



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MÉTODO PARA LA REDUCCIÓN DE LA
COMPLEJIDAD DEL ALIMENTADOR SANTA ROSA DE PICHUL – SAN
GERARDO**

PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO/A ELÉCTRICO

AUTOR(ES):

Nayeli Elsa Andi Grefa

Jimmy Sebastian Pinto Montesdeoca

TUTOR:

Ing. Franklin Hernán Vásquez Teneda MSc.

LATACUNGA, FEBRERO, 2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, **ANDI GREFA NAYELI ELSA** con C.C: 1550208951 y **PINTO MONTESDEOCA JIMMY SEBASTIÁN** con C.C: 0550127732, declaramos ser los autores del proyecto de titulación “**IMPLEMENTACIÓN DE UN MÉTODO PARA LA REDUCCIÓN DE LA COMPLEJIDAD DEL ALIMENTADOR SANTA ROSA DE PICHUL – SAN GERARDO**”, siendo el **Ing. MSc. Vásquez Teneda Franklin Hernán** tutor del presente trabajo de titulación; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo de titulación, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Atentamente,

Latacunga, 16 de marzo del 2026



Andi Grefa Nayeli Elsa
CC. 1550208951



Pinto Montesdeoca Jimmy Sebastián
CC. 0550127732

AVAL DEL TUTOR DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título: “**IMPLEMENTACIÓN DE UN MÉTODO PARA LA REDUCCIÓN DE LA COMPLEJIDAD DEL ALIMENTADOR SANTA ROSA DE PICHUL – SAN GERARDO**”, propuesto por los estudiantes **Andi Grefa Nayeli Elsa** y **Pinto Montesdeoca Jimmy Sebastian**, de la Carrera de Ingeniería en Electricidad, considero que dicho proyecto de titulación cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos al tribunal de lectores.

Latacunga, 16 de marzo del 2026



Ing. Vásquez Franklin MSc.
CC. 1710434497
TUTOR

AVAL DE APROBACIÓN DE LECTORES

Cumpliendo con el Reglamento de Titulación de la Universidad Técnica de Cotopaxi, en calidad de Lectores de Tribunal de Proyecto de Investigación con el Título “IMPLEMENTACIÓN DE UN MÉTODO PARA LA REDUCCIÓN DE LA COMPLEJIDAD DEL ALIMENTADOR SANTA ROSA DE PICHUL – SAN GERARDO”, propuesto por los estudiantes **Andi Grefa Nayeli Elsa** con C.C: 1550208951 y **Pinto Montesdeoca Jimmy Sebastian** con C.C: 0550127732 de la Carrera de Ingeniería en Electricidad, me permito indicar que los estudiantes ha concluido todas las observaciones y realizado las correcciones señaladas por el Tribunal de Lectores, además de validar el funcionamiento de la propuesta, por lo cual presentamos el Aval de aprobación del Proyecto de Titulación correspondiente a la modalidad de Propuesta tecnológica, en virtud de lo cual el o la postulante puede presentarse a la Defensa de su Proyecto de Titulación.

Particular que pongo en su conocimiento para los fines legales pertinentes.

Atentamente,

Latacunga, 16 de marzo del 2026



Lector 1 (Presidente)

Ing. Ortiz González Yadyra Monserrath MSc.
C.C: 1722464110



Lector 2

Ing. Rueda Flores Walter Paul MSc.
C.C: 0503689895



Lector 3

Ing. Freire Freire Armando Salvador MSc.
C.C: 0503842833

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por la vida, la fortaleza y la sabiduría necesarias para culminar esta etapa académica, así como por brindarme la perseverancia para superar cada desafío presentado durante este proceso.

A la universidad y a la carrera de Ingeniería en Electricidad, por la formación académica recibida y por proporcionar los conocimientos y herramientas fundamentales que hicieron posible el desarrollo de este trabajo de investigación.

A los docentes que formaron parte de mi proceso educativo, por su dedicación, exigencia y vocación profesional, contribuyendo significativamente a mi crecimiento académico y personal.

De manera especial, expreso mi sincero agradecimiento a mi tutor de tesis, Ing. Franklin Vásquez, y al Ing. Luis Cruz, por su orientación, apoyo y acompañamiento constante durante el desarrollo de esta investigación.

A mis padres, por su respaldo permanente, comprensión y sacrificio, que hicieron posible la continuidad de mis estudios y el cumplimiento de esta meta profesional.

A mis hermanos y hermanas, por su apoyo, consejos y palabras de ánimo brindadas a lo largo de este camino, siendo un soporte importante en los momentos de mayor exigencia.

Finalmente, agradezco a todas las personas que formaron parte de este camino, tanto a quienes permanecen como a quienes ya no están en mi vida, porque cada una dejó una enseñanza que contribuyó a mi crecimiento personal y profesional.

Nayeli Andi

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento a Dios, por brindarme la vida, la salud y la fortaleza necesarias para culminar esta importante etapa de mi formación profesional.

A mi familia, por su amor incondicional, apoyo contante y sacrificio a lo largo de mi vida académica. Gracias por impulsarme a seguir adelante ante cada desafío presentado.

A mis docentes, por compartir sus conocimientos, experiencias y enseñanzas, que fueron fundamentales en mi crecimiento académico y profesional.

De manera especial, agradezco a mi tutor de tesis por su orientación, paciencia y acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación, brindándome las herramientas necesarias para alcanzar los objetivos propuestos.

A mis compañeros y amigos que encontré a lo largo de la etapa académica, por su apoyo, colaboración y compañerismo.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron a la realización y culminación de esta tesis.

Jimmy Pinto

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por guiar mi camino, darme fortaleza en los momentos difíciles y permitirme llegar hasta esta meta.

A mis padres, Ángel Andi y Elvia Grefa, por ser el pilar de mi vida, por su confianza, su esfuerzo diario y por enseñarme que el estudio es la mejor herencia y que los objetivos se alcanzan con trabajo, responsabilidad y fe.

A mis hermanos Ángel, Jimmy y Jerson, y a mis hermanas Luci, Yamy y Andrea, por ser mi fuerza en los momentos de debilidad y recordarme siempre que no estaba sola en este camino.

De manera especial, a mi hermana Andrea, por caminar conmigo durante este proceso y convertirse en un apoyo esencial para alcanzar este logro. Le dedico este logro por no soltarme cuando me sentí débil, por escucharme y por apoyarme incluso cuando tú también tenías tus propias cargas. Este logro lleva una parte de tu esfuerzo y de tu amor.

A mis amigos Andy, Carlos; en especial a Jorge A. que ha sido un apoyo constante, un aliado en los momentos difíciles. Y a mi compañero de tesis, Jimmy, quienes compartieron conmigo este esfuerzo y formaron parte importante de esta etapa.

Finalmente, dedico este logro a quienes ya no forman parte de mi vida, pero dejaron enseñanzas que contribuyeron a mi crecimiento personal. CDLR

Este trabajo representa no solo una meta académica, sino el resultado del esfuerzo, la constancia y la fe que hicieron posible este sueño.

Nayeli Andi

DEDICATORIA

Dedico la presente tesis, en primer lugar, a Dios, por brindarme la vida, la sabiduría y la fortaleza necesarios para culminar esta importante etapa de mi formación profesional.

A mi madre, Elsi Montesdeoca, quien ha sido el pilar fundamental de mi vida y la razón principal de este logro. Gracias por cada sacrificio silencioso, por tus desvelos, por tu esfuerzo incansable y por el amor infinito con el que me has guiado desde mis primeros pasos. Has sido mi ejemplo de lucha, perseverancia y valentía. En los momentos más difíciles, tu apoyo incondicional y tus palabras de aliento fueron mi mayor impulso para no rendirme. Todo lo que soy y todo lo que he alcanzado tiene como base tu entrega y dedicación. Este logro no es solo mío, es el reflejo de todo tu amor y esfuerzo.

A mis hermanos, Sixto, Brayan y Fernando, por su apoyo constante, por motivarme a superarme cada día y por acompañarme en cada etapa de mi vida, brindándome siempre ánimo y fortaleza para seguir adelante.

A mi compañera de tesis, Nayeli, por su compromiso, responsabilidad y dedicación durante el desarrollo de esta investigación. Gracias por el esfuerzo compartido, la perseverancia y el trabajo en equipo que hicieron posible culminar con éxito este proyecto.

Y de manera muy especial, a mi novia, Gisela, por su amor, paciencia y comprensión durante este proceso. Gracias por estar a mi lado en los momentos de estrés y dificultad, por tus palabras de apoyo y por creer en mi incluso en los días más complicados. Tu compañía fue un impulso fundamental para alcanzar esta meta.

Jimmy Pinto

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TITULO: “IMPLEMENTACIÓN DE UN MÉTODO PARA LA REDUCCIÓN DE LA COMPLEJIDAD DEL ALIMENTADOR SANTA ROSA DE PICHUL – SAN GERARDO”

Autor/es:

Andi Grefa Nayeli Elsa
Pinto Montesdeoca Jimmy Sebastian

RESUMEN

La multiplicidad de las redes de distribución eléctrica de media tensión a causa del elevado número de ramales conectados plantea un desafío en su análisis y operación a través de modelos detallados, por lo que para líneas de suministro con estructura radial como la de Santa Rosa de Pichul – San Gerardo a 13.8 kV el propósito general de este estudio fue crear un modelo simplificado aplicando la disminución de nodos, facilitando así la evaluación en estado estacionario sin afectar la exactitud eléctrica del sistema general.

Para alcanzar esta meta se empleó una metodología cuantitativa utilizando el modelado minucioso de la red en el programa DIGSILENT PowerFactory junto con parámetros eléctricos reales. Posteriormente se ejecutó el cálculo matemático estableciendo límites eléctricos y equivalencias para validar el modelo simplificado mediante simulaciones de flujo de carga, donde los resultados demostraron que el esquema replicó con exactitud el comportamiento eléctrico del sistema original, pues la potencia total de salida determinada en el modelo completo fue de $107,99 \text{ kW} + j34,16 \text{ kVAr}$, mientras que el modelo simplificado arrojó $107,98 \text{ kW} + j34,15 \text{ kVAr}$. A modo de conclusión esta táctica conforma una herramienta técnica de gran utilidad para mitigar la dificultad de un modelo de distribución, permitiendo de esta manera una evaluación veloz y confiable sin perjudicar la calidad o la representatividad de los resultados obtenidos en el proceso evaluativo de la red.

