

**SIMULACIÓN DE CORTOCIRCUITOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA USANDO MÉTODOS TRADICIONALES Y NORMATIVAS**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
SIMULACIÓN DE CORTOCIRCUITOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA USANDO MÉTODOS TRADICIONALES Y NORMATIVAS**

**AUTOR:
ORLANDO ALEXANDER ÁLVAREZ LASTRA**

**TUTOR:
CARLOS ANDRÉS BARRERA SINGAÑA**

Quito D.M., octubre 2020

Orlando Alexander Álvarez Lastra

SIMULACIÓN DE CORTOCIRCUITOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA USANDO MÉTODOS TRADICIONALES Y NORMATIVAS

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2020

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



Orlando Alexander Álvarez Lastra (Y'1992). Realizó sus estudios de nivel primario en la Unidad Educativa “Camino del Inca”, nivel secundario en el Colegio Técnico Industrial “Miguel de Santiago” de la ciudad de Quito-Ecuador. Actualmente egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. oalvarezl1@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Carlos Andrés Barrera Singaña (Y'1989). Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional de Quito, donde se graduó de Ingeniero Eléctrico en 2013. Además, cursó estudios de posgrado en la Universidad de Zaragoza, España, donde obtuvo el título en Máster en Energías Renovables y Eficiencia Energética con Especialidad en Sistemas Eléctricos. Actualmente es profesor ocasional a tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana. cbarrera@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2020 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Carlos Andrés Barrera Singaña declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*SIMULACIÓN DE CORTOCIRCUITOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA USANDO MÉTODOS TRADICIONALES Y NORMATIVAS*” realizado por Orlando Alexander Álvarez Lastra, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito D.M., octubre de 2020



.....
Carlos Andrés Barrera Singaña


C.C.: 0503503336

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Orlando Alexander Álvarez Lastra, con documento de identificación N° 1723706857, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: “*SIMULACIÓN DE CORTOCIRCUITOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA USANDO MÉTODOS TRADICIONALES Y NORMATIVAS*”, mismo que 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 aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, D.M., octubre de 2020



.....
Orlando Alexander Álvarez Lastra

C.C.: 1723706857

1. ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Marco teórico	3
2.1	Fallas en sistemas eléctricos de potencia.....	3
2.2	Teoría de componentes simétricos	3
2.3	Fallas de conductor abierto	4
2.4	Falla de circuito abierto de dos conductores:	4
2.5	Apertura de un solo conductor:.....	4
2.6	Fallas de cortocircuito	5
2.7	Cortocircuitos balanceados	6
2.8	Cortocircuito trifásico.....	6
2.9	Cortocircuitos desbalanceados.....	6
2.10	Cortocircuito monofásico	6
2.11	Cortocircuito bifásico	6
2.12	Cortocircuito bifásico a tierra	7
2.13	Métodos de solución de cortocircuitos.....	7
2.14	Método IEC 60909.....	7
2.15	Método completo	8
2.16	Voltajes luego de la falla	8
3	Implementación en el software Matlab	10
3.1	Sistema de prueba uno.....	10
3.2	Sistema de prueba dos	10
3.3	Escenarios de simulación.....	10
3.4	Sistema de prueba uno.....	10
3.5	Sistema de prueba dos	10
4	Análisis de resultados	12
4.1	Sistema de prueba uno.....	12
4.2	Caso de estudio 1	12
4.3	Caso de estudio 2	12
4.4	Caso de estudio 3	12
4.5	Caso de estudio 4	13
4.6	Sistema de prueba dos	13
4.7	Caso de estudio 1	13
4.8	Caso de estudio 2	13

4.9	Caso de estudio 3	14
4.10	Caso de estudio 4	14
5	Conclusiones	14
5.1	Trabajos futuros	14
6	Referencias.....	15
6.1	Matriz de Estado del Arte.....	17
6.2	Resumen de Indicadores.....	20
7	Anexos	22

2. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fallas en el sistema eléctrico de potencia.....	3
Figura 2. Suma grafica de las componentes de secuencia.....	4
Figura 3. Componentes de secuencia positiva, negativa y cero	4
Figura 4. Fasores en un sistema desbalanceado.....	4
Figura 5. (a) Fallo de serie abierta de dos conductores y (b) conexión de redes de secuencia.....	5
Figura 6. (a) Fallo de serie abierta de un conductor y (b) conexión de redes de secuencia.....	5
Figura 7. Cortocircuito trifásico.....	6
Figura 8. Cortocircuito monofásico.....	6
Figura 9. Cortocircuito monofásico a tierra a través de una impedancia de falla.....	6
Figura 10. Cortocircuito bifásico	7
Figura 11. Cortocircuito bifásico a través de una impedancia de falla	7
Figura 12. Cortocircuito bifásico a tierra	7
Figura 13. Cortocircuito bifásico a tierra	7
Figura 14. Diagrama del sistema	8
Figura 15. Esquema del circuito equivalente del sistema de secuencia positiva	8
Figura 16. Diagrama de flujo de la metodología de estudio.	10
Figura 17. Sistema de 5 barras propuesto por J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma ...	11
Figura 18. Sistema de 9 barras propuesto por IEEE.....	11
Figura 19. Cortocircuito trifásico franco en la barra 4 IEC 60909.....	12
Figura 20. Cortocircuito trifásico franco en la barra 4 método completo.	12
Figura 21. Cortocircuito monofásico en la barra 3 IEC 60909.	13
Figura 22. Cortocircuito monofásico en la barra 3 método completo.	13
Figura 23. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.....	20
Figura 24. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....	20
Figura 25. Indicador de solución - Estado del arte.....	21

3. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Causas de fallas	3
Tabla 2. Factor de voltaje “c”	8
Tabla 3. Resultados caso 1.	12
Tabla 4. Resultados caso 2.	12
Tabla 5. Resultados caso 3.	12
Tabla 6. Resultados caso 4.	13
Tabla 7. Resultados caso 1 sistema de prueba dos.	13
Tabla 8. Resultados caso 2 sistema de prueba dos.	13
Tabla 9. Resultados caso 3 sistema de prueba dos.	14
Tabla 10. Resultados caso 4 sistema de prueba dos.	14
Tabla 11. Matriz de estado del arte.	17
Tabla 12. Datos de potencia y voltaje base.	22
Tabla 13. Datos de transformadores en por unidad.	22
Tabla 14. Datos de líneas en por unidad.	22
Tabla 15. Datos de las máquinas sincrónicas en por unidad.	22
Tabla 16. Datos de barras.	22
Tabla 17. Datos de transformadores.	23
Tabla 18. Datos de líneas por conductor y longitud.	23
Tabla 19. Datos de generadores y cargas.	23

SIMULACIÓN DE CORTOCIRCUITOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA USANDO MÉTODOS TRADICIONALES Y NORMATIVAS

Resumen

El cálculo de cortocircuitos es una tarea fundamental en los sistemas eléctricos de potencia, ya con esta información se puede dimensionar equipos, además de ajustar el desempeño de las protecciones eléctricas, evitar los fenómenos transitorios. Desde el punto de vista académico, los softwares no suelen ser amigables con el usuario y no entregan toda la información del proceso de cálculo. Con este antecedente, en este trabajo se desarrolla los modelos de cálculos de cortocircuito según los métodos IEC 60909 y Completo. Estas dos metodologías son implementadas en Matlab y comprobados con el software Power World a fin de obtener una codificación que permita evaluar cortocircuitos en cualquier sistema de potencia. Se emplea dos sistemas de prueba el primer sistema encontrado en la literatura para el cálculo de cortocircuitos y el segundo sistema de prueba propuesto por IEEE. Por tanto, los resultados obtenidos aseguran una respuesta adecuada y en cuanto al método de sistematización dispuesto, brinda primacías computacionales y ha inspeccionado resultados de forma rápida y representativa.

Palabras Clave: Cortocircuito, Simulación, IEC 60909, programación, Powerworld, sistema IEEE. Fenómenos transitorios.

Abstract

Short-circuit calculation is a fundamental task in electrical power systems, because with this information you can size equipment, in addition to adjusting the performance of electrical protections, avoid transient phenomena. From an academic point of view, software is not usually user-friendly and does not deliver all the information from the calculation process. With this background, this work develops the short-circuit calculation models according to IEC 60909 and Complete methods. These two methodologies are implemented in Matlab and tested with Power World software to obtain a coding that allows to evaluate short circuits in any power system. Two test systems are used the first system found in the literature for short-circuit calculation and the second test system proposed by IEEE. Therefore, the results obtained ensure an adequate response and in terms of the method of systematization provided, provides computational primacies, and has inspected results quickly and representatively.

Keywords: ShortCircuit, Simulation, IEC 60909, Programming, Powerworld, IEEE System. Transient phenomena.

1 Introducción

En el (SEP), la determinación de las corrientes en falla es un aspecto importante de considerar para la planificación y operación de estos. El cálculo de estas corrientes no deseadas hace que sea posible el dimensionamiento y diseño de ciertos equipamientos o sistemas inherentes a una subestación; por ejemplo, el sistema de puesta a tierra. Desde otro punto de vista, contar con valores de corriente de cortocircuito permite la selección y coordinación de las distintas protecciones eléctricas en los elementos del SEP [1].

En el sistema eléctrico y sus instalaciones, es posible que aparezcan distintos tipos de fallas, como lo es el cortocircuito, las cuales no están dentro del alcance del control humano [2][3]. Por lo tanto, los dispositivos que componen el sistema pueden sufrir daños temporales o graves, y si hay un mal funcionamiento, el sistema puede llegar a padecer daños permanentes [4][5][6].

Realizar estudios de cortocircuito para determinar el nivel de corriente que existe en situación de fallas, permite adquirir indagación necesaria para seleccionar discretamente la capacidad de los equipos de medición o protección del sistema acuerdo con los requisitos mínimos que deben cumplir, de modo que, si se producen fallas en el sistema eléctrico, este debe soportar el impacto de situaciones inesperadas [7].

Para establecer la corriente de cortocircuito en un SEP, existen varios métodos [8][9]. El método de ohmios, el método equivalente de kVA, el método punto a punto y el método de Z_{BARRA} son maneras utilizadas para calcular el valor de cortocircuito, pero debido a la complejidad de muchos sistemas eléctricos actuales, el uso de varios de estos no es viable, porque requieren tiempos de cálculo elevados. Por

otro lado, el método punto a punto es un método menos preciso. El método de matriz de impedancia (Z_{BARRA}) facilita datos de todas las barras, por tanto los resultados se igualan a la realidad [10][11][12]. Para establecer la dimensión de la corriente de una avería, es necesario utilizar el circuito equivalente observado desde el punto de falla como base de la representación original [13].

