



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE CORTOCIRCUITO MEDIANTE COMPONENTES
SIMÉTRICAS EN UN SISTEMA DE POTENCIA CON TRANSFORMADORES EN
PARALELO CONFORME A LA NORMATIVA IEC 60909-4**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Eléctrico

AUTORES: Wilson Eduardo Analuisa Yungán

Cindy Valentina Reyes Zambrano

TUTOR: Ing. Ervin Geovanny Solano Villegas, MSc.

Guayaquil – Ecuador

2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Wilson Eduardo Analuisa Yungán con documento de identificación N° 0950314112 y Cindy Valentina Reyes Zambrano con documento de identificación N° 0957805062 manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo y autorizamos 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.

Guayaquil, 30 de enero del año 2025

Atentamente,



Wilson Eduardo Analuisa Yungán

0950314112



Cindy Valentina Reyes Zambrano

0957805062

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

Nosotros, Wilson Eduardo Analuisa Yungán con número de identificación N° 0950314112 y Cindy Valentina Reyes Zambrano con número de identificación N° 0957805062, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de lo que somos autores del Proyecto Técnico: “ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE CORTOCIRCUITO MEDIANTE COMPONENTES SIMÉTRICAS EN UN SISTEMA DE POTENCIA CON TRANSFORMADORES EN PARALELO CONFORME A LA NORMATIVA IEC 60909 - 4”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero en Electricidad, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Guayaquil, 30 de enero del año 2025.

Atentamente,



Wilson Eduardo Analuisa Yungán

0950314112



Cindy Valentina Reyes Zambrano

0957805062

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Ervin Geovanny Solano Villegas con documento de identificación N° 0923481915 docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE CORTOCIRCUITO MEDIANTE COMPONENTES SIMÉTRICAS EN UN SISTEMA DE POTENCIA CON TRANSFORMADORES EN PARALELO CONFORME A LA NORMATIVA IEC 60909 – 4, realizado por Wilson Eduardo Analuisa Yungán con número de identificación N° 0950314112 y Cindy Valentina Reyes Zambrano con número de identificación N°0957805062, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 30 de enero del año 2025.

Atentamente,



Ing. Ervin Geovanny Solano Villegas

0923481915

DEDICATORIA

Dedico mi tesis primeramente a Dios, por permitirme llegar a un cumplir una de mis metas, ya que él me ha ayudado en fuerzas y conocimiento para seguir adelante cada día.

A mis padres por haberme ayudado incondicionalmente en todo momento y motivarme a seguir adelante.

Wilson Eduardo Analuisa Yungán

Este trabajo de titulación lo dedico, ante todo, a Dios, quien me ha dado la fuerza y sabiduría para enfrentar cada desafío que se presentó. A mi familia, que siempre ha sido mi pilar y mi mayor fuente de inspiración: a mi padre, Andrés Reyes, por su apoyo incondicional y por ser un verdadero ejemplo de esfuerzo y perseverancia; a mi madre, Susana Zambrano, por su amor infinito y por estar siempre ahí para mí, cuidándome y dándome su cariño en cada momento; y a mis hermanos, Anayeli y Julián, por estar a mi lado cuando más los necesitaba, ofreciéndome su compañía y apoyo inquebrantable. Este logro no es solo mío, sino también de ellos, que han estado conmigo en cada paso de este camino.

Cindy Valentina Reyes Zambrano

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradeciendo a todos los tutores que me compartieron todos sus conocimientos de la mejor manera a lo largo de la carrera y buscaban la manera de explicarnos algún tema.

En especial agradecer al Ing. Ervin Solano, quien nos ha ayudado en el proceso de la tesis.

A mis compañeros de toda la carrera los cuales compartimos conocimiento, ayuda e incontables horas de estudio, agradezco a todos por su grano de arena y aporte para mi crecimiento profesional.

A mis padres por la confianza y apoyo diario que me impulsaban a ser mejor cada día, todas las noches esperando mi llegada.

Wilson Eduardo Analuisa Yungán

Estoy profundamente agradecido con Dios por la vida, la salud y la fortaleza que me ha dado para alcanzar este logro tan importante en mi carrera. Mi eterno agradecimiento a mis padres, Andrés y Susana, y a mis hermanos, Anayeli y Julián, por su amor constante y su apoyo incondicional en cada paso de este proceso. Sin ellos, este momento no sería posible. Un agradecimiento muy especial al ingeniero Ervin Solano, por su valiosa guía y apoyo, que fueron fundamentales en este camino.

Cindy Valentina Reyes Zambrano

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	ii
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.....	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xiv
ACRÓNIMOS	xv
1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. TÍTULO	1
1.2. INTRODUCCIÓN	1
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	3
1.4.1. BENEFICIARIOS.....	4
1.5. OBJETIVOS.....	4
1.5.1. OBJETIVO GENERAL	4
1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	5
2.1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	5
2.1.1. TIPOS DE S/E ELÉCTRICAS.....	5
2.2. COMPONENTES PRINCIPALES: GENERACIÓN, TRANSMISIÓN, DISTRIBUCIÓN Y CONSUMO	6
2.2.1. GENERACIÓN.....	6
2.2.2. TRANSMISIÓN.....	7
2.2.3. DISTRIBUCIÓN.....	8
2.3. MODELADO BÁSICO PARA ESTUDIOS DE CORTOCIRCUITO.....	8

2.4.	ANÁLISIS DE FALLAS EN SISTEMAS ELECTRICOS.....	9
2.5.	CLASIFICACIÓN DE FALLAS TRIFÁSICAS, MONOFÁSICA A TIERRA, BIFÁSICA Y BIFÁSICA A TIERRA.	9
2.6.	MÉTODOS DE ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO	10
2.7.	ANÁLISIS POR COMPONENTES SIMÉTRICAS	11
2.8.	COMPARACIÓN CON MÉTODOS BASADOS EN IEC 60909-4	12
2.9.	MODELADO DE TRANSFORMADORES	12
	13
2.10.	SOFTWARE DE SIMULACIÓN PARA ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO ...	13
2.11.	USO DE ETAP PARA SIMULACIONES	14
2.11.1.	USO DE ETAP PARA SIMULACIONES.....	15
3.	CAPÍTULO III	16
3.1.	METODOLOGÍA	16
3.2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
3.3.	CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA ETAP.....	17
3.4.	CONFIGURACIÓN EN PARÁMETROS DE CORTOCIRCUITO (IEC 69090-4)	17
3.5.	APLICACIÓN DEL MÉTODO DE COMPONENTES SIMÉTRICAS	17
3.6.	SIMULACIÓN DE ESCENARIOS DE CORTOCIRCUITO	18
3.7.	JUSTIFICACIÓN Y DETALLES ADICIONALES	18
3.7.1.	COMPLEJIDAD DE LOS CÁLCULOS	18
3.7.2.	DIVERSIDAD DE CONDICIONES	19
3.7.3.	HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN Y SU COMPLEJIDAD.....	19
3.8.	CÁLCULOS SEGÚN LA NORMATIVA IEC 60909-4	21
3.8.1.	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA PLANTEADO EN LA NORMATIVA IEC 60909-4	21
3.8.2.	TRANSFORMADORES.....	23
3.8.3.	LÍNEAS (CABLES Y LÍNEA AÉREA)	24
3.9.	DETERMINACIÓN DE LAS IMPEDANCIAS DE SECUENCIA CERO	25
3.9.1.	TRANSFORMADORES.....	25
3.9.2.	LÍNEAS (CABLES Y LÍNEAS AÉREAS)	25
3.10.	CÁLCULO DE I_k'' Y i_P PARA CORTOCIRCUITOS TRIFÁSICOS	26

3.10.1.	UBICACIÓN DEL CORTOCIRCUITO F1.....	26
3.10.2.	PARA EL SISTEMA DE SECUENCIA POSITIVA, SE ENCUENTRA LA SIGUIENTE IMPEDANCIA DE CORTOCIRCUITO EN LA UBICACIÓN F1:	26
3.10.3.	MÉTODO (B): RELACIÓN DE IMPEDANCIA EN LA UBICACIÓN DEL CORTOCIRCUITO	27
3.10.4.	MÉTODO (C): FRECUENCIA EQUIVALENTE CON R/X DE LA EDUCACIÓN. 27	
3.11.	UBICACIÓN DEL CORTOCIRCUITO F2.....	28
3.11.1.	EL CÁLCULO CON EL MÉTODO (C).....	28
3.12.	CÁLCULO DE IK1 PARA ip1 CORTOCIRCUITOS DE LÍNEA A TIERRA... 29	
3.12.1.	UBICACIÓN DEL CORTOCIRCUITO F1.....	29
3.12.2.	LOCALIZACIÓN DEL CORTOCIRCUITO F3.....	30
	Z1 = Z2 = Zk = 1,977 + j 6,827 MΩ	30
3.12.3.	UBICACIÓN DEL CORTOCIRCUITO F3.....	31
3.13.	RECOPIACIÓN DE RESULTADOS.....	31
3.14.	DISEÑO EN ETAP	32
3.14.1.	RED ELÉCTRICA	32
3.14.2.	BARRAS DE DISTRIBUCIÓN	32
3.14.3.	TRANSFORMADORES.....	33
3.14.4.	CABLES DE CONEXIÓN	33
3.14.5.	LÍNEA AÉREA	34
3.14.6.	FLUJO DE CARGA.....	34
3.15.	DATOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN.....	35
3.15.1.	RED ELÉCTRICA	36
3.15.2.	TRANSFORMADOR 1	38
3.15.3.	TRANSFORMADOR 2	41
3.15.4.	CABLE L1.....	44
3.15.5.	CABLE L2.....	45
3.15.6.	CABLE L3.....	46
3.15.7.	LÍNEA AÉREA	47
3.15.1.	FLUJO DE CARGA.....	48
3.15.2.	CORTOCIRCUITO	48

3.16.	CÁLCULO DE COMPONENTES SIMÉTRICOS Y CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO.....	49
3.16.1.	FALLA A TIERRA EN EL TRANSFORMADOR T1:	49
3.16.2.	CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA DE SECUENCIA POSITIVA Z_{1T1}	49
3.16.3.	IMPEDANCIA DE SECUENCIA CERO Z_{0T1}	50
3.16.4.	CORRIENTE DE FALLA TRIFÁSICA I_{k3}	50
3.16.5.	CORRIENTE DE FALLA MONOFÁSICA A TIERRA (I_{k1}).....	51
3.17.	FALLA EN EL PUNTO F2 (CONEXIÓN DEL CABLE L3):	51
3.17.1.	COMPONENTES DE LA RED DE ALIMENTACIÓN (Q).....	51
3.17.2.	IMPEDANCIA TOTAL DE SECUENCIA POSITIVA (Z_1)	52
3.17.3.	IMPEDANCIA TOTAL SECUENCIA CERO (Z_0)	52
3.18.	FALLA EN EL PUNTO F3 (EXTREMO DE LA LÍNEA AÉREA):.....	52
3.18.1.	COMPONENTES DE LA RED DE ALIMENTACIÓN (Q).....	53
3.18.2.	IMPEDANCIA TOTAL DE SECUENCIA POSITIVA (Z_1)	53
3.18.3.	IMPEDANCIA TOTAL SECUENCIA CERO (Z_0)	53
	RECOMENDACIONES	54
	BIBLIOGRAFÍA.....	55

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Sistema eléctrico nacional	5
FIGURA 2. Operación de sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica.....	6
FIGURA 3. Tipos de cortocircuito	10
FIGURA 4. Componentes simétricos.....	13
FIGURA 5. Pantalla de inicio ETAP	14
FIGURA 6. Sistema de baja tensión.....	21
FIGURA 7. Sistema de secuencia positiva.....	26
FIGURA 8. Sistema de secuencia positiva, secuencia negativa y secuencia cero	30
FIGURA 9. Diseño en Etap.....	35
FIGURA 10. Red eléctrica	36
FIGURA 11. Valores red eléctrica.....	37
FIGURA 12. Valores nominales.....	38
FIGURA 13. Valores de impedancia T1	39
FIGURA 14. Conexión T1	40
FIGURA 15. Valores nominales T2	41
FIGURA 16. Valores de impedancia T2.....	42
FIGURA 17. Conexión T2	43
FIGURA 18. Valores de cable L1.....	44
FIGURA 19. Valores de cable L2.....	45
FIGURA 20. Valores de cable L3.....	46
FIGURA 21. Valores de línea aérea	47
FIGURA 22. Diseño con flujo de carga	48
FIGURA 23. Resultados de cortocircuito	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos de equipos eléctricos	22
Tabla 2. Impedancias de cortocircuito.....	31
Tabla 3. Integral de Joule	31

RESUMEN

En este estudio se analiza y simula el comportamiento de un sistema de potencia con transformadores en paralelo ante fallas eléctricas, utilizando la descomposición en componentes simétricas y cumpliendo con los lineamientos de la normativa IEC 60909-4. Este análisis es fundamental para poder asegurar la seguridad, estabilidad y fiabilidad de los sistemas eléctricos, ya que permite calcular las corrientes de cortocircuito bajo distintas condiciones, sentando las bases para el correcto diseño de los sistemas de protección y la selección de equipos capaces de soportar estas fallas.

La descomposición en componentes simétricas permite simplificar el análisis de sistemas desequilibrados, representándolos como combinaciones de componentes equilibradas (positiva, negativa y cero). Este enfoque facilita la identificación de causas, la evaluación de los efectos de las fallas y la resolución de problemas relacionados con las corrientes de cortocircuito, minimizando riesgos y asegurando la correcta operación del sistema.

En sistemas con transformadores en paralelo, el análisis de cortocircuito es más complejo debido a las interacciones entre los transformadores. Estas interacciones afectan tanto la magnitud como la distribución de las corrientes de falla, dependiendo de características como la impedancia, la potencia nominal y las configuraciones de conexión (estrella, delta, etc.). Por ello, es fundamental un análisis detallado que contemple las diferencias en las respuestas de los transformadores y los efectos cruzados que estas generan en la red.

La normativa IEC 60909-4 proporciona un marco estándar para el cálculo de las corrientes de cortocircuito. Define procedimientos y fórmulas específicas que consideran la asimetría de las fallas, las características de los equipos y las condiciones operativas del sistema. La norma abarca diferentes tipos de fallas (monofásicas, bifásicas y trifásicas) y factores como la impedancia de los transformadores, las reactancias de secuencia y las condiciones de carga, asegurando un análisis completo y adaptado a las particularidades de cada caso.

El objetivo de este trabajo es evaluar la magnitud y distribución de las corrientes de cortocircuito y analizar su impacto en el diseño y configuración de los sistemas de protección. La correcta aplicación de la IEC 60909-4 garantiza que los dispositivos de protección, como relevadores e interruptores automáticos, respondan de manera eficiente, minimizando riesgos y asegurando la continuidad operativa del sistema.

Finalmente, se incluye una simulación práctica que aplica los principios de la normativa IEC 60909-4 en un sistema de potencia con transformadores en paralelo. Esto demuestra cómo el análisis, apoyado en modelos matemáticos y herramientas computacionales, permite prever el comportamiento del sistema y tomar decisiones técnicas fundamentadas, contribuyendo al desarrollo de sistemas eléctricos más robustos y seguros.

ABSTRACT

This study analyzes and simulates the behavior of a power system with parallel transformers under electrical faults, using symmetrical component decomposition and complying with the guidelines of IEC 60909-4. This analysis is essential to ensure the safety, stability, and reliability of electrical systems, as it allows the calculation of short-circuit currents under different conditions, providing a foundation for the proper design of protection systems and the selection of equipment capable of withstanding such faults.

Symmetrical component decomposition simplifies the analysis of unbalanced systems by representing them as combinations of balanced components (positive, negative, and zero sequences). This approach facilitates the identification of causes, the assessment of fault effects, and the resolution of issues related to short-circuit currents, minimizing risks and ensuring the proper operation of the system.

In systems with parallel transformers, short-circuit analysis is more complex due to the interactions between the transformers. These interactions affect both the magnitude and distribution of fault currents, depending on characteristics such as impedance, rated power, and connection configurations (e.g., star, delta, etc.). Therefore, a detailed analysis that considers differences in transformer responses and their cross-effects on the network is essential.

The IEC 60909-4 standard provides a standardized framework for calculating short-circuit currents. It defines specific procedures and formulas that account for fault asymmetry, equipment characteristics, and system operating conditions. The standard addresses various fault types (single-phase, two-phase, and three-phase) and factors such as transformer impedance, sequence reactances, and loading conditions, ensuring a comprehensive analysis tailored to the specificities of each case.