Palabras Clave: Redes de distribución, Kron, Flujo de carga, PowerFactory.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

FACULTY OF ENGINEERING ANDI APPLIED SCIENCES

TITLE: “IMPLEMENTATION OF A METHOD TO REDUCE THE COMPLEXITY OF THE SANTA ROSA DE PICHUL – SAN GERARDO FEEDER”

Authors:

Andi Grefa Nayeli Elsa
Pinto Montesdeoca Jimmy Sebastian

ABSTRACT

The complexity of medium-voltage power distribution networks, due to the large number of connected branches, poses a challenge for their analysis and operation using detailed models. Therefore, for radial-structured supply lines such as the one in Santa Rosa de Pichul – San Gerardo at 13.8 kV, the overall objective of this study was to create a simplified model by reducing the number of nodes, thereby facilitating steady-state evaluation without compromising the electrical accuracy of the overall system.

To achieve this goal, a quantitative methodology was employed using detailed network modeling in the DIgSILENT PowerFactory software along with actual electrical parameters. Subsequently, the mathematical calculation was performed by establishing electrical limits and equivalences to validate the simplified model through load flow simulations, where the results demonstrated that the scheme accurately replicated the electrical behavior of the original system, as the total output power determined in the full model was $107.99 \text{ kW} + j34.16 \text{ kVAr}$, while the simplified model yielded $107.98 \text{ kW} + j34.15 \text{ kVAr}$. In conclusion, this approach constitutes a highly useful technical tool for mitigating the complexity of a distribution model, thereby enabling a rapid and reliable evaluation without compromising the quality or representativeness of the results obtained in the network evaluation process.

Keywords: Distribution networks, Kron node reduction, Load flow, PowerFactory

ÍNDICE GENERAL

1.	INFORMACIÓN GENERAL	1
2.	INTRODUCCIÓN	2
2.1.	Situación Problemática	2
2.2.	Formulación del Problema	3
2.3.	Objeto y Campo de Acción	3
2.3.1.	Objeto de Investigación	3
2.3.2.	Campo de Acción	3
2.4.	Beneficiarios	4
2.4.1.	Beneficiarios directos	4
2.4.2.	Beneficiarios indirectos	4
2.5.	Justificación	4
2.6.	Objetivos	5
2.6.1.	General	5
2.6.2.	Específicos	5
2.7.	Sistema de Tareas	6
3.	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	7
3.1.	Sistema de distribución eléctrica	7
3.2.	Alimentadores eléctricos	7
3.2.1.	Complejidad de los alimentadores	8
3.3.	Métodos para reducción de la complejidad	9
3.3.1.	Reconfiguración de redes	10
3.3.2.	Agrupamiento de nodos o segmentación	11
3.3.3.	Modelos de equivalencia eléctrica	12

3.3.4.	Método de reducción de Kron	13
3.4.	Indicadores de desempeño y calidad	14
3.4.1.	Pérdidas técnicas (%)	15
3.4.2.	Nivel de tensión en nodos críticos	15
3.5.	Herramientas de análisis y simulación	16
3.5.1.	DIgSILENT PowerFactory	16
4.	MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS	18
4.1.	Enfoque de la investigación	18
4.2.	Diseño de la investigación	18
4.3.	Tipo de investigación	19
4.4.	Métodos	19
4.5.	Técnicas e instrumentos de recolección de información	20
4.6.	Contexto del sitio de estudio	20
4.6.1.	Tipo de red de distribución	21
4.6.2.	Nivel de tensión del alimentador	21
4.6.3.	Configuración trifásica y monofásica del sistema	22
4.6.4.	Características generales del alimentador	22
4.7.	Desarrollo de la metodología	23
4.7.1.	Extracción del modelo matemático inicial	23
4.7.2.	Partición y ordenamiento nodal	23
4.7.3.	Reducción matemática	24
4.7.4.	Obtención de parámetros eléctricos equivalentes	24
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	26
5.1.	Caracterización de los elementos del alimentador	26

5.2.	Reducción y simplificación de la complejidad del alimentador	31
5.2.1.	Reducción Equivalente del Subsistema 1	31
5.2.2.	Reducción equivalente del Subsistema 2	35
5.2.3.	Reducción equivalente del Subsistema 3	38
5.3.	Impedancia de los elementos de la red trifásica y monofásica del alimentador	42
5.4.	Validación del modelo simplificado	43
6.	CONCLUSIONES	45
7.	RECOMENDACIONES	46
8.	REFERENCIAS	47
9.	ANEXOS	50
	Anexo A: Red completa del modelo (inicio)	50
	Anexo B: Número de Nodos Totales	51
	Anexo C: Cálculo de admitancias	56
	Anexo D: Datos de los transformadores	73
	Anexo E: Código de Matlab para resolución de matrices	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución eléctrica [4]	7
Figura 2. Software DIgSILENT PowerFactory [2]	16
Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología aplicada para la reducción de la complejidad del alimentador Santa Rosa de Pichul – San Gerardo	25
Figura 4. Coordinación de líneas trifásica y monofásicas	27
Figura 5. Número de transformadores	29
Figura 6. Número de nodos existentes dentro del modelo (monofásicos y trifásicos)	30
Figura 7. Modelo general del modelo durante el levantamiento de información Anexo A.	43
Figura 8. Modelo general del después de la intervención	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO	1
Tabla 2. Sistema de tareas.	6
Tabla 3. Configuración de cargas monofásicas	26
Tabla 4. Configuración de cargas trifásicas	26
Tabla 5. Configuración de cargas trifásicas	27
Tabla 6. Parámetros eléctricos de las líneas utilizadas en el modelo del alimentador Santa Rosa de Pichul – San Gerardo	28
Tabla 7. Parámetros eléctricos de los transformadores utilizados en el modelo del alimentador Santa Rosa de Pichul – San Gerardo.	29
Tabla 8. Parámetros eléctricos de los nodos utilizados en el modelo del alimentador Santa Rosa de Pichul – San Gerardo	30
Tabla 9. Análisis global de impedancia	42
Tabla 10. Tabla comparativa de la simulación y el modelo	44

1. INFORMACIÓN GENERAL

Tema del proyecto: Implementación de un método para la reducción de la complejidad del alimentador Santa Rosa de Pichul – San Gerardo

Modalidad de Titulación:

Propuestas Tecnológicas

Proyectos de Investigación

Carrea: Ingeniería en Electricidad

Trabajo de Titulación Vinculado al Proyecto: DIRGI-CP2021-008 Implementación de tecnologías de eficiencia energética en el sector productivo del sector San Felipe para reducir las pérdidas en la red eléctrica.

Equipo de Trabajo:

Andi Grefa Nayeli Elsa

Pinto Montesdeoca Jimmy Sebastián

Ing. Vásquez Teneda Franklin Hernán, MSc.

Ing. Cruz Panchi Luis Rolando, MSc.

Área de Conocimiento:

Tabla 1. Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO

330000	CIENCIAS	3306	ingeniería	y	3306.09	Transmisión	y
TECNOLÓGICAS		Tecnología Eléctricas			Distribución		

Línea de investigación: Tecnología de la información y las comunicaciones, robótica, automatización y optimización de sistemas.

Sublíneas de investigación de la Carrera: Diseño, construcción y explotación eficiente de sistemas eléctricos con energía convencional y alternativa.

2. INTRODUCCIÓN

Actualmente, con el avance de las tecnologías de simulación y la digitalización de las redes eléctricas, la reducción de nodos se ha convertido en una herramienta clave dentro de la industria eléctrica, permitiendo desarrollar metodologías de modelación simplificada, facilitando una evaluación más eficiente del comportamiento de la red en sistemas de distribución eléctrica [1].

Es de esta manera que el presente trabajo de investigación se aborda desde la construcción de un modelo simplificado de la red de distribución eléctrica del alimentador Santa Rosa de Pichul – San Gerardo en la Provincia de Cotopaxi, aplicando para este fin el método matemático de Reducción de Kron destinado a condensar la matriz de admitancias nodales del sistema , logrando evaluar su comportamiento en estado estable de forma expedita mediante las simulaciones ejecutadas en el software DIGSILENT PowerFactory.

Para examinar la multiplicidad de los sistemas de distribución estructurados por un volumen elevado de nodos con diversas cargas interconectadas, resulta imperativo sortear las dificultades de procesamiento generadas por los altos requerimientos computacionales junto con los extensos tiempos de simulación , optando así por plantear un esquema matemático simplificado orientado a minimizar los puntos de conexión, logrando de esta manera una representación operativa veloz que conserve la exactitud del comportamiento eléctrico del tendido real.

Para materializar la reducción de elementos topológicos en el suministro eléctrico del alimentador Santa Rosa de Pichul - San Gerardo, es imperioso estructurar las líneas trifásicas y monofásicas operantes en Media Tensión destinadas al examen en estado estable, consiguiendo con esta acción estimar la respuesta de la red bajo parámetros operativos habituales, facilitando finalmente la ejecución veloz del cálculo de flujo de carga con mediciones exactas sin recurrir a modelados densos.

2.1. Situación Problemática

En Cotopaxi, un territorio con una infraestructura eléctrica indispensable para el desarrollo agrícola y comercial, la imposibilidad de estructurar ágilmente esta red restringe las opciones de los proyectistas para ejecutar mejoras sustanciales [2], dado que diversas investigaciones exponen cómo los alimentadores habituales superan los 1000 nodos de conexión,

transformando las simulaciones extensas en procesos computacionalmente agobiantes [3], mermando la agilidad para ejecutar diagnósticos veloces orientados a decisiones inmediatas y planeación estratégica.

Sumado a esto, las barreras técnicas descritas perjudican las operaciones diarias y entorpecen la proyección de escenarios venideros sobre el incremento de la demanda, añadiendo trabas para incorporar nuevas cargas o generación distribuida, situación particularmente grave en Cotopaxi al poseer actividades productivas ligadas directamente a la continuidad y calidad energética, donde la ausencia de un esquema manejable obstaculiza prever contingencias, proyectar la extensión del cableado y plantear reconfiguraciones operativas destinadas a afianzar la seguridad del suministro.

