión disminuye a 0.95 por unidad y después a 0 por unidad. A los 0,25 segundos, la tensión se recupera, adoptando primero una magnitud de 0,91 por unidad hasta alcanzar su valor anterior a la falla.

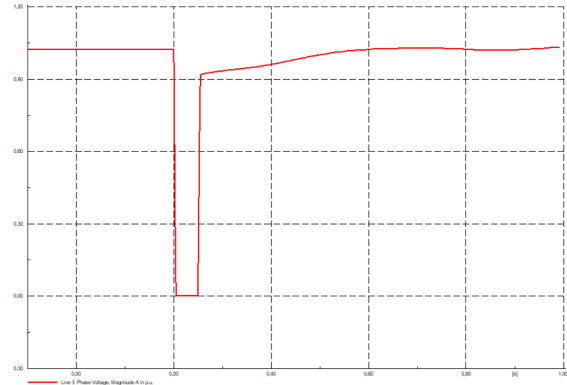


Figura 68, Falla ABC, voltaje fase A – Power Factory.

Por otro lado, la magnitud de la forma de onda de la fase B (Figura 69) se mantiene en 1,02 por unidad desde el segundo 0 hasta los 0,2 segundos. Sin embargo, cuando se produce la falla a los 0,2 segundos, la tensión cae a 0 pu y se mantiene así mientras dura la anomalía, hasta los 0,25 segundos. Transcurrido este tiempo, la forma de onda recupera la magnitud que tenía antes de producirse el fallo.

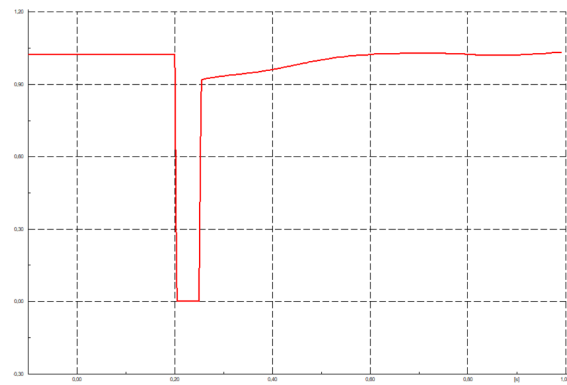


Figura 69. Falla ABC, voltaje fase B – Power Factory.

La forma de onda de la tensión de la fase C (Figura 70) tiene una magnitud eficaz de 1,02 por unidad desde el segundo 0 hasta los 0,2 segundos, cuando se produce la avería. Como consecuencia de la falla, la tensión disminuye a 0 por unidad. A los 0,25 segundos, la tensión se recupera, adoptando primero una magnitud de 0,92 por unidad hasta alcanzar su valor anterior a la falla.

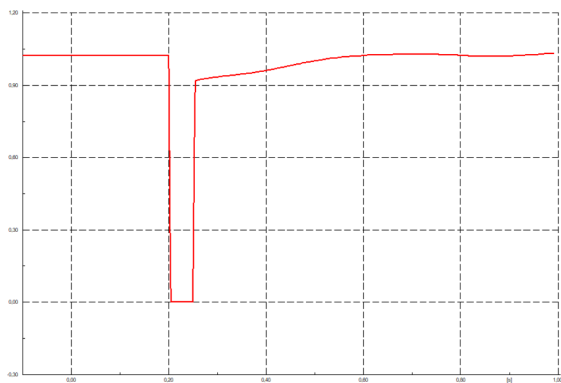


Figura 70. Falla ABC, voltaje fase C – Power Factory.

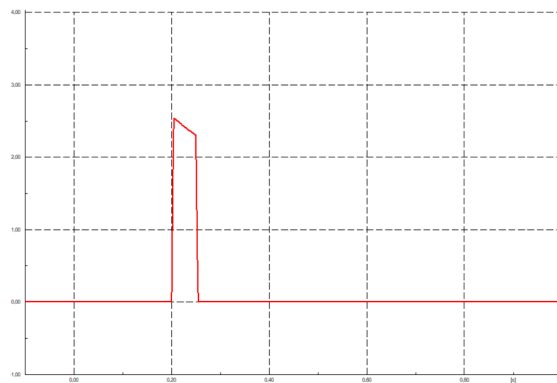


Figura 71. Falla ABC, corriente fase A – Power Factory.

Por otro lado, se constata que el comportamiento de la onda de corriente de la fase A (Figura 71) se mantiene constante con una magnitud de 185 A, desde el segundo 0 hasta 0.2. Posterior a este intervalo de tiempo, la onda de corriente adopta una magnitud de 2.54 kA y mantiene este comportamiento durante el tiempo que dura la falla (0.25 seg). Posterior a este tiempo la magnitud de la onda de corriente de la fase A vuelve a su estado normal de manera progresiva.