The objective of this work is to evaluate the magnitude and distribution of short-circuit currents and analyze their impact on the design and configuration of protection systems. The correct application of IEC 60909-4 ensures that protective devices, such as relays and circuit breakers, respond efficiently, minimizing risks and ensuring operational continuity of the system.

Finally, a practical simulation is included, applying the principles of IEC 60909-4 to a power system with parallel transformers. This demonstrates how analysis, supported by mathematical models and computational tools, allows for the prediction of system behavior and the making of well-founded technical decisions, contributing to the development of more robust and secure electrical systems.

ACRÓNIMOS

- I_1 : Corriente de componente directa (positiva)
- I_2 : Corriente de componente inversa (negativa)
- I_0 : Corriente de componente homopolar (cero)
- V_1 : Tensión de componente directa (positiva)
- V_2 : Tensión de componente inversa (negativa)
- V_0 : Tensión de componente homopolar (cero)
- Z_1 : Impedancia de componente directa (positiva)
- Z_2 : Impedancia de componente inversa (negativa)
- Z_0 : Impedancia de componente homopolar (cero)
- I_{sc} : Corriente de cortocircuito
- I_k : Corriente de cortocircuito en fase k ($k = 1, 2, 3$)
- V_{sc} : Tensión de cortocircuito
- P_{sc} : Potencia de cortocircuito
- S_{sc} : Potencia aparente de cortocircuito
- X : Reactancia
- R : Resistencia
- S : Potencia aparente
- U : Tensión (Voltaje)
- f : Frecuencia
- Z_{th} : Impedancia total del sistema
- ΔI : Cambio en la corriente
- ΔV : Cambio en la tensión
- $I_0 = 0$: Corriente homopolar nula (en algunas situaciones)
- $T\Delta$: Tiempo de respuesta del sistema de protección
- I_c : Corriente de fase durante cortocircuito
- I_{bc} : Corriente de cortocircuito bifásica
- I_{sc3} : Corriente de cortocircuito trifásica
- I_{sc1} : Corriente de cortocircuito monofásica
- AC: Corriente alterna (Alternating Current)
- DC: Corriente continua (Direct Current)
- PS: Potencia activa (Active Power)
- QS: Potencia reactiva (Reactive Power)
- S: Potencia aparente (Apparent Power)
- PF: Factor de potencia (Power Factor)
- kV: Kilovoltios (Kilovolts)
- kA: Kiloamperios (Kiloamperes)
- MW: Megavatios (Megawatts)
- MVA: Megavoltamperios (Megavolt-amperes)

- kVA: Kilovoltamperios (Kilovolt-amperes)
- Ω : Ohm (unidad de resistencia)
- p.u.: Por unidad (per unit, utilizado para normalizar valores)
- f.p.: Fase de potencia (Power factor, también abreviado como PF)
- THD: Distorsión armónica total (Total Harmonic Distortion)
- L-G: Falla de línea a tierra (Line-to-ground fault)
- L-L: Falla de línea a línea (Line-to-line fault)
- L-L-G: Falla de línea a línea y tierra (Line-to-line-to-ground fault)
- GFL: Falla de generador (Generator Fault Line)

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. TÍTULO

Análisis y Simulación de cortocircuito mediante componentes simétricas en un sistema de potencia con transformadores en paralelo conforme a la normativa IEC 60909-4.

1.2. INTRODUCCIÓN

En el diseño y operación de sistemas eléctricos de potencia, el análisis de fallas y cortocircuitos es esencial para garantizar la seguridad y estabilidad de los sistemas. Las fallas asimétricas, que ocurren cuando las tensiones o corrientes entre las fases no están equilibradas, representan uno de los retos más complejos debido a su impacto directo en la operación del sistema. Para enfrentar este desafío, se utiliza el método de Componentes Simétricas, propuesto por Charles Fortescue en 1918. Este método permite descomponer un sistema desequilibrado en tres componentes balanceadas: la positiva (directa), la negativa (inversa) y la cero (homopolar). Esta descomposición simplifica el análisis de las fallas asimétricas, proporcionando un enfoque sistemático para estudiar el comportamiento del sistema en condiciones de cortocircuito.

Por otro lado, la normativa internacional IEC 60909-4 establece procedimientos y fórmulas para calcular las corrientes de cortocircuito en sistemas eléctricos. Esta norma tiene en cuenta no solo la asimetría de las fallas, sino también las características específicas de los componentes del sistema. Esto permite evaluar con precisión el impacto de las fallas en los equipos eléctricos, facilitando el diseño de sistemas de protección eficientes, la selección adecuada de componentes y la continuidad del suministro de energía. Contar con modelos precisos de las condiciones de falla es, por lo tanto, clave para prevenir daños y mejorar la resiliencia de los sistemas eléctricos.

El objetivo de este trabajo es llevar a cabo un análisis detallado sobre el uso de las componentes simétricas en sistemas eléctricos de potencia, aplicando la normativa IEC 60909-4 y utilizando simulaciones en el software ETAP para calcular y analizar las corrientes de cortocircuito en diferentes escenarios de falla. Este enfoque busca profundizar en la comprensión de las fallas asimétricas y su efecto en los sistemas eléctricos, al mismo tiempo que se destaca la importancia de las herramientas computacionales en el diseño y mejora de la protección y operación del sistema.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los sistemas de potencia, los cortocircuitos y fallas eléctricas son eventos críticos que pueden tener consecuencias graves, tanto en el funcionamiento del sistema como en la seguridad de las personas y equipos. Estas situaciones pueden provocar daños considerables en componentes como generadores, transformadores, cables e interruptores, afectando su rendimiento, reduciendo su vida útil y generando interrupciones en el suministro eléctrico. Además, las fallas en el sistema pueden desestabilizar la red, ocasionar pérdidas económicas significativas y, en casos extremos, poner en peligro la seguridad de los operadores y quienes se encuentren cerca de las instalaciones.

Para prevenir estos riesgos y minimizar el impacto de las fallas, es imprescindible realizar un análisis preciso de las corrientes de falla. Este análisis permite comprender el comportamiento del sistema durante un evento crítico y diseñar sistemas de protección capaces de desconectar rápidamente las áreas afectadas, evitando daños mayores. Asimismo, calcular con exactitud las corrientes de falla es esencial para seleccionar dispositivos de protección adecuados y dimensionar correctamente los equipos eléctricos. Por lo tanto, este proceso no solo contribuye a mantener la estabilidad del sistema, sino que también resulta clave para garantizar la seguridad operativa.

La normativa internacional IEC 60909-4 ofrece un marco esencial para realizar cálculos de corrientes de cortocircuito en sistemas eléctricos. Sin embargo, su aplicación puede ser un desafío, debido a la complejidad técnica que implica. Este estándar considera múltiples factores, como la naturaleza asimétrica de ciertas fallas, las características específicas de los componentes del sistema (por ejemplo, transformadores, generadores y líneas de transmisión) y las condiciones de operación. La combinación de estas variables exige un nivel de precisión elevado y una interpretación adecuada de los parámetros establecidos en la norma, lo que puede resultar complicado para muchos ingenieros.

Una herramienta clave para abordar esta complejidad es el método de componentes simétricas, que permite representar fallas asimétricas, es decir, aquellas que afectan de manera desigual las fases del sistema. Este enfoque simplifica el análisis de estas fallas al descomponer el sistema en tres componentes equilibradas, lo que facilita la identificación de las condiciones de falla y su impacto en el sistema.

Por otro lado, el software ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) se ha convertido en una herramienta indispensable para modelar sistemas de potencia y simular escenarios de cortocircuito con un alto nivel de detalle. ETAP permite visualizar en tiempo real el impacto de diversas fallas y evaluar la respuesta del sistema bajo diferentes condiciones. Sin embargo, para utilizar esta herramienta de manera efectiva, se requiere un conocimiento profundo de su configuración y un manejo preciso de los parámetros de simulación. La posibilidad de analizar múltiples escenarios y representar de manera realista las fallas hace que ETAP sea una solución poderosa, aunque demandante en términos técnicos.

1.4. JUSTIFICACIÓN

Este trabajo destaca lo importante que es calcular bien las corrientes de falla en los sistemas eléctricos de potencia. Las fallas en estos sistemas no solo pueden causar daños costosos, sino que también pueden dejar a muchas personas sin electricidad y, en casos graves, poner en peligro la seguridad de los usuarios. Si somos capaces de calcular con precisión esas corrientes de falla y dimensionar correctamente las protecciones, podemos reducir considerablemente los riesgos, lo que permite que el sistema responda mejor y más rápido cuando ocurre un problema.

En sistemas de baja tensión, como los que usamos en nuestras casas y oficinas, los cortocircuitos generan corrientes muy altas que, si no se controlan bien, pueden arruinar equipos, detener operaciones y hasta ser peligrosos para las personas. Por eso es tan importante hacer un análisis detallado de lo que podría pasar en caso de una falla, para asegurarnos de que los dispositivos de protección, como los disyuntores o fusibles, estén correctamente configurados. Así, si hay un problema, el sistema puede desconectar rápidamente la energía y evitar mayores daños.

Este análisis también nos ayuda a detectar puntos débiles en la infraestructura eléctrica. Esto es clave para poder anticiparnos a posibles problemas, evitando daños graves y costosos, y haciendo que el sistema siga funcionando de manera confiable. Si todo está bien protegido, se reduce el riesgo de paradas imprevistas y se optimiza el funcionamiento de todo el sistema, lo que al final se traduce en menores costos y menos interrupciones.

El objetivo principal de este estudio es garantizar que, incluso cuando ocurren fallas graves, el sistema eléctrico siga funcionando de forma segura y eficiente, protegiendo tanto los equipos como la gente que depende de la electricidad. Al tener todo bien dimensionado y coordinado, logramos mantener la estabilidad del sistema, sin dejar de lado la seguridad de las personas y la continuidad del servicio.

El método de componentes simétricas se utiliza para descomponer un sistema eléctrico desbalanceado, como los cortocircuitos asimétricos, en tres componentes de secuencia (positiva, negativa y cero). Este enfoque permite comprender mejor cómo las fallas afectan a los diferentes componentes del sistema, incluidos los transformadores en paralelo, evitando posibles errores en un análisis convencional.

La normativa IEC 60909-4 establece procedimientos estandarizados para calcular las corrientes de cortocircuito y proteger los equipos en los sistemas eléctricos de potencia. Esta normativa es esencial para asegurar que los sistemas de protección estén adecuadamente dimensionados y funcionen de manera eficiente, protegiendo los equipos sin comprometer la estabilidad del sistema. Cumplir con estos lineamientos es fundamental para que el sistema eléctrico cumpla con los estándares internacionales, asegurando un servicio seguro y fiable.

El propósito de esta tesis es analizar y simular el comportamiento de un sistema de potencia con transformadores en paralelo ante eventos de cortocircuito, utilizando el método de componentes simétricas. La simulación se llevará a cabo siguiendo las directrices de la

normativa IEC 60909-4, lo que permitirá realizar un análisis detallado de las corrientes de cortocircuito y dimensionar los equipos de protección de manera adecuada. Los resultados obtenidos contribuirán a mejorar la fiabilidad del sistema eléctrico, optimizar el diseño de las protecciones y garantizar que el sistema cumpla con los requisitos técnicos de seguridad y eficiencia.

Este estudio también ayudará a identificar posibles debilidades en el sistema de protección actual y a proponer mejoras que minimicen los riesgos asociados a las fallas eléctricas, contribuyendo directamente a la seguridad operativa y optimización de recursos del sistema eléctrico.

1.4.1. BENEFICIARIOS

Dentro de los beneficiarios del trabajo investigativo planteado estarán:

- Los autores, consolidarán y fortalecerán sus conocimientos para posteriormente recibir título de Ingeniero en electricidad
- La Universidad Politécnica Salesiana, sumara un proyecto de investigación más para su destacada trayectoria, así como el mérito por graduar excelentes profesionales

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar y simular el comportamiento de cortocircuito en un sistema de potencia con transformadores en paralelo mediante el uso de componentes simétricas, conforme a la normativa IEC 60909-4, para mejorar la precisión en la determinación de las corrientes de falla del sistema.

1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar la normativa IEC 60909-4 para determinar los distintos tipos de fallas del sistema de potencia en estudio por medios de componentes simétricos.
- Simular en Etap el comportamiento del sistema bajo diferentes escenarios de fallas.
- Analizar los resultados obtenidos de la simulación en ETAP y los cálculos, realizando conforme a la normativa IEC 60909-4, para determinar la precisión de los métodos utilizados.

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Los sistemas de potencia son redes eléctricas encargadas de generar, transmitir y distribuir energía eléctrica hacia diversos sistemas. Por lo general, están formados por componentes como generadores, transformadores, líneas de transmisión y dispositivos de protección. Su diseño y análisis son fundamentales para asegurar un suministro de energía confiable y seguro.

El análisis de cortocircuito es una parte fundamental en el diseño, operación y protección de los sistemas eléctricos de potencia. Un cortocircuito ocurre cuando una falla en el sistema crea una conexión no deseada entre las fases o entre una fase y tierra, lo que genera una corriente extremadamente alta. Esta corriente puede dañar los equipos y poner en peligro la estabilidad del sistema. El propósito de realizar un análisis de cortocircuito es identificar las corrientes que se generarán durante estos eventos, lo que es clave para poder diseñar sistemas de protección que respondan de manera adecuada y eficiente.

2.1.1. TIPOS DE S/E ELÉCTRICAS

Un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) es una red integral diseñada para generar, transmitir, distribuir y consumir energía eléctrica de manera segura y eficiente. La generación de electricidad se realiza en centrales eléctricas que utilizan diversas fuentes de energía, como la hidráulica, térmica, eólica o solar. Posteriormente, la energía es transportada mediante líneas de transmisión de alta tensión y transformadores elevadores que ayudan a reducir las pérdidas durante su traslado.

En las subestaciones, el voltaje se reduce para adaptarse a las necesidades de los usuarios finales. Finalmente, el sistema de distribución entrega la electricidad a hogares, industrias y comercios, apoyándose en mecanismos de protección, control y comunicación para garantizar un suministro confiable [1].



FIGURA 1. Sistema eléctrico nacional

Fuentes: [CNEL]

2.2. COMPONENTES PRINCIPALES: GENERACIÓN, TRANSMISIÓN, DISTRIBUCIÓN Y CONSUMO

Un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) está diseñado para garantizar la producción y el suministro eficiente de energía eléctrica desde su generación hasta los consumidores finales. Este sistema se compone de cuatro elementos fundamentales que operan de forma integrada: generación, transmisión, distribución y consumo. La ausencia de cualquiera de estos componentes impediría que la energía llegue de manera efectiva a hogares, industrias u otros usuarios finales [2].

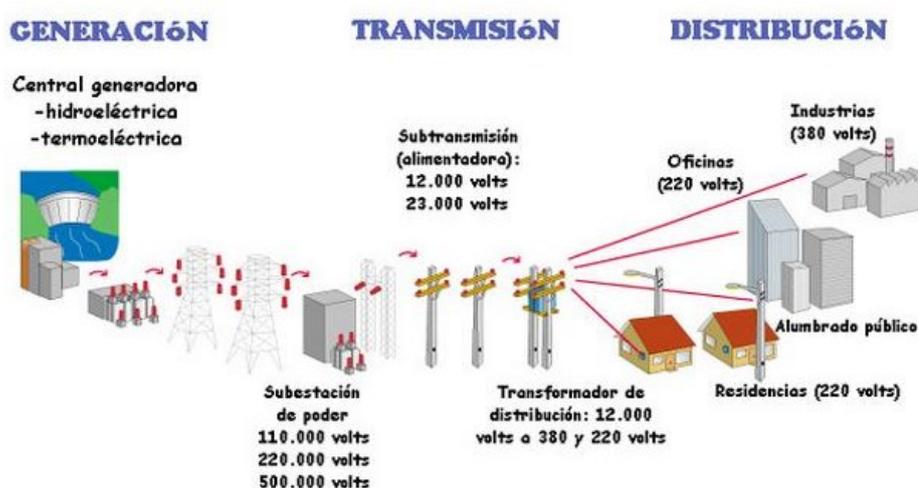


FIGURA 2. Operación de sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica

Fuentes: [CNEL]

2.2.1. GENERACIÓN

La generación es el primer eslabón de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) y se basa en transformar diferentes tipos de energía primaria en energía eléctrica. Estas centrales se ubican estratégicamente en lugares donde puedan aprovechar al máximo los recursos naturales disponibles, buscando reducir costos y optimizar la eficiencia del sistema [3].