Para el cálculo de fallas, existen regulaciones que cumplen con los estándares internacionales. Estas especificaciones se basan en calcular corrientes de falla para ayudar a determinar los tamaños de un equipo al considerar situaciones muy adversas en la red [14][15].

El estándar actualmente válido es IEC 60909, aplicable a redes de distinta topología. El estándar se fundamenta al aplicar la proposición de Thevenin, que incluye calcular una fuente de voltaje semejante en el punto de falla y rápidamente encontrar la corriente de falla en ese punto [16]. Mientras que el estándar IEEE C37.010 propone dos técnicas de cálculo, a saber, la técnica de simplificado y el procedimiento corregido. El segundo procedimiento provee un producto más preciso basado en la aplicación de valores simétricos a interruptores de alto voltaje en base a los valores simétricos [17]. Debido a los estándares IEC y ANSI/IEEE, los métodos anteriores tienen características distintivas, especialmente al utilizarlos la diferencia entre ellos radica en el concepto de tipo de carga, modelado del sistema y diferentes procesos de cálculo al aplicar estos métodos los resultados del cálculo estándar serán diferentes [18].

Los métodos de cálculo de fallas del sistema de potencia son diferentes, lo que hace que su investigación sea un mercado competitivo y con futuro, por lo cual el presente trabajo consta de una actualización y renovación de los

diferentes trabajos de la actualidad ya que su objetivo principal es concentrarse en usar el método Z_{BARRA} ya que es el más eficiente computacionalmente para calcular fallas en el SEP. Este método analiza fallas en distintos puntos del sistema y así la corriente de cualquier punto del sistema además de otras variables como voltajes [19][20]. El contexto de este trabajo es incluir la condición previa a la falla dada por IEC y la solución de un flujo de potencia.

2 Marco teórico

2.1 Fallas en sistemas eléctricos de potencia

Una falla es cualquier suceso que obstruye el flujo uniforme de corriente, que coloca al sistema en un punto de acción fuera de lo uniforme.

El analizar fallas en el (SEP) se encuadra en un inconveniente más amplio que puede ser designado cálculo de situaciones anormales Figura 1.

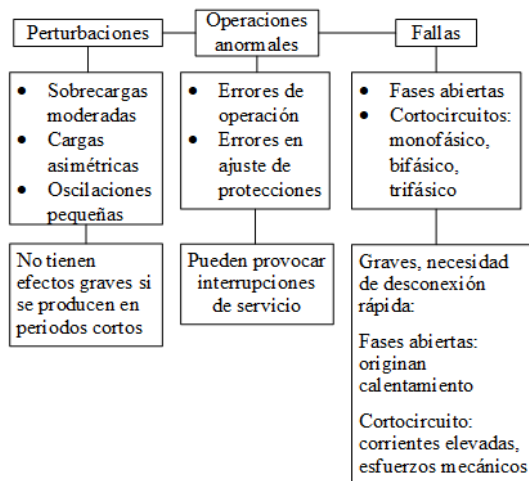


Figura 1. Fallas en el sistema eléctricos de potencia.

Los motivos para su estudio se detallan a continuación:

- Dimensionamiento de interruptores.
- Desconectores, cortacircuitos.
- Arreglo de relés de protección.
- Dispositivos o sistemas ordinarios.

- Evitar fenomenos transitorios.
- Lograr obtener estabilidad transitoria.
- Definir la capacidad de ruptura de los interruptores.
- Obtener la corriente en el punto de falla.

Las principales causas de fallas se muestran a continuación Tabla 1.

Tabla 1. Causas de fallas

Porcentaje [%]	Razón/ Motivo	Ejemplo
70 a 80	Atmosféricas	Rayos, tempestades, neblina, hielo, nieve, salinidad, etc.
7 a 15	Mecánicas	Roturas de conductores, aisladores, golpes, caídas.
8 a 10	Eléctricas	Aislantes envejecidos, errores humanos.

Las fallas del SEP pueden ser de dos tipos, de conductor abierto y de cortocircuito, siendo este último tipo de falla aquel que puede ocurrir con mayor frecuencia, además de provocar los efectos más negativos en la red eléctrica.

2.2 Teoría de componentes simétricos

La aparición de una falla en el SEP crea un desequilibrio en el sistema, que puede estudiarse al utilizar la teoría de los componentes simétricos (Figura 2) [15].

Esta teoría fue formulada por C. Fortescue en 1918, donde se propone que un sistema desbalanceado de n fases puede ser representado por n sistemas balanceados. Los n sistemas balanceados son los componentes simétricos del sistema no balanceado original Figura 3.

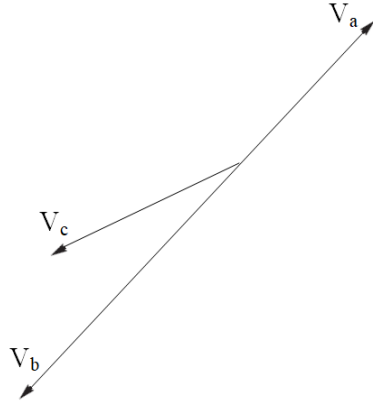


Figura 2. Suma grafica de las componentes de secuencia

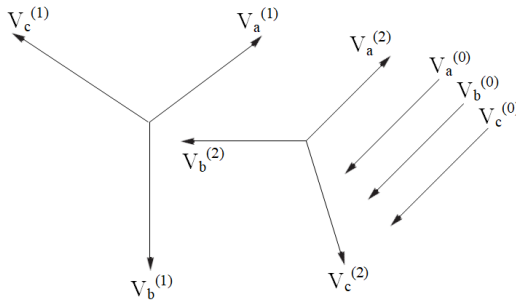


Figura 3. Componentes de secuencia positiva, negativa y cero

Cumpléndose que:

$$\begin{aligned} V_a &= V_a^{(0)} + V_a^{(1)} + V_a^{(2)} \\ V_b &= V_b^{(0)} + V_b^{(1)} + V_b^{(2)} \\ V_c &= V_c^{(0)} + V_c^{(1)} + V_c^{(2)} \end{aligned} \quad (1)$$

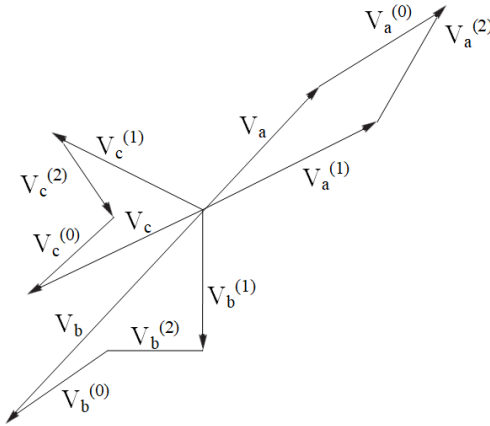


Figura 4. Fasores en un sistema desbalanceado.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.3 Fallas de conductor abierto

Estas fallas están en serie con la línea y se llaman también fallas en serie [9]. Uno o dos conductores pueden desconectarse debido a daños mecánicos u operación del fusible en una falla asimétrica [10].

2.4 Falla de circuito abierto de dos conductores:

Para la falla de dos conductores, se considera que los conductores de las fases b y c están abiertos. La corriente en estos conductores es cero.

$$I_b = I_c = 0 \quad (4)$$

En el punto de ruptura en la Figura 5, el voltaje a través de la línea de fase ininterrumpida es cero, se cumple que:

$$V_a^{(0)} = V_a^{(1)} + V_a^{(2)} + V_a^{(0)} = 0 \quad (5)$$

$$I_a^{(1)} = I_a^{(2)} = I_a^{(0)} = \frac{1}{3} I_a \quad (6)$$

Esto muestra que las redes de secuencia se deben conectar en serie, Figura 5.

2.5 Apertura de un solo conductor:

Ahora, se considera que la fase a del conductor se ha desconectado como se muestra en la Figura 6.

$$I_a = V_b^{(0)} - V_c^{(0)} = 0 \quad (7)$$

Así cumpliéndose que:

$$V_a^{(1)} = V_a^{(2)} = V_a^{(0)} = \frac{1}{3} V_a^{(0)} \quad (8)$$

$$I_a^{(1)} + I_a^{(2)} + I_a^{(0)} = 0 \quad (9)$$

Esto muestra que las redes de secuencia están conectadas en paralelo, Figura 6.

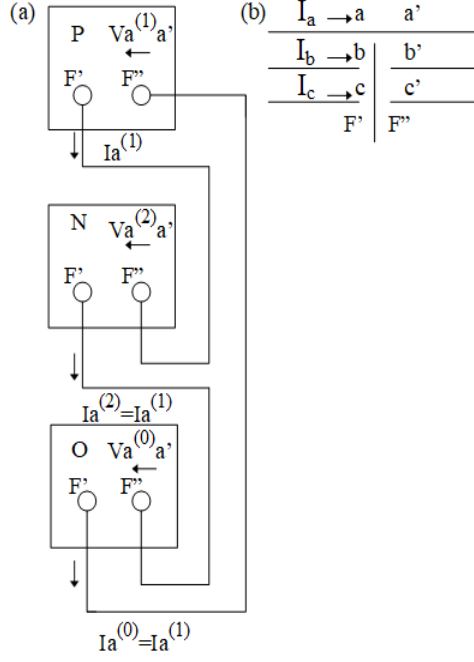


Figura 5. (a) Fallo de serie abierta de dos conductores y (b) conexión de redes de secuencia.

Al observar que una o dos fases de la línea trifásica están desconectadas, se produce un desequilibrio en el sistema y provoca el flujo de corriente desequilibrado. Si una tormenta hace que uno o dos conductores de línea de transmisión se desconecten o un fusible, y un aislador o disyuntor solo funciona en una o dos fases está ocurriendo una falla de conductor abierto [11]. Estas fallas también se pueden analizar con el método de Z_{BARRA} .