La elevada carga de procesamiento vinculada a representaciones excesivamente minuciosas retrasa la ejecución de flujos de potencia, cálculos de cortocircuito y coordinación de protecciones, limitando así el margen de acción ingenieril, motivo por el cual la implementación de técnicas orientadas a mitigar la multiplicidad topológica perfecciona el planteamiento de las simulaciones, elevando las destrezas de cálculo de los profesionales, facilitando ejecuciones comparativas y dinámicas para optimizar el desempeño operativo de la estructura estatal.

2.2. Formulación del Problema

El alimentador Santa Rosa de Pichul – San Gerardo presenta una red compleja con gran cantidad de nodos siendo 173, dificultando la evaluación de su comportamiento en estado estable en el software DIgSILENT PowerFactory. Lo que plantea la imperante necesidad de realizar un modelo simplificado que permita reducir la cantidad de nodos permitiendo un análisis de flujo de carga más ágiles y con menores tiempos de simulación.

2.3. Objeto y Campo de Acción

2.3.1. Objeto de Investigación

El alimentador Santa Rosa de Pichul – San Gerardo

2.3.2. Campo de Acción

3306.02 Aplicaciones Eléctricas

2.4. Beneficiarios

2.4.1. Beneficiarios directos

Santa Rosa de Pichul

2.4.2. Beneficiarios indirectos

Estudiantes

Docentes

Profesionales

2.5. Justificación

El estudio elaborado acerca de los modelos de equivalencia eléctrica para disminuir la cantidad de nodos en una red de distribución posee un alto valor académico y técnico, adaptando el método matemático de Kron a la particularidad del alimentador Santa Rosa de Pichul – San Gerardo para facilitar la medición de pérdidas energéticas junto con las caídas de tensión en instalaciones extensas , considerando que la examinación del suministro bajo diversas condiciones operativas resulta indispensable para comprender su comportamiento en situaciones reales , garantizando en todo momento que el esquema simplificado final logre la minimización topológica sin alterar el desempeño general del sistema.

La simplificación de modelos eléctricos es cada vez más necesaria debido a la expansión de las redes de distribución y la incorporación de nuevas tecnologías. Además, el interés en este caso de estudio se deriva de la experiencia previa en el análisis de redes de distribución eléctrica profundizando en conocimientos teóricos y prácticos sobre la modelación y simulación, así como en la aplicación de metodologías avanzadas para resolver problemas complejos en el campo de la ingeniería eléctrica.

Así, también fomentar la aplicación de mejores prácticas en la gestión y operación de redes de distribución eléctrica, alineándose con los objetivos de desarrollo energético regional y nacional.

2.6. Objetivos

2.6.1. General

Desarrollar un modelo simplificado de la red de distribución eléctrica trifásica y monofásica en media tensión del alimentador Santa Rosa de Pichul – San Gerardo implementando métodos de reducción de nodos para el estudio de la red en estado estable.

2.6.2. Específicos

- Caracterizar los elementos del alimentador Santa Rosa de Pichul – San Gerardo mediante la identificación y cuantificación de los nodos, cargas y conexiones de la red trifásica y monofásica para establecer el estado actual del sistema.
- Desarrollar la simplificación de la complejidad del alimentador Santa Rosa de Pichul – San Gerardo aplicando reducción de nodos.
- Obtener los modelos de impedancia de los elementos de la red trifásica y monofásica del alimentador simplificado.
- Validar el modelo simplificado mediante simulaciones en estado estable mediante una simulación computacional.

2.7. Sistema de Tareas

Tabla 2. Sistema de tareas.

Objetivos específicos	Actividades (tareas)	Resultados esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Caracterizar los elementos del alimentador Santa Rosa de Pichul – San Gerardo mediante la identificación y cuantificación de nodos, cargas y conexiones de la red trifásica y monofásica para establecer el estado actual del sistema.	Recolección de información técnica del alimentador. Identificación de nodos trifásicos y monofásicos. Levantamiento de datos de transformadores, líneas y cargas. Elaboración/actualización del diagrama unifilar.	Base de datos técnica del alimentador. Diagrama unifilar creado. Cuantificación total de nodos y cargas. Determinación del estado operativo actual.	Revisión documental de la empresa eléctrica. Diagrama unifilar. Hojas de cálculo para organización de datos.
Aplicar métodos de reducción de nodos para simplificar la topología del alimentador manteniendo la equivalencia eléctrica del sistema.	Selección de nodos pasivos (sin inyección de carga/generación) para su eliminación. Extracción de la matriz de admitancias nodales (Y_{bus}) del sistema original. Aplicación del algoritmo matricial de Reducción de Kron. Reconfiguración topológica del modelo.	Red topológicamente simplificada del alimentador. Disminución del número de nodos. Matriz de admitancia reducida (Y_{red}).	Programa de análisis de redes (DIGSILENT). Desarrollo matricial en Matlab. Algoritmos de álgebra lineal aplicada.
Determinar los parámetros de los elementos equivalentes del alimentador simplificado.	Procesamiento matemático de la matriz particionada. Cálculo de las nuevas admitancias de cada transformador de la red de cargas. Transformación matemática de admitancias a impedancias de rama equivalentes (Z_{eq}). Consolidación de los parámetros eléctricos del modelo reducido.	Matriz de parámetros eléctricos finales del modelo reducido. Valores de resistencia e inductancia equivalentes calculados para las nuevas ramas. Validación de la conectividad de la nueva topología.	Software de análisis y simulación eléctrica. Entorno de cálculo matricial avanzado como MATLAB para procesar la inversión y multiplicación de las matrices complejas.
Validar el modelo simplificado mediante simulaciones computacionales en estado estable comparándolo con el modelo original del alimentador.	Ejecución de flujo de carga en modelo original. Ejecución de flujo de carga en modelo reducido. Comparación de tensiones, corrientes y pérdidas. Análisis de error porcentual.	Validación técnica del modelo simplificado. Verificación de equivalencia eléctrica. Comparación cuantitativa antes VS después.	Estudio de flujo de carga. Indicadores de error porcentual. Análisis comparativo técnico.

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1. Sistema de distribución eléctrica

El sistema de distribución eléctrica comprende la infraestructura diseñada para suministrar energía desde las estaciones transformadoras hasta los usuarios finales. Incluye redes primarias y secundarias, alimentadores, transformadores, subestaciones y dispositivos de protección. Su función principal es garantizar un suministro eléctrico continuo, seguro y eficiente, mantener la calidad de la tensión y minimizar las pérdidas de energía [4].

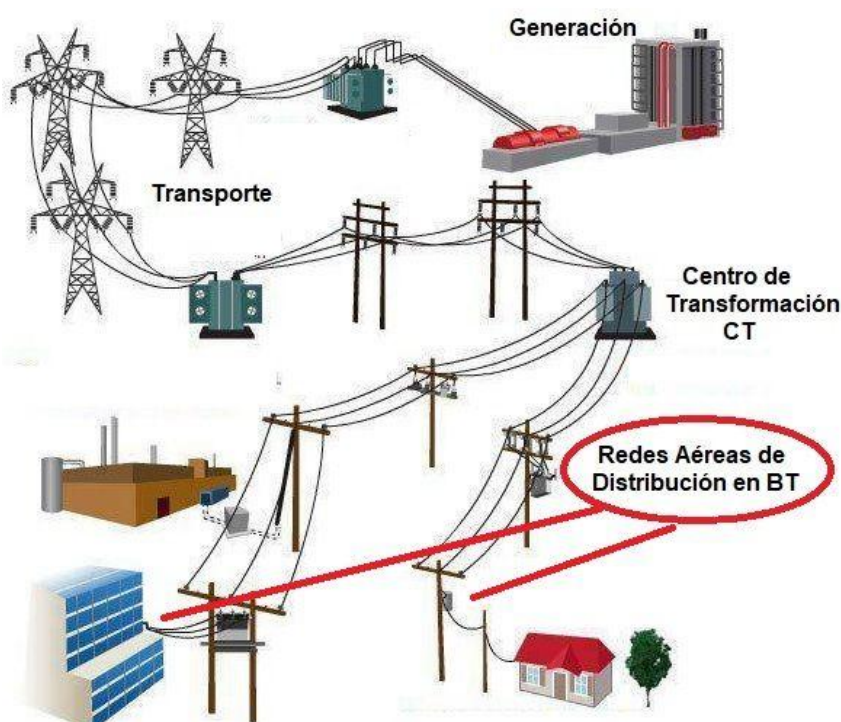


Figura 1. Distribución eléctrica [4]

En la práctica, esta etapa es una de las más extensas y complejas del sistema eléctrico, ya que debe adaptarse a las condiciones ambientales, ya sean urbanas o rurales, así como a las sobretensiones y a las características topográficas y ambientales de la zona [3].

3.2. Alimentadores eléctricos

Los alimentadores eléctricos son las líneas que transportan energía desde una subestación a diversas zonas de consumo. Técnicamente, forman la parte del sistema de distribución donde se producen las principales caídas de tensión y pérdidas de potencia [5].

La dificultad estructural de un alimentador está subordinada a múltiples variables como su longitud, la cantidad de ramales, el conductor utilizado, la topología de la red y el tipo de cargas interconectadas, motivo por el cual la evaluación detallada de estas líneas de suministro se posiciona como una etapa indispensable para planificar, operar y perfeccionar las redes de distribución eléctrica [6].

3.2.1. Complejidad de los alimentadores

Esta multiplicidad técnica engloba el grado de dificultad vinculado al modelado, evaluación, funcionamiento y mantenimiento de la infraestructura de suministro, manifestándose con mayor notoriedad en cableados de media tensión con topologías extensas y altamente ramificadas propias de zonas rurales o semiurbanas, escenarios donde los nodos, derivaciones e interconexiones se multiplican a la par de la expansión del sistema eléctrico [7].

Analizando la infraestructura desde su conformación topológica, la multiplicidad del suministro está estrechamente ligada a la cantidad de terminales de carga, la existencia de abundantes derivaciones laterales y la coexistencia de líneas trifásicas y monofásicas, ocasionando que un mayor volumen de conexiones genere representaciones sumamente densas, dificultando caracterizar el comportamiento eléctrico general y localizar zonas vulnerables propensas a caídas de tensión, sobrecargas o elevadas mermas de potencia [8].