Actualmente en Ecuador tenemos varios tipos de generación eléctrica los cuales son:

Generación Hidroeléctrica: Ecuador es uno de los países en América Latina con mayor capacidad para generar energía hidroeléctrica, gracias a su abundante red de ríos y su geografía montañosa de los Andes. La energía hidroeléctrica representa más del 60% de la electricidad que se produce en el país, convirtiendo a Ecuador en un referente en el uso de energías renovables. Las centrales hidroeléctricas funcionan aprovechando el agua de los embalses o el caudal de los ríos para generar electricidad mediante turbinas conectadas a generadores.

Algunas de las principales centrales hidroeléctricas del país son la Central Coca Codo Sinclair, la Central Manduriacu y la Central Paute, entre otras.

La energía hidroeléctrica es una de las fuentes clave en Ecuador debido a su bajo costo operativo y su menor impacto ambiental, aunque es importante reconocer que la construcción de grandes represas puede generar ciertos efectos ecológicos y sociales.

La generación térmica se basa en la quema de combustibles fósiles, como gas natural, petróleo o carbón, para producir vapor, que a su vez mueve turbinas para generar electricidad. Aunque Ecuador tiene una gran capacidad de generación hidroeléctrica, las centrales térmicas se usan principalmente para asegurar el suministro de energía, especialmente durante la temporada seca, cuando los niveles de los ríos bajan y la producción hidroeléctrica disminuye.

Estas centrales térmicas suelen estar ubicadas en áreas costeras y urbanas del país, como la Central Termoeléctrica de Machala o la Central Termoeléctrica de Esmeraldas. Aunque la generación térmica tiene un mayor impacto ambiental debido a la emisión de gases contaminantes, sigue siendo una fuente clave para garantizar la estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico en Ecuador.

La energía eólica está ganando terreno como una fuente renovable en Ecuador, aprovechando el potencial del viento tanto en las zonas costeras como en las regiones andinas. El país tiene un gran potencial para la generación eólica, especialmente en provincias como Manabí y Guayas, donde ya se están llevando a cabo proyectos de parques eólicos [4].

Uno de los primeros proyectos de generación eólica en Ecuador es el Parque Eólico Villonaco, ubicado en la provincia de Loja, que ha mostrado resultados positivos. Aunque la capacidad instalada de energía eólica en Ecuador es aún pequeña en comparación con la hidroeléctrica, esta fuente de energía está ganando importancia como parte de los esfuerzos para diversificar las fuentes de energía y reducir la dependencia de los combustibles fósiles.

2.2.2. TRANSMISIÓN

El subsistema de transmisión se encarga de trasladar la electricidad desde los centros de generación hasta las subestaciones de distribución o los principales centros de carga. Su función es garantizar un transporte eficiente y seguro de la energía eléctrica a largas distancias, conectando la generación con el consumo [5].

La generación de energía es el primer paso en cómo funciona un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP). Se trata de convertir diferentes tipos de energía natural, como el sol, el viento, el agua o los combustibles fósiles, en electricidad que usamos todos los días. Hoy en día, las fuentes renovables como la solar, eólica e hidroeléctrica están tomando más protagonismo porque son más amigables con el medio ambiente. Sin embargo, muchas plantas aún usan fuentes no renovables como el gas natural o el carbón debido a que son más fáciles de conseguir y a menudo más baratas [6].

2.2.3. DISTRIBUCIÓN

Las redes de distribución incluyen líneas de media y baja tensión, así como sistemas de protección y monitoreo que aseguran la entrega confiable de la energía. En áreas urbanas, las redes suelen ser subterráneas, mientras que en áreas rurales predominan las líneas aéreas [7].

Las redes de distribución son el sistema que lleva la electricidad desde las plantas generadoras hasta nuestros hogares, negocios y lugares de trabajo. Están formadas por cables de media y baja tensión, que permiten que la electricidad viaje de manera segura y eficiente. Además, cuentan con sistemas de protección y monitoreo para asegurarse de que la energía llegue sin problemas. Si hay alguna falla o interrupción en el servicio, estos sistemas pueden detectarlo rápidamente y corregirlo, evitando mayores inconvenientes [8].

En las ciudades, las redes de distribución suelen estar enterradas bajo tierra. Esto no solo protege las líneas de los daños causados por el clima, como tormentas o vientos fuertes, sino que también hace que las calles se vean más ordenadas y limpias. Sin embargo, en las zonas rurales, es más común ver las líneas de electricidad sobre postes, ya que resulta más sencillo y económico de instalar en áreas donde hay menos densidad de población.

2.3. MODELADO BÁSICO PARA ESTUDIOS DE CORTOCIRCUITO

El modelado básico para realizar estudios de cortocircuito en sistemas eléctricos de potencia consiste en representar matemáticamente los principales componentes del sistema utilizando parámetros equivalentes que simulan su comportamiento durante una falla. En el caso de los generadores sincrónicos, se emplea su impedancia sub-transitoria, ya que esta representa la respuesta inicial del generador ante la falla, permitiendo analizar el estado más crítico del sistema en ese momento [9].

El modelado básico para estudios de cortocircuito en sistemas eléctricos de potencia tiene como objetivo representar de manera precisa los componentes más importantes del sistema para poder simular lo que ocurre durante una falla, como un cortocircuito. Este tipo de estudio es fundamental para entender cómo reaccionan los diferentes elementos del sistema eléctrico ante una interrupción, lo que ayuda a diseñar soluciones para minimizar daños y restablecer el servicio rápidamente [10].

Para hacer estas simulaciones, se utilizan parámetros equivalentes que permiten representar matemáticamente el comportamiento de los componentes del sistema, como líneas de transmisión, transformadores, y generadores. En el caso de los generadores sincrónicos, uno de los componentes clave, se usa la "impedancia sub-transitoria". Esta impedancia es importante porque refleja la reacción inicial del generador en el momento justo después de que ocurre una falla. Es en ese instante cuando el sistema está en su estado más crítico, ya que el generador no ha tenido tiempo de ajustar su comportamiento a la nueva situación. Al usar este modelo, se puede analizar cómo se comporta el sistema en este período inicial, lo cual es esencial para evaluar la gravedad de la falla y tomar decisiones sobre las protecciones y ajustes necesarios.

2.4. ANÁLISIS DE FALLAS EN SISTEMAS ELECTRICOS

El análisis de fallas en sistemas eléctricos tiene como objetivo estudiar el comportamiento del sistema frente a condiciones anormales que alteran su operación normal, como cortocircuitos o conexiones no deseadas. Estas fallas pueden ser provocadas por diversos factores, como descargas atmosféricas, fallos en el aislamiento, errores humanos o sobrecargas mecánicas. Este tipo de eventos generan corrientes excesivas que pueden comprometer la estabilidad del sistema, dañar los equipos y poner en peligro la seguridad de las personas [11].

El estudio de fallas se basa en la representación del sistema eléctrico mediante impedancias equivalentes y el uso de métodos analíticos, como las componentes simétricas. Este enfoque permite descomponer las variables de un sistema trifásico en tres sistemas independientes que representan las secuencias positivas, negativa y cero, lo que facilita el cálculo de corrientes y tensiones durante una falla. Por ejemplo, en una falla trifásica simétrica, únicamente la secuencia positiva está activa, mientras que, en fallas asimétricas, como las de fase a tierra o bifásicas, las secuencias negativa y cero también desempeñan un papel crucial.

Los resultados de este análisis son esenciales para el diseño de sistemas de protección, el ajuste de relés, la selección adecuada de interruptores y la evaluación de la estabilidad del sistema frente a contingencias. Además, garantizan que los equipos puedan resistir las corrientes de falla sin sufrir daños, reduciendo interrupciones y evitando que las fallas se propaguen por la red eléctrica [12].

2.5. CLASIFICACIÓN DE FALLAS TRIFÁSICAS, MONOFÁSICA A TIERRA, BIFÁSICA Y BIFÁSICA A TIERRA.

Las fallas en sistemas eléctricos de potencia se clasifican según las fases involucradas en la condición anómala, lo que permite entender su naturaleza y diseñar soluciones específicas para cada tipo. Las principales categorías son las fallas trifásicas, monofásica a tierra, bifásica y bifásica a tierra, cada una con características únicas y efectos distintos sobre el sistema [13].

La falla trifásica se considera la más severa en términos de análisis simétrico, ya que implica un cortocircuito directo entre las tres fases sin conexión a tierra. Aunque es menos frecuente en la práctica, su análisis es crucial porque produce las corrientes de cortocircuito más altas, definiendo las condiciones de diseño más exigentes para los equipos y los sistemas de protección [14].

La falla monofásica a tierra es una de las más comunes en los sistemas eléctricos. Ocurre cuando una de las fases del sistema entra en contacto con el suelo o con algún conductor que esté conectado a tierra.

Esta falla puede generar corrientes muy altas, lo que representa un riesgo considerable para los equipos eléctricos. Las corrientes elevadas pueden dañar transformadores, cables y otros componentes, e incluso afectar la continuidad del suministro eléctrico, interrumpiendo el servicio a los usuarios.

Este tipo de falla es especialmente preocupante porque, además de los posibles daños materiales, puede llevar a situaciones peligrosas si no se maneja adecuadamente. Por eso, es crucial contar con sistemas de protección que detecten rápidamente estas fallas y actúen para aislar la zona afectada, minimizando los riesgos tanto para las personas como para la infraestructura del sistema eléctrico.

La falla monofásica a tierra es la más habitual en los sistemas eléctricos y se produce cuando una fase entra en contacto con el suelo o con un conductor conectado a tierra. Este tipo de falla genera corrientes elevadas que pueden ocasionar daños en los equipos y poner en riesgo la continuidad del suministro eléctrico. [15]

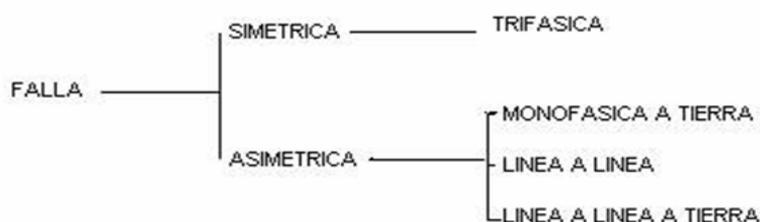


FIGURA 3. Tipos de cortocircuito

Fuentes: [patrioconcha.ubb.cl]

2.6. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO

El análisis mediante componentes simétricas es una técnica utilizada para abordar fallas asimétricas en sistemas trifásicos desequilibrados. Esta técnica simplifica el problema al dividirlo en tres sistemas equilibrados ficticios. En este enfoque, las tensiones y corrientes de las tres fases se expresan como la suma de tres grupos de fasores: los correspondientes a las secuencias positiva, negativa y cero

Estos desequilibrios pueden surgir por diversas razones, como problemas de carga o fallas en los componentes del sistema. Esta técnica permite simplificar el análisis, descomponiendo el problema complejo en tres sistemas equilibrados ficticios, facilitando así su comprensión y solución. A través de este enfoque, las tensiones y corrientes de las tres fases se representan como la suma de tres grupos de fasores: aquellos asociados con las secuencias positiva, negativa y cero [16].

De esta manera, es posible identificar y analizar más fácilmente los desequilibrios y sus efectos en el sistema, lo que resulta crucial para la correcta operación y mantenimiento de redes eléctricas. Estas fallas pueden causar distorsiones que afectan la eficiencia y estabilidad del sistema, por lo que es esencial comprender y corregir estos desequilibrios para evitar daños y optimizar el funcionamiento.

El análisis mediante componentes simétricas ayuda a resolver este desafío al descomponer un sistema trifásico desequilibrado en tres componentes equilibrados. Es decir, se separan las corrientes y tensiones en tres secuencias diferentes: positiva, negativa y cero. La secuencia positiva representa un sistema equilibrado que funciona normalmente; la secuencia negativa refleja los desequilibrios que causan las fallas en el sistema; y la secuencia cero está relacionada con problemas de tierra o defectos que afectan todas las fases de manera igual. Este enfoque simplifica la resolución de problemas complejos, permitiendo a los ingenieros identificar la naturaleza y la gravedad de las fallas, y tomar decisiones informadas para mantener la estabilidad y eficiencia del sistema eléctrico [17].

2.7. ANÁLISIS POR COMPONENTES SIMÉTRICAS

El análisis por componentes simétricas es una herramienta clave en ingeniería eléctrica para solucionar problemas en sistemas trifásicos desequilibrados. En un sistema trifásico ideal, las tres fases están balanceadas y se encuentran desfasadas 120 grados entre sí. Sin embargo, en la práctica, pueden surgir desequilibrios debido a fallas en una fase, cargas desbalanceadas o problemas en los componentes del sistema.

Para solucionar estos problemas, el análisis por componentes simétricas divide el sistema en tres partes equilibradas ficticias. Esto facilita entender y resolver los desequilibrios al separar las tensiones y corrientes de las tres fases en tres secuencias: positiva, negativa y cero. De esta manera, es más fácil identificar qué está causando el problema y encontrar una solución.

El análisis mediante componentes simétricas es una técnica utilizada para abordar fallas asimétricas en sistemas trifásicos desequilibrados. Esta técnica simplifica el problema al dividirlo en tres sistemas equilibrados ficticios. En este enfoque, las tensiones y corrientes de las tres fases se expresan como la suma de tres grupos de fasores: los correspondientes a las secuencias positiva, negativa y cero [18].

2.8. COMPARACIÓN CON MÉTODOS BASADOS EN IEC 60909-4

La comparación entre los métodos clásicos de análisis y los métodos basados en la norma IEC 60909-4 destaca diferencias clave en sus fundamentos, aplicaciones y resultados.

Los métodos clásicos de análisis se fundamentan en los principios básicos de los circuitos eléctricos y proporcionan una visión detallada del comportamiento del sistema eléctrico.

Estos métodos incluyen modelos específicos para cada componente del sistema, como los generadores, los transformadores y las líneas de transmisión. Gracias a este enfoque detallado, los métodos clásicos resultan especialmente valiosos en estudios complejos, ya que permiten una comprensión exhaustiva de los fenómenos dinámicos y transitorios que se presentan en el sistema eléctrico [19].

2.9. MODELADO DE TRANSFORMADORES

El análisis del modelado de transformadores en sistemas eléctricos resulta fundamental para comprender su comportamiento y evaluar su impacto en el funcionamiento de la red. Estos dispositivos permiten la transferencia de energía eléctrica entre circuitos mediante un enlace magnético, ajustando los niveles de tensión y corriente de acuerdo con las demandas del sistema. Uno de los enfoques más utilizados para el análisis en sistemas de potencia es el modelo de circuito equivalente [20].

Este método representa al transformador a través de parámetros eléctricos clave, como la impedancia de los devanados, las pérdidas asociadas al núcleo y las corrientes de magnetización. La impedancia del transformador, que generalmente se describe como una combinación de resistencia y reactancia, juega un papel esencial en la determinación tanto del flujo de potencia como de las corrientes durante fallas eléctricas.

El modelado adecuado de los transformadores es esencial para diseñar sistemas de protección, evaluar la estabilidad del sistema y garantizar la operación eficiente de la red. Representación en secuencias positiva, negativa y cero [21].

El objetivo es crear una representación del transformador que permita analizar su desempeño y comportamiento, para poder diseñar y simular redes eléctricas de manera eficiente. Este modelo ayuda a predecir cómo el transformador va a manejar la energía entre los circuitos de baja y alta tensión.

La representación en secuencias positiva, negativa y cero es una técnica fundamental para analizar sistemas eléctricos trifásicos bajo condiciones de desequilibrio. Esta metodología permite descomponer un sistema trifásico en tres sistemas ficticios equilibrados, simplificando el análisis de fenómenos como fallas asimétricas o desequilibrios en redes eléctricas [22].

✓ **Secuencia positiva:**

Mantiene tres fasores iguales tanto en magnitud, desplazados 120 grados uno del otro, y están seguidos en la misma secuencia tanto en su fase y los fasores iniciales.

✓ **Secuencia negativa:**

Tres fasores iguales en magnitud, desplazados 120 grados uno del otro, por lo cual mantienen una secuencia opuesta a los fasores iniciales.

✓ **Secuencia cero:**

Formado por tres fasores iguales en magnitud y desplazamiento cero entre fases.