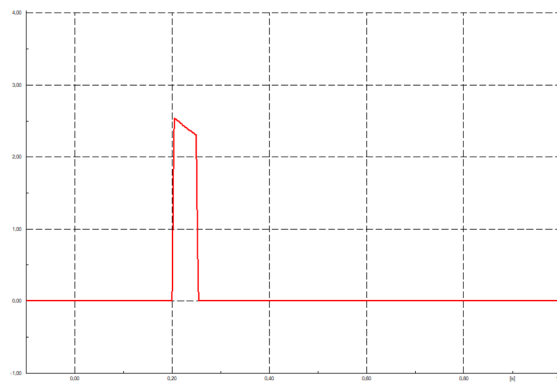


Figura 72. Falla ABC, corriente fase B – Power Factory.

Asimismo, la onda de corriente de la fase B (Figura 72) desde el segundo 0 hasta 0.2 describe un comportamiento normal. Posterior a este intervalo de tiempo, la magnitud de la fase B presenta un valor pico importante de 2.54 kA que se mantiene durante una milésima de segundo, para luego adoptar una magnitud de 2.3 kA, valor que prevalece hasta los 0.25 segundos. Luego de este tiempo, la onda de corriente recupera su valor normal de manera paulatina.

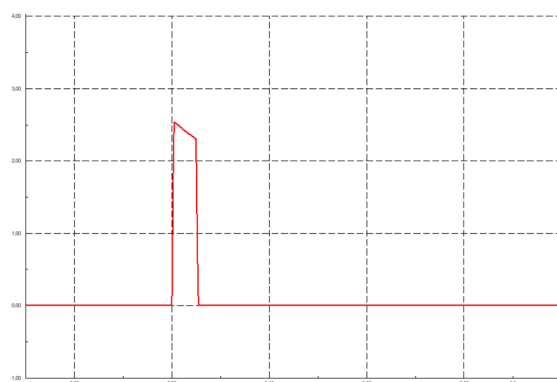


Figura 73. Falla ABC, corriente fase C – Power Factory.

En lo que se refiere a la fase C (Figura 73), el comportamiento de la onda de corriente desde el segundo 0 hasta 0.2 se mantiene constante con una magnitud de 184 A. Posterior a este intervalo de tiempo, la onda de corriente presenta un valor pico importante de 2.5 kA, valor que prevalece hasta los 0.25 segundos. Luego de este tiempo, la onda de corriente recupera su valor normal de manera paulatina.

Al aplicar la transformada S de corriente para cada fase (Figura 74), se comprueba que la forma de onda de la fase A posee una amplitud superior a 50000 tanto en el eje positivo y negativo de frecuencias, además, existe una deformación importante. Asimismo, la forma de onda de la fase B presenta una deformación importante y describe una magnitud superior a los 50000.

Del mismo modo, la forma de onda de la fase C presenta una deformación importante y describe una magnitud superior a los 90000. Esto se debe a que las fases A, B y C se involucran en la falla.

En contraste, del análisis de la transformada S por fase se concluye que las formas de onda de las fases que se involucran en la falla se deforman a comparación de las fases sin falla.

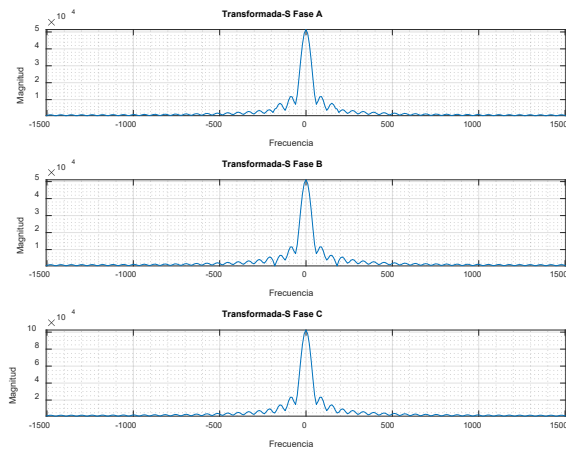


Figura 74. Falla ABC, transformada S.

En lo que respecta a la respuesta del clasificador de fallas (Figura 75), se constata que existe un gráfico por cada fase, donde se activa la fase A, B y C a partir del segundo 0.2, y se desactivan a los 0.25. Por consiguiente, se concluye que la ANN identificó la falla de forma exitosa.

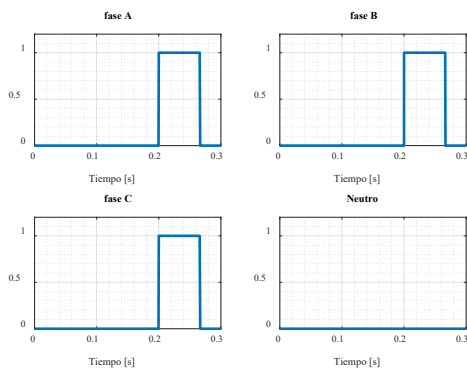


Figura 75. Falla ABC, respuesta de clasificador de fallas.