En materia operativa, las complicaciones se intensifican por las alteraciones del flujo de potencia a través del recorrido, derivadas de un reparto asimétrico del consumo y de impedancias fluctuantes en el tendido, sumando a ello la convivencia de demandas lineales y no lineales en infraestructuras de 3 fases que desequilibran el sistema, originando corrientes de secuencia negativa, incrementos en las pérdidas y deterioro de la energía suministrada, eventualidades que exigen esquemas minuciosos para plasmar con exactitud las verdaderas respuestas de la red [9].

En cuanto al procesamiento de datos de acuerdo con Pilatagsi [10], la multiplicidad del cableado afecta directamente las dimensiones de las matrices aplicadas para las evaluaciones, especialmente al calcular flujos de potencia mediante métodos nodales, puesto que un volumen elevado de puntos de interconexión genera sistemas matemáticos inmensos, incrementando la duración de las simulaciones, demandando altos recursos informáticos y entorpeciendo la

ejecución de estudios comparativos, agravándose este panorama al examinar múltiples condiciones operativas o al planificar extensiones territoriales.

Evaluando las labores de funcionamiento y planificación, los tendidos sumamente densos suponen un obstáculo considerable para las distribuidoras de energía, entorpeciendo la formulación de decisiones inmediatas orientadas a perfeccionar los niveles de tensión, minimizar las mermas energéticas y aprovechar eficientemente los activos disponibles, adicionando el inconveniente de que el inmenso flujo de datos derivado de representaciones excesivamente minuciosas impide aislar los componentes que impactan con mayor fuerza en el desempeño del sistema [11].

Para subsanar estos inconvenientes, disminuir la extensión topológica de las líneas de suministro conforma una necesidad técnica ineludible para agilizar las evaluaciones sin alterar la exactitud de las métricas resultantes, logrando a través de métodos de simplificación de nodos y equivalencia eléctrica condensar la esencia del circuito en una representación de menor tamaño para facilitar el cálculo en estado estacionario, conservando los parámetros operativos principales, perfeccionando las simulaciones y asegurando una medición óptima del rendimiento general de la red [11, 12].

3.3. Métodos para reducción de la complejidad

Resulta imperativo señalar que mitigar la multiplicidad de un sistema de distribución eléctrica conforma un procedimiento analítico orientado a simplificar su esquema sin alterar el comportamiento operativo verdadero, siendo esta maniobra indispensable en redes de gran tamaño dotadas con un alto volumen de nodos o derivaciones, puesto que acorta los tiempos de procesamiento computacional, agilizando evaluaciones como la simulación de flujos de potencia, la determinación de cortocircuitos y el estudio de la estabilidad.

En concordancia con los postulados de Baran y Wu, la multiplicidad de un circuito guarda una relación ineludible con la cantidad de variables y las interconexiones presentes entre sus diversos componentes, motivo por el cual la condensación matemática no debe suponer la eliminación de datos sustanciales, debiendo más bien conformar una abstracción topológica que salvaguarde permanentemente las propiedades eléctricas constitutivas de la infraestructura [12].

3.3.1. Reconfiguración de redes

Una de las maniobras habituales para atenuar la multiplicidad de las líneas de suministro eléctrico consiste en reconfigurar el tendido, técnica que requiere alterar la topología del circuito accionando la apertura o cierre de enlaces junto con interruptores seccionales, buscando con ello repartir nuevamente los consumos para atenuar las mermas técnicas y perfeccionar los niveles de voltaje a lo largo de toda la extensión del cableado [13].

Al ejecutar esta modificación topológica el esquema original se convierte en una armazón más eficaz al suprimir trayectorias innecesarias o tramos con escaso paso de energía, sumado a que este procedimiento incrementa la seguridad en la operación al posibilitar la apertura de caminos opcionales para el flujo eléctrico frente a posibles averías o labores de mantenimiento previamente programadas [14].

Este proceso se apoya en el uso de análisis topológico y algoritmos de optimización que determinan los procesos necesarios para lograr una configuración más estable. En los últimos años, la incorporación de herramientas computacionales ha permitido automatizar este proceso, lo que se traduce en resultados más rápidos y precisos. Esta estrategia es especialmente útil en zonas donde la expansión de la red se ha producido sin una planificación adecuada, ya que permite reorganizar los alimentadores existentes sin reemplazar infraestructura costosa [15]. Este se puede abordar desde la siguiente expresión:

$$\min P_{Loss} = \sum_{i=1}^n R_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

P_{loss} = pérdidas totales de potencia activa en el alimentador

R_i = resistencia del tramo i

P_i = potencia activa que fluye por el tramo i

Q_i = potencia reactiva que fluye por el tramo i

V_i = tensión en el nodo i

n = número total de ramas

3.3.2. Agrupamiento de nodos o segmentación

Otra técnica eficaz para simplificar la estructura de un sistema de distribución es la agrupación o segmentación de nodos. Este método intenta representar grupos de cargas o segmentos de línea con características similares mediante un nodo o segmento equivalente. Según Silva et al., esta estrategia es especialmente útil en redes extensas o con un gran número de consumidores, ya que reduce el número de elementos a analizar sin afectar significativamente la precisión de los resultados [16].

El principio básico consiste en identificar grupos de nodos que compartan niveles de tensión, demandas o factores de potencia similares, de modo que puedan combinarse en una única representación que exprese el comportamiento eléctrico general de la zona. Para implementar esto correctamente, es necesario un estudio detallado de la carga, las condiciones de operación y la ubicación geográfica de cada componente del sistema [16].

Una vez definidos los grupos equivalentes, se crea un modelo conciso del alimentador, lo que reduce significativamente el número de ecuaciones y variables a resolver. Este proceso no solo facilita los cálculos, sino que también permite identificar áreas o regiones críticas donde se concentran las pérdidas de energía. Por lo tanto, la agrupación de nodos contribuye a la toma de decisiones técnicas destinadas a mejorar la eficiencia y la confiabilidad de la red de distribución [17]. Este se puede abordar desde la siguiente expresión:

$$S_{eq} = \sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^n (P_i + jQ_i) \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

S_{eq} = potencia compleja equivalente del grupo

P_i = potencia activa del nodo i

Q_i = potencia reactiva del nodo i

n = número de nodos agrupados

3.3.3. Modelos de equivalencia eléctrica

Los modelos de equivalencia de potencia son una herramienta ampliamente utilizada para representar redes complejas de forma simplificada. Su objetivo es reemplazar ciertos segmentos de alimentación con modelos equivalentes que preservan los parámetros eléctricos más importantes, como la impedancia, la potencia activa y reactiva, y los niveles de tensión promedio. Según Cruz et al. [18], este enfoque reduce el número de nodos y líneas en el sistema sin alterar significativamente el comportamiento general del flujo de potencia, lo que lo hace particularmente útil en estudios de planificación o contingencia.

Dichos esquemas se estructuran mediante técnicas matemáticas de cálculo orientadas a definir parámetros representativos fundamentados en las propiedades primordiales de la infraestructura, siendo aplicables en 2 variantes de simulación tanto estática como dinámica para examinar topologías extensas o sistemas con recursos informáticos limitados, sumado a que al conservar las magnitudes eléctricas constitutivas resulta factible integrar esta equivalencia en evaluaciones de optimización junto con el control del voltaje y la medición de la fiabilidad, facilitando así un escrutinio veloz del suministro [3].

El método de equivalencia eléctrica se basa en la idea de representar una red compleja mediante un modelo simplificado que mantiene la misma respuesta eléctrica desde diferentes perspectivas. En otras palabras, su objetivo es preservar el comportamiento del sistema en términos de tensión, corriente y pérdidas, reduciendo el número de elementos involucrados. Esta simplificación se logra reemplazando grupos de líneas, transformadores y cargas por sus impedancias o fuentes equivalentes, calculadas según las reglas básicas de los circuitos eléctricos [3].

En el contexto de esta investigación, la estructura del alimentador Santa Rosa de Pichul – San Gerardo presenta un número significativo de nodos, ramales secundarios y derivaciones de baja carga. Estas características hacen que su modelado completo en software de simulación, sea más complejo, tanto en el procesamiento como en el análisis de los resultados [5]. Por ello, para lograr esta simplificación, se aplica el método de Reducción de Kron, el cual opera directamente sobre la matriz de admitancias nodales (Y_{bus}) del sistema. Este método topológico permite eliminar matemáticamente los nodos de paso, preservando intacta la respuesta eléctrica en los nodos de interés.

La ecuación nodal del sistema se divide en submatrices separando los nodos a retener (subíndice r) de los nodos a eliminar (subíndice e):

$$\begin{bmatrix} I_r \\ I_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{rr} & Y_{re} \\ Y_{er} & Y_{ee} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ V_e \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 3}$$

Dado que los nodos a eliminar son pasivos y no tienen inyección de corriente de fuentes o cargas ($I_e = 0$), el sistema de ecuaciones se reordena para despejar las tensiones de los nodos eliminados y sustituirlas en las ecuaciones de los nodos retenidos. El resultado es una matriz de admitancia equivalente reducida (Y_{red}) descrita por la siguiente expresión:

$$Y_{red} = Y_{rr} - Y_{re}Y_{ee}^{-1}Y_{er}$$

Donde:

Y_{rr} = Sub matriz de admitancias propias y mutuas de los nodos a retener.

Y_{ee} = Sub matriz de admitancias de los nodos a eliminar.

Y_{re} y Y_{er} = Submatrices de admitancias mutuas entre nodos retenidos y eliminados.

3.3.4. Método de reducción de Kron

Es una técnica matemática utilizada en el análisis de redes eléctricas. Su objetivo es eliminar los nodos internos que no son esenciales para la investigación principal. Su aplicación se basa en dividir la matriz de admitancia de nodos del sistema en submatrices, separando los nodos esenciales de los que se van a eliminar. El resultado de esta división es una nueva matriz más pequeña que mantiene un comportamiento eléctrico equivalente entre los nodos restantes y permite reducir el tamaño del sistema sin comprometer la precisión de los resultados eléctricos requeridos. Esta metodología se utiliza ampliamente en estudios de sistemas energéticos, modelado de líneas de transmisión y reducción de redes trifásicas [19]. Su representación matemática puede verse influenciada por medio de la siguiente expresión:

$$Y_{red} = Y_{aa} - Y_{ab}Y_{bb}^{-1}Y_{ba} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde Y_{bb} representa la submatriz asociada a los nodos que serán eliminados.