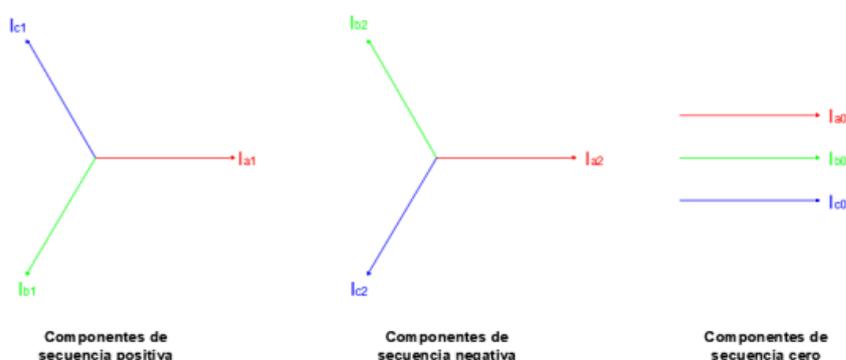


FIGURA 4. Componentes simétricos

Fuentes [Escuela Politécnica Salesiana]

2.10. SOFTWARE DE SIMULACIÓN PARA ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO

El análisis de cortocircuitos en sistemas eléctricos se lleva a cabo con el apoyo de herramientas de simulación especializadas, las cuales permiten modelar la red eléctrica, determinar las corrientes de falla y evaluar el comportamiento del sistema frente a diversos escenarios operativos. Estas herramientas resultan fundamentales para el diseño y la implementación de sistemas de protección, el dimensionamiento adecuado de los equipos eléctricos y el análisis de la estabilidad de la red [23].

El empleo del software ETAP para simular el análisis de cortocircuito es crucial para garantizar la seguridad y el rendimiento de los sistemas eléctricos de potencia. Esta herramienta permite a los ingenieros modelar y examinar cómo reaccionará el sistema ante fallas, asegurando que los dispositivos de protección estén correctamente dimensionados para reducir los riesgos derivados de las fallas eléctricas. Además, ETAP se ajusta a las normativas internacionales, facilitando el diseño y la operación de redes eléctricas más seguras, fiables y eficientes [24].

2.11. USO DE ETAP PARA SIMULACIONES

El software ETAP se destaca como una herramienta de simulación eléctrica gracias a su capacidad para modelar con alta precisión sistemas eléctricos complejos y analizar su comportamiento bajo diversas condiciones operativas. Su interfaz gráfica intuitiva permite representar detalladamente sistemas eléctricos, integrando componentes como generadores, transformadores, líneas de transmisión y cargas, configurados con sus parámetros específicos.

En el ámbito del análisis de cortocircuitos, ETAP cuenta con herramientas avanzadas que realizan cálculos conforme a normativas internacionales, tales como la IEC 60909-4 y ANSI/IEEE. Estas funcionalidades incluyen el estudio de fallas simétricas y asimétricas, así como el cálculo de corrientes de falla iniciales, transitorias y en estado estacionario. Adicionalmente, el software permite simular el comportamiento dinámico del sistema, evaluando la respuesta de los diferentes componentes antes, durante y después de una falla [25].

Una de las principales ventajas de ETAP es su capacidad para realizar análisis de coordinación de protecciones. Esto facilita el ajuste de dispositivos como relés e interruptores, garantizando una detección y aislamiento eficiente de las fallas, reduciendo al mínimo el impacto en el resto del sistema. Además, el software genera reportes detallados que ayudan en la interpretación de resultados y en la toma de decisiones informadas [26].



FIGURA 5. Pantalla de inicio ETAP

Fuentes: [https://etap.com/es/product-releases/etap_2-release]

2.11.1. USO DE ETAP PARA SIMULACIONES

El estudio de fallas en sistemas eléctricos es clave para garantizar la seguridad y estabilidad de la red. En esta simulación, se analizarán fallas simétricas mediante el software ETAP, con el propósito de comprender su efecto en la operación del sistema y asegurar que las protecciones funcionen de manera adecuada [27].

Se creará un modelo de un sistema de potencia en ETAP, similar a los que se usan en la realidad, incluyendo:

- ✓ **Generadores**, que producen la energía eléctrica.
- ✓ **Transformadores**, que regulan los niveles de tensión para su correcto funcionamiento.
- ✓ **Líneas de transmisión**, encargadas de llevar la electricidad a distintos puntos de la red.
- ✓ **Cargas eléctricas**, que representan el consumo de energía en el sistema.

Para evaluar cómo responde el sistema ante fallas, se simulará un cortocircuito trifásico a tierra en un punto estratégico. Esto permitirá analizar su impacto y verificar si la red está preparada para manejar este tipo de situaciones.

En esta simulación, se recreará un sistema de potencia típico con todos sus componentes esenciales: generadores, transformadores, líneas de transmisión y cargas eléctricas. Luego, se provocará una falla trifásica a tierra en un punto estratégico para observar cómo responde el sistema y evaluar la efectividad de sus protecciones [28].

Este análisis es clave para mejorar la coordinación de los dispositivos de protección y garantizar que, ante cualquier eventualidad, la red pueda recuperarse rápidamente, evitando daños en los equipos y reduciendo el riesgo de cortes en el suministro eléctrico.

Una vez que el modelo esté listo, se simulará una falla trifásica a tierra en un punto clave del sistema. Esto permitirá observar cómo afecta la estabilidad de la red y evaluar si los dispositivos de protección responden de manera adecuada.

El objetivo de este análisis es asegurarse de que las protecciones estén bien coordinadas para que, en caso de una falla real, el sistema pueda recuperarse rápidamente. Esto no solo ayuda a prevenir daños en los equipos, sino que también reduce el riesgo de cortes de energía y mejora la continuidad del servicio eléctrico [29].

Este tipo de estudios es esencial en el diseño y operación de redes eléctricas modernas, ya que permite hacerlas más confiables, mejorar su capacidad de respuesta ante fallas y garantizar un suministro de energía más seguro y eficiente para todos [30].

3. CAPÍTULO III

3.1. METODOLOGÍA

La metodología que se utilizará combinará el enfoque cualitativo y cuantitativo. Primero, se estudiará la normativa IEC-60909-4 aplicando modelos de componentes simétricos en sistemas de potencia y evaluando su uso en ETAP con ejemplos prácticos. Luego, se simularán cortocircuitos en ETAP para obtener las corrientes de falla y se compararán los resultados con los valores teóricos establecidos en la normativa, buscando así mayor precisión en los resultados [31].

3.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Calcular las corrientes de cortocircuito es clave para asegurar que un sistema eléctrico funcione de manera segura, ya que estas corrientes, mucho más altas que las normales, pueden causar daños graves a los equipos y poner en peligro el sistema. Para hacer este cálculo de manera adecuada, es necesario seguir la normativa IEC 60909-4, que establece cómo deben calcularse las corrientes de cortocircuito, lo que ayuda a que los sistemas de protección estén bien diseñados [32].

Un método útil para este análisis es el de componentes simétricas, que descompone las corrientes de un sistema desequilibrado en tres partes: positiva, negativa y cero. Cada una de estas componentes muestra un aspecto diferente de lo que sucede en el sistema cuando hay un cortocircuito:

Secuencia positiva: Es la corriente que circula en condiciones normales, cuando el sistema está equilibrado.

Secuencia negativa: Surge cuando hay un desequilibrio, como cuando se produce un cortocircuito entre fases, y es la que más daño puede causar a los equipos.

Secuencia cero: Se relaciona con las corrientes que pasan por el neutro o por las fases cuando hay una falla entre fase y tierra.

Al entender cómo estas tres componentes afectan al sistema, podemos identificar los posibles problemas y mejorar la protección de los equipos. Siguiendo la normativa IEC 60909-4, nos aseguramos de que los sistemas de protección sean capaces de soportar estas corrientes sin comprometer la seguridad ni dañar los equipos o la infraestructura del sistema eléctrico [33].

3.3. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA ETAP

Diseñar el ejercicio en ETAP con sus componentes que serían las barras, transformadores, fuente y el cortocircuito que vamos a analizar; debemos mantener los valores tanto de voltajes y potencia que el ejercicio nos brinda. Ingresar todos los parámetros eléctricos necesarios en cada componente: impedancias, potencias nominales, tensiones y parámetros de generación.

3.4. CONFIGURACIÓN EN PARÁMETROS DE CORTOCIRCUITO (IEC 6909-4)

- a) Con la ayuda del software ETAP procederemos a seleccionar el módulo de cortocircuito bajo la normativa IEC 60909-4.
- b) Establecer el nivel de tensión base y los factores de corrección de impedancias según la normativa.
- c) Definir las condiciones iniciales, como si se trata de un sistema en operación o en estado de mantenimiento.
- d) Configurar los tipos de falla a analizar, que generalmente incluyen:
 - ✓ Falla trifásica
 - ✓ Falla bifásica
 - ✓ Falla monofásica a tierra
 - ✓ Falla bifásica a tierra

3.5. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE COMPONENTES SIMÉTRICAS

- a) El método de componentes simétricas consiste en descomponer la red en tres secuencias de componentes: positiva, negativa y cero.
- b) ETAP nos ayudara de forma automática con el método de componentes simétricas según los datos que hayamos ingresado y la normativa seleccionada que en nuestro caso es la IEC 60909-4 para poder calcular la impedancia en cada secuencia que se ha descrito.
- c) La normativa IEC 60909-4 detalla cómo aplicar las relaciones de secuencia de cada componente, y ETAP lo utiliza para calcular las corrientes de cortocircuito en cada tipo de falla.

3.6. SIMULACIÓN DE ESCENARIOS DE CORTOCIRCUITO

- a) Procedemos a realizar las simulaciones en ETAP con cada tipo de falla y en cada punto crítico de la red.
- b) Registramos los resultados de las corrientes de cortocircuito tanto simétricas y asimétricas en función del tiempo, incluyendo valores instantáneos y de estado estable.
- c) ETAP nos permite ver los valores de cada componente (generador, transformador, etc.) en cada tipo de falla, de igual manera el flujo de corriente en cada fase de la que estaremos analizando.

3.7. JUSTIFICACIÓN Y DETALLES ADICIONALES

3.7.1. COMPLEJIDAD DE LOS CÁLCULOS

Los cálculos para determinar las corrientes de cortocircuito bajo condiciones asimétricas son altamente complejos y requieren un enfoque detallado para cada tipo de falla (monofásica, bifásica, trifásica). Esto implica no solo la descomposición de las corrientes en componentes simétricas, sino también la evaluación de la influencia de las impedancias de los componentes del sistema [34].

Se enfoca en analizar las fallas dentro de un sistema de potencia de manera detallada. Este método descompone las corrientes de cortocircuito en tres componentes: positiva, negativa y cero, lo que permite estudiar cada tipo de fallo con mayor precisión. Sin embargo, para aplicar este enfoque correctamente, es necesario entender bien cómo interactúan las corrientes y las impedancias de los componentes del sistema en cada tipo de fallo.

Además, este análisis requiere tener en cuenta varias variables, como las características de los equipos eléctricos, las condiciones del sistema en el momento de la falla y la configuración específica de las redes. No solo se debe reflejar cómo está funcionando el sistema en ese momento, sino también cómo pueden cambiar las condiciones con el tiempo después de un cortocircuito [35].

Dado que este método involucra distintas partes del sistema, como generadores, transformadores y cables, es fundamental hacer los ajustes adecuados para cada componente y fase. Aunque el método es bastante útil para analizar la estabilidad y el comportamiento del sistema durante fallas, aplicar las fórmulas de manera correcta y comprender bien los resultados requiere atención a los detalles para asegurar que los análisis sean precisos y realmente útiles.

3.7.2. DIVERSIDAD DE CONDICIONES

Los sistemas de potencia varían significativamente en términos de topología, componentes involucrados, configuraciones de protección y condiciones operativas. Esta variabilidad exige que los modelos y simulaciones consideren un amplio rango de posibles escenarios de falla.

La diversidad de condiciones en los componentes simétricos de potencia se refiere a las diferencias que pueden surgir en los comportamientos y características de los componentes dentro de un sistema de potencia, los cuales, en un principio, deberían ser idénticos o tener un funcionamiento equilibrado. Estos componentes incluyen generadores, transformadores, cables, y otros equipos esenciales para la transmisión y distribución de energía eléctrica [36].

En la teoría, estos componentes están diseñados para ser simétricos, de modo que sus condiciones operativas sean similares y su rendimiento, uniforme. Sin embargo, en la práctica, diversos factores pueden influir en su comportamiento, generando variaciones en su desempeño. Algunos de estos factores incluyen cargas desbalanceadas (cuando la distribución de la carga entre las fases no es uniforme), variaciones en la temperatura (que afectan la resistencia y eficiencia de los materiales), o deficiencias en el mantenimiento (que pueden provocar el desgaste o deterioro de los equipos) [37].

Estas diferencias pueden generar desbalance dentro del sistema de potencia, afectando tanto su rendimiento como su eficiencia. El desbalance puede resultar en pérdidas de energía, sobrecalentamiento, o incluso en fallas a largo plazo en los equipos. Además, un sistema desbalanceado puede generar distorsiones en la calidad de la energía, lo cual afecta la estabilidad y confiabilidad de todo el sistema eléctrico [38].

3.7.3. HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN Y SU COMPLEJIDAD

Aunque programas como ETAP permiten la simulación de cortocircuitos con gran precisión, estos requieren una correcta parametrización de los sistemas y una interpretación adecuada de los resultados. La simulación de fallas no solo debe considerar las características técnicas de los equipos, sino también la dinámica de la red y la interacción entre los diferentes componentes, lo que añade un nivel de complejidad al análisis [39].

3.7.4. MODELADO AVANZADO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS

ETAP permite crear modelos detallados y complejos de sistemas eléctricos de potencia, lo que requiere que los usuarios tengan la capacidad de representar con precisión todos los elementos del sistema, como generadores, transformadores, líneas de transmisión y equipos de protección. Este proceso demanda un conocimiento profundo sobre cómo funciona el sistema y las características de cada componente [40].

a) Interacción entre componentes

El software simula cómo interactúan los diferentes elementos de un sistema eléctrico tanto en condiciones normales como durante fallas. Esto incluye la dinámica de transformadores, generadores, líneas de transmisión y sistemas de protección, lo cual puede ser bastante complejo cuando se trata de redes grandes e interconectadas [41].

b) Complejidad en los cálculos de cortocircuito

La simulación de cortocircuitos en ETAP requiere cálculos precisos de las corrientes de falla, considerando factores como la impedancia del sistema, la topología de la red, las características de los dispositivos de protección y las condiciones operativas. Además, se debe tener en cuenta la posibilidad de fallas asimétricas y la secuencia de componentes, lo que añade un nivel considerable de complejidad al proceso de simulación [42].

c) Requisitos de datos específicos

Para obtener resultados precisos en las simulaciones, ETAP necesita una gran cantidad de datos específicos sobre el sistema eléctrico, como la impedancia de los componentes, los valores nominales de tensión y potencia, y las curvas de protección de los dispositivos. Ingresar esta información de manera correcta es fundamental para lograr simulaciones fiables [43].

d) Interfaz compleja para nuevos usuarios

Aunque la interfaz de ETAP es relativamente intuitiva, la amplia variedad de funcionalidades y la capacidad de realizar simulaciones avanzadas pueden resultar abrumadoras para los usuarios sin experiencia previa. Los ingenieros deben familiarizarse con los distintos módulos, herramientas y opciones que el software ofrece para aprovechar todo su potencial [44].

e) Requisitos de potencia computacional

Debido a la complejidad de las simulaciones, especialmente en sistemas grandes o al realizar simulaciones detalladas de contingencias, ETAP puede requerir una considerable capacidad de procesamiento. Los ingenieros deben contar con el equipo adecuado para poder ejecutar las simulaciones de forma eficiente [45].

3.8. CÁLCULOS SEGÚN LA NORMATIVA IEC 60909-4

Se determinarán los distintos tipos de fallas en el sistema de potencia en estudio mediante el método de componentes simétricos. Los cálculos se realizarán conforme a la normativa IEC 60909-4, garantizando el cumplimiento de los requisitos establecidos y la precisión en el análisis de las condiciones de cortocircuito.