## 5 Conclusiones

El enfoque propuesto en esta investigación logra identificar y clasificar varios de tipos de falla como se demostró en el análisis de resultados sobre el sistema de prueba de 9 nodos. En este sentido, un aspecto muy importante es la etapa de obtención de datos, ya que se requiere ejecutar una gran variedad de fallos sobre el sistema de prueba para obtener las magnitudes de voltajes y corrientes en el punto de falla.

La transformada S permite realizar un análisis en el dominio de la frecuencia. Es así como, para el caso de identificación y clasificación de fallas se demostró que la transformada S permite extraer las características de la fase que presenta una anomalía. En otras palabras, cuando se calcula la transformada S, las fases con falla se deforman de manera importante a comparación de las fases sin falla.

Por otro lado, la técnica de aprendizaje no supervisado requiere predictores y respuestas de salida. De manera que, para la clasificación de fallas los predictores se refiere a los datos obtenidos de la transformada S, mientras que, las respuestas corresponden a las variables binarias que se asocia con cada tipo de falla.

Por otro lado, en la etapa de extracción de características existe un aspecto muy importante, el cual se relaciona con el tiempo de muestreo para el cálculo de la transformada S. Esto se debe a que la elección del tiempo de muestreo incorrecto dificulta el cálculo de dicha transformada.

La base de datos, que contiene las ejecuciones de estudios de cortocircuito, se puede obtener mediante varios softwares, como es el caso del Matlab y Power Factory.

Los resultados obtenidos en el sistema de prueba de 9 nodos demuestran que la efectividad de la ANN es del 97% de manera global, lo cual se obtuvo en base a la base de datos ensamblada producto de los múltiples estudios de cortocircuito y con la ayuda de la herramienta Nftool de

MATLAB. Esto implica que la mayor parte de detecciones (97%) son acertadas, mientras que, el 3% restante corresponden a detecciones y clasificaciones erróneas. Por otro lado, el porcentaje de efectividad para la validación, testeo y entrenamiento es del 97%, 98%, 97% respectivamente.

En otra perspectiva, la respuesta del clasificador de fallas es bastante precisa, ya que en la mayoría de los casos no presenta detecciones intermitentes durante de la ejecución de las simulaciones.

Según la efectividad obtenida de la técnica propuesta es posible mencionar que el índice de confiabilidad del sistema se verá mejorado, ya que se tendría un conocimiento pleno y rápido de las fallas que se susciten en el SEP.

### 5.1 Trabajos futuros

El enfoque propuesto en esta investigación clasifica de forma precisa varios tipos de falla en el sistema de transmisión. Para lo cual, se emplea la extracción de características mediante la transformada de S.

Por otro lado, se conoce que existen técnicas similares para el procesamiento de datos y extracción de características. Con este contraste, como estudio consecutivo se plantea la comparación de varias técnicas de extracción de características junto con la ANN, para cuantificar el grado de efectividad entre técnicas.

## 6 Referencias

[1] D. Akmaz, M. S. Mamiş, M. Arkan, and M. E. Tağluk, "Transmission line fault location using traveling wave frequencies and extreme learning machine," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 155, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1016/j.epsr.2017.09.019.

[2] X. Tong and H. Wen, "A novel transmission line fault detection algorithm based on pilot impedance," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 179, no. October 2019, p.

106062, 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2019.106062.

[3] B. Patel, "A new FDOST entropy based intelligent digital relaying for detection, classification and localization of faults on the hybrid transmission line," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 157, pp. 39–47, 2018, doi: 10.1016/j.epsr.2017.12.002.

[4] B. Rathore and A. G. Shaik, "Wavelet-alienation based protection scheme for multi-terminal transmission line," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 161, pp. 8–16, 2018, doi: 10.1016/j.epsr.2018.03.025.

[5] S. Das, S. P. Singh, and B. K. Panigrahi, "Transmission line fault detection and location using Wide Area Measurements," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 151, pp. 96–105, 2017, doi: 10.1016/j.epsr.2017.05.025.

[6] C. D. Prasad and P. K. Nayak, "Performance assessment of swarm-assisted mean error estimation-based fault detection technique for transmission line protection," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 71, no. July, pp. 115–128, 2018, doi: 10.1016/j.compeleceng.2018.07.030.

[7] C. D. Prasad and P. K. Nayak, "A DFT-ED based approach for detection and classification of faults in electric power transmission networks," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 10, no. 1, pp. 171–178, 2019, doi: 10.1016/j.asej.2018.02.004.