2.6 Fallas de cortocircuito

En el SEP, se produce un cortocircuito si dos o más puntos a diferente potencial eléctrico en condiciones normales de funcionamiento pasan accidentalmente a juntarse [13]. Los efectos negativos de los cortocircuitos están relacionados con la alta corriente que circula en el SEP, que

puede superar en varios órdenes de magnitud a la corriente nominal de funcionamiento [14]. Para calcular corrientes de cortocircuito es posible emplear el método de impedancia de barra [21].

$$Z_{BARRA} = Y_{BARRA}^{(-1)} \quad (10)$$

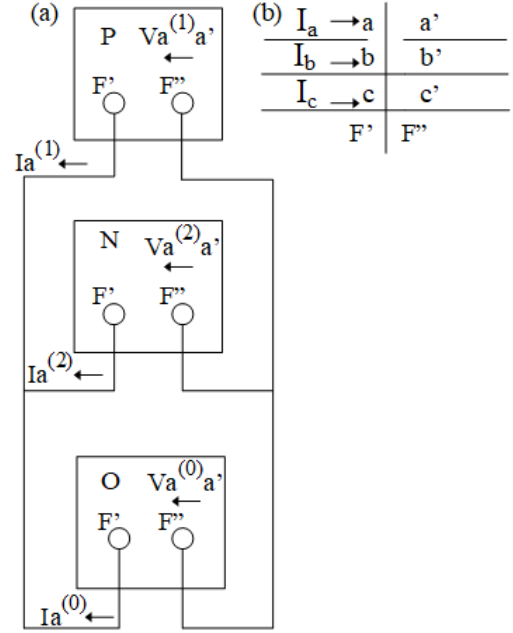


Figura 6. (a) Fallo de serie abierta de un conductor y (b) conexión de redes de secuencia.

La expresión anterior se aplica a cada secuencia del sistema de componentes simétricos.

$$\begin{aligned} Z_{BARRA}^{(1)} &= \left(Y_{BARRA}^{(1)} \right)^{(-1)} \\ Z_{BARRA}^{(2)} &= \left(Y_{BARRA}^{(2)} \right)^{(-1)} \\ Z_{BARRA}^{(0)} &= \left(Y_{BARRA}^{(0)} \right)^{(-1)} \end{aligned} \quad (11)$$

Desde el punto de vista el voltaje, generalmente para la barra k que falla; el voltaje durante la falla es:

$$V_k^{(0)} = -Z_k^{(0)} I_f^{(0)} \quad (12)$$

$$V_k^{(1)} = V_f - Z_k^{(1)} I_f^{(1)} \quad (13)$$

$$V_k^{(2)} = -Z_k^{(2)} I_f^{(2)} \quad (14)$$

Mientras que en una barra no fallada j :

$$V_j^{(0)} = -Z_j^{(0)} I_f^{(0)} \quad (15)$$

$$V_j^{(1)} = V_f - Z_j^{(1)} I_f^{(1)} \quad (16)$$

$$V_j^{(2)} = -Z_j^{(2)} I_f^{(2)} \quad (17)$$

2.7 Cortocircuitos balanceados

Los cortocircuitos balanceados son aquellos que dejan al SEP en una condición de equilibrio tanto en voltajes como en corrientes; y, en este exclusivo caso no es necesario emplear componentes simétricos para su análisis. El cortocircuito trifásico es aquel que se encuentra dentro de esta categoría.

2.8 Cortocircuito trifásico

El cortocircuito trifásico (Figura 7) es el único cortocircuito que se comporta de forma equilibrada porque todas las fases se ven afectadas de la misma manera. El voltaje en el punto de cortocircuito (ya sea cerrado o aislado de tierra) es cero, lo que indica que la corriente tiene el mismo módulo, pero los parámetros difieren en 120° . El cortocircuito trifásico es considerado el más grave y puede calcularse como un sistema equilibrado, solo necesitándose de la red de secuencia positiva para su cálculo [18].

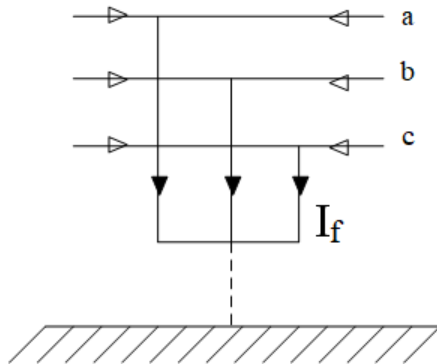


Figura 7. Cortocircuito trifásico.

2.9 Cortocircuitos desbalanceados

Los cortocircuitos desbalanceados dejan al SEP en una condición donde sus voltajes y

corrientes no tienen la misma magnitud y tampoco están desfasados 120° . Dentro de esta categoría se encuentran los cortocircuitos monofásicos, bifásicos y bifásicos a tierra.

2.10 Cortocircuito monofásico

Este es el cortocircuito más frecuente en el SEP [20]. Ya sea para una corriente grande o una conexión a tierra, su cálculo es muy importante, ya que hace posible calcular la corriente que se dirige a tierra. Para ser calculado se requieren de las redes de sucesión positiva, negativa y cero [13].

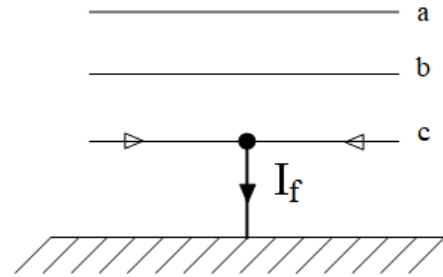


Figura 8. Cortocircuito monofásico

$$I_f^{(1)} = I_f^{(2)} = I_f^{(0)} = \frac{V_f}{Z^{(1)} + Z^{(2)} + Z^{(0)} + 3Z_f} \quad (18)$$

$$I_f = 3I_f^{(0)} \quad (19)$$

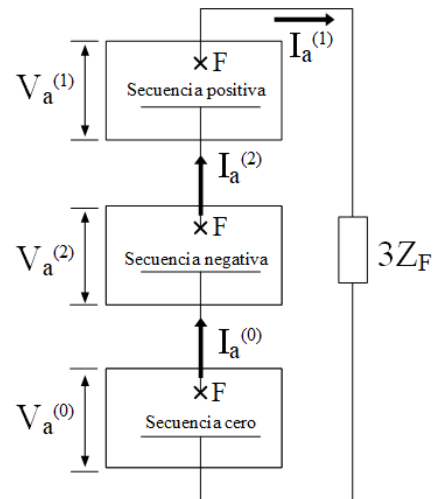


Figura 9. Cortocircuito monofásico a tierra a través de una impedancia de falla

2.11 Cortocircuito bifásico

En general, la corriente de falla simétrica

inicial es menor que la corriente de falla trifásica, aunque si el cortocircuito ocurre cerca de un motor síncronico o asíncronico con cierta potencia, la corriente de falla puede incluso alcanzar corrientes más altas que el valor de un cortocircuito trifásico [21]. Para ser calculado es necesario utilizar redes de sucesión positiva y negativa. El circuito se representa en la Figura 10 y la Figura 11 [18].

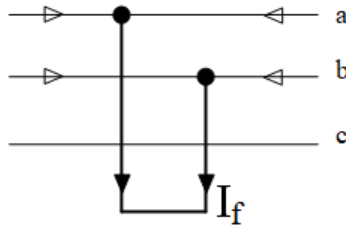


Figura 10. Cortocircuito bifásico

$$I_f^{(1)} = -I_f^{(2)} = \frac{V_f}{Z^{(1)} + Z^{(2)} + Z_f} \quad (20)$$

$$I_f^{(0)} = 0 \quad (21)$$

$$I_a = I_b = -I_c \quad (22)$$

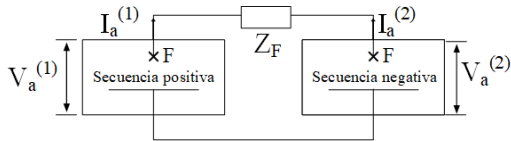


Figura 11. Cortocircuito bifásico a través de una impedancia de falla

2.12 Cortocircuito bifásico a tierra

Tiene las mismas particularidades que un cortocircuito de dos fases sin conexión a tierra, pero este caso, la corriente sí se dirige a tierra a través de una conexión física [13][20]. Para este tipo de falla, además de considerar la red de sucesión positiva y negativa y la red de sucesión cero debido a la presencia de tierra. La representación de este cortocircuito se puede apreciar en la Figura 12 y la Figura 13 [18].

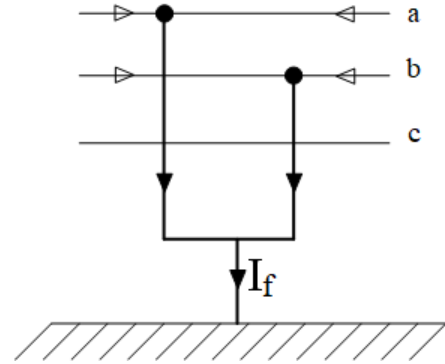


Figura 12. Cortocircuito bifásico a tierra

$$I_f^{(1)} = \frac{V_f}{Z^{(1)} + \left(\frac{Z^{(2)} \cdot (Z^{(0)} + 3Z_f)}{Z^{(2)} + Z^{(0)} + 3Z_f} \right)} \quad (23)$$

$$I_f^{(2)} = -I_f^{(1)} \frac{Z^{(0)} + 3Z_f}{Z^{(2)} + Z^{(0)} + 3Z_f} \quad (24)$$

$$I_f^{(0)} = -I_f^{(1)} \frac{Z^{(2)}}{Z^{(2)} + Z^{(0)} + 3Z_f} \quad (25)$$

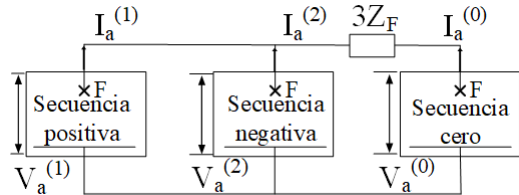


Figura 13. Cortocircuito bifásico a tierra

2.13 Métodos de solución de cortocircuitos

Existen diversos métodos de cálculo de corrientes de cortocircuito que se basan en la utilización de la matriz Z_{BARRA} , el cual es de característica robusta. De acuerdo con lo expuesto anteriormente, la matriz de impedancia de barra puede ser empleada tanto en el método según IEC y el método completo.