La IEC 60909-4 no solo define cómo calcular las corrientes de cortocircuito en diferentes tipos de fallas (monofásicas, bifásicas y trifásicas), sino que también ofrece una guía detallada para analizar tanto las características estáticas como dinámicas de los componentes del sistema. Gracias a esta norma, se garantiza que el sistema eléctrico pueda gestionar las fallas de manera segura, protegiendo los equipos y asegurando que el servicio continúe sin interrupciones. Además, cumple con los estándares internacionales de seguridad y fiabilidad, lo que es clave para evitar riesgos de sobrecarga o fallas graves durante los cortocircuitos [46].

El análisis de cortocircuito es esencial en la planificación y protección de los sistemas de potencia, ya que permite calcular las corrientes que podrían generarse en caso de una falla. Para llevar a cabo este análisis, se emplea el método de componentes simétricas, que divide las corrientes y tensiones en las distintas secuencias de fase (positiva, negativa y cero) de un sistema eléctrico. Este enfoque es particularmente importante en sistemas que incluyen transformadores en paralelo, ya que estos equipos pueden tener un impacto considerable en el comportamiento del sistema durante un cortocircuito [47].

3.8.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA PLANTEADO EN LA NORMATIVA IEC 60909-4

Se dispone de un sistema de baja tensión con $U_n = 400 \text{ V}$ y $f = 50 \text{ Hz}$, como se muestra en la figura 6. Se deben determinar las corrientes de cortocircuito I e i en los puntos de cortocircuito F1 a F3. Se puede suponer que los cortocircuitos en los puntos F1 a F13 son cortocircuitos alejados del generador.

Los datos del equipo para los sistemas de secuencia positiva, secuencia negativa y secuencia cero se presenta:

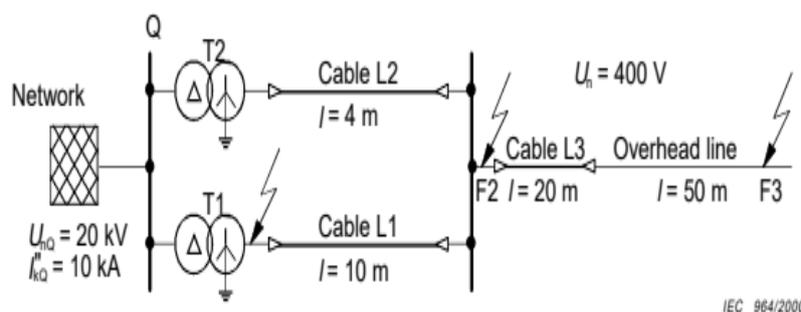


FIGURA 6. Sistema de baja tensión

Fuentes: [Autores]

3.8.1.1. DETERMINACIÓN DE LAS IMPEDANCIAS DE SECUENCIA POSITIVA

Alimentador de red

$$\frac{C_Q U_{nQ}}{\sqrt{3} I_1^2 kQ} \times \frac{1}{t^2 r} = \frac{1,1 \times 20 \text{kv}}{\sqrt{3} 10 \text{kA}} \left(\frac{0,41 \text{kV}}{20 \text{kv}} \right)^2 = 0,534 \Omega \quad (1)$$

$$X_{QT} = 0,995 \quad Z_{QT} = 0,531 \text{m}\Omega \quad \} \quad Z_{QT} = (0,053 + j 0,531) \text{m}\Omega$$

$$R_{QT} = 0,1 X_{QT} = 0,531 \text{m}\Omega$$

Impedancias de secuencia positiva y secuencia cero ($Z_2 = Z_1$)

Equipment	Data of equipment	Equations (IEC 60909-0)	$Z_{(1)} = Z_{(2)}$	$Z_{(0)}$
			mΩ	mΩ
Network feeder Q	$U_{nQ} = 20 \text{ kV}; I_{kQ}'' = 10 \text{ kA}$ $c_Q = c_{Qmax} = 1,1$ (table 1 of IEC 60909-0) $R_Q = 0,1 X_Q; X_Q = 0,995 Z_Q$	(6)	$Z_{QT} = 0,053 + j 0,531$	-
Transformers T1 (Dyn 5)	$S_{rT} = 630 \text{ kVA}; U_{rTHV} = 20 \text{ kV}$ $U_{rTLV} = 410 \text{ V}; u_{kr} = 4 \%$ $P_{krT} = 6,5 \text{ kW}; R_{(0)T}/R_T = 1,0;$ $X_{(0)T}/X_T = 0,95.$	(7) to (9) K_T from (12a)	$Z_{T1K} = 2,68 + j 10,054$	$Z_{(0)T1K} = 2,68 + j 9,551$
T2 (Dyn 5)	$S_{rT} = 400 \text{ kVA}; U_{rTHV} = 20 \text{ kV}$ $U_{rTLV} = 410 \text{ V}; u_{kr} = 4 \%$ $P_{krT} = 4,6 \text{ kW}; R_{(0)T}/R_T = 1,0;$ $X_{(0)T}/X_T = 0,95.$		$Z_{T2K} = 4,712 + j 15,698$	$Z_{(0)T2K} = 4,712 + j 14,913$
Lines L1	Two parallel four-core cables; $\ell = 10 \text{ m}; 4 \times 240 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ $Z'_L = (0,077 + j 0,079) \Omega/\text{km}$ $R_{(0)L} = 3,7 R_L; X_{(0)L} = 1,81 X_L.$	Data and ratios $\frac{R_{(0)L}}{R_L}; \frac{X_{(0)L}}{X_L}$ given by the manufacturer	$Z_{L1} = 0,385 + j 0,395$	$Z_{(0)L1} = 1,425 + j 0,715$
L2	Two parallel three-core cables; $\ell = 4 \text{ m}; 3 \times 185 \text{ mm}^2 \text{ Al};$ $Z'_L = (0,208 + j 0,068) \Omega/\text{km}$ $R_{(0)L} = 4,23 R_L; X_{(0)L} = 1,21 X_L.$		$Z_{L2} = 0,416 + j 0,136$	$Z_{(0)L2} = 1,760 + j 0,165$
L3	Four-core cable $\ell = 20 \text{ m}; 4 \times 70 \text{ mm}^2 \text{ Cu};$ $Z'_L = (0,271 + j 0,087) \Omega/\text{km}$ $R_{(0)L} = 3 R_L; X_{(0)L} = 4,46 X_L.$		$Z_{L3} = 5,420 + j 1,740$	$Z_{(0)L3} = 16,260 + j 7,760$
L4	Overhead line; $\ell = 50 \text{ m};$ $q_n = 50 \text{ mm}^2 \text{ Cu}; d = 0,4 \text{ m};$ $Z'_L = (0,3704 + j 0,297) \Omega/\text{km}$ $R_{(0)L} = 2 R_L; X_{(0)L} = 3 X_L.$		(14), (15)	$Z_{L4} = 18,50 + j 14,85$

Tabla 1. Datos de equipos eléctrico

3.8.2. TRANSFORMADORES

De acuerdo con las ecuaciones, se obtiene:

a) Transformador T1

$$z_{T1} = \frac{u_{krT1}}{100\%} \times \frac{U^2 r_{T1LV}}{S_{rT1}} = \frac{4\%}{100\%} \times \frac{(410v)^2}{630kvA} = 10,673 \text{ m}\Omega \quad (2)$$

$$R_{T1} = \frac{P_{krT1}}{3I_{rT1LV}^2} = \frac{P_{kTI} \times U^2 r_{T1LV}}{S^2 r_{TI}} = \frac{6,5 \text{ kW}(410v)^2}{(630kvA)^2} = 2,753 \text{ m}\Omega \quad (3)$$

$$u_{Rr} = \frac{P_{kTI}}{S_{rTI}} \times 100\% = 1,032\% \cup x_r = \sqrt{U^2 k_r - U_{Rr}^2} = 3,865\% \quad (4)$$

$$x_T = \sqrt{Z^2 T1 - R^2 T1} = 10,31 \text{ m}\Omega$$

$$z_{T1} = (2,753 + j10,312) \text{ m}\Omega$$

$$k_{T1} = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,6x_{T1}} = 0,95 \frac{1,05 \cdot}{1 + 0,6 \times 0,03865} = 0,975$$

$$z_{T1} = (2,684 + j 10,054) \text{ m}\Omega$$

b) Transformador T2

$$z_{T2} = \frac{4\%}{100\%} \times \frac{(410v)^2}{400KVA} = 16,810 \text{ m}\Omega$$

$$R_{T2} = \frac{4,6 \text{ kw} \times (410v)^2}{(400KVA)^2} = 4,833 \text{ m}\Omega$$

$$z_{T2} = (4,833 + j 16,100) \text{ m}\Omega$$

$$z_{T2} = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,6 X_{T2}} = 0,95 \frac{1,05}{1 + 0,6 \times 0,03831} = 0,975$$

$$z_{T2} = z_{T2} k_{T2} (4,712 + j 15,698) \text{ m}\Omega$$

3.8.3. LÍNEAS (CABLES Y LÍNEA AÉREA)

a) Línea L1 (dos cables paralelos):

$$z_{L1} = 0,5 (0,077 + j 0,079) \frac{\Omega}{\text{km}} \times 10\text{m} = (0,385 + j 0,39) \text{ m}\Omega \quad (5)$$

b) Línea L2 (dos cables paralelos)

$$z_{L2} = 0,5 (0,208 + j 0,068) \frac{\Omega}{\text{km}} \times 4\text{m} = (0,416 + j 0,136) \text{ m}\Omega \quad (6)$$

c) Línea L3 (cable):

$$R_{L4} = \frac{p}{q_n} = \frac{\Omega\text{mm}^2}{54\text{m} \times 50\text{mm}^2} = 0,3704 \frac{\Omega}{\text{m}} \quad r = 1,14 \sqrt{\frac{q_n}{\pi}} = 4,55 \text{ mm} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} X_{L4} &= 2 \Pi f = \frac{\mu_0}{2\Pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d}{r} \right) = 2\Pi \times 50 \text{ s}^{-1} \frac{4\Pi \times 10^{-4} \text{ VS}}{2\Pi\text{A km}} \\ &= \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{0,4}{0,455 \times 10^{-2} \text{ m}} \right) = 0,297 \frac{\Omega}{\text{km}} \end{aligned}$$

$$Z_{L4} = (R_{L4} + j X_{L4}) \frac{\Omega}{\text{km}} \times 50 \text{ m} = (18,50 + j 14,85) \text{ m}\Omega$$

3.9. DETERMINACIÓN DE LAS IMPEDANCIAS DE SECUENCIA CERO

3.9.1. TRANSFORMADORES

Para los transformadores T1 y T2 con el grupo vectorial Dyn5 las siguientes relaciones son dadas por los fabricantes:

$$R_{(0)T} = (R_{T1+0,95 X_{T1}}) = 0,95 X_T$$

Junto a los factores de corrección de impedancia KT del 3.2.2, se encuentran las siguientes impedancias de secuencia cero de los transformadores:

$$X_{(0)T1K} = (R_{T1+0,95 j 0,95 X_{T1}}) K_{T1} = (2,684 + j 9,551) \text{ m}\Omega$$

$$X_{(0)T2K} = (R_{T2+0,95 j 0,95 X_{T2}}) K_{T2} = (4,712 + j 14,913) \text{ m}\Omega$$

3.9.2. LÍNEAS (CABLES Y LÍNEAS AÉREAS)

a) Línea L1:

$$R_{(0)L} = 3,7 R_L ; X_{(0)L} = 1,81 X_L \quad \text{Con circuito de retorno por el cuarto conductor y conductor circundante:}$$

$$R_{(0)L} = (3,7 R_L ; X_{(0)L} = 1,81 X_L) = (1,425 + j 0,715) \text{ m}\Omega$$

b) Línea L2:

$$R_{(0)L} = 4,23 R_L ; X_{(0)L} = 1,21 X_L \quad \text{con retorno}$$

$$Z_{(0)L2} = (4,23 R_{L2} + j 1,21 X_{L2}) = (1,760 + j 0,165) \text{ m}\Omega$$

c) Línea L3:

$$R_{(0)L} = 3 R_L ; X_{(0)L} = 4,46 X_L \quad \text{Con circuito de retorno por el cuarto conductor, funda y tierra:}$$

$$Z_{(0)L3} = (3 R_{L3} + j 4,46 X_{L3}) = (16,260 + j 7,760) \text{ m}\Omega$$

d) Línea 4:

Línea aérea con $R_{(0)L} = 2 R_L$; $X_{(0)L} = 3 X_L$ al calcular las corrientes máximas de cortocircuito:

$$Z_{(0)L4} = (2 R_{L4} + j 3 X_{L4}) = (37,04 + j 44,55) \text{ m}\Omega$$

3.10. CÁLCULO DE I''_k Y i_p PARA CORTOCIRCUITOS TRIFÁSICOS

3.10.1. UBICACIÓN DEL CORTOCIRCUITO F1

3.10.2. PARA EL SISTEMA DE SECUENCIA POSITIVA, SE ENCUENTRA LA SIGUIENTE IMPEDANCIA DE CORTOCIRCUITO EN LA UBICACIÓN F1:

$$z_k = z_{Qt} - \frac{(Z_{T2K} + Z_{L10} + Z_{L3})}{Z_{T2K} + Z_{L10} + Z_{L3}} = (1,881 + j 6,746) \text{ m}\Omega$$

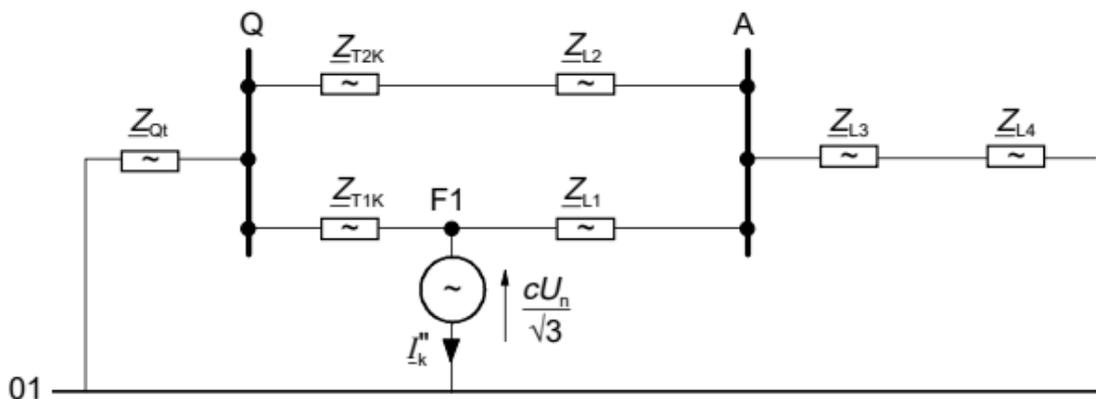


FIGURA 7. Sistema de secuencia positiva

Fuentes: [Autores]

Corriente máxima inicial de cortocircuito trifásico con $C = C_{max}$

$$I = \frac{CU_n}{\sqrt{3}} = \frac{105 \times 400}{\sqrt{3} \times 7,003 \text{ m}\Omega} = 34,64 \text{ Ka}$$

NOTA:

La diferencia con el resultado de la norma IEC 60909 se debe principalmente a la tensión nominal de 400 v. La diferencia por la introducción de K_T es de solo el 0,25 %

Debido a que el cálculo se realiza con cantidades complejas, es fácil encontrar x con el método (por) usando la radio r/x en la ubicación del cortocircuito o para una mayor precisión con el método (c)

3.10.3. MÉTODO (B): RELACIÓN DE IMPEDANCIA EN LA UBICACIÓN DEL CORTOCIRCUITO

$$\frac{R}{X} = \frac{R_K}{X_K} = 0,279$$

$$K_b = 1,02 + 0,98 e^{-3 R/X} = 1,445$$

Como la relación R/X de $Z_{T2K} + Z_{L1} + Z_{L2}$ es mayor que 0,3, es necesario introducir el factor 1,15 en el método (b)

$$i_p = 1,15 k(b)\sqrt{2} I_K = 1,15 \times 1,445 \times \sqrt{2} \times 34,62 \text{ KA} = 81,36 \text{ KA}$$