[8] A. Yadav and A. Swetapadma, "A novel transmission line relaying scheme for fault detection and classification using wavelet transform and linear discriminant analysis," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 6, no. 1, pp. 199–209, 2015, doi: 10.1016/j.asej.2014.10.005.

[9] K. Hemapala, O. Gnana, and K.

- Dharmadasa, “Techno-economic feasibility of lighting protection of overhead transmission line with multi-chamber insulator arrestors,” *Dev. Eng.*, vol. 3, no. May, pp. 100–116, 2018, doi: 10.1016/j.deveng.2018.05.003.
- [10] M. Jaya Bharata Reddy, P. Gopakumar, and D. K. Mohanta, “A novel transmission line protection using DOST and SVM,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 19, no. 2, pp. 1027–1039, 2016, doi: 10.1016/j.jestch.2015.12.011.
- [11] S. Mishra, L. Tripathy, and S. Swain, “DWT approach based differential relaying scheme for single circuit and double circuit transmission line protection including STATCOM,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 10, no. 1, pp. 93–102, 2019, doi: 10.1016/j.asej.2018.02.002.
- [12] A. Asuhaimi, M. Saini, M. Mustafa, A. Sultan, and Rahimuddin, “New algorithm for detection and fault classification on parallel transmission line using DWT and BPNN based on Clarke’s transformation,” *Neurocomputing*, vol. 168, pp. 983–993, 2015, doi: 10.1016/j.neucom.2015.05.026.
- [13] S. Agarwal, A. Swetapadma, C. Panigrahi, and A. Dasgupta, “A method for fault section identification in High voltage direct current transmission lines using one End measurements,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 172, no. March, pp. 140–151, 2019, doi: 10.1016/j.epsr.2019.03.008.
- [14] L. Tang and X. Dong, “A travelling wave differential protection scheme for half-wavelength transmission line,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 99, no. January, pp. 376–384, 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.01.018.
- [15] T. Bhati and H. Khyani, “Detection and Classification of Transmission Line Faults Using Combined Features of Stockwell Transform, Hilbert Transform, and Wigner Distribution Function,” M. Shorif Uddin, A. Sharma, K. L. Agarwal, and M. Saraswat, Eds., in *Algorithms for Intelligent Systems*. Singapore: Springer Singapore, 2021, pp. 449–467. doi: 10.1007/978-981-15-8820-4\_38.
- [16] G. Dabre, A. Dutta, and A. Kadu, “Performance evaluation of distribution network and reduction in technical & non-technical losses by using energy efficient equipment and cost benefit analysis in the power sector,” in *2014 International Conference on Power, Automation and Communication (INPAC)*, IEEE, Oct. 2014, pp. 6–11. doi: 10.1109/INPAC.2014.6981126.
- [17] N. Saxena, R. Saxena, and K. Murari, “Novel Fault Detection Scheme Using Stockwell Transform for Transmission Lines with Wind Power Penetration,” in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2021, pp. 27–38. doi: 10.1007/978-981-15-7994-3\_3.
- [18] O. Mahela, V. Sharma, B. Khan, S. Agarwal, and H. Alhelou, *Identification and classification of faults using Stockwell transform and decision rule*. Elsevier Inc., 2022. doi: 10.1016/B978-0-12-819130-9.00026-7.
- [19] S. Ola, A. Saraswat, S. Goyal, S. Jhajharia, and O. Mahela, “Detection and Analysis of Power System Faults in the Presence of Wind Power Generation Using Stockwell Transform Based Median,” in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2020, pp. 319–329. doi: 10.1007/978-981-15-