Este enfoque permite preservar las interacciones eléctricas entre nodos externos, lo que reduce significativamente el esfuerzo computacional en simulaciones numéricas y análisis matriciales. Su principal ventaja radica en que simplifica el procesamiento de redes extensas, especialmente cuando existen nodos intermedios o conductores neutros, cuya ausencia no altera la respuesta global del sistema en estudio. La ecuación general del sistema se expresa como:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} \\ Y_{ba} & Y_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde

I_a y V_a representan las corrientes y tensiones de los nodos principales

I_b y V_b corresponden a los nodos internos que se desean eliminar.

Para aplicar la reducción, se considera que en los nodos eliminados no existe inyección de corriente, por lo que:

$$I_b = 0$$

A partir de esta condición, se despeja el vector de tensiones de los nodos internos:

$$V_b = -Y_{bb}^{-1}Y_{ba}V_a$$

Posteriormente, esta expresión se sustituye en la ecuación correspondiente a los nodos principales, obteniendo la forma reducida del sistema:

$$I_a = (Y_{aa} - Y_{ab}Y_{bb}^{-1}Y_{ba})V_a$$

3.4. Indicadores de desempeño y calidad

Para evaluar el impacto de las estrategias de reducción de la complejidad en los sistemas de distribución eléctrica, se deben utilizar indicadores técnicos y de rendimiento para medir los beneficios obtenidos. Estos parámetros reflejan las mejoras en la eficiencia, estabilidad y confiabilidad del sistema antes y después de implementar el método.

Conforme a la normativa IEEE 1366 [20], los parámetros de desempeño junto con las métricas de calidad constituyen instrumentos indispensables para la administración técnica y la formulación de dictámenes estratégicos en las corporaciones de distribución eléctrica, facultando estas evaluaciones la ejecución de cotejos frente a magnitudes de referencia o metas

preestablecidas para garantizar una medición imparcial del desenvolvimiento operativo de la red.

3.4.1. Pérdidas técnicas (%)

Las mermas técnicas engloban aquella fracción energética disipada durante los procesos de transmisión y distribución a causa de la resistencia propia de los conductores junto con los transformadores y demás elementos del circuito, expresándose habitualmente como un valor porcentual respecto a la potencia total provista, estando condicionadas por variables como el amperaje circulante, la extensión kilométrica del tendido y el calibre del cableado empleado [3].

Dichas disipaciones aumentan en líneas de suministro provistas de configuraciones topológicas múltiples al transitar la energía por trayectos extensos atravesando abundantes derivaciones, motivo por el cual la ejecución de técnicas de simplificación estructural minimiza estas mermas al perfeccionar las rutas de la corriente y balancear los consumos entre las 3 fases, representando este decremento porcentual una optimización notoria en la operatividad del circuito sumada a una reducción en los gastos de funcionamiento para validar la utilidad del procedimiento planteado [3].

3.4.2. Nivel de tensión en nodos críticos

La magnitud del voltaje en las terminales más distantes o provistas de una mayor carga conforma un parámetro decisivo para calificar la excelencia del servicio eléctrico, originándose las caídas de tensión en las mallas de distribución por la sumatoria de la resistencia y reactancia a través de toda la extensión de los cables, perjudicando esta condición el funcionamiento de los aparatos de los usuarios finales y mermando la eficacia del sistema [21].

Al ejecutar procedimientos orientados a atenuar la composición topológica se condensa la estructura del cableado, minimizando la impedancia global junto con las caídas de voltaje en las zonas vulnerables para originar un esquema compacto provisto de un perfil de tensión más estable dentro de las fronteras exigidas por las normativas del 5 % respecto a la magnitud nominal, convirtiendo el cotejo de estos niveles eléctricos antes y después de la simplificación en una medición directa de las optimizaciones obtenidas en el suministro [15].

3.5. Herramientas de análisis y simulación

El escrutinio y perfeccionamiento de las líneas de suministro eléctrico demandan el empleo de aplicaciones informáticas especializadas facultadas para emular el accionar verdadero del circuito frente a múltiples exigencias de demanda y configuración, posibilitando estas plataformas digitales un diseño exacto de la topología para ejecutar cálculos de flujos de potencia junto con la estimación de mermas, el dictamen de cortocircuitos y las mediciones de estabilidad operativa [22].

Conforme a los postulados de Pérez y Mora el aprovechamiento de programas computacionales de alta especialidad resulta indispensable en las labores ingenieriles contemporáneas al viabilizar evaluaciones densas prescindiendo de la manipulación física de la infraestructura, aminorando de esta forma los egresos económicos junto con los peligros y los lapsos de ejecución mediante herramientas de amplio uso como ETAP, DIGSILENT PowerFactory y CYME, opciones provistas de interfaces visuales intuitivas, extensos catálogos de componentes y la aptitud para contrastar escenarios previos y posteriores a la mitigación topológica [22].

3.5.1. DigSILENT PowerFactory

La plataforma DIGSILENT PowerFactory se posiciona como una de las aplicaciones más exhaustivas y exactas para el escrutinio de los sistemas eléctricos de potencia, siendo este entorno desarrollado por la corporación alemana DIGSILENT GmbH para abarcar la totalidad de las etapas investigativas de la electricidad desde el diseño de los modelos hasta la simulación, el examen dinámico y la medición de la estabilidad [2].

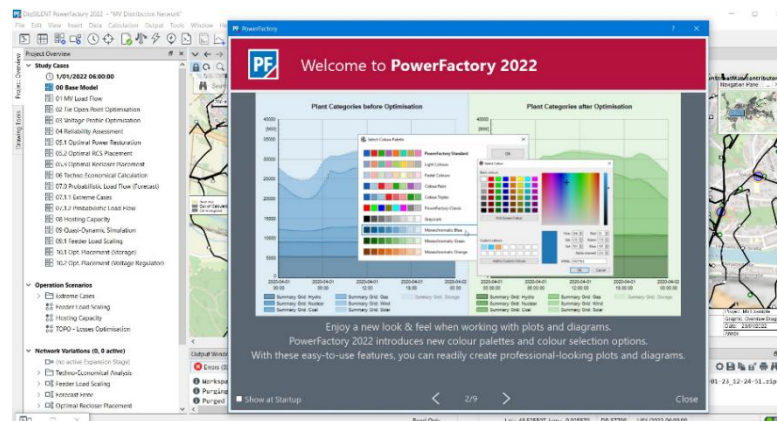


Figura 2. Software DIGSILENT PowerFactory [2]

Su versatilidad estructural viabiliza la representación tanto de líneas de suministro reducidas como de gigantescas mallas eléctricas interconectadas, figurando entre sus mayores beneficios la disposición de módulos configurados para agrupar en un único entorno diversas modalidades de cálculo como el flujo de potencia, los cortocircuitos, las distorsiones armónicas, la fiabilidad, la sincronización de las protecciones y los eventos transitorios [2].

Uno de sus atributos más sobresalientes radica en la capacidad para atenuar la multiplicidad al estructurar los esquemas topológicos, posibilitando el cotejo del accionar de la red primigenia frente a un diseño condensado al contabilizar las mermas energéticas junto con los voltajes nodales y el balance, contando adicionalmente con instrumentos de automatización impulsados por rutinas de programación en DPL o Python para agilizar la formulación de algoritmos de optimización propios y la corrida expedita de simulaciones recurrentes [13].

4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

4.1. Enfoque de la investigación

La investigación adoptó un enfoque cuantitativo, ya que se basó en el análisis de variables eléctricas específicas del alimentador Santa Rosa de Pichul – San Gerardo. El objetivo fue obtener resultados numéricos para evaluar la eficacia del método de reducción de complejidad propuesto.

Este enfoque facilitó la transformación de los datos generados durante la simulación en información objetiva y verificable, expresada mediante indicadores medibles que facilitaron la interpretación técnica y la toma de decisiones.

Además, una orientación cuantitativa resultó ser el más adecuado para garantizar la reproducibilidad de los resultados, ya que las herramientas de simulación se implementaron en condiciones controladas que reproducían fielmente el comportamiento real del sistema de distribución.

4.2. Diseño de la investigación

La presente investigación se estructuró bajo los lineamientos de un diseño metodológico no experimental de carácter descriptivo y correlacional, justificado por la nula manipulación directa sobre las variables operativas de la infraestructura eléctrica, prefiriendo en su lugar examinar minuciosamente el desempeño del circuito a través de 2 escenarios comparativos correspondientes a los instantes previos y posteriores a la ejecución del procedimiento matemático orientado a la condensación de los nodos.

El diseño de correlación permitió identificar las relaciones entre las modificaciones estructurales de la red y los cambios en el rendimiento eléctrico, lo que permitió explorar la posibilidad de reducir nodos del modelo de red completo.

Además, facilitó la comparación entre diferentes escenarios simulados, lo que permitió un análisis riguroso y verificable mediante software especializado.

4.3. Tipo de investigación

Este estudio se clasificó como investigación aplicada porque se centró en la solución de un problema técnico específico dentro del sistema de distribución eléctrica, en este caso, el alimentador Santa Rosa de Pichul – San Gerardo. Las investigaciones de tipo aplicadas se enfocan en solventar cada uno de los problemas evidenciado de manera íntegra, es decir identificando directamente su problema raíz y dando soluciones pertinentes y acertadas [23].

Además, esta investigación tuvo como objetivo implementar un método que utiliza los principios científicos y las herramientas técnicas de la ingeniería eléctrica para optimizar la operación real del sistema. Por lo tanto, los resultados obtenidos tienen un enfoque práctico y transferible, orientado a mejorar la eficiencia energética y operativa del alimentador.