2.14 Método IEC 60909

Para el cálculo de cortocircuitos se puede utilizar el método propuesto por la norma internacional IEC 60909, en el cual primero se debe encontrar una fuente de voltaje semejante en el punto de avería.

El método manejado para el cálculo se basa en la inserción de una fuente de voltaje semejante en el punto de falla. La fuente de voltaje equivalente es el único voltaje activo en el sistema. Toda la red de suministro de energía, los motores sincrónicos y asíncrónicos se reemplazan por su resistencia interna. En todos los casos, la corriente de falla se puede determinar por medio de una fuente de voltaje equivalente, mientras que no se considera corriente de carga anterior a la falla, es decir el sistema trabaja en vacío [25]. La Figura 14, modela un ejemplo de fuente de tensión semejante en el punto de falla F, que es la única tensión efectiva en el sistema suministrado por el alterador del cambiador de tomas bajo carga o sin carga. De esta manera, la red de suministro de energía de la Figura 14, está representada por su impedancia interna (Z_{ot}), que se transfiere al lado de bajo voltaje del transformador, y se denomina lado de bajo voltaje. Al calcular la corriente de cortocircuito de acuerdo con la Figura 15, no se considera la admitancia paralela (como la capacidad de línea y la carga pasiva).

La norma IEC 60909 añade la consideración de un factor “c”, el cual multiplica a un voltaje prefalla de 1 p.u., el cual depende del nivel de voltaje de la red y se indica en la Tabla 2.

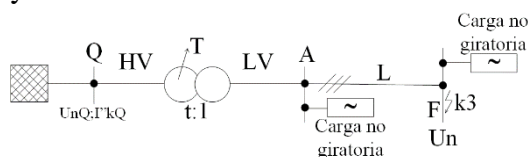


Figura 14. Diagrama del sistema

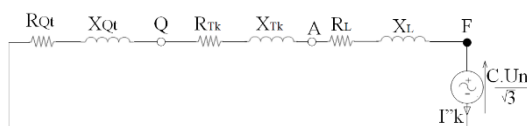


Figura 15. Esquema del circuito equivalente del sistema de secuencia positiva

2.15 Método completo

Para sistemas grandes, el cálculo manual es inviable y requiere de una computadora digital. El procedimiento que seguir no es calcular la corriente en el punto de falla, sino distribuirla a todo el sistema; esto implica calcular directamente el voltaje en diferentes nodos con la ayuda del modelo de impedancia de nodo. Si se conoce el voltaje durante la falla, se puede calcular la corriente de cada rama [26]. Debido a la velocidad de los cálculos digitales, la matriz de impedancia puede, por ejemplo, incluir admitancias paralelas, como las admitancias relacionadas con la carga. Este método toma en cuenta que el sistema está cargado y por lo tanto el voltaje anterior a la ocurrencia del cortocircuito proviene de la solución de flujos de potencia.

Tabla 2. Factor de voltaje “c”

Voltaje nominal U_n	Factor de voltaje para el cálculo de	
	corrientes de cortocircuito máximas C_{max} (1)	corrientes de cortocircuito mínimas C_{min}
Bajo voltaje 100 V a 1000 V (tabla 1 de la norma CEI 60038)	1.05 (3) 1.05 (4)	0.95
Medio voltaje > 1 kV a 35 kV (tabla 3 de la norma CEI 60038)	1.10	1.00
Alto voltaje (2) > 35 kV (tabla 4 de la norma CEI 60038)		

(1) $C_{max}U_n$ no debería exceder el voltaje más elevado para el material U_m de los sistemas de potencia.
(2) Si no está definido el voltaje nominal se debería aplicar: $C_{max}U_n=U_m$ $C_{min}U_n=0,9xU_m$
(3) Para sistemas de bajo voltaje con tolerancia de +6%, por ejemplo, sistemas renombrados de 380V a 400V.
(4) Para sistemas de bajo voltaje con una tolerancia de +10%

2.16 Voltajes luego de la falla

El voltaje posterior a la falla se puede obtener como la superposición de la

condición previa a la falla (generalmente obtenida del cálculo del flujo de potencia) y la condición durante la falla, es decir:

$$\left[V_b^{(f)} \right] = \left[V_b^{(0)} \right] + \left[V_b^{(cc)} \right] \quad (26)$$

Donde:

$\left[V_b^{(f)} \right]$: Vector de voltajes post – falla

$\left[V_b^{(0)} \right]$: Vector de voltajes prefalla

$\left[V_b^{(cc)} \right]$: Vector de voltajes debido solo a la falla

$$\left[V_b^{(f)} \right] = \left[V_{lf} \cdots V_{pf} \cdots V_{qf} \cdots V_{nf} \right]^{(t)} \quad (27)$$

$$\left[V_b^{(0)} \right] = \left[V_{l0} \cdots V_{p0} \cdots V_{q0} \cdots V_{n0} \right]^{(t)} \quad (28)$$

$$\left[V_b^{(cc)} \right] = \left[V_{lcc} \cdots V_{pcc} \cdots V_{qcc} \cdots V_{ncc} \right]^{(t)} \quad (29)$$

Al aplicar el método de resolución nodal a la red del SEP, después de falla se tiene:

$$\left[I^{(f)} \right] = \left[Y_b \right] \cdot V_b^{(cc)} \rightarrow V^{(cc)} = Z_b \cdot \left[I^{(f)} \right] \quad (30)$$

Donde $\left[I^{(f)} \right]$ es el vector de corriente (de falla) inyectado en diferentes barras, $\left[Z_b \right]$ es la matriz de impedancia de barra correspondiente al recíproco de la matriz de admitancia de barra $\left[Y_b \right]$; definida como:

$$\left[I^{(f)} \right] = \left[I_{1f} \cdots I_{2f} \cdots I_{3f} \cdots I_{nf} \right]^{(t)} \quad (31)$$

$$\left[Z_b \right] = \begin{bmatrix} Z_{11\dots} & Z_{12\dots} & Z_{13\dots} & Z_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{21\dots} & Z_{22\dots} & Z_{23\dots} & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{31\dots} & Z_{32\dots} & Z_{33\dots} & Z_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{41\dots} & Z_{42\dots} & Z_{43\dots} & Z_{4n} \end{bmatrix} \quad (32)$$

De hecho, no se inyecta corriente en ninguna barra, pero solo se extrae corriente de la barra fallida (por ejemplo, barra p); por lo tanto, solo uno de los elementos del vector de corriente inyectada es diferente de cero y vale I_f .

Sí se tiene en cuenta (27), (26), al introducir en las ecuaciones (28), (26) y (32) en (26), se obtiene:

$$\begin{aligned} V_f^{(1)} &= V - Z \cdot I_f \\ V_f^{(2)} &= V - Z \cdot I_f \\ V_f^{(0)} &= V - Z \cdot I_f \\ V_f^{(n)} &= V - Z^{(n)} \cdot I_f \end{aligned} \quad (33)$$

Si hay una impedancia de falla Z_f entre la barra de falla y la tierra, entonces:

$$V_f = Z_f \cdot I_f \quad (34)$$

Se realiza la sustitución (34) en la ecuación p de (33), y finalmente:

$$I_f = \frac{V^{(0)}}{Z_f + Z} \quad (35)$$

Esta expresión permite el cálculo de la corriente en la barra defectuosa. Del mismo modo, el voltaje en esta barra es:

$$V_f = \left(1 - \frac{Z}{Z_f + Z} \right) V^{(0)} \quad (36)$$

Del mismo modo, el voltaje se puede obtener en cualquier otra barra, y la corriente de falla se puede obtener en cualquier línea conectada entre las barras p y q con impedancia Z [21].

$$V_f = V^{(0)} - \frac{Z}{Z_f + Z} V^{(0)} \quad (37)$$

$$I_f = \frac{V_f^{(2)} - V_f^{(1)}}{Z} \quad (38)$$

3 Implementación en el software Matlab

En este artículo, el software de Matlab se usa para resolver el problema de simulación. Para los métodos propuestos en este trabajo, IEC y Completo se desarrolla en base a algoritmos que pueden implementarse, en cualquier caso.

De acuerdo con los métodos descritos a continuación en la Figura 16 se indica la metodología de simulación de cortocircuitos sean estos balanceados o desbalanceados en el SEP.

3.1 Sistema de prueba uno

Primer modelo de prueba, se maneja el diagrama de 5 barras que se muestra en la Figura 17. La tabla 12, tabla 13, tabla 14 y la tabla 15, proveen los datos de las máquinas, líneas y transformadores utilizados en el estudio del caso.

3.2 Sistema de prueba dos

Segundo modelo de prueba, se maneja el diagrama de 9 barras (IEEE) que se muestra en la Figura 18. La tabla 16, tabla 17, tabla 18 y la tabla 19, proveen los datos de las máquinas, líneas y transformadores utilizados en el sistema.

3.3 Escenarios de simulación

Se plantea la ocurrencia de los siguientes cortocircuitos a fin de emplear el código realizado en Matlab para los sistemas de prueba previamente expuestos.

3.4 Sistema de prueba uno

- Caso 1: Cortocircuito trifásico franco en la barra 4. Solución con IEC 60909 máximas corrientes.
- Caso 2: Cortocircuito monofásico franco en la barra 5. Solución con IEC 60909 máximas corrientes.
- Caso 3: Cortocircuito trifásico franco en la barra 4. Solución con Método completo.

- Caso 4: Cortocircuito monofásico franco en la barra 5. Solución con Método completo.