- 0214-9\_36.
- [20] S. Datta, A. Chattopadhyaya, S. Chattopadhyay, and A. Das, "S-Transform Based Kurtosis Analysis for Detection of LG and LL Faults in 14 Bus Microgrid System," *IETE J. Res.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–12, 2020, doi: 10.1080/03772063.2020.1779619.
- [21] S. Ola, A. Saraswat, S. Goyal, S. Jhahharia, and O. Mahela, "A technique using stockwell transform based median for detection of power system faults," *8th IEEE Power India Int. Conf. PIICON 2018*, pp. 1–5, 2018, doi: 10.1109/POWERI.2018.8704459.
- [22] B. Jain, N. Gupta, and A. Raj, "Numerical Simulation of Detection and Classification of Symmetrical and Unsymmetrical Faults using Improved Stockwell Transform," *Int. J. Recent Technol. Mech. Electr. Eng.*, pp. 75–80, 2022, doi: <https://doi.org/10.17762/ijrmee.v9i3.376>.
- [23] A. Kulshrestha, O. Mahela, M. Gupta, B. Khan, H. Alhelou, and P. Siano, "Hybridization of the stockwell transform and wigner distribution function to design a transmission line protection scheme," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 22, pp. 1–15, 2020, doi: 10.3390/app10227985.
- [24] T. Bhati and H. Khyani, "Detection and Classification of Transmission Line Faults Using Combined Features of Stockwell Transform, Hilbert Transform, and Wigner Distribution Function," 2021, pp. 449–467. doi: 10.1007/978-981-15-8820-4\_38.
- [25] D. Guillen *et al.*, "Fault detection and classification in transmission lines based on a PSD index," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, no. 18, pp. 4070–4078, 2018, doi: 10.1049/iet-gtd.2018.5062.
- [26] J. Han, S. Miao, Y. Li, W. Yang, and H. Yin, "Faulted-Phase classification for transmission lines using gradient similarity visualization and cross-domain adaption-based convolutional neural network," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 191, no. June 2020, p. 106876, 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106876.
- [27] N. Bon and L. Van Dai, "Fault Identification, Classification, and Location on Transmission Lines Using Combined Machine Learning Methods," *Int. J. Eng. Technol. Innov.*, vol. 12, no. 2, pp. 91–109, 2022, doi: 10.46604/IJETI.2022.7571.
- [28] M. Jamil, S. Sharma, and R. Singh, "Fault detection and classification in electrical power transmission system using artificial neural network," *Springerplus*, vol. 4, no. 1, 2015, doi: 10.1186/s40064-015-1080-x.

## 6.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 3: Matriz de estado del arte.

DETECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE FALLAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA UTILIZANDO EL MÉTODO DE LA TRANSFORMADA S																								
ITEM	DATOS			CITAS	TEMÁTICA			FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA					
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA		DETECCIÓN DE FALLAS	UBICACIÓN DE LA FALLA	CLASIFICACIÓN DE FALLAS	VOLTAJES	CORRIENTES	TRANSFORMADA DE WAVELET	TRANSFORMADA DE STOKWELL	TIPOS DE FALLAS	CANTIDAD DE DATOS DE VOLTAJES Y CORRIENTES	NÚMERO DE CAPAS DE ENTRADA	NÚMERO DE CAPAS DE SALIDA	FRECUENCIA	ANN	ÁRBOLES DE DECISIÓN	RECONOCIMIENTO DE PATRONES	SISTEMA ADAPTATIVO DIFUSO	ANÁLISIS DE SECUENCIAS	TRANSFORMADA DE CLARKE	CLASIFICACIÓN DE TIPO DE FALLA	IDENTIFICACIÓN DE LA FALLA
1	2018	Transmission line fault location using traveling wave frequencies and extreme learning machine	Akmaz, Düzgün Mamiş, Mehmet Salih Arkan, Müslüm Tağluk, Mehmet Emin	71	☒		☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒						☒	☒	
2	2020	A novel transmission line fault detection algorithm based on pilot impedance	Tong, Xiaoyang Wen, Hao	23	☒		☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒							☒	☒	
3	2018	A new FDOST entropy based intelligent digital relaying for detection, classification, and localization of faults on the hybrid transmission line	Patel, Bikash	58	☒	☒	☒	☒			☒	☒							☒			☒		
4	2018	Wavelet-alienation based protection scheme for multi-terminal transmission line	Rathore, Bhuvnesh Shaik, Abdul Gafoor		☒		☒	☒			☒		☒				☒					☒	☒	
5	2017	Transmission line fault detection and location using Wide Area Measurements	Das, Sayari Singh, Shiv P. Panigrahi, Bijaya K.	51	☒		☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒		☒						☒	☒	
6	2018	Performance assessment of swarm-assisted mean error estimation-based fault detection technique for transmission line protection	Prasad, Ch D. Nayak, Paresh Kumar	24	☒		☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒		☒						☒	☒	
7	2019	A DFT-ED based approach for detection and classification of faults in electric power transmission networks	Prasad, Ch D. Nayak, Paresh Kumar	29	☒		☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒	☒					☒	☒	



DETECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE FALLAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA UTILIZANDO EL MÉTODO DE LA TRANSFORMADA S