Asimismo, se trató de un estudio de campo y documental. Los estudios de campo se caracterizan por generar un levantamiento de información en sitio, por medio de cual se valoran los datos o estimaciones que se pueden emplear en una investigación. Por otro lado, las investigaciones de tipo documental se basan en búsquedas bibliográficas de las cuales se extrae la información precisa y verídica para solventar un hecho [24]. Es de esta manera que se recopilaron datos reales del sistema, complementados con información técnica de manuales, normas eléctricas internacionales como la IEEE y bibliografías especializadas. Esta combinación permitió integrar la observación empírica con el soporte teórico necesario para validar los resultados obtenidos.

4.4. Métodos

El método utilizado fue cuantitativo-analítico, basado en la comparación de parámetros técnicos antes y después de aplicar el proceso de reducción de complejidad. De acuerdo con Sampieri [23], un método cualitativo se caracteriza por trabajar directamente con números o valores que permiten la caracterización numérica de un problema. Y en conjunto con la parte analítica gestionar el correcto desempeño o muestra de esos resultados.

Bajo esta premisa durante 1 etapa inicial se recopiló la información técnica del alimentador, identificando su configuración estructural junto con la cantidad de nodos y la extensión kilométrica de las líneas además de otros parámetros eléctricos determinantes, procediendo a

continuación con el diseño computacional de la red para ejecutar las simulaciones de flujo de potencia orientadas a conseguir los valores métricos de partida.

Posteriormente se implementó el procedimiento matemático para atenuar la multiplicidad del circuito, abarcando esta maniobra la condensación de los puntos de interconexión junto con el cálculo de equivalencias eléctricas y la modificación topológica del tendido, logrando que sobre este esquema compacto se corran nuevas simulaciones bajo 2 estados operativos idénticos, posibilitando así el cotejo analítico directo entre los escenarios planteados.

Por último, se evaluaron indicadores clave como pérdidas totales, perfil de tensión, balance de carga y confiabilidad del sistema, validando numéricamente la eficacia del proceso propuesto para mejorar el rendimiento eléctrico del alimentador.

4.5. Técnicas e instrumentos de recolección de información

Se utilizaron técnicas de simulación documental y/o bibliográfica, observacional y computacional para obtener la información necesaria. Las investigaciones de índole observacional se caracterizan por identificar la información sin entrar en contacto directo con el problema [25].

En primer lugar, se realizó una revisión documental de normas técnicas internacionales, manuales de software y publicaciones especializadas, que sirvió como base teórica para el desarrollo de la metodología. Esta revisión permitió definir los principios fundamentales del modelado de redes eléctricas, el análisis del flujo de potencia y la reducción de la complejidad.

A continuación, se recopiló información técnica de la empresa distribuidora sobre el alimentador de Santa Rosa de Pichul – San Gerardo, incluyendo datos sobre la longitud de la línea, el calibre del conductor, la ubicación de los transformadores y las características de la carga conectada.

4.6. Contexto del sitio de estudio

El municipio de Santa Rosa de Pichul recibe electricidad de la Línea 2 de la subestación San Rafael, ubicada en la capital del cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi. Este sistema de distribución forma parte de la infraestructura operada por la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi S.A, empresa responsable del suministro eléctrico en la región. El suministro eléctrico

se extiende desde la subestación San Rafael a las zonas rurales y semiurbanas del cantón, atendiendo a una población geográficamente dispersa. Esto da como resultado una estructura radial con largas líneas y numerosos ramales, similar a los sistemas de distribución en las zonas rurales de todo el país [26].

Desde la perspectiva de este estudio, la línea eléctrica de Santa Rosa de Pichul – San Gerardo es importante porque representa una red de distribución en constante expansión. Sus desafíos estructurales y operativos requieren un análisis detallado para garantizar la calidad y confiabilidad adecuadas del suministro eléctrico.

4.6.1. Tipo de red de distribución

La provisión energética de Santa Rosa de Pichul – San Gerardo se constituye como una arquitectura radial operante en media tensión, tratándose de una disposición empleada con asiduidad por las distribuidoras de electricidad dada su maniobrabilidad simplificada junto con la integración de mecanismos de resguardo de baja complejidad técnica, permitiendo así una gestión fluida del flujo de potencia sin requerir inversiones onerosas en sistemas de control automatizados o topologías de difícil mantenimiento para los operarios locales. En este tipo de red, la energía se suministra desde un único punto de suministro, la subestación San Rafael a diversos usuarios finales sin necesidad de bucles cerrados. Sin embargo, la topología radial presenta limitaciones significativas para una red de suministro eléctrico de gran tamaño. La falta de vías de suministro secundarias implica que una falla en cualquier parte de la red puede afectar directamente a todos los consumidores aguas abajo, lo que aumenta la importancia de un análisis exhaustivo del comportamiento eléctrico del sistema [27].

Además, la antigua ampliación de la línea de suministro ha añadido nuevos ramales y derivaciones, lo que aumenta el número de nodos y elementos eléctricos que deben considerarse en los estudios de flujo de carga y análisis de estado estacionario.

4.6.2. Nivel de tensión del alimentador

El suministro eléctrico de Santa Rosa de Pichul – San Gerardo opera a una tensión nominal de 13,8 kV, equivalente a la norma de media tensión utilizada por la Empresa Eléctrica Ambato Regional Centro Norte S. A. EEASA. para la distribución eléctrica en zonas urbanas y rurales.

Esta tensión permite una transmisión eficiente de energía a largas distancias y reduce las pérdidas técnicas asociadas al flujo de potencia [27].

El uso de 13,8 kV requiere equipos especializados de protección, seccionamiento y conversión, como interruptores automáticos de media tensión, seccionadores y transformadores de distribución, que son componentes esenciales del suministro eléctrico y deben estar correctamente representados en el modelo eléctrico desarrollado para este estudio.

Además, la tensión nominal determina los límites permisibles de caída de tensión y los criterios de calidad del servicio especificados en la normativa aplicable, aspectos cruciales para el análisis en estado estacionario y la validación del modelo simplificado propuesto.

4.6.3. Configuración trifásica y monofásica del sistema

El suministro eléctrico de Santa Rosa de Pichul – San Gerardo utiliza una configuración mixta trifásica/monofásica, común en las redes de distribución que atienden zonas rurales. La línea principal de suministro eléctrico se compone principalmente de líneas trifásicas de media tensión que alimentan transformadores de distribución ubicados a lo largo de la ruta de suministro [27]. De estos transformadores se derivan ramales monofásicos para suministrar energía a hogares y pequeños comercios. Esta configuración cumple con criterios técnicos y económicos, ya que la demanda individual no justifica la extensión de una red trifásica a todos los usuarios finales.

La coexistencia de elementos trifásicos y monofásicos aumenta la complejidad del análisis eléctrico del sistema, ya que puede provocar desequilibrios de carga entre fases, fluctuaciones en los perfiles de tensión y variaciones en la corriente que fluye por cada conductor. Estos factores deben considerarse cuidadosamente durante el proceso de modelado y son una de las principales razones para implementar métodos de reducción de complejidad que ayuden a representar con precisión el comportamiento general del suministro eléctrico.

4.6.4. Características generales del alimentador

Según Villacrés [26] la red eléctrica de Santa Rosa de Pichul se caracteriza por su gran tamaño, numerosos puntos de distribución y una diversa distribución de la carga a lo largo de su recorrido. Esto se debe al continuo crecimiento de la red, común en los sistemas de distribución

de zonas rurales y pequeñas localidades. Las principales características comunes de las redes eléctricas incluyen:

- Múltiples puntos de distribución conectados por ramales y puntos de carga.
- Variables longitudes de línea, que inciden directamente en la impedancia y la caída de tensión observada en cada sección.
- Transformadores de distribución monofásicos y trifásicos conectan la red de media tensión con los consumidores de baja tensión.
- La demanda de electricidad en la mayoría de los hogares presenta perfiles de carga variables.

Debido a estas características, las fuentes de alimentación presentan un comportamiento eléctrico complejo en los estudios de flujo de carga y análisis de estado estacionario, lo que requiere el uso de métodos que reduzcan la complejidad del modelo sin comprometer la representación del sistema real.

4.7. Desarrollo de la metodología

La obtención de los parámetros de la red equivalente se fundamenta en la simplificación topológica del sistema mediante la Reducción de Kron. Este proceso matemático requiere estructurar la información del alimentador en forma matricial para eliminar aquellos nodos que operan únicamente como puntos de paso.

4.7.1. Extracción del modelo matemático inicial

A partir del modelado detallado del alimentador Santa Rosa de Pichul – San Gerardo en el software de simulación, se ejecuta un flujo de carga base. Esto permite capturar el módulo de la tensión (V) y el ángulo de fase (θ) en todos los nodos, que servirán como valores de validación. Posteriormente, se extrae la matriz de admitancias nodales (Y_{bus}) original del sistema, la cual contiene las admitancias propias en la diagonal principal y las admitancias mutuas fuera de la diagonal.

4.7.2. Partición y ordenamiento nodal

Se realiza un análisis de los nodos del sistema para clasificarlos en dos grupos. El primer grupo corresponde a los "nodos retenidos" o frontera (subíndice r), que incluyen la barra de la

subestación y los nodos con derivaciones de carga significativas. El segundo grupo abarca los "nodos a eliminar" (subíndice e), que corresponden a puntos intermedios de conexión o postes sin inyección neta de potencia ($I_e = 0$). Con esta clasificación, la matriz Y_{bus} se reordena y particiona en cuatro sub matrices: Y_{rr} , Y_{re} , Y_{er} y Y_{ee} .

4.7.3. Reducción matemática

Se aplica el algoritmo de Kron para colapsar la matriz original y obtener la matriz de admitancia reducida (Y_{red}). Para resolver la ecuación $Y_{red} = Y_{rr} - Y_{re}Y_{ee}^{-1}Y_{er}$, es necesario calcular la inversa de la sub matriz de los nodos a eliminar (Y_{ee}^{-1}) y realizar multiplicaciones de matrices de números complejos.

4.7.4. Obtención de parámetros eléctricos equivalentes

Los elementos resultantes en la matriz Y_{red} representan las admitancias de las nuevas ramas que conectan directamente los nodos frontera retenidos. Estos valores ($Y = G + jB$) se invierten matemáticamente para obtener las impedancias en serie equivalentes ($Z_{eq} = R + jX$) de las nuevas líneas consolidadas.