3.10.4. MÉTODO (C): FRECUENCIA EQUIVALENTE CON R/X DE LA EDUCACIÓN.

La impedancia $Z_C = R_C + j X_C$ se calcula según el método (c) con la frecuencia equivalente después de $f_c = 20 \text{ Hz}$. El procedimiento de cálculo es similar al cálculo de Z_K pero utilizando las siguientes magnitudes de 20 Hz:

$$Z_{Qtc} = (0,053 + j 0,212) \text{ m}\Omega \quad (8)$$

$$Z_{T1Kc} = (2,684 + j 4,0212) \text{ m}\Omega ; Z_{T2Kc} = (4,712 + j 6,279) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{L1c} = (0,385 + j 0,158) \text{ m}\Omega ; Z_{L2c} = (0,416 + j 0,054) \text{ m}\Omega$$

$$Z_C = Z_{Qtc} + \frac{Z_{T1Kc} (Z_{T2Kc} + Z_{L1c} + Z_{L2c})}{Z_{T2Kc} Z_{T2Kc} + Z_{L1c} + Z_{L2c}} \quad (9)$$

$$= (1,8738 + j2,7076)\text{m}\Omega$$

$$\frac{R}{X} \frac{R_C}{X_C} \times \frac{f_c}{f} \frac{1,874 \text{ m}\Omega}{2,707 \text{ m}\Omega} \times \frac{20 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 0,277$$

$$K_{(C)} = 1,02 + 0,98 e^{-3 R/X} = 1,447$$

$$i_{\text{pico}} = K_{(C)} \sqrt{2} I_K = 1,447 \times \sqrt{2} \times 34,62 = 70,85 \text{ K}$$

NOTA:

El método (a) no es adecuado en este caso. Este método debe utilizarse solo como una primera aproximación si el cálculo de la corriente de cortocircuito se lleva a cabo solo con reactancias. El método (a) conduciría a $K_a = 1,46$, tomando las relaciones más pequeñas R/X donde Z_{T1K} de $Z_{T1K1} + Z_{T2K} + Z_{L1}$. Si el alimentador de red con $R_{Qt}/X_{Qt} = 0,1$ también se trata como una rama de la red, entonces se encontraría un factor $K_a = 1,75$ y una corriente de cortocircuito $I_{p(a)} = 85,5 \text{ KA}$

3.11. UBICACIÓN DEL CORTOCIRCUITO F2

$$Z_C = Z_{QtC} + \frac{Z_{T1Kc} (Z_{T2Kc} + Z_{L1c} + Z_{L2c})}{Z_{T2Kc} Z_{T2Kc} + Z_{L1c} + Z_{L2c}} = (1,977 + j 6,827) \text{ m}\Omega$$

$$I_K + \frac{c^U}{\sqrt{3} Z_K} = \frac{1,05 \times 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 7,0107 \text{ m}\Omega} = 34,12 \text{ KA}$$

3.11.1. EL CÁLCULO CON EL MÉTODO (C)

$$Z_c = (1,976 + j 2,733) \text{ m}\Omega \tag{10}$$

$$\frac{R}{X} = \frac{R_C}{X_C} = \frac{f_c}{f} = \frac{1,976 \text{ m}\Omega}{2,733 \text{ m}\Omega} \times \frac{20 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 0,289$$

$$I_{p(c)} = K_c = \sqrt{2} I_K = 1,432 \times \sqrt{2} \times 34,12 \text{ KA} = 69,10 \text{ KA}$$

NOTA:

La razón decisiva R/X está determinada principalmente por las de las dos ramas $Z_{T1K} + Z_{L1}$ y Z_{L2} con $R/X = 0,294$ y $0,324$. Estas dos razones son similares a $\frac{R_K}{X_K} = 0,29$, lo que lleva a $= 1,431$. El cálculo con el método (b) pero sin el factor adicional $1,15$ llevaría a:

$$Z_k = Z_{Qt} + \frac{(Z_{T1K} + Z_{L1})(Z_{T2K} + Z_{L2})}{Z_{T1K} + Z_{T2K} + Z_{L1} + Z_{L2}} + Z_{L3} + Z_{L4} = (25,897 + j 23,417) \text{ m}\Omega$$

$$I_k^* = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_k} = \frac{1,05 \times 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 34,914 \text{ m}\Omega} = 6,95 \text{ kA}$$

$$Z_c = Z_{F2c} + Z_{L3c} + Z_{L4c} = (1,976 + j 2,733) \text{ m}\Omega + (23,920 + j 6,636) \text{ m}\Omega$$

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \times \frac{f_c}{f} = \frac{25,896 \text{ m}\Omega}{9,369 \text{ m}\Omega} \times \frac{20 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 1,106$$

$$i_{p(c)} = \kappa_c \sqrt{2} I_k^* = 1,056 \times \sqrt{2} \times 6,95 \text{ kA} = 10,38 \text{ kA}$$

3.12. CÁLCULO DE I_{K1} PARA i_{p1} CORTOCIRCUITOS DE LÍNEA A TIERRA

3.12.1. UBICACIÓN DEL CORTOCIRCUITO F1

El circuito equivalente en el sistema de secuencia positiva, secuencia negativa y secuencia cero de la red de la figura 6 con un cortocircuito de línea a tierra en F1.

$$Z_{(1)} = Z_{(2)} = Z_k = (1,881 + j 6,764) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{(0)} = \frac{Z_{(0)T1K}(Z_{(0)T2K} + Z_{(0)L1} + Z_{(0)L2})}{Z_{(0)T1K} + Z_{(0)T2K} + Z_{(0)L1} + Z_{(0)L2}} = (2,140 + j 6,009) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{(1)} + Z_{(2)} + Z_{(0)} = 2 Z_{(1)} + Z_{(0)} = (5,902 + j 19,537) \text{ m}\Omega$$

La corriente de cortocircuito inicial de línea a tierra.

$$I_{k1}^* = \frac{\sqrt{3} c U_n}{|2Z_{(1)} + Z_{(0)}|} = \frac{\sqrt{3} \times 1,05 \times 400 \text{ V}}{20,409 \text{ m}\Omega} = 35,64 \text{ kA}$$

La corriente máxima de cortocircuito i_{p1} se calcula con el factor $\kappa_{(c)} = 1,447$ hallado a partir del sistema de secuencia positiva.

$$i_{p(c)} = \kappa_{(c)} \sqrt{2} I_{k1}^* = 1,447 \times \sqrt{2} \times 35,64 \text{ kA} = 72,93 \text{ kA}$$

Si tomamos Z_C y $Z_{(0)c}$ en un cálculo más detallado para encontrar $K_{(c)}$ y $i_{pI(c)}$, se pueden obtener los siguientes resultados:

$$\frac{R}{X} = \frac{2R_c + R_{(0)c}}{2X_c + X_{(0)c}} \times \frac{f_c}{f} = \frac{5,828 \text{ m}\Omega}{7,875 \text{ m}\Omega} \times \frac{20 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 0,296$$

$$\kappa_{(c)} = 1,02 + 0,98 e^{-3R/X} = 1,423$$

$$i_{p(c)} = \kappa_{(c)} \sqrt{2} I_{k1}^* = 1,423 \times \sqrt{2} \times 35,64 \text{ kA} = 71,72 \text{ Ka}$$

La diferencia en este caso es sólo del 1,7%.

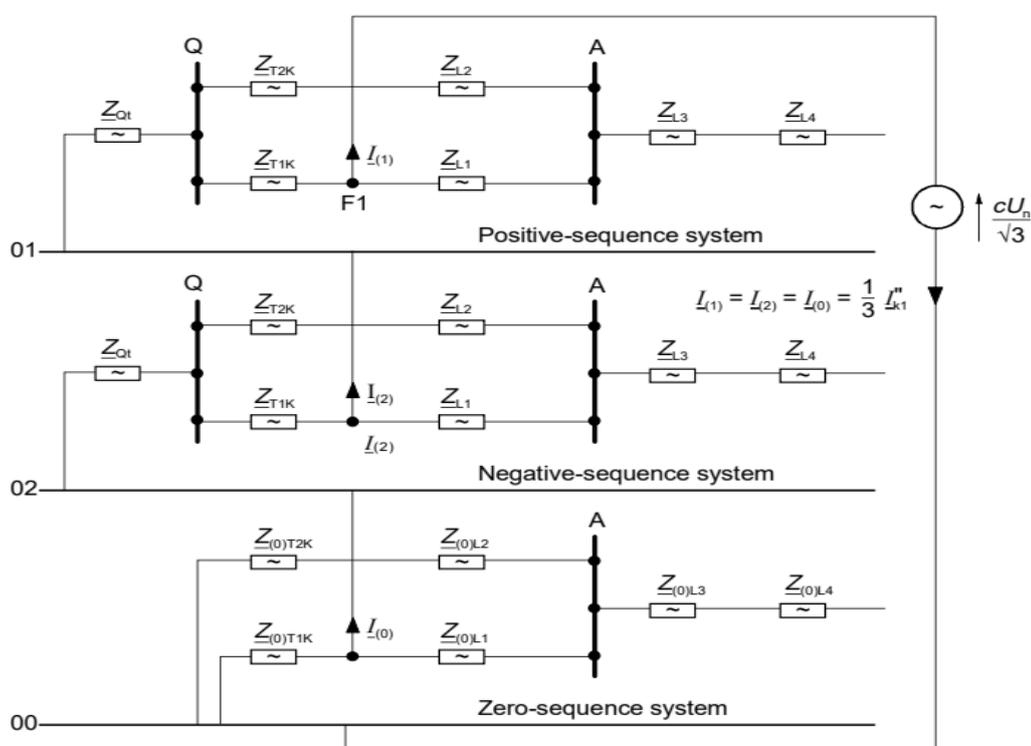


FIGURA 8. Sistema de secuencia positiva, secuencia negativa y secuencia cero

Fuentes: [Autores]

3.12.2. LOCALIZACIÓN DEL CORTOCIRCUITO F3

$$Z_{(1)} = Z_{(2)} = Z_k = (1,977 + j 6,827) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{(0)} = \frac{(Z_{(0)T1K} + Z_{(0)L1})(Z_{(0)T2K} + Z_{(0)L2})}{Z_{(0)T1K} + Z_{(0)T2K} + Z_{(0)L1} + Z_{(0)L2}} = (2,516 + j 6,109) \text{ m}$$

(11)

$$I_{k1}^* = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|2Z_{(1)} + Z_{(0)}|} = \frac{\sqrt{3} \times 1,05 \times 400 \text{ V}}{20,795 \text{ m}\Omega} = 34,98 \text{ kA} \quad (12)$$

$$i_{p(c)} = \kappa_{(c)}\sqrt{2}I_{k1}^* = 1,432 \times \sqrt{2} \times 34,98 \text{ kA} = 70,84 \text{ Ka}$$

3.12.3. UBICACIÓN DEL CORTOCIRCUITO F3

$$Z_{(1)} = Z_{(2)} = Z_k = (25,897 + j 23,417) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{(0)} = Z_{(0)F2} + Z_{(0)L3} + Z_{(0)L4} = (55,816 + j 58,419) \text{ m}$$

$$I_{k1}^* = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|2Z_{(1)} + Z_{(0)}|} = \frac{\sqrt{3} \times 1,05 \times 400 \text{ V}}{150,550 \text{ m}\Omega} = 4,83 \text{ kA}$$

$$i_{p(c)} = \kappa_{(c)}\sqrt{2}I_{k1}^* = 1,056 \times \sqrt{2} \times 4,83 \text{ kA} = 7,21 \text{ kA}$$

3.13. RECOPIACIÓN DE RESULTADOS

La recopilación de resultados, se presenta para las impedancias y corrientes de cortocircuito y en la tabla para la integral de Joule.

Short-circuit location	$Z_k = Z_{(1)}$	$Z_{(0)}$	I_k''	$i_{p(c)}$	I_{k1}''	$i_{p1(c)}$	I_{k1}''/I_k''
	m Ω	m Ω	kA	kA	kA	kA	–
F1	7,003	6,421	34,62	70,85	35,64	72,93	1,03
F2	7,107	6,601	34,12	69,10	34,98	70,84	1,03
F3	34,929	80,79	6,95	10,38	4,83	7,21	0,70

Tabla 2. Impedancias de cortocircuito

La integral de Joule se calcula en los puntos de cortocircuito F2 y F3, utilizando los factores m y n que se indican en la norma IEC 60909-0. Los tiempos de corte tiempos de cortocircuito T_K para el fusible se obtienen a partir de una característica dada de un fusible de baja tensión de 250 A.

Short-circuit location	Short-circuit location	Protection type	T_k	κ	m 1)	n 2)	Joule integral (equation (102) of IEC 60909-0) (kA) ² s
	kA	–	S	–	–	–	(kA) ² s
F2	$I_k'' = 34,12$	circuit breaker 250 A	0,06	1,43	0,197	1	83,61
F3	$I_k'' = 6,95$		0,06	1,06	0,059	1	3,07
F3	$I_k'' = 4,83$		0,06	1,06	0,059	1	1,48
F2	$I_k'' = 34,12$	fuse 250 A	<0,005	–	–	–	<0,56 ³⁾
F3	$I_k'' = 6,95$		0,02	1,06	0,178	1	1,19
F3	$I_{k1}'' = 4,83$		0,07	1,06	0,051	1	1,72

1) Calculated with equation for m (see annex A of IEC 60909-0).
2) Far-from-generator short circuit: $I_k = I_k'' n = 1$.
3) Cut-off characteristic of the fuse.

Tabla 3. Integral de Joule

NOTA:

Con una duración de cortocircuito T_K determinada, como la del disyuntor del ejemplo, la integral de Joule máxima se produce para la corriente de cortocircuito más grande. Mientras que con una característica extremadamente inversa, como la del fusible del ejemplo, la integral de Joule más grande se produce con la corriente de cortocircuito más pequeña, que puede ser un cortocircuito de línea a tierra simple, como en el ejemplo en la ubicación de cortocircuito F3

3.14. DISEÑO EN ETAP

El diagrama eléctrico presentado corresponde a un sistema de distribución de baja tensión diseñado para operar eficientemente a partir de una fuente de alimentación conectada a la red eléctrica principal. A continuación, se describen detalladamente los componentes y el flujo de energía en el sistema.

3.14.1. RED ELÉCTRICA

El sistema se alimenta de una red eléctrica principal con una capacidad de cortocircuito de 346,41 MVA. Este suministro opera a un nivel de tensión de 20 kV, conectándose directamente a la barra denominada Barra01.

3.14.2. BARRAS DE DISTRIBUCIÓN

El sistema incluye varias barras que cumplen funciones específicas:

Barra01:

- Es la barra de entrada del sistema.
- Opera a 20 kV y distribuye energía hacia dos transformadores: T1 y T2.

Barra02:

- Recibe la energía transformada de T1.
- Opera a un nivel de tensión de 0,41 kV.

Barra03:

- Recibe la energía transformada de T2.
- También opera a 0,41 kV.

Barra04:

- Actúa como punto de confluencia de las salidas de Barra02 y Barra03.
- Distribuye energía hacia Barra05 a través del Cable L3.

Barra05 y Barra06:

- Estas barras distribuyen la energía final a cargas o sistemas conectados, manteniendo el nivel de tensión en 0,41 kV.

3.14.3. TRANSFORMADORES

Dos transformadores principales realizan la conversión de tensión

Transformador T1:

- Conecta Barra01 con Barra02.
- Su capacidad es de 0,63 MVA.
- Convierte la tensión de entrada de 20 kV a 0,41 kV.

Transformador T2:

- Conecta Barra01 con Barra03.
- Su capacidad es de 0,4 MVA.
- Realiza la misma conversión de 20 kV a 0,41 kV.

3.14.4. CABLES DE CONEXIÓN

El sistema utiliza cables para interconectar las barras y distribuir la energía:

Cable L1:

- Une Barra02 con Barra04.
- Transporta energía a 0,41 kV.

Cable L2:

- Conecta Barra03 con Barra04.
- También opera a 0,41 kV.

Cable L3:

- Conecta Barra04 con Barra05, transportando energía hacia los puntos finales.

3.14.5. LÍNEA AÉREA

La conexión entre Barra05 y Barra06 se realiza a través de una línea aérea que transporta energía a un nivel de 0,41 kV. Este segmento es ideal para aplicaciones en las que no se requiera un tendido subterráneo.

3.14.6. FLUJO DE CARGA

El flujo de carga es un análisis fundamental en los sistemas eléctricos que permite determinar cómo se distribuye la potencia eléctrica en una red. Su objetivo principal es calcular voltajes, potencias activas y reactivas, así como pérdidas en líneas de transmisión. Se usa comúnmente en el diseño, planificación y operación de sistemas eléctricos de potencia.

- ✓ La energía se toma de la red eléctrica principal a un nivel de 20 kV.
- ✓ Los transformadores T1 y T2 convierten este voltaje a 0,41 kV, ajustándolo a los requisitos de distribución.
- ✓ La energía transformada se distribuye a través de las barras y los cables hacia las cargas finales conectadas a Barra06.