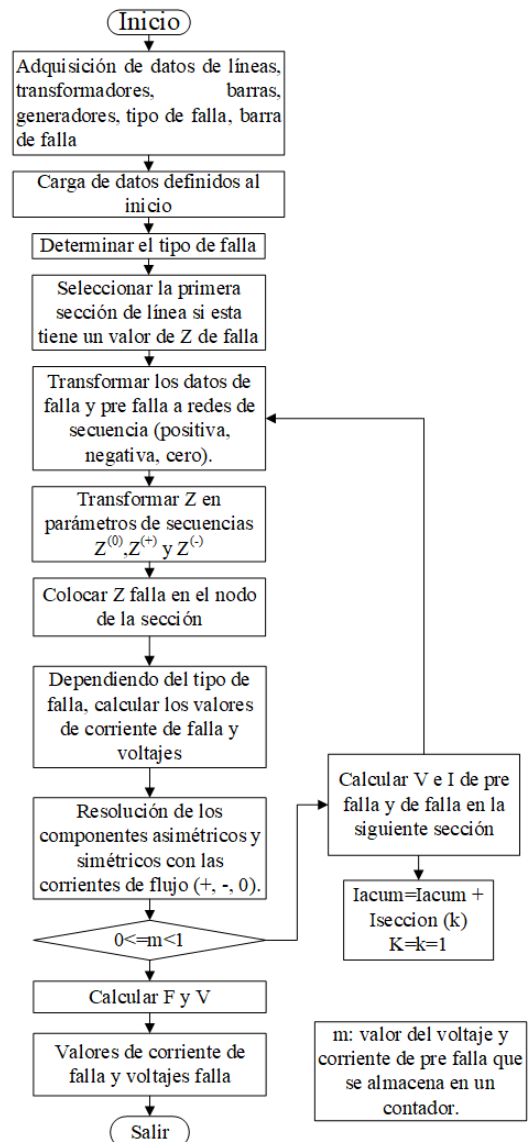


Figura 16. Diagrama de flujo de la metodología de estudio.

3.5 Sistema de prueba dos

- Caso 1: Cortocircuito monofásico en la barra 3. Solución con IEC 60909 máximas corrientes.
- Caso 2: Cortocircuito trifásico en la barra 5. Solución con IEC 60909 máximas corrientes.

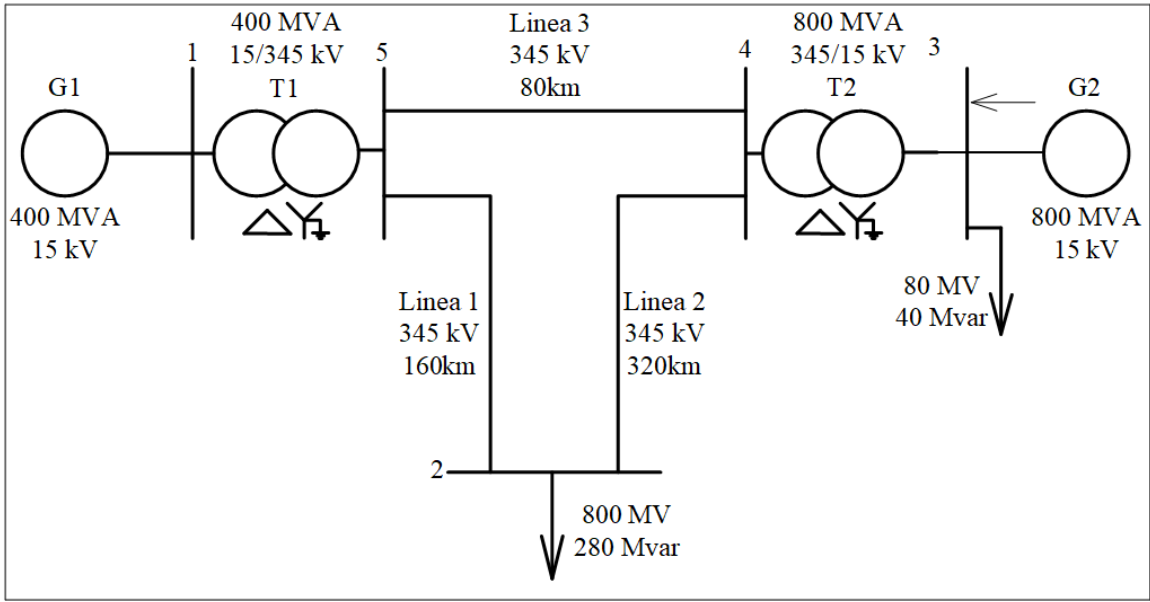


Figura 17. Sistema de 5 barras propuesto por J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma

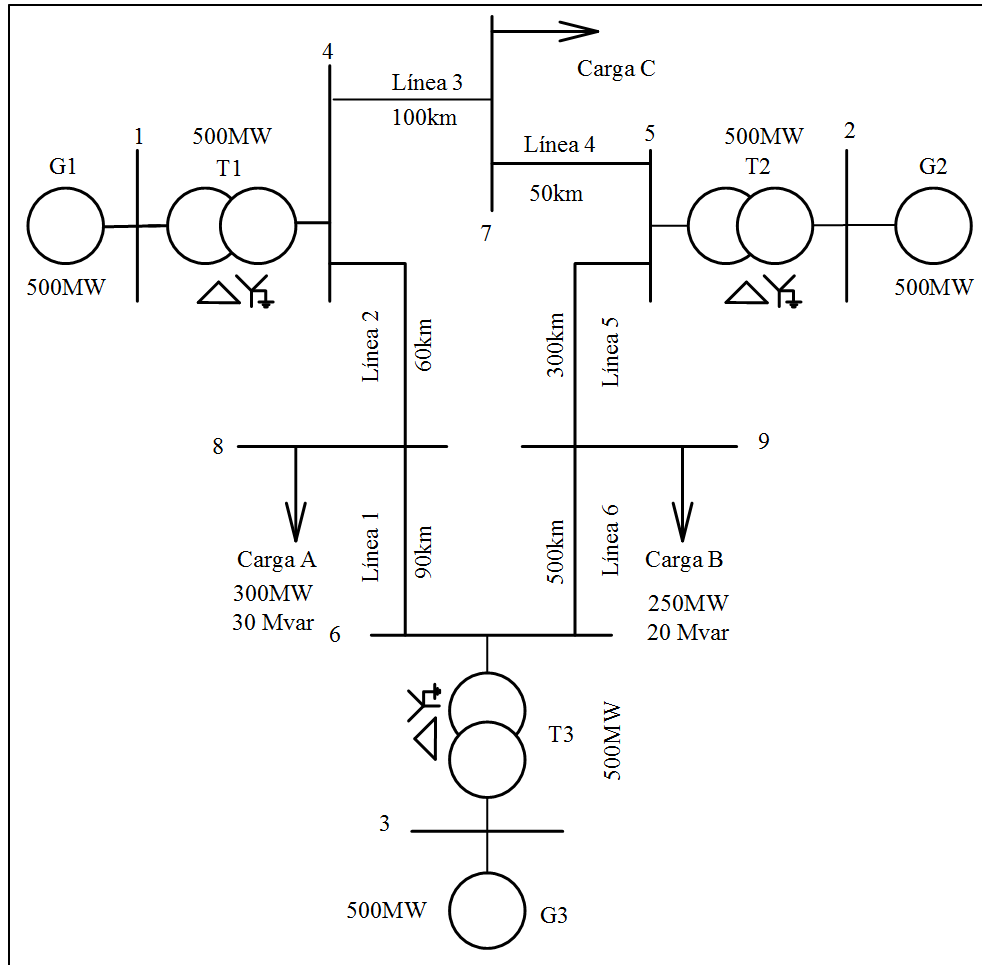


Figura 18. Sistema de 9 barras propuesto por IEEE

- Caso 3: Cortocircuito monofásico en la barra 3. Solución con Método completo.
- Caso 4: Cortocircuito trifásico en la barra 5. Solución con Método completo.

4 Análisis de resultados

4.1 Sistema de prueba uno

Como consecuencia del estudio en el modelo matemático propuesto, el sistema de prueba, se establece el valor de corrientes y los voltajes sobre los casos de estudios anteriormente expuestos. A manera ilustrativa; a continuación, en la Figura 19 y la Figura 20, se indica gráficamente los resultados del caso de estudio 1, donde se aprecian las magnitudes de los voltajes en las barras. Los resultados obtenidos del método IEC 60909 y el método completo, determinan que el margen de error entre los métodos propuestos es de un 0.3%. El error que se menciona anteriormente se debe a la cantidad de decimales que se utiliza para el cálculo en el simulador propuesto.

4.2 Caso de estudio 1

La corriente de falla es 42.57. p.u. (7.125 kA), mientras que los voltajes se revelan en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados caso 1.

Barra	V [p.u.]	Ang [°]
1	0.46	0.00
2	0.107	0.00
3	0.307	0.00
4	0.00	0.00
5	0.232	0.00

4.3 Caso de estudio 2

La corriente de falla es 0.00 p.u. (0.0 kA), mientras que los voltajes se revelan en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados caso 2.

Barra	V [p.u.]	Ang [°]
1	1.00	0.00
2	0.00	-180.0
3	1.00	0.00
4	0.00	-180.0
5	0.00	-180.0

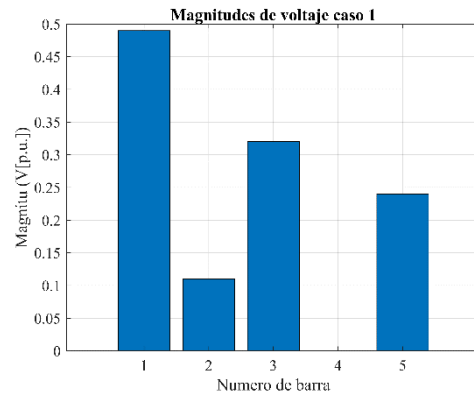


Figura 19. Cortocircuito trifásico franco en la barra 4 IEC 60909.

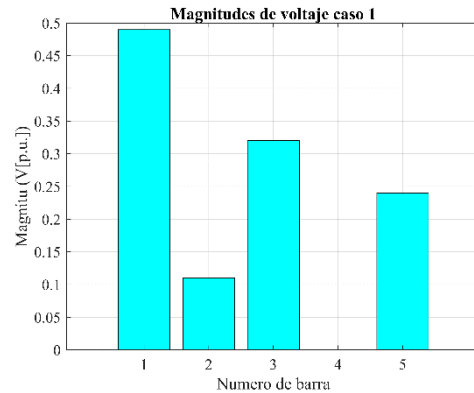


Figura 20. Cortocircuito trifásico franco en la barra 4 método completo.

4.4 Caso de estudio 3

La corriente de falla es 44.70 p.u. (7.481 kA), mientras que los voltajes se revelan en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados caso 3.

Barra	Va [p.u.]	Vb [p.u.]	Vc [p.u.]
1	0.49∠-0°	0.49∠-120°	0.49∠120°
2	0.11∠-0°	0.11∠-120°	0.11∠120°
3	0.32∠-0°	0.32∠-120°	0.32∠120°
4	0.00∠0°	0.00∠-120°	0.00∠120°
5	0.24∠-0°	0.24∠-120°	0.24∠120°

4.5 Caso de estudio 4

La corriente de falla es 0.0 p.u. (0.0 kA), mientras que los voltajes se revelan en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados caso 4.