El balanceo de carga entre fases conforma una condición indispensable para el correcto funcionamiento de un sistema de distribución al evitar que los desequilibrios originen corrientes en los neutros y ocasionen pérdidas adicionales, conectándose de manera directa con la representación gráfica que ilustra visualmente la distribución equitativa de múltiples circuitos de consumo a través de las líneas disponibles para impedir fluctuaciones severas, logrando con esto una red con parámetros operativos estables al agrupar nodos con un comportamiento eléctrico semejante.

Una vez analizado el proceso de reducción y abordado el proceso metodológico su simplificación se detalla en la figura expuesta a continuación. Este resumen involucra desde la identificación del problema, la metodología y el método empleado hasta la comparación entre el modelo original y la red simplificada.

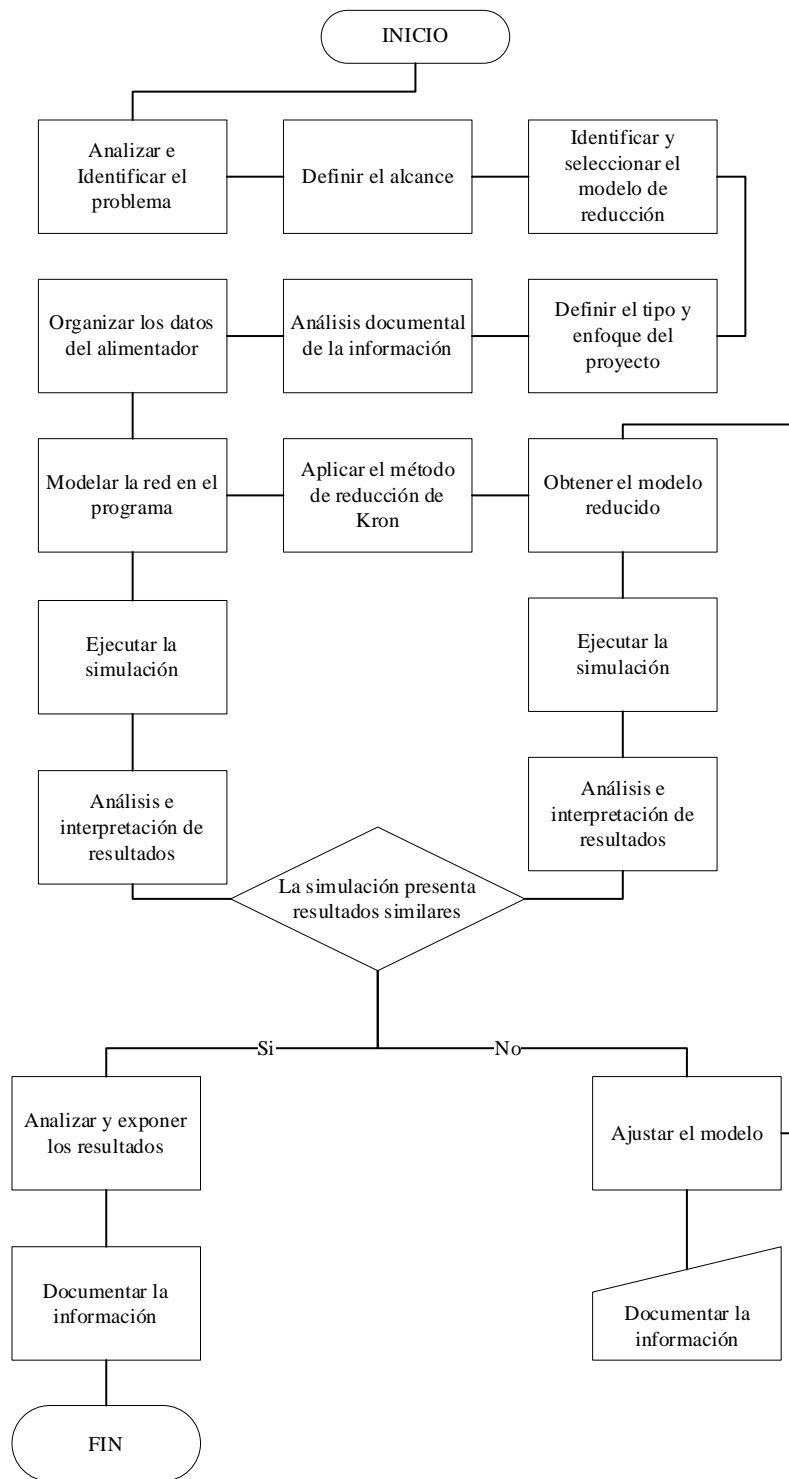


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología aplicada para la reducción de la complejidad del alimentador Santa Rosa de Pichul – San Gerardo

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Caracterización de los elementos del alimentador

El modelo está constituido por 173 nodos interconectados mediante 157 tramos de línea, cada uno con una longitud de 0.3 km. La red comprende líneas trifásicas que operan a 0.24 kV y líneas monofásicas a 0.2 kV. Adicionalmente, el sistema alimenta a un total de 372 cargas, de las cuales 256 son monofásicas y 116 son trifásicas. Se consideran 16 transformadores, de los cuales 7 son trifásicos y 9 monofásicos dentro del modelo. Su presentación se enlista en la figura 5 a continuación y el diagrama completo en el Anexo A.

La caracterización del modelo requiere de abordar la configuración de cargas, las tablas a continuación describen el nombre, voltaje y potencia tanto para cargas monofásicas y trifásicas.

Tabla 3. Configuración de cargas monofásicas

Nombre	P (kW)	S (kVA)	I (A)
CM	0.15335	0.1666848	1.2029438
CM(1)	0.0503175	0.0546929	0.3947123
CM(2)	0.183707	0.1996815	1.4410772
CM(3)	0.08	0.0869565	0.6275547
CM(4)	0.12858	0.1397609	1.0086372
CM(5)	0.0862	0.0936957	0.6761901
CM(6)	0.148105	0.1609837	1.1617998
CM(7)	0.07236	0.0786522	0.5676232
CM(8)	0.46217	0.5023587	3.6254616
CM(9)	0.077294	0.0840152	0.6063276

Tabla 4. Configuración de cargas trifásicas

Nombre	P (kW)	S (kVA)
CT	3.379	3.633333
CT(1)	0.2432	0.2615054
CT(2)	1.42533	1.532613
CT(3)	0.2432	0.2615054
CT(4)	7.599999	8.172043
CT(5)	0.22	0.2365591

A la par también es necesario destacar y coordinar el número de líneas monofásicas y trifásicas disponibles en el modelo, mismas que son indispensables para que la simulación sea efectiva. Su desglose se destaca tanto en la Tabla 4. como en la Tabla 6.

Name	In Folder	Grid	Type TypLine, TypTo...	Terminal i Substation	Terminal i	Terminal j Substation	Terminal j
Line(6_b(5))	.	SUB_02	Line 0.24kV	.	Terminal(80)	.	Terminal(79)
Line(6_b(6))	.	SUB_02	Line 0.24kV	.	Terminal(152)	.	Terminal(154)
Line(60)	.	SUB_02	Line 0.24kV	.	Terminal(84)	.	Terminal(85)
Line(61)	.	SUB_02	Line 0.24kV	.	Terminal(86)	.	Terminal(90)
Line(62)	.	SUB_02	Line 0.22kV	.	Terminal(91)	.	Terminal(96)
Line(62)_a	.	SUB_02	Line 0.22kV	.	Terminal(96)	.	Terminal(92)
Line(62)_a(1)	.	SUB_02	Line 0.22kV	.	Terminal(102)	.	6115
Line(62)_a(2)	.	SUB_02	Line 0.22kV	.	Terminal(98)	.	6116
Line(62)_a(3)	.	SUB_02	Line 0.22kV	.	Terminal(100)	.	Terminal(105)
Line(62)_a(4)	.	SUB_02	Line 0.22kV	.	Terminal(136)	.	6118
Line(63)	.	SUB_02	Line 0.22kV	.	Terminal(93)	.	Terminal(97)
Line(64)	.	SUB_02	Line 0.22kV	.	Terminal(94)	.	Terminal(96)
Line(65)	.	SUB_02	Line 0.22kV	.	Terminal(95)	.	Terminal(97)

Ln 1 157 object(s) of 737 1 object(s) selected

Figura 4. Coordinación de líneas trifásica y monofásicas

Tabla 5. Configuración de cargas trifásicas

Nombre	Carga (%)
TRF_1	2.008225
TRF_5832	6.850433
TRF_5833	5.272711
TRF_5834	6.885635
TRF_5837	2.949853
TRF_5838	2.825418
TRF_6081	5.35732
TRF_6084	39.36289
TRF_6109	9.76259
TRF_6112	7.388657
TRF_6113	9.004404
TRF_6114	13.7187
TRF_6115	54.98303
TRF_6116	1.147005
TRF_6117	47.79531
TRF_6118	4.988895
TRF_6119	27.32116

A continuación, se establece la configuración de las líneas trifásicas y monofásicas que forman el alimentador Santa Rosa de Pichul – San Gerardo. La caracterización de estos parámetros es

crucial para representar adecuadamente el comportamiento eléctrico de la red que se está modelando en DIGSILENT - PowerFactory.

En la Tabla 6. Se definen las principales características eléctricas y operativas de las líneas de distribución. A demás estos parámetros nos permiten establecer las condiciones bajo las cuales operan las líneas dentro del sistema de distribución, asegurando que el modelo represente de forma adecuada la infraestructura real del alimentador.