- ✓ Al ingresar los datos de la power grid (red eléctrica), el diseño nos indica que es una red trifásica y de 20KV los cuales han sido ingresado correctamente.

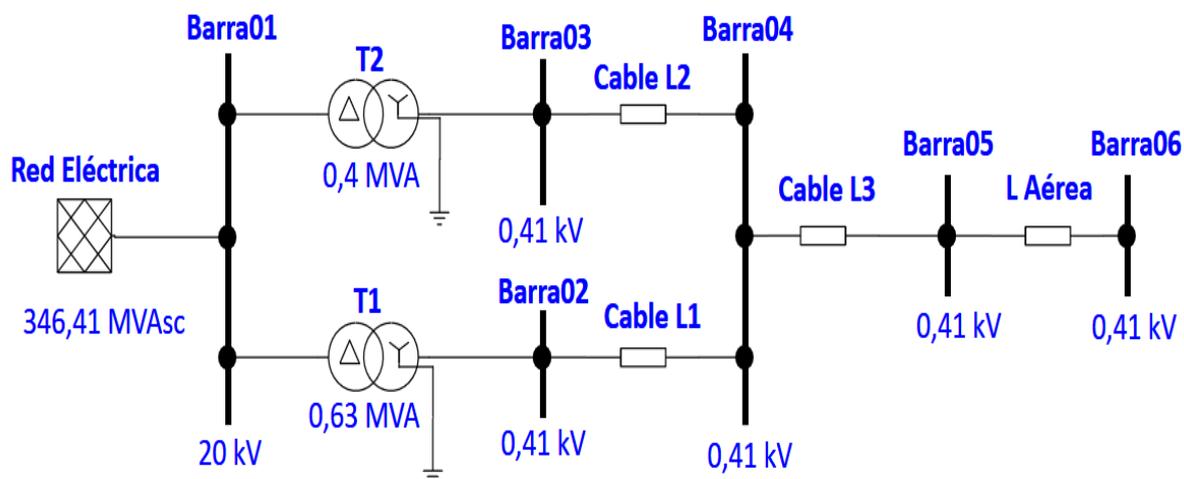


FIGURA 9. Diseño en Etap

Fuentes [Autores]

3.15. DATOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN

Al ingresar los datos de la power grid (red eléctrica), el diseño nos indica que es una red trifásica y de 20KV los cuales han sido ingresado correctamente.

Red trifásica:

- Se refiere a un sistema de distribución eléctrica que utiliza tres fases (tres conductores con corrientes alternas desfasadas en 120° entre sí).
- Es el tipo de sistema más utilizado en redes de media y alta tensión para la distribución de energía eléctrica.

Tensión de 20 kV:

- Significa que la red opera con un voltaje de 20,000 voltios, lo cual es típico en sistemas de media tensión utilizados para la distribución de energía eléctrica antes de ser transformada a niveles más bajos para consumo industrial o residencial.

Ingresar los datos en el sistema:

- Es fundamental ingresar correctamente los parámetros eléctricos como la tensión y la configuración del sistema (trifásico en este caso).
- Esto permite que los cálculos de carga, flujo de potencia, cortocircuito y estabilidad del sistema sean precisos y reflejen la realidad operativa.

3.15.1. RED ELÉCTRICA

Power Grid Editor - Red Eléctrica

Info Rating Short Circuit Time Domain Harmonic Reliability Energy Price Remarks Comment

20 kV Swing

Info

ID Red Eléctrica

Bus Bus1 20 kV

Revision Data

Base

Condition

Service In Out

State As-Built

Equipment

Tag #

Name

Description

Configuration

Normal

Operation Mode

Swing Voltage Control Mvar Control PF Control

Red Eléctrica

OK Cancel

FIGURA 10. Red eléctrica

Fuentes: [Autores]

Power Grid Editor - Red Eléctrica

Info Rating Short Circuit Time Domain Harmonic Reliability Energy Price Remarks Comment

20 kV Swing

Rated kV Balanced Unbalanced

	Gen. Cat.	%V	Vangle	MW	Mvar	%PF	Qmax	Qmin
1	Design	100	0					
2	Normal	100	0					
3	Shutdown	100	0					
4	Emergency	100	0					
5	Standby	100	0					
6	Startup	100	0					
7	Accident	100	0					
8	Summer Load	100	0					
9	Winter Load	100	0					

Operating

% V	Vangle	MW	Mvar
<input type="text" value="100"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>

Red Eléctrica

OK Cancel

FIGURA 11. Valores red eléctrica

Fuentes: [Autores]

3.15.2. TRANSFORMADOR 1

El transformador 1 tiene una conexión DYN5 y con una potencia nominal aparente de 630KVA (conversión 0,63MVA); con una alimentación de 20Kv en el lado de alta tensión y una salida de 410V (conversión 0,41kV) en el lado de baja tensión.

2-Winding Transformer Editor - T1

Reliability		Magnetization		Remarks		Comment	
Info	Rating	Impedance	Tap	Grounding	Sizing	Protection	Harmonic
0,63 MVA IEC Liquid-Fill Other 65 C						20	0,41 kV
Voltage Rating				Nominal Bus kV		Z Base	
	kV	FLA				MVA	
Prim.	20	18,19		20		0,63	
Sec.	0,41	887,1		0,41			
				Other 65			
Power Rating						Alert - Max	
MVA						MVA	
Rated	0,63					0,63	
Other 65						<input checked="" type="radio"/> Derated MVA <input type="radio"/> User-Defined	
Derated	0,63					Installation	
						Altitude	
						1000 m	
						Ambient Temp.	
						30 °C	
MFR							
Type / Class							
Type		Sub Type		Class		Temp. Rise	
Liquid-Fill		Other		Other		65	

FIGURA 12. Valores nominales

Fuentes: [Autores]

Se procede a utilizar los valores típicos que vienen por defecto en el software de simulación ETAP.

- Se ingreso la impedancia del cortocircuito (%Z) como indica el ejercicio a 4%.
- Las pérdidas de cortocircuito (PkrT) el ejercicio nos indica 6,5 KW pero este valor tuvo que ajustarse a 6,3 kW para poder equilibrar el porcentaje de la corriente en plena carga (FLA).

2-Winding Transformer Editor - T1

Reliability		Magnetization		Remarks		Comment																			
Info	Rating	Impedance	Tap	Grounding	Sizing	Protection	Harmonic																		
0,63 MVA IEC Liquid-Fill Other 65 C						20	0,41 kV																		
Impedance <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>%Z</th> <th>X/R</th> <th>R/X</th> <th>%X</th> <th>%R</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Positive</td> <td>4</td> <td>3,96</td> <td>0,253</td> <td>3,878</td> <td>0,979</td> </tr> <tr> <td>Zero</td> <td>3,812</td> <td>3,763</td> <td>0,266</td> <td>3,684</td> <td>0,979</td> </tr> </tbody> </table> <p>Typical Z & X/R Typical X/R</p>							%Z	X/R	R/X	%X	%R	Positive	4	3,96	0,253	3,878	0,979	Zero	3,812	3,763	0,266	3,684	0,979	Z Base MVA 0,63 Other 65	
	%Z	X/R	R/X	%X	%R																				
Positive	4	3,96	0,253	3,878	0,979																				
Zero	3,812	3,763	0,266	3,684	0,979																				
Z Variation <table border="1"> <thead> <tr> <th>@</th> <th>% Tap</th> <th>%Z</th> <th>% Z Variation</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-5</td> <td>% Tap</td> <td>4</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>% Tap</td> <td>4</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>						@	% Tap	%Z	% Z Variation	-5	% Tap	4	0	5	% Tap	4	0	Z Tolerance + 0 % - 0 %							
@	% Tap	%Z	% Z Variation																						
-5	% Tap	4	0																						
5	% Tap	4	0																						
No Load Data (Unbalanced and Transient Stability Analyses) <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>% FLA</th> <th>kW</th> <th>% G</th> <th>% B</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Positive</td> <td>1</td> <td>6,3</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Zero</td> <td>1</td> <td>6,3</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table> <p><input type="checkbox"/> Buried Delta Winding Zero Seq. Impedance Typical Value</p>									% FLA	kW	% G	% B	Positive	1	6,3	1	0	Zero	1	6,3	1	0			
	% FLA	kW	% G	% B																					
Positive	1	6,3	1	0																					
Zero	1	6,3	1	0																					

T1

FIGURA 13. Valores de impedancia T1

Fuentes: [Autores]

El transformador usado es un Dyn5 que hace referencia a una conexión:

- ✓ **Delta:** El devanado de alta tensión (AT) se encuentra conectado en circuito de forma delta (triángulo).
- ✓ **Estrella:** El devanado de baja tensión (BT) se encuentra conectado de forma estrella(Y).
- ✓ **Neutro:** El neutro del devanado en estrella es para la conexión externa.

Nos indica el desfase horario entre vectores de tensión entre los devanados de alta y baja tensión.

FIGURA 14. Conexión T1

Fuentes: [Autores]

3.15.3. TRANSFORMADOR 2

El transformador 2 tiene una conexión DYN5 y con una potencia nominal aparente de 400KVA (conversión 0,4MVA); con una alimentación de 20Kv en el lado de alta tensión y una salida de 410V (conversión 0,41kV) en el lado de baja tensión.

2-Winding Transformer Editor - T2

Reliability		Magnetization		Remarks		Comment	
Info	Rating	Impedance	Tap	Grounding	Sizing	Protection	Harmonic
0,4 MVA IEC Liquid-Fill Other 65 C						20 0,41 kV	
Voltage Rating				Nominal Bus kV		Z Base	
Prim.	kV 20	FLA 11,55	20		MVA 0,4		
Sec.	0,41	563,3	0,41				
				Other 65			
Power Rating						Alert - Max	
MVA						MVA	
Rated	0,4					0,4	
Other 65						<input checked="" type="radio"/> Derated MVA <input type="radio"/> User-Defined	
Derated	0,4					Installation	
% Derating				0		Altitude	
						1000 m	
						Ambient Temp.	
						30 °C	
MFR							
Type / Class							
Type	Sub Type	Class	Temp. Rise				
Liquid-Fill	Other	Other	65				

FIGURA 15. Valores nominales T2

Fuentes: [Autores]

Se procede a utilizar los valores típicos que vienen por defecto en el software de simulación ETAP.

- Se ingreso la impedancia del cortocircuito (%Z) como indica el ejercicio a 4%.
- Las pérdidas de cortocircuito (PkrT) el ejercicio nos indica 4.6kW, pero este valor tuvo que ajustarse a 4kW para poder equilibrar el porcentaje de la corriente en plena carga (FLA).

2-Winding Transformer Editor - T2

Reliability		Magnetization			Remarks		Comment																			
Info	Rating	Impedance	Tap	Grounding	Sizing	Protection	Harmonic																			
0,4 MVA IEC Liquid-Fill Other 65 C							20	0,41 kV																		
Impedance <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>%Z</th> <th>X/R</th> <th>R/X</th> <th>%X</th> <th>%R</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Positive</td> <td>4</td> <td>3,09</td> <td>0,324</td> <td>3,806</td> <td>1,232</td> </tr> <tr> <td>Zero</td> <td>4</td> <td>3,09</td> <td>0,324</td> <td>3,806</td> <td>1,232</td> </tr> </tbody> </table>							%Z	X/R	R/X	%X	%R	Positive	4	3,09	0,324	3,806	1,232	Zero	4	3,09	0,324	3,806	1,232	Z Base MVA 0,4 Other 65		
	%Z	X/R	R/X	%X	%R																					
Positive	4	3,09	0,324	3,806	1,232																					
Zero	4	3,09	0,324	3,806	1,232																					
Z Variation <table border="1"> <thead> <tr> <th>@</th> <th>% Tap</th> <th>%Z</th> <th>% Z Variation</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-5</td> <td>% Tap</td> <td>4</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>% Tap</td> <td>4</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>						@	% Tap	%Z	% Z Variation	-5	% Tap	4	0	5	% Tap	4	0	Z Tolerance + 0 % - 0 %								
@	% Tap	%Z	% Z Variation																							
-5	% Tap	4	0																							
5	% Tap	4	0																							
No Load Data (Unbalanced and Transient Stability Analyses) <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>% FLA</th> <th>kW</th> <th>% G</th> <th>% B</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Positive</td> <td>1</td> <td>4</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Zero</td> <td>1</td> <td>4</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table> <input type="checkbox"/> Buried Delta Winding										% FLA	kW	% G	% B	Positive	1	4	1	0	Zero	1	4	1	0			
	% FLA	kW	% G	% B																						
Positive	1	4	1	0																						
Zero	1	4	1	0																						
			Zero Seq. Impedance		Typical Value																					

FIGURA 16. Valores de impedancia T2

Fuentes: [Autores]

El transformador usado es un Dyn5 que hace referencia a una conexión:

- ✓ **Delta:** El devanado de alta tensión (AT) se encuentra conectado en circuito de forma delta(triángulo).
- ✓ **Estrella:** El devanado de baja tensión (BT) se encuentra conectado de forma estrella(Y).
- ✓ **Neutro:** El neutro del devanado en estrella es para la conexión externa.

Nos indica el desfase horario entre vectores de tensión entre los devanados de alta y baja tensión.

FIGURA 17. Conexión T2

Fuentes: [Autores]

3.15.4. CABLE L1

Para este sistema, se utilizan 2 cables paralelos de cuatro conductores cada uno, con una longitud de 10 metros y un área de sección transversal de 240mm^2 por cada uno de los conductores; estos son de tipo cobre (Cu) por su alta conductividad eléctrica.

Cable Editor - Cable L1

Sizing - Phase	Sizing - GND/PE	Reliability	Routing	Remarks	Comment	
Info	Physical	Impedance	Configuration	Loading	Capacity	Protection
BS5467	Mag.	50 Hz	Code : 240			
XLPE	100 %	1.0 kV	4/C	CU	240 mm ²	

Info

ID: Cable L1

From: Barra02 0.41 kV

To: Barra04 0.41 kV

Revision Data: Base

Equipment

Tag #:

Name:

Description:

Condition

Service: In Out

State: As-Built

No. of Conductors/Phase: 2

Length

Length: 10 m

Tolerance: 0 %

Library

Library...

Link to Library

Connection

3 Phase 1 Phase

OK Cancel

FIGURA 18. Valores de cable L1

Fuentes: [Autores]

3.15.6. CABLE L3

En el cable L3 se utilizó un cable de cuatro conductores, con una distancia de 20 metros con una sección transversal de 70mm² por conductor y con un diseño de cuatros núcleos; el material del conductor es de tipo cobre (Cu) por su gran conductividad eléctrica.

Cable Editor - Cable L3

Sizing - Phase	Sizing - GND/PE	Reliability	Routing	Remarks	Comment	
Info	Physical	Impedance	Configuration	Loading	Capacity	Protection
U1000AR2V	Non-Mag.	50 Hz	Code : 4x70			
XLPE	100 %	1.0 kV	4/C	AL	70 mm ²	

Info

ID: Cable L3

From: Barra05 0.41 kV

To: Barra04 0.41 kV

Revision Data: Base

Equipment

Tag #:

Name:

Description:

Condition

Service: In Out

State: As-Built

No. of Conductors/Phase: 1

Length

Length: 20 m

Tolerance: 0 %

Library

Library...

Link to Library

Connection

3 Phase 1 Phase

OK Cancel

FIGURA 20. Valores de cable L3

Fuentes: [Autores]

3.15.7. LÍNEA AÉREA

En la línea aérea se emplea 50 metros de conductor tipo cobre (Cu), con una sección transversal de 50mm^2 y una separación entre conductores de 0,4 metros lo cual reduce efectos de interferencia electromagnética.

Cable Editor - Cable L3

Sizing - Phase	Sizing - GND/PE	Reliability	Routing	Remarks	Comment	
Info	Physical	Impedance	Configuration	Loading	Capacity	Protection
U1000AR2V	Non-Mag.	50 Hz	Code : 4x70			
XLPE	100 %	1.0 kV	4/C	AL	70 mm ²	

Info

ID: Cable L3

From: Barra05 0.41 kV

To: Barra04 0.41 kV

Revision Data: Base

Equipment

Tag #:

Name:

Description:

Condition

Service: In Out

State: As-Built

No. of Conductors/Phase: 1

Length

Length: 20 m

Tolerance: 0 %

Library

Library...