Barra	Va [p.u.]	Vb [p.u.]	Vc [p.u.]
1	1.05∠0°	1.05∠-120°	1.05∠120°
2	0.00∠36°	1.81∠-150°	1.81∠150°
3	1.05∠0°	1.05∠-120°	1.05∠120°
4	0.00∠53°	1.81∠-150°	1.81∠150°
5	0.00∠-0°	1.81∠-150°	1.81∠150°

Las corrientes y los voltajes tienden a cambiar sus valores de forma poco predecible. Por lo tanto, los casos propuestos tienen como fin analizar características que se estudian de forma teórica, es por tal razón que su análisis es alto y la respuesta es rápida.

4.6 Sistema de prueba dos

En consecuencia, del estudio en el modelo matemático propuesto en el sistema de prueba, se establece el valor de corrientes y los voltajes sobre los casos de estudios anteriormente expuestos. A manera ilustrativa; a continuación, en la Figura 21 y la Figura 22, se indica gráficamente los resultados del caso de estudio 1, donde se aprecian las magnitudes de los voltajes en las barras.

Los resultados obtenidos del método IEC 60909 y el método completo, determinan que el margen de error entre los métodos propuestos es del 0.3%. El error que se menciona anteriormente se debe a la cantidad de decimales que se utiliza para el cálculo en el simulador.

4.7 Caso de estudio 1

La corriente de falla es 7.455 p.u. (1.871 kA), mientras que los voltajes se revelan en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados caso 1 sistema de prueba dos.

Barra	V [p.u.]	Ang [°]
1	0.628	-0.86
2	0.631	-1.48
3	0.000	-0.34
4	0.614	-0.91
5	0.617	-1.57
6	0.607	0.90
7	0.616	-1.35
8	0.611	-0.19
9	0.613	-0.65

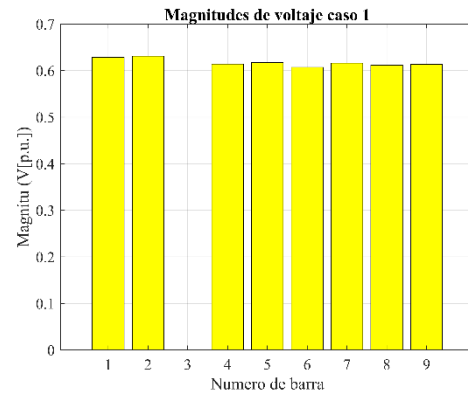


Figura 21. Cortocircuito monofásico en la barra 3 IEC 60909.

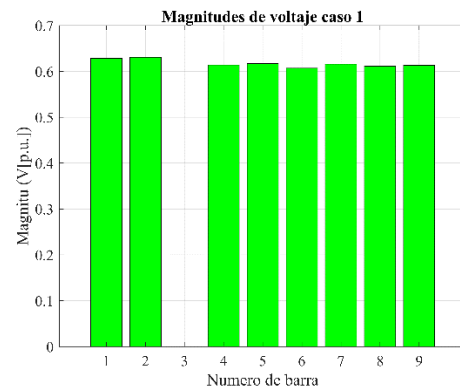


Figura 22. Cortocircuito monofásico en la barra 3 método completo.

4.8 Caso de estudio 2

La corriente de falla es 7.552 p.u. (1.895 kA), mientras que los voltajes se revelan en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados caso 2 sistema de prueba dos.

Barra	V [p.u.]	Ang [°]
1	0.071	-40.99

Barra	V [p.u.]	Ang [°]
2	0.035	-0.00
3	0.088	-46.42
4	0.052	-68.85
5	0.000	-179.3
6	0.071	-68.57
7	0.017	-68.57
8	0.060	-68.72
9	0.026	-68.94

4.9 Caso de estudio 3

La corriente de falla es 7.455 p.u. (1.871 kA), mientras que los voltajes se revelan en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados caso 3 sistema de prueba dos.

Barra	Va [p.u.]	Vb [p.u.]	Vc [p.u.]
1	0.84∠15°	1.02∠-104°	0.02∠135°
2	0.83∠43°	1.49∠-76°	0.49∠163°
3	0.00∠63°	1.28∠-56°	0.29∠-176°
4	0.85∠60°	1.0∠59.3°	0.00∠-60°
5	0.85∠23°	1.45∠-97°	0.45∠142°
6	0.82∠26°	1.19∠-93°	0.19∠146°
7	0.85∠21°	1.41∠-98°	0.42∠141°
8	0.84∠25°	1.07∠-94°	0.07∠145°
9	0.84∠19°	1.32∠-100°	0.32∠139°

4.10 Caso de estudio 4

La corriente de falla es 7.552 p.u. (1.895 kA), mientras que los voltajes se revelan en la Tabla 10.

Tabla 10. Resultados caso 4 sistema de prueba dos.

Barra	Va [p.u.]	Vb [p.u.]	Vc [p.u.]
1	0.07∠16°	0.07∠-103°	0.07∠136°
2	0.02∠52°	0.02∠-67°	0.02∠172°
3	0.07∠45°	0.07∠-74°	0.07∠165°
4	0.05∠16°	0.05∠-103°	0.05∠136°
5	0.00∠23°	0.00∠-96°	0.00∠143°
6	0.05∠20°	0.05∠-99°	0.05∠140°
7	0.01∠21°	0.01∠-98°	0.01∠141°
8	0.05∠17°	0.05∠-102°	0.05∠137°
9	.02∠.69°	0.02∠-119°	0.02∠120°

Las corrientes y los voltajes tienden a cambiar sus valores de forma poco predecible. Por lo tanto, los casos propuestos tienen como fin analizar características que se estudian de forma

teórica, es por tal razón que su análisis es alto y la respuesta es rápida.

5 Conclusiones

Se afinado dos metodologías de cálculo para cortocircuito en sistemas de potencia, los cuales son empleados en planificación y operación del sistema, siendo el primer método regido por la norma según IEC 60909 y el método Completo respectivamente para el cálculo de fallas.

Las aplicaciones computacionales permiten a los profesionales de la ingeniería reducir tiempos de cálculo y de cierta manera eliminar errores que pueden aparecer en un cálculo manual de diversos tópicos de sistemas eléctricos de potencia.

La aplicación desarrollada en Matlab permite obtener resultados detallados de cortocircuitos, tanto la corriente de falla como los voltajes en las barras del SEP. Esto puede constituirse en una herramienta didáctica para estudiar este tipo de fallas que son propias de un sistema eléctrico, independientemente de su nivel de voltaje.

El trabajo cumple satisfactoriamente el objetivo planteado el cual es obtener el cálculo de las corrientes de falla en sistemas eléctricos de potencia, de dos maneras diferentes con IEC 60909 y el método completo lo cual deja brinda una ventana a futuras generaciones para hacer diferentes cambios y apoyo a estudiante de la cátedra de falla en el SEP.

5.1 Trabajos futuros

En base a los corolarios obtenidos en el actual documento estos consiguen ser la base para futuras investigaciones relacionadas con:

- Implementación de energías renovables como generación eólica y fotovoltaica para el cálculo de cortocircuitos.

- Implementación de elementos basado en la electrónica de potencia para cálculo de cortocircuitos.

6 Referencias

- [1] N. K. Gouvalas, I. F. Gonos, and I. A. Stathopoulos, "Impact study of short-circuit calculation methods on the design of a wind farm's grounding system," *Renew. Energy*, vol. 66, pp. 25–32, 2014, doi: 10.1016/j.renene.2013.11.059.
- [2] J. Talaq, "Fault calculations using three terminal Thevenin's equivalent circuit," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 33, no. 8, pp. 1462–1469, 2011, doi: 10.1016/j.ijepes.2011.06.027.
- [3] M. B. Djurić, Z. M. Radojević, and V. V. Terzija, "Digital signal processing algorithm for arcing faults detection and fault distance calculation on transmission lines," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 19, no. 3, pp. 165–170, 1997, doi: 10.1016/s0142-0615(96)00034-8.
- [4] Z. M. Radojević, V. V. Terzija, and M. B. Djurić, "Spectral domain arcing fault recognition and fault distance calculation in transmission systems," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 37, no. 2, pp. 105–113, 1996, doi: 10.1016/0378-7796(96)01044-9.
- [5] E. Power, E. Engineering, and E. Engineering, .. "J: fl," vol. 10, pp. 69–75, 1985.
- [6] S. K. Banerjee and B. R. Reddi, "Reliability Calculations for Electrical Transmission Systems on the Basis of Mean Failure Indices," *IEEE Trans. Reliab.*, vol. R-32, no. 4, pp. 346–349, 1983, doi: 10.1109/TR.1983.5221679.
- [7] J. Li, Q. Yang, W. Sima, C. Sun, T. Yuan, and M. Zahn, "A new estimation model of the lightning shielding performance of transmission lines using a fractal approach," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 18, no. 5, pp. 1712–1723, 2011, doi: 10.1109/TDEI.2011.6032843.
- [8] C. Yao *et al.*, "A novel method to locate a fault of transmission lines by shielding failure," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 21, no. 4, pp. 1573–1583, 2014, doi: 10.1109/TDEI.2014.004321.
- [9] T. Masuda *et al.*, "Safety and Reliability of 66-kV Class HTS Cable Systems in Short-Circuit Current Accidents-Experimental Results on 40-m Cable System," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 27, no. 4, pp. 1–4, 2017, doi: 10.1109/TASC.2017.2656625.
- [10] L. Thurner *et al.*, "Pandapower - An Open-Source Python Tool for Convenient Modeling, Analysis, and Optimization of Electric Power Systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 6, pp. 6510–6521, 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2018.2829021.
- [11] S. Kopylov, N. Balashov, S. Ivanov, A. Veselovsky, and V. Zhemerikin, "Use of superconducting devices operating together to ensure the dynamic stability of electric power system," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, no. 3 PART 2, pp. 2135–2139, 2011, doi: 10.1109/TASC.2010.2100092.
- [12] U. A. Bordalo, A. B. Rodrigues, and M. G. DaSilva, "A new methodology for probabilistic short-circuit evaluation with applications in power quality analysis," *IEEE Trans. Power*