ITEM	DATOS		CITAS	TEMÁTICA			FORMULACIÓN DEL PROBLEMA		RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA							
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO		REFERENCIA	DETECCIÓN DE FALLAS	UBICACIÓN DE LA FALLA	CLASIFICACIÓN DE FALLAS	VOLTAJES	CORRIENTES	TRANSFORMADA DE WAVELET	TRANSFORMADA DE STOKWELL	TIPOS DE FALLAS	CANTIDAD DE DATOS DE VOLTAJES Y CORRIENTES	NÚMERO DE CAPAS DE ENTRADA	NÚMERO DE CAPAS DE SALIDA	FRECUENCIA	ANN	ÁRBOLES DE DECISIÓN	RECONOCIMIENTO DE PATRONES	SISTEMA ADAPTATIVO DIFUSO	ANÁLISIS DE SECUENCIAS	TRANSFORMADA DE CLARKE	CLASIFICACIÓN DE TIPO DE FALLA	IDENTIFICACIÓN DE LA FALLA
8	2015	A novel transmission line relaying scheme for fault detection and classification using wavelet transform and linear discriminant analysis	Yadav, Anamika Swetapadma, Aleena	71	☒	☒	☒	☒	☒	☒				☒					☒			☒	☒	
9	2018	Techno-economic feasibility of lightning protection of overhead transmission line with multi-chamber insulator arrestors	Hemapala, K. T.M.U. Gnana Swathika, O. V. Dharmadasa, K. P.R.D.S.K.	12	☒	☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒
10	2016	A novel transmission line protection using DOST and SVM	Jaya Bharata Reddy, M. Gopakumar, P. Mohanta, D. K.	33	☒	☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒		☒							☒	☒	
11	2019	DWT approach based differential relaying scheme for single circuit and double circuit transmission line protection including STATCOM	Mishra, S. K. Tripathy, L. N. Swain, S. C.	14	☒	☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒	☒						☒	☒	
12	2015	New algorithm for detection and fault classification on parallel transmission line using DWT and BPNN based on Clarke's transformation	Asuhaimi Mohd Zin, Abdullah Saini, Makmur Mustafa, Mohd Wazir Sultan, Ahmad Rizal Rahimuddin	80	☒	☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒			☒				☒		☒	☒	
13	2019	A method for fault section identification in High voltage direct current transmission lines using one End measurements	Agarwal, S. Swetapadma, A. Panigrahi, C. Dasgupta, A.	22	☒	☒	☒	☒			☒					☒				☒		☒	☒	

DETECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE FALLAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA UTILIZANDO EL MÉTODO DE LA TRANSFORMADA S

ITEM	DATOS			CITAS	TEMÁTICA			FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA						
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA		DETECCIÓN DE FALLAS	UBICACIÓN DE LA FALLA	CLASIFICACIÓN DE FALLAS	VOLTAJES	CORRIENTES	TRANSFORMADA DE WAVELET	TRANSFORMADA DE STOKWELL	TIPOS DE FALLAS	CANTIDAD DE DATOS DE VOLTAJES Y CORRIENTES	NÚMERO DE CAPAS DE ENTRADA	NÚMERO DE CAPAS DE SALIDA	FRECUENCIA	ANN	ÁRBOLES DE DECISIÓN	RECONOCIMIENTO DE PATRONES	SISTEMA ADAPTATIVO DIFUSO	ANÁLISIS DE SECUENCIAS	TRANSFORMADA DE CLARKE	CLASIFICACIÓN DE TIPO DE FALLA	IDENTIFICACIÓN DE LA FALLA
14	2018	A travelling wave differential protection scheme for half-wavelength transmission line	Tang, Lanxi Dong, Xinzhou	19	☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒					☒	☒	
15	2021	Detection and Classification of Transmission Line Faults Using Combined Features of Stockwell Transform, Hilbert Transform, and Wigner Distribution Function,	Bhati, Tanmay Khyani, Harish Kumar	0	☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒					☒	☒	
16	2021	Novel Fault Detection Scheme Using Stockwell Transform for Transmission Lines with Wind Power Penetration	Saxena, Nishant Saxena, Rachit Murari, Krishna	0	☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒						☒	☒	
17	2022	Identification and classification of faults using Stockwell transform and decision rule	Mahela, Om Prakash Sharma, Vishnu Dutt Khan, Baseem Agarwal, Sunil Alhelou, Hassan Haes	0	☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒		☒							☒	☒	
18	2020	Detection and Analysis of Power System Faults in the Presence of Wind Power Generation Using Stockwell Transform Based Median	Ola, Sheesh Ram Saraswat, Amit Goyal, Sunil Kumar Jhaharia, S. K. Mahela, Om Prakash	11	☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒	☒					☒		☒		☒	☒	
19	2022	S-Transform Based Kurtosis Analysis for Detection of LG and LL Faults in 14 Bus Microgrid System	Datta, Sagnik Chattopadhyaya, Aweek Chattopadhyay, Surajit Das, Arabinda	0	☒		☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒					☒			☒	☒	
20	2018	A technique using stockwell transform based median for detection of power system faults	Ola, Sheesh Ram Saraswat, Amit Goyal, Sunil Kumar Jhaharia, S. K. Mahela, Om Prakash	11	☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒						☒	☒	

DETECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE FALLAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA UTILIZANDO EL MÉTODO DE LA TRANSFORMADA S

DETECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE FALLAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA UTILIZANDO EL MÉTODO DE LA TRANSFORMADA S																								
ITEM	DATOS			CITAS	TEMÁTICA			FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA							
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA		DETECCIÓN DE FALLAS	UBICACIÓN DE LA FALLA	CLASIFICACIÓN DE FALLAS	VOLTAJES	CORRIENTES	TRANSFORMADA DE WAVELET	TRANSFORMADA DE STORWELL	TIPOS DE FALLAS	CANTIDAD DE DATOS DE VOLTAJES Y CORRIENTES	NÚMERO DE CAPAS DE ENTRADA	NÚMERO DE CAPAS DE SALIDA	FRECUENCIA	ANN	ÁRBOLES DE DECISIÓN	RECONOCIMIENTO DE PATRONES	SISTEMA ADAPTATIVO DIFUSO	ANÁLISIS DE SECUENCIAS	TRANSFORMADA DE CLARKE	CLASIFICACIÓN DE TIPO DE FALLA	IDENTIFICACIÓN DE LA FALLA
21	2022	Numerical Simulation of Detection and Classification of Symmetrical and Unsymmetrical Faults using Improved Stockwell Transform	Jain, Bharat Bhushan Gupta, Nandkishor Raj, Ashish Engineering, Electronics Engineering, Electronics	0	☒	☒	☒	☒			☒			☒					☒				☒	☒
22	2020	Hybridization of the stockwell transform and wigner distribution function to design a transmission line protection scheme	Kulshrestha, Atul Mahela, Om Prakash Gupta, Mukesh Kumar Khan, Baseem Alhelou, Hassan Haes Siano, Pierluigi	8	☒		☒	☒	☒		☒		☒	☒	☒	☒	☒					☒	☒	
23	2021	Detection and Classification of Transmission Line Faults Using Combined Features of Stockwell Transform, Hilbert Transform, and Wigner Distribution Function	Bhati, Tanmay Khyani, Harish Kumar	0	☒		☒	☒	☒		☒		☒	☒	☒	☒						☒	☒	
24	2018	Fault detection and classification in transmission lines based on a PSD index	Guillen, Daniel Paternina, Mario R. Arrieta Ortiz-Bejar, Jose Tripathy, Rajesh Kumar Zamora-Mendez, Alejandro Tapia-Olvera, Ruben Tellez, Eric S.	29	☒		☒	☒	☒		☒		☒	☒	☒	☒	☒					☒	☒	
25	2022	Faulted-Phase classification for transmission lines using gradient similarity visualization and cross-domain adaption-based convolutional neural network	Han, Ji Miao, Shihong Li, Yaowang Yang, Weichen Yin, Haoran	12	☒		☒	☒		☒	☒		☒	☒	☒	☒	☒					☒	☒	

DETECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE FALLAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA UTILIZANDO EL MÉTODO DE LA TRANSFORMADA S

ITEM	DATOS		REFERENCIA	CITAS	TEMÁTICA			FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA								
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO			DETECCIÓN DE FALLAS	UBICACIÓN DE LA FALLA	CLASIFICACIÓN DE FALLAS	VOLTAJES	CORRIENTES	TRANSFORMADA DE WAVELET	TRANSFORMADA DE STORWELL	TIPOS DE FALLAS	CANTIDAD DE DATOS DE VOLTAJES Y CORRIENTES	NÚMERO DE CAPAS DE ENTRADA	NÚMERO DE CAPAS DE SALIDA	FRECUENCIA	ANN	ÁRBOLES DE DECISIÓN	RECONOCIMIENTO DE PATRONES	SISTEMA ADAPTATIVO DIFUSO	ANÁLISIS DE SECUENCIAS	TRANSFORMADA DE CLARKE	CLASIFICACIÓN DE TIPO DE FALLA	IDENTIFICACIÓN DE LA FALLA	UBICACIÓN DEL LUGAR DE LA FALLA
26	2022	Fault Identification, Classification, and Location on Transmission Lines Using Combined Machine Learning Methods	Bon, Nguyen Nhan Van Dai, Le	1	☒		☒	☒	☒		☒		☒	☒	☒	☒						☒	☒		
27	2015	Fault detection and classification in electrical power transmission system using artificial neural network	Nag, Ankita Yadav, Anamika	184	☒		☒	☒	☒		☒		☒	☒		☒						☒	☒		
				CANTIDAD:	27	5	25	25	27	12	11	24	3	23	23	14	19	14	2	3	6	1	26	25	2