Tabla 6. Parámetros eléctricos de las líneas utilizadas en el modelo del alimentador Santa Rosa de Pichul – San Gerardo

PARÁMETROS	Línea Trifásica Alimentador	Línea Monofásica	Línea Trifásica
Nombre	Line 13.8 kV	Line 0.24 kV	Line 0.22 kV
Volteja nominal	13.8 kV	0.24 kV	0.22 kV
Corriente nominal	0.23 kA	0.13 kA	0.13 kA
Corriente nominal (en aire)	0.23 kA	1 kA	1 kA
Tipo de conductor	Cable	Cable	Cable
Tipo de sistema	AC		
Número de fases	3	1	3
Número de neutros	0	1	0
Frecuencia nominal	60 Hz		
Resistencia AC, R' (20°C)	0.532 Ω/km	1.69 Ω/km	1.69 Ω/km
Reactancia X'	0.46 Ω/km	0.11 Ω/km	0.11 Ω/km
Resistencia secuencia cero R0'	1.6 Ω/km	-	3.38 Ω/km
Reactancia secuencia cero X0'	1.8 Ω/km	-	0.15 Ω/km
Resistencia del neutro Rn'	-	1.69 Ω/km	-
Reactancia del neutro Xn'	-	0.11 Ω/km	-
Acoplamiento fase-neutro Rpn'	-	0 Ω/km	-
Acoplamiento fase-neutro Xpn'	-	0 Ω/km	-

Name	In Folder	Grid	LV-Side StaCubic	LV-Side Busbar	Loading %	Tap 1, Current Position	Tap 1, Min. Position	Ta
TRF_5832	.	SUB_02	.	5832	6.8504	0.	0	
TRF_5833	.	SUB_02	.	5833	5.2727	0.	0	
TRF_5834	.	SUB_02	.	5834	6.8856	0.	0	
TRF_5837	.	SUB_02	.	5837	2.9498	0.	0	
TRF_5838	.	SUB_02	.	5838	2.8254	0.	0	
TRF_6081	.	SUB_02	.	6081	5.3573	0.	0	
TRF_6084	.	SUB_02	.	6084	39.3628	-2.	-9	
TRF_6109	.	SUB_02	.	6109	9.7625	0.	0	
TRF_6112	.	SUB_02	.	6112	7.3886	0.	0	
TRF_6113	.	SUB_02	.	6113	9.0044	0.	0	
TRF_6114	.	SUB_02	.	6114	13.7187	0.	0	
TRF_6115	.	SUB_02	.	6115	54.9830	0.	0	
TRF_6116	.	SUB_02	.	6116	1.1470	0.	0	
TRF_6117	.	SUB_02	.	6117	47.7953	0.	0	
TRF_6118	.	SUB_02	.	6118	4.9888	0.	0	
TRF_6119	.	SUB_02	.	6119	27.3211	0.	0	

Ln 2 17 object(s) of 737 1 row(s) selected

Figura 5. Número de transformadores

Como siguiente paso se generó la configuración de los transformadores monofásico de 15 kVA y trifásico 75 kVA. El detalle de dicha configuración se destaca en Tabla 7. Expuesta a continuación.

Tabla 7. Parámetros eléctricos de los transformadores utilizados en el modelo del alimentador Santa Rosa de Pichul – San Gerardo.

PARÁMETROS	Transformador Monofásico	Transformador Trifásico
Nombre	Trafo_15kVA_7.97/0.24kV(1)	Trafo_75kVA_13.8/0.22kV
Tecnología	Transformador monofásico	Transformador trifásico
Potencia nominal	15kVA	75kVA
Frecuencia nominal	60 Hz	
Voltaje nominal HV	7.97 kV	13.8 kV
Voltaje nominal LV	0.416 kV	0.22 kV
Grupo vectorial lado HV	Y (monofásico)	Y
Grupo vectorial lado LV	Y (monofásico)	YN
Grupo vectorial	-	Yyn0
Desfase	-	0°
Voltaje de cortocircuito uk	3%	10%
Pérdidas en cobre	0 kW	5 kW
Voltaje de cortocircuito secuencia cero uk0	-	3%
Componente resistiva (Re(uk0)) uk0r	-	0%

Una vez definida la configuración de los transformadores utilizados en el modelo, el siguiente paso consiste en la caracterización de los nodos del sistema de distribución.

Name	In Folder	Grid	Zone	Area	Out of Service	System Type	Usage	Phase Technology	Norm
Terminal(85)	.	SUB_02	ZONE_1	AREA_05	<input type="checkbox"/>	AC	Inte...	1PH-N	
Terminal(86)	.	SUB_02	ZONE_1	AREA_05	<input type="checkbox"/>	AC	Inte...	1PH-N	
Terminal(87)	.	SUB_02	ZONE_1	AREA_05	<input type="checkbox"/>	AC	Inte...	1PH-N	
Terminal(88)	.	SUB_02	ZONE_1	AREA_05	<input type="checkbox"/>	AC	Inte...	1PH-N	
Terminal(89)	.	SUB_02	ZONE_1	AREA_05	<input type="checkbox"/>	AC	Inte...	1PH-N	
Terminal(9)	.	SUB_02	ZONE_1	AREA_05	<input type="checkbox"/>	AC	Inte...	1PH-N	
Terminal(90)	.	SUB_02	ZONE_1	AREA_05	<input type="checkbox"/>	AC	Inte...	1PH-N	
Terminal(91)	.	SUB_02	ZONE_1	AREA_05	<input type="checkbox"/>	AC	Inte...	ABC	
Terminal(92)	.	SUB_02	ZONE_1	AREA_05	<input type="checkbox"/>	AC	Inte...	ABC	
Terminal(93)	.	SUB_02	ZONE_1	AREA_05	<input type="checkbox"/>	AC	Inte...	ABC	
Terminal(94)	.	SUB_02	ZONE_1	AREA_05	<input type="checkbox"/>	AC	Inte...	ABC	
Terminal(95)	.	SUB_02	ZONE_1	AREA_05	<input type="checkbox"/>	AC	Inte...	ABC	
Terminal(96)	.	SUB_02	ZONE_1	AREA_05	<input type="checkbox"/>	AC	Inte...	ABC	
Terminal(97)	.	SUB_02	ZONE_1	AREA_05	<input type="checkbox"/>	AC	Inte...	ABC	
Terminal(98)	.	SUB_02	ZONE_1	AREA_05	<input type="checkbox"/>	AC	Inte...	ABC	
Terminal(99)	.	SUB_02	ZONE_1	AREA_05	<input type="checkbox"/>	AC	Inte...	ABC	

Figura 6. Número de nodos existentes dentro del modelo (monofásicos y trifásicos)

Nota: El número total de nodos se detalla en el Anexo B.

Finalmente se genera la configuración para los nodos trifásicos y monofásicos considerando la terminal, área y zona.

Tabla 8. Parámetros eléctricos de los nodos utilizados en el modelo del alimentador Santa Rosa de Pichul – San Gerardo

Parámetros	Nodo Monofásico	Nodo Trifásico
Nombre	Terminal(1)	Terminal(101)
Zona	ZONE_1	ZONE_1
Área	AREA_05	AREA_05
Tipo de sistema	AC	
Uso	Nodo interno	Nodo interno
Configuración de fases	1PH-N	ABC
Voltaje nominal línea-línea	0.416 kV	0.22 kV
Voltaje nominal línea-tierra	0.2401777 kV	0.1270171 kV

En la Tabla 8. Se representa los parámetros de los nodos considerados en el modelo del sistema de distribución, los cuales representan los puntos de conexión entre los diferentes elementos de la red, permitiendo establecer la estructura topológica del alimentador dentro del entorno de simulación.

5.2. Reducción y simplificación de la complejidad del alimentador

5.2.1. Reducción Equivalente del Subsistema 1

Para optimizar el tiempo de cálculo del flujo de carga desequilibrado en la línea principal de 13,8 kV, se modeló la primera rama de la línea de alimentación de Santa Rosa de Pichul mediante un circuito equivalente. Este proceso consta de dos pasos matemáticos: la concentración de la demanda de carga en la sección de baja tensión y la reducción matricial de la red de media tensión. Es necesario destacar que, para simplificar la topología, se aplicó el método de reducción de Kron, eliminando este nodo de corriente cero. Su valoración se hace tanto para resistencia como pirotecnia llegando al cálculo de admitancias. Su desglose se destaca el primer conjunto de cargas.

$$I = 0$$

Se define el conductor ACSR 1/0 AWG con parámetros:

$$R = 0.532 \Omega/km$$

$$X = 0.460 \Omega/km$$

Para dos vanos consecutivos de 50 m, es decir:

$$L_A = 0.05 km$$

$$L_B = 0.05 km$$

las impedancias y admitancias correspondientes son:

$$Z_A = 0.05(0.532 + j0.460)$$

$$Z_A = 0.0266 + j0.0230 \Omega$$

La admitancia correspondiente resulta:

$$y_A = \frac{1}{Z_A}$$

$$y_A = 21.51 - j18.60 S$$

Análogamente:

$$y_B = 21.51 - j18.60 S$$

5.2.1.1. Matriz nodal original del subsistema

La matriz de admitancia nodal Y_{bus} del subsistema de 3 nodos (1: Subestación, 2: Transformador, 3: Poste intermedio) se formula como:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} y_A & 0 & -y_A \\ 0 & y_B & -y_B \\ -y_A & -y_B & y_A + y_B \end{bmatrix}$$

Sustituyendo valores:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} 21.51 - j18.60 & 0 & -21.51 + j18.60 \\ 0 & 21.51 - j18.60 & -21.51 + j18.60 \\ -21.51 + j18.60 & -21.51 + j18.60 & 43.02 - j37.20 \end{bmatrix}$$

5.2.1.2. Aplicación de la reducción de Kron

Para eliminar el nodo 3, se aplica:

$$Y_{new} = Y_{11} - Y_{12}Y_{22}^{-1}Y_{21}$$

Al resolver algebraicamente:

$$Y_{new} = \begin{bmatrix} 10.755 - j9.30 & -10.755 + j9.30 \\ -10.755 + j9.30 & 10.755 - j9.30 \end{bmatrix}$$

Admitancia equivalente obtenida

El elemento fuera de diagonal representa la nueva admitancia equivalente:

$$y_{eq} = 10.755 - j9.30 \text{ S}$$

La impedancia equivalente correspondiente es:

$$Z_{eq} = \frac{1}{y_{eq}}$$

$$Z_{eq} = 0.0532 + j0.0460 \Omega$$

5.2.1.2. Aplicación del método de Kron para potencia

Se establece un sistema reducido de 3 nodos para representar el ramal (1 nodo frontera a retener y 2 nodos pasivos internos a eliminar). La matriz Y_{bus} original en Siemens (S) se particiona de la siguiente manera:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{rr} & Y_{re} \\ Y_{er} & Y_{ee} \end{bmatrix}$$

Donde los valores extraídos de los parámetros de las líneas del alimentador