- Syst.*, vol. 21, no. 2, pp. 474–479, 2006, doi: 10.1109/TPWRS.2006.873055.
- [13] M. Barzegaran, A. Mazloomzadeh, and O. A. Mohammed, “Fault diagnosis of the asynchronous machines through magnetic signature analysis using finite-element method and neural networks,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 28, no. 4, pp. 1064–1071, 2013, doi: 10.1109/TEC.2013.2281325.
- [14] S. Das, P. Purkait, C. Koley, and S. Chakravorti, “Performance of a load-immune classifier for robust identification of minor faults in induction motor stator winding,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 21, no. 1, pp. 33–44, 2014, doi: 10.1109/TDEI.2013.003549.
- [15] S. Bifaretti, P. Zanchetta, A. Watson, L. Tarisciotti, and J. C. Clare, “Advanced power electronic conversion and control system for universal and flexible power management,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 2, no. 2, pp. 231–243, 2011, doi: 10.1109/TSG.2011.2115260.
- [16] M. S. El Moursi and R. Hegazy, “Novel technique for reducing the high fault currents and enhancing the security of ADWEA power system,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 1, pp. 140–148, 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2207746.
- [17] D. Elliott *et al.*, “A Comparison of AC and HVDC Options for the Connection of Offshore Wind Generation in Great Britain,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 31, no. 2, pp. 798–809, 2016, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2453233.
- [18] R. M. Palomino, “Estudio Comparativo de las Normas IEC y ANSI para Cálculo de Corto Circuito ’ México , D . F .,” 2007.
- [19] C. International and E. Commission, “Rapport Technique Technical Report,” pp. 656–659, 1996, doi: 10.2307/3019137.
- [20] I. Kasikci, *Short Circuits in Power Systems*, vol. 7. 2002.
- [21] O. Conductor, “Open Conductor Faults :,” pp. 208–219.
- [22] J. Schlabbach, “Short-circuit currents,” *Short-Circuit Curr.*, pp. 1–307, 2005, doi: 10.1049/PBPO051E.
- [23] J. M. Gers and E. J. Holmes, “Calculation of short-circuit currents,” *Prot. Electr. Distrib. Networks*, no. 158, pp. 11–30, 2011, doi: 10.1049/pbpo065e_ch2.
- [24] J. L. Rodriguez Espantoso and P. Zapico Gutierrez, “Calculo de la intensidad de cortocircuito con los cambios normativos,” *Calc. short circuit Curr. with Regul. Chang.*, no. 297, pp. 60–68, 2012.
- [25] “Asim Etricas),” pp. 167–223.
- [26] E. Ice, “Líneas de Transmisión y Campos Electromagnéticos,” 2000.

6.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 11. Matriz de estado del arte.

SIMULACIÓN DE CORTOCIRCUITOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA USANDO MÉTODOS TRADICIONALES Y NORMATIVAS																													
ITEM	DATOS				TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA								
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	PAÍS	CITAS	FALLAS EN TRANSMISIÓN	DIFERENCIACIÓN DE FALLAS EN EL SISTEMA	EXPANSIÓN DE LA TRANSMISIÓN	FALLAS EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	COMPONENTES SIMÉTRICA Y ASIMÉTRICAS	FALLAS DE ARCO; PROTECCIÓN A DISTANCIA	FALLAS DE CONDUCTOR ABIERTO	UBICACIÓN DE FALLAS	FLUJOS DE POTENCIA	NORMAS IEC 60909	FALLAS PERMANENTES Y TRANSITORIAS	TIEMPO DE DURACIÓN DE UNA FALLA	INYECCIÓN DE POTENCIA EN EL SEP	CAPACIDAD DE POTENCIA DE TRANSMISIÓN EN LÍNEAS	ANÁLISIS DE ANGULO, VOLTAJE	POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA	FLUJOS DE POTENCIA	COMPONENTES SIMÉTRICAS/ASIMÉTRICAS	SIMULACIÓN ITERATIVA	MÉTODO COMPLETO PARA ANÁLISIS DE FALLAS	ALGORITMOS GENÉTICOS Y MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE	UBICACIÓN Y ANÁLISIS DE FALLAS MEDIANTE	ANÁLISIS DEL TIEMPO DE FALLA EN EL SISTEMA	CONTROL Y ANÁLISIS DEL FLUJO DE POTENCIA	ANÁLISIS DE CADA TIPO DE FALLA
1	2014	Impact study of short-circuit calculation methods on the design of a wind farm's grounding system	Grecia	16	☒	☒		☒				☒		☒			☒				☒			☒	☒				☒
2	2011	Fault calculations using three terminal Thevenin's equivalent circuit	Barein	16			☒			☒		☒		☒		☒				☒		☒		☒	☒			☒	
3	1997	Digital signal processing algorithm for arcing faults detection and fault distance calculation on transmission lines	Alemania	27	☒				☒		☒				☒				☒					☒	☒		☒		
4	1996	Spectral domain arcing fault recognition and fault distance calculation in transmission systems	Serbia	22	☒		☒				☒			☒		☒					☒				☒				☒
5	1985	Fault Impedance Calculation Algorithms for Transmission Line Distance Protection	Taiwan	80	☒		☒		☒		☒	☒	☒	☒	☒						☒			☒				☒	
6	1983	Reliability Calculations for Electrical Transmission Systems on the Basis of Mean Failure Indices	India	7		☒		☒		☒	☒		☒				☒	☒				☒		☒		☒			☒
7	2011	A new estimation model of the lightning shielding performance of transmission lines using a fractal approach	China	21			☒					☒			☒	☒						☒			☒			☒	

SIMULACIÓN DE CORTOCIRCUITOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA USANDO MÉTODOS TRADICIONALES Y NORMATIVAS

ITEM	DATOS				TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA									
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	PAÍS	CITAS	FALLAS EN TRANSMISIÓN	DIFERENCIACIÓN DE FALLAS EN EL SISTEMA	EXPANSIÓN DE LA TRANSMISIÓN	FALLAS EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	COMPONENTES SIMÉTRICA Y ASIMÉTRICAS	FALLAS DE ARCO; PROTECCIÓN A DISTANCIA	FALLAS DE CONDUCTOR ABIERTO	UBICACIÓN DE FALLAS	FLUJOS DE POTENCIA	NORMAS IEC 60909	FALLAS PERMANENTES Y TRANSITORIAS	TIEMPO DE DURACIÓN DE UNA FALLA	INYECCIÓN DE POTENCIA EN EL SEP	CAPACIDAD DE POTENCIA DE TRANSMISIÓN EN LINEAS	ANÁLISIS DE ÁNGULO, VOLTAJE	POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA	FLUJOS DE POTENCIA	COMPONENTES SIMÉTRICAS/ASIMÉTRICAS	SIMULACIÓN ITERATIVA	MÉTODO COMPLETO PARA ANÁLISIS DE FALLAS	ALGORITMOS GENÉTICOS Y MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE	UBICACIÓN Y ANÁLISIS DE FALLAS MEDIANTE	ANÁLISIS DEL TIEMPO DE FALLA EN EL SISTEMA	CONTROL Y ANÁLISIS DEL FLUJO DE POTENCIA	ANÁLISIS DE CADA TIPO DE FALLA	
8	2014	A novel method to locate a fault of transmission lines by shielding failure	China	17	☒		☒		☒					☒					☒		☒		☒	☒						☒
9	2017	Safety and Reliability of 66-kV Class HTS Cable Systems in Short-Circuit Current Accidents-Experimental Results on 40-m Cable System	Japón	7	☒	☒			☒	☒				☒		☒				☒				☒				☒		
10	2018	Pandapower - An Open-Source Python Tool for Convenient Modeling, Analysis, and Optimization of Electric Power Systems	Alemania	79	☒	☒			☒					☒						☒			☒	☒		☒	☒		☒	
11	2011	Use of superconducting devices operating together to ensure the dynamic stability of electric power system	Rusia	9	☒		☒							☒		☒					☒	☒				☒				☒
12	2006	A new methodology for probabilistic short-circuit evaluation with applications in power quality analysis	Brasil	25	☒		☒							☒	☒						☒	☒	☒				☒			☒
13	2013	Fault diagnosis of the asynchronous machines through magnetic signature analysis using finite-element method and neural networks	USA	39	☒	☒			☒	☒				☒	☒	☒				☒					☒	☒				☒
14	2014	Performance of a load-immune classifier for robust identification of minor faults in induction motor stator winding	India	39		☒			☒												☒					☒				☒
15	2011	Advanced power electronic conversion and control system for	Italia	281	☒	☒	☒	☒						☒		☒					☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒		

SIMULACIÓN DE CORTOCIRCUITOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA USANDO MÉTODOS TRADICIONALES Y NORMATIVAS