## 6.2 Resumen de Indicadores

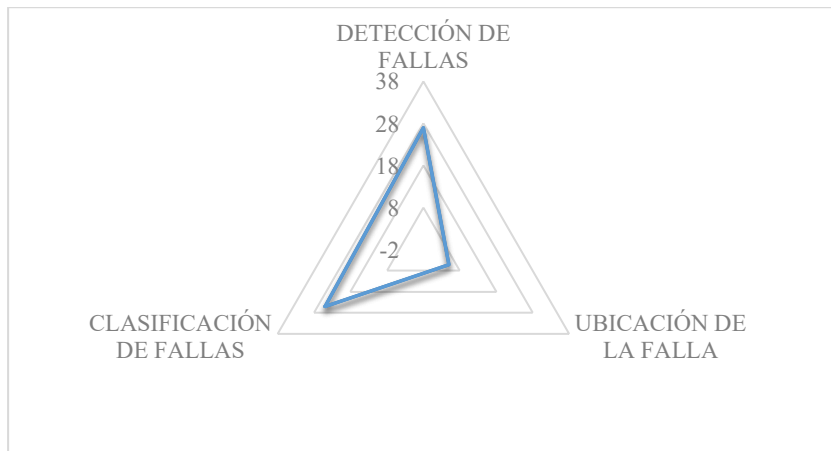


Figura 76. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

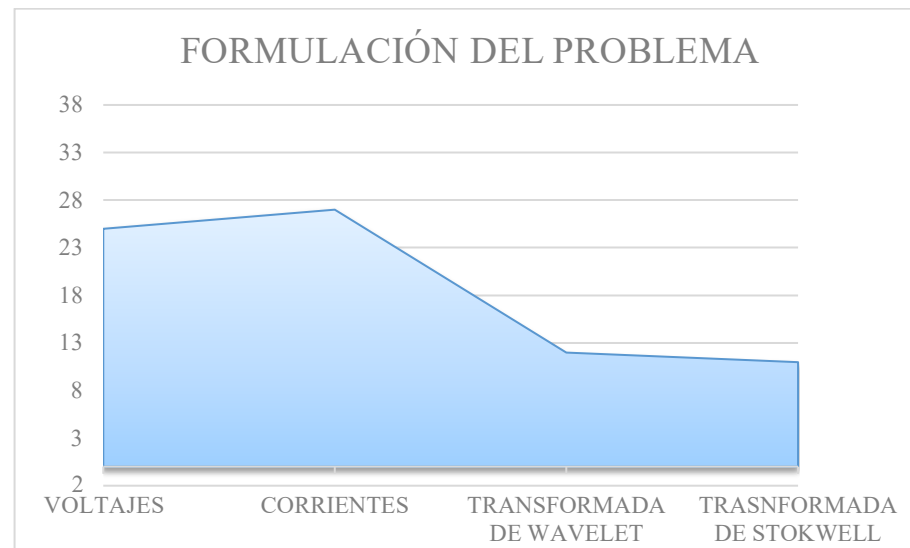


Figura 77. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

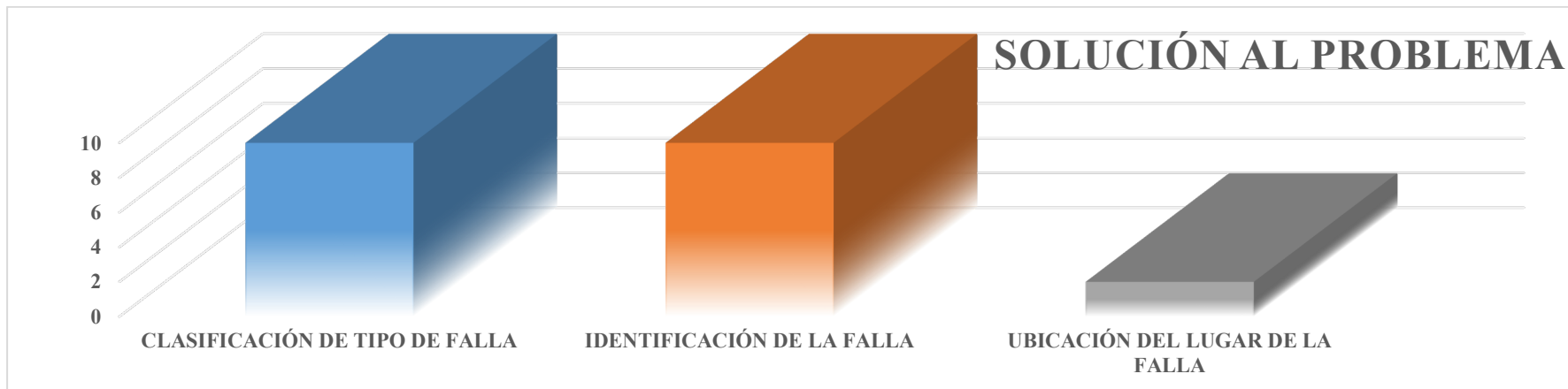


Figura 78. Indicador de solución - Estado del arte.