Link to Library

Connection

3 Phase 1 Phase

OK Cancel

FIGURA 21. Valores de línea aérea

Fuentes: [Autores]

3.15.1. FLUJO DE CARGA

Se procede a ejecutar el flujo de carga (load flow) permitiéndonos determinar las tensiones de cada nodo, corrientes que circulan por cada línea, potencias activas y reactivas, factor de potencia.

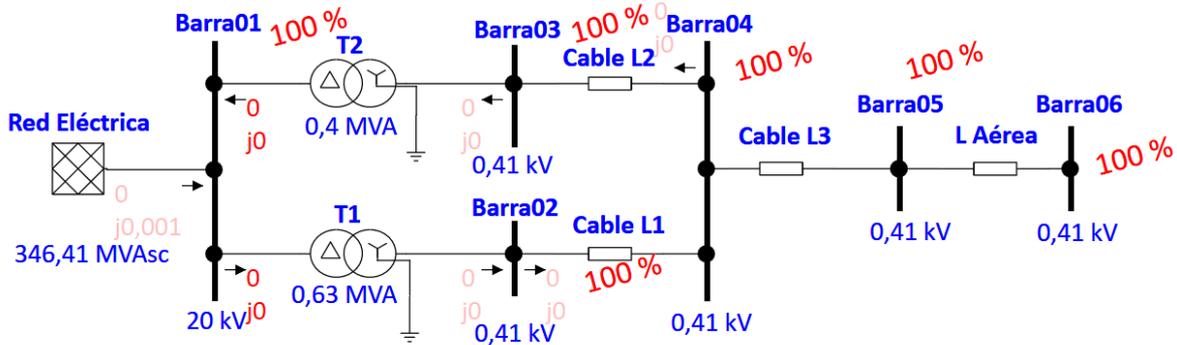


FIGURA 22 Diseño con flujo de carga

Fuentes. [Autores]

3.15.2. CORTOCIRCUITO

Se procede a ejecutar las fallas de cortocircuito en Barra02, Barra04 y Barra 05y se obtienen los siguientes valores.

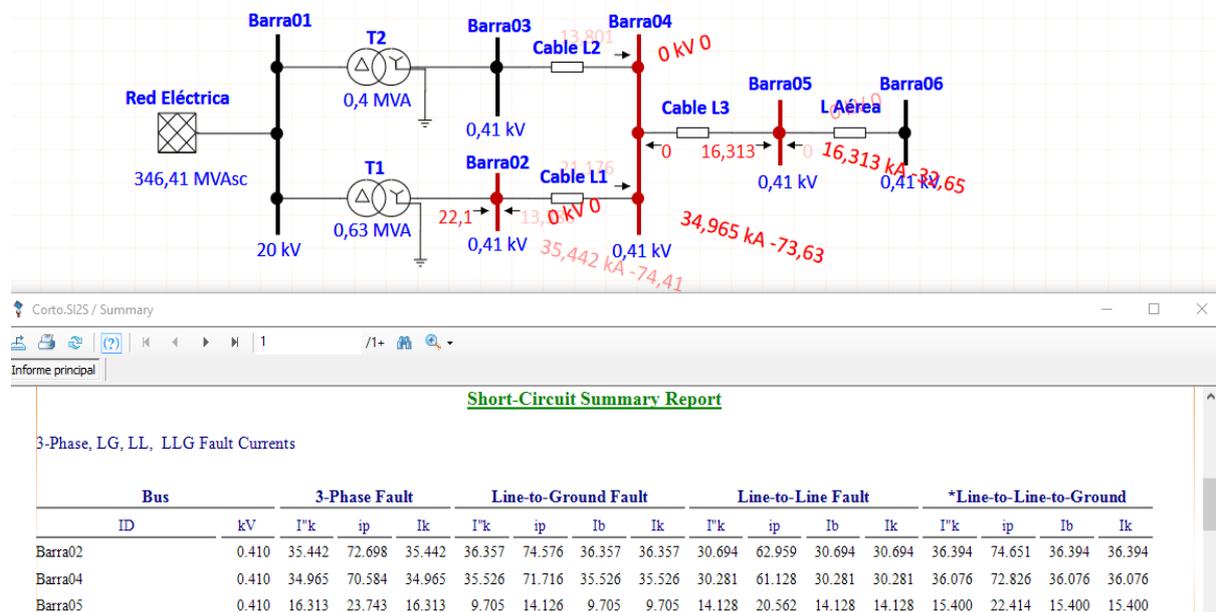


FIGURA 23 Resultados de cortocircuito

Fuentes. [Autores]

3.16. CÁLCULO DE COMPONENTES SIMÉTRICOS Y CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO

3.16.1. FALLA A TIERRA EN EL TRANSFORMADOR T1:

Es una falla localizada en el transformador T1, donde uno de los devanados del transformador entra en contacto con tierra, probablemente debido a un aislamiento defectuoso o daño interno. Esta falla genera corrientes de cortocircuito significativas que deben ser controladas para evitar daños al transformador y al sistema.

3.16.2. CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA DE SECUENCIA POSITIVA Z_{1T1}

La fórmula general para la impedancia positiva en un transformador trifásico es:

$$Z_{1T1} = \frac{u_k \cdot (U_{TLV})^2}{100 \cdot S_T} \quad (13)$$

Sustituyendo los valores:

$$Z_{1T1} = \frac{4 \cdot (410)^2}{100 \cdot 630}$$

$u_k = 4\%$: Impedancia relativa del transformador.

$U_{TLV} = 410$: Voltaje nominal del lado de baja tensión

$S_T = 630\text{kVA}$: Potencia nominal del transformador.

Realizando los cálculos:

$$Z_{1T1} = \frac{4 \cdot 168100}{63000}$$

$$Z_{1T1} = \frac{672400}{63000} = \mathbf{10.673 \text{ m}\Omega}$$

Convertimos el resultado a mili Ohm (mΩ):

$$Z_{1T1} = 10673.02 \text{ m}\Omega$$

3.16.3. IMPEDANCIA DE SECUENCIA CERO Z_{0T1}

De la tabla proporcionada, el valor de Z_{0T1} está dado como:

$$Z_{0T1} = 2.68 + j 9.551 \text{ m}\Omega$$

Su magnitud se calcula con la fórmula:

$$\begin{aligned} |Z_{0T1}| &= \sqrt{(\text{Re}[Z_{0T1}])^2 + (\text{Im}[Z_{0T1}])^2} \\ |Z_{0T1}| &= \sqrt{(2.68)^2 + (9.551)^2} \\ |Z_{0T1}| &= \sqrt{7.1824 + 91.214801} \\ |Z_{0T1}| &= \sqrt{98.397201} = 9.92 \text{ m}\Omega \\ Z_{0T1} &= \mathbf{9.92 \text{ m}\Omega} \end{aligned} \tag{14}$$

3.16.4. CORRIENTE DE FALLA TRIFÁSICA I_{k3}

La corriente de falla trifásica se calcula con:

$$I_{k3} = \frac{U_n}{|Z_{1T1}|} \tag{15}$$

Donde:

$U_n = 400 \text{ V}$: Voltaje nominal del lado de baja tensión

$|Z_{0T1}|$: Impedancia positiva del transformador

Sustituyendo:

$$\begin{aligned} I_{k3} &= \frac{400}{10.673 \Omega} \\ I_{k3} &= \mathbf{37.48 \text{ KA}} \end{aligned}$$

3.16.5. CORRIENTE DE FALLA MONOFÁSICA A TIERRA (I_{k1})

Para una falla monofásica a tierra, la corriente se calcula con:

$$I_{k1} = \frac{U_n}{|Z_{1T1} + Z_{0T1} + Z_f|} \quad (16)$$

$$Z_{1T1} = 10.673\Omega: \text{ Impedancia de secuencia positiva.}$$

$$Z_{0T1} = (10.673 + 2.68) + j9.551 = 13.353 + j9.551\Omega$$

Calculamos la magnitud de Z_{total}

$$|Z_{total}| = \sqrt{(13.353)^2 + (9.551)^2}$$

$$|Z_{total}| = \sqrt{178.308 + 91.247} = \sqrt{269.555} = 16.42\Omega$$

Calculamos I_{k1}

$$I_{k1} = \frac{400}{16.42}$$

$$I_{k1} = \mathbf{24.36 \text{ KA}}$$

3.17. FALLA EN EL PUNTO F2 (CONEXIÓN DEL CABLE L3):

Se presenta una falla en el nodo donde el cable L3 se conecta al sistema. Este tipo de falla puede implicar un cortocircuito o una interrupción en la continuidad del circuito debido a conexiones defectuosas o problemas de aislamiento.

3.17.1. COMPONENTES DE LA RED DE ALIMENTACIÓN (Q)

- Impedancia de secuencia positiva (Z_1) = $Z_Q = 0.053 + j0.531 \Omega$
- Impedancia de secuencia cero (Z_0) no está especificada, pero no afecta este análisis en el caso dado.

3.17.2. IMPEDANCIA TOTAL DE SECUENCIA POSITIVA (Z_1)

Se suman en serie todas las componentes en el trayecto al punto de falla:

$$Z_{1,\text{total}} = Z_Q + Z_{T_{1,1}} + Z_{L_{1,1}} + Z_{L_{3,1}} \quad (17)$$

Sustituyendo los valores:

$$Z_{1,\text{total}} = (0.053 + j0.531) + (2.68 + j10.054) + (0.385 + j0.395) + (5.420 + j1.740)$$

Calculando:

$$Z_{1,\text{total}} = \mathbf{8.538 + j12.72 \Omega}$$

3.17.3. IMPEDANCIA TOTAL SECUENCIA CERO (Z_0)

De manera similar, se suman las componentes en serie para la secuencia cero:

$$Z_{0,\text{total}} = Z_Q + Z_{T_{1,0}} + Z_{L_{1,0}} + Z_{L_{3,0}}$$

Sustituyendo los valores:

$$Z_{0,\text{total}} = (0.053 + j0.531) + (2.68 + j9.551) + (1.425 + j0.715) + (16.260 + j7.760)$$

Calculando:

$$Z_{0,\text{total}} = \mathbf{20.418 + j18.557 \Omega}$$

3.18. FALLA EN EL PUNTO F3 (EXTREMO DE LA LÍNEA AÉREA):

Es una falla ubicada en el extremo final de la línea aérea. Esta puede ser causada por descargas atmosféricas, contacto con objetos externos o degradación del aislamiento, afectando la continuidad del suministro eléctrico.

3.18.1. COMPONENTES DE LA RED DE ALIMENTACIÓN (Q)

- Impedancia de secuencia positiva (Z_1) = $Z_Q = 0.053 + j0.531 \Omega$
- Impedancia de secuencia cero (Z_0) no está especificada, pero no afecta este análisis en el caso dado.

3.18.2. IMPEDANCIA TOTAL DE SECUENCIA POSITIVA (Z_1)

Se suman en serie todas las componentes en el trayecto al punto de falla:

$$Z_{1,\text{total}} = Z_Q + Z_{T_{1,1}} + Z_{L_{1,1}} + Z_{L_{3,1}}$$

Sustituyendo los valores:

$$Z_{1,\text{total}} = (0.053 + j0.531) + (2.68 + j10.054) + (0.385 + j0.395) + (5.420 + j1.740)$$

Calculando:

$$Z_{1,\text{total}} = \mathbf{8.538 + j12.72 \Omega}$$

3.18.3. IMPEDANCIA TOTAL SECUENCIA CERO (Z_0)

De manera similar, se suman las componentes en serie para la secuencia cero:

$$Z_{0,\text{total}} = Z_Q + Z_{T_{1,0}} + Z_{L_{1,0}} + Z_{L_{3,0}}$$

Sustituyendo los valores:

$$Z_{0,\text{total}} = (0.053 + j0.531) + (2.68 + j9.551) + (1.425 + j0.715) + (16.260 + j7.760)$$

Calculando:

$$Z_{0,\text{total}} = \mathbf{20.418 + j18.557 \Omega}$$

RECOMENDACIONES

- Crear cuadros comparativos en base a la norma IEC-609094 sobre los resultados obtenidos en cada falla simulada para poder visualizar el comportamiento de las fallas.
- Analizar los posibles ajustes en los diferentes esquemas de protección, la configuración de la red y/o selección de equipos para asegurar el cumplimiento de la norma.
- El análisis de los resultados bajo la norma permite validar si los equipos actuales cumplen con los requisitos necesarios o si es necesario seleccionar nuevos dispositivos más apropiados para garantizar la protección adecuada.
- Los ajustes realizados en los esquemas de protección aseguran una mejor coordinación entre los dispositivos y una operación más confiable frente a diferentes escenarios de falla.
- El análisis de posibles ajustes en la configuración de la red asegura que el sistema de protección sea adaptable a cambios futuros, como ampliaciones o modificaciones en las cargas y generación.
- Simular el diagrama en el software ETAP para realizar una comparación de los datos obtenidos.
- En caso de que las corrientes de falla superan los valores nominales se recomienda aumentar la capacidad de los interruptores o modificación de los relés

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cesienergy, "Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP): Definición y partes," 7 11 2022. [Online]. Available: <https://cesienergy.com/sistemas-electricos-de-potencia-sep-definicion-y-partes/>.
- [2] P. S. Kundur and O. P. Malik, *Power System Stability and Control*, McGraw Hill, 2022.
- [3] N. Tleis, *Power Systems Modelling and Fault Analysis*, Elsevier Ltd., 2008.
- [4] J. Das, *Power System Analysis: Short-Circuit Load Flow and Harmonics*, Second Edition (Power Engineering, CRC Press, 2017).
- [5] N. Mohan, T. M. Undeland and W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, Wiley, 2002.
- [6] International Electrotechnical Commission, "Informe técnico IEC 60909-4. Corrientes de cortocircuito en sistemas de corriente alterna trifásica.
- [7] J. Duncan Glover, M. S. Sarma, T. Overbye and A. B. Birchfield, *Power System Analysis and Design*, Cengage Learning, 2022.
- [8] S. Sivanagaraju and S. Satyanarayana, *Electric Power Transmission and Distribution*, Dorling Kindersley, 2009.
- [9] P. Murty, *Operation and Control in Power Systems*, CRC Press, 2011.
- [10] J. A. Martinez-Velasco, *Power System Transients: Parameter Determination*, CRC Press, 2017.
- [11] A. Gómez Expósito, J. Martínez Ramos, J. Rosendo Macías, E. Romero Ramos and J. Riquelme Santos, *Sistemas Electricos de Potencia Exposito*, Pearson Alhambra, 2003.
- [12] I. Kasikci, *Short-circuit currents: Calculation in power systems according to IEC 60909-0 and IEC 61363-1 standards*. Siemens AG, Wiley-VCH, 2018.
- [13] R. E. Brown, *Electric Power Distribution Reliability (Power Engineering, CRC Press, 2008*.
- [14] J. Machowski, Z. Lubosny, J. W. Bialek and J. R. Bumby, *Power System Dynamics: Stability and Control*, Wiley, 2020.
- [15] D. P. Kothari and J. Nagrath, *Modern Power System Analysis*, Tata McGraw Hill Education Private Limited, 2011.

- [16] IEEE, IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis, IEEE, 1990.
- [17] C. I. Ciontea, "The Use of Symmetrical Components in Electrical Protection," 2019 72nd Conference for Protective Relay Engineers (CPRE), College Station, TX, USA, 2019,
- [19] Arrillaga J., Arnold C.P., and Harker B.J. Computer modelling of electrical power systems John Wiley & Sons Ltd. 1983
- [20] C. I. Ciontea, "The Use of Symmetrical Components in Electrical Protection," 2019 72nd Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)
- [21] P. Rodríguez, A. Luna, R. S. Muñoz-Aguilar, I. Etxeberria-Otadui, R. Teodorescu and F. Blaabjerg,
- [22] M. Vasiladiotis and A. Rufer, "Analysis and Control of Modular Multilevel Converters With Integrated Battery Energy Storage," in IEEE Transactions on Power Electronics,
- [23] E. H. Watanabe, R. M. Stephan and M. Aredes, "New concepts of instantaneous active and reactive powers in electrical systems with generic loads,
- [24] G. C. Paap, "Symmetrical components in the time domain and their application to power network calculations," in IEEE Transactions on Power Systems,
- [25] D. Yazdani, M. Mojiri, A. Bakhshai and G. JoÓs, "A Fast and Accurate Synchronization Technique for Extraction of Symmetrical Components," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 3, pp. 674-684, March 2009,