ITEM	DATOS				TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO					RESTRICCIONES DEL PROBLEMA					PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA						
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	PAÍS	CITAS	FALLAS EN TRANSMISIÓN	DIFERENCIACIÓN DE FALLAS EN EL SISTEMA	EXPANSIÓN DE LA TRANSMISIÓN	FALLAS EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	COMPONENTES SIMÉTRICA Y ASIMÉTRICAS	FALLAS DE ARCO; PROTECCIÓN A DISTANCIA	FALLAS DE CONDUCTOR ABIERTO	UBICACIÓN DE FALLAS	FLUJOS DE POTENCIA	NORMAS IEC 60909	FALLAS PERMANENTES Y TRANSITORIAS	TIEMPO DE DURACIÓN DE UNA FALLA	INYECCIÓN DE POTENCIA EN EL SEP	CAPACIDAD DE POTENCIA DE TRANSMISIÓN EN LÍNEAS	ANÁLISIS DE ÁNGULO, VOLTAJE	POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA	FLUJOS DE POTENCIA	COMPONENTES SIMÉTRICAS/ASIMÉTRICAS	SIMULACIÓN ITERATIVA	MÉTODO COMPLETO PARA ANÁLISIS DE FALLAS	ALGORITMOS GENÉTICOS Y MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE	UBICACIÓN Y ANÁLISIS DE FALLAS MEDIANTE	ANÁLISIS DEL TIEMPO DE FALLA EN EL SISTEMA	CONTROL Y ANÁLISIS DEL FLUJO DE POTENCIA	ANÁLISIS DE CADA TIPO DE FALLA
		universal and flexible power management																											
16	2013	Novel technique for reducing the high fault currents and enhancing the security of ADWEA power system	Abu Dhabi	36	☒						☒			☒	☒	☒		☒						☒		☒		☒	
17	2016	A Comparison of AC and HVDC Options for the Connection of Offshore Wind Generation in Great Britain	USA	44	☒		☒	☒	☒	☒				☒				☒			☒	☒		☒		☒			
18	2007	“Estudio Comparativo de las Normas IEC y ANSI para Cálculo de Corto Circuito” México, D. F .	México	4					☒	☒									☒				☒					☒	
19	1996	Rapport Technique Technical Report	Norma Internacional	81	☒	☒			☒	☒		☒					☒			☒			☒	☒		☒		☒	
20	2002	Short Circuits in Power Systems	Alemania	59			☒		☒		☒			☒		☒				☒	☒					☒			
21	2019	Open Conductor Faults	USA	13	☒	☒		☒				☒	☒					☒					☒					☒	
22	2005	Short-circuit currents	Londres	86	☒	☒		☒	☒	☒		☒		☒			☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒	
23	2002	Short Circuits in Power Systems	Alemania	59			☒				☒					☒			☒			☒		☒				☒	
24	2011	Calculation of short-circuit currents	Paris	54	☒	☒		☒	☒		☒			☒	☒	☒		☒					☒		☒	☒			
25	2017	Asim Etricas	Colombia	0	☒		☒	☒		☒			☒		☒		☒			☒		☒		☒		☒		☒	
26	2000	Líneas de Transmisión y Campos Electromagnéticos	Costa Rica	2	☒		☒	☒	☒	☒		☒		☒	☒		☒		☒		☒		☒		☒		☒	☒	
CANTIDAD :					19	11	13	12	12	13	13	8	10	8	13	10	10	11	8	9	6	14	9	7	16	13	12	9	13

6.2 Resumen de Indicadores

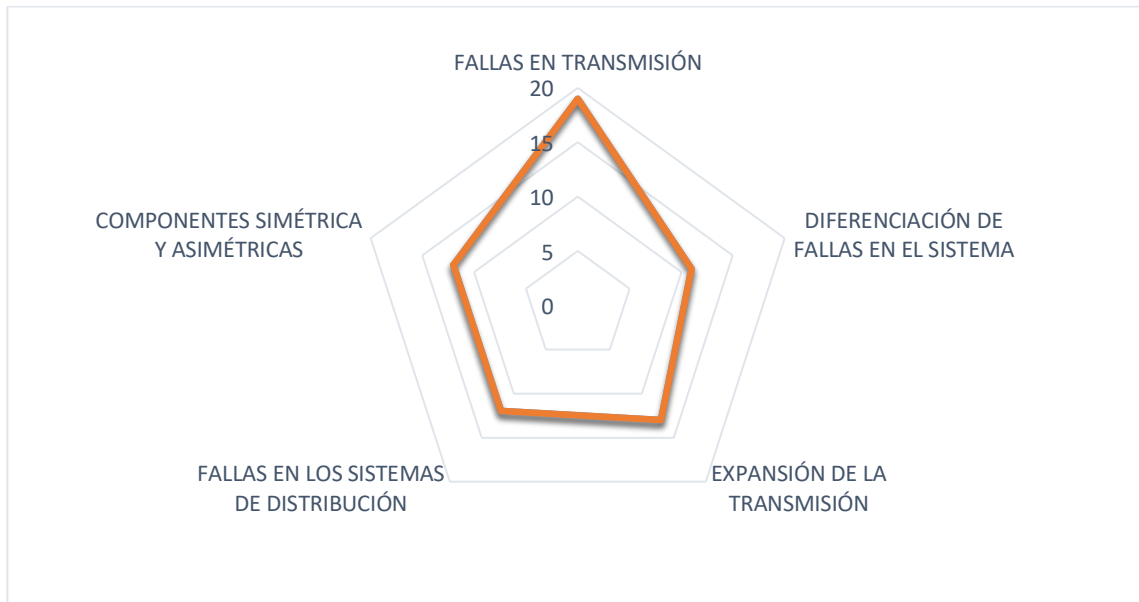


Figura 23. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

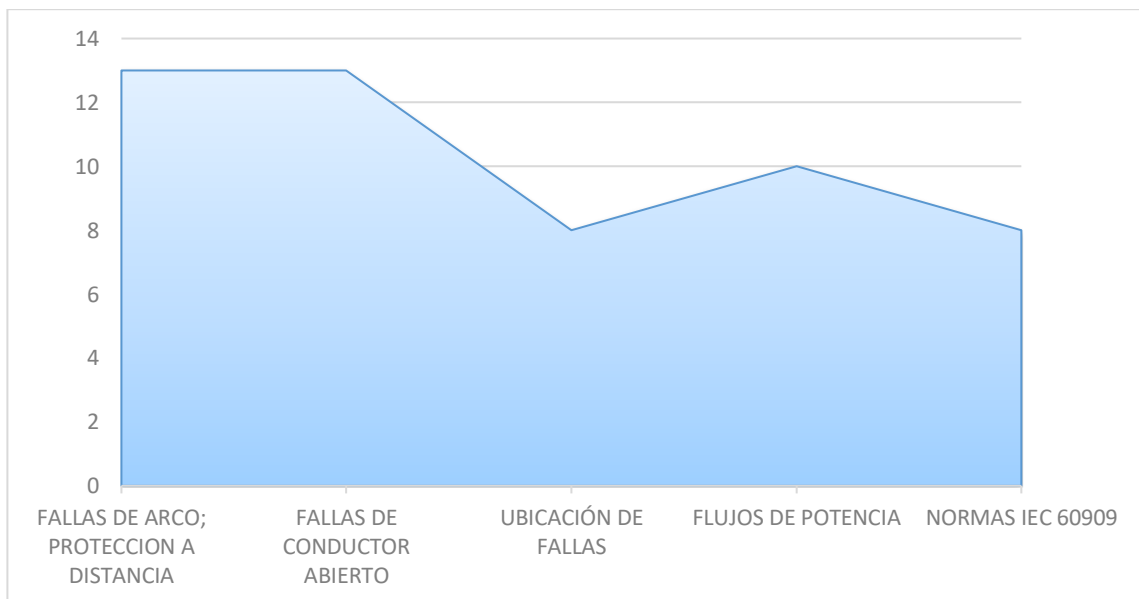


Figura 24. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

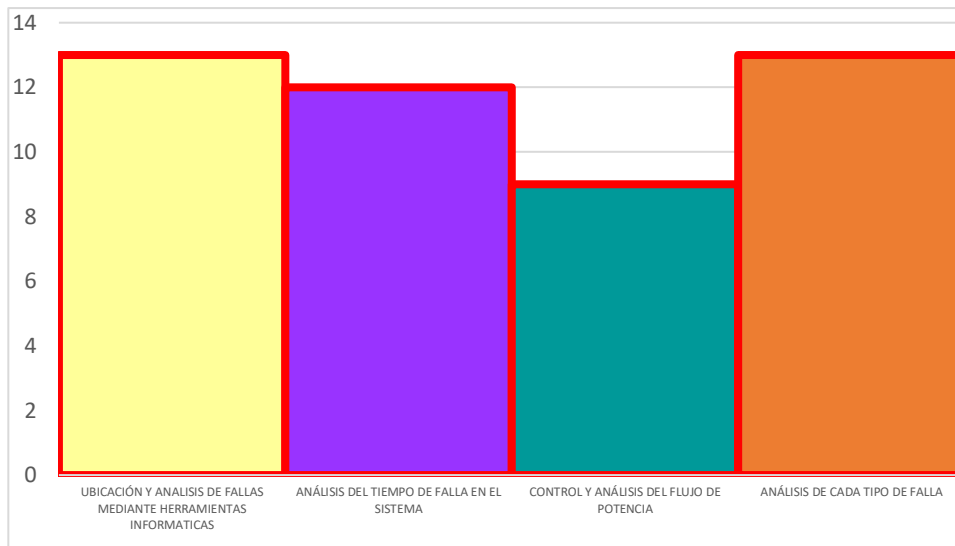


Figura 25. Indicador de solución - Estado del arte.

7 Anexos

Anexo 1 Datos Técnicos del Sistema de 5 barras

Tabla 12. Datos de potencia y voltaje base.

Sbase	100 MVA
Vbase	15 kV barras 1, 3
	345 kV barras 2, 4, 5

Tabla 13. Datos de transformadores en por unidad.

barra LV	barra HV	X	Xn
1(Δ)	5(Y)	0.02	0
3(Δ)	4(Y)	0.01	0

Tabla 14. Datos de líneas en por unidad.

Línea	X1	X0
2-4	0.1	0.3
2-5	0.05	0.15
4-5	0.025	0.075

Tabla 15. Datos de las máquinas sincrónicas en por unidad.

Barra	X1=X"d	X2=X"d	X0	Xn
1	0.045	0.045	0.0125	0
3	0.0225	0.0225	0.005	0.0025

Anexo 2 Datos Técnicos del Sistema de 9 Barras de la IEEE

Tabla 16. Datos de barras.

Barra	Voltajes kV
1	115
2	115
3	115
4	230
5	230
6	230
7	230
8	230
9	230

Tabla 17. Datos de transformadores.

Línea de barra a barra	Transformador	X [p.u.]
[1 - 4]	1	0.0373
[2 - 5]	2	0.0373
[3 - 6]	3	0.0373

Tabla 18. Datos de líneas por conductor y longitud.

Líneas De Transmisión Conductor Drake Voltaje 230 kV				
Línea de barra a barra	R Ω / km	X Ω / km	Y1 μ /km	km
[4 - 7]	0.1172	0.0373	3.3	100
[4 - 8]	0.1172	0.0373	3.3	60
[5 - 7]	0.1172	0.0373	3.3	50
[5 - 9]	0.1172	0.0373	3.3	300
[8 - 6]	0.1172	0.0373	3.3	90
[9 - 6]	0.1172	0.0373	3.3	500

Tabla 19. Datos de generadores y cargas.

Barra	Generación		Cargas	
	P MW	Q Mvar	P MW	Q Mvar
1	500	-	-	-
2	500	-	-	-
3	500	-	-	-
4	-	-	-	-
5	-	-	-	-
6	-	-	100	-
7	-	-	300	50
8	-	-	300	30
9	-	-	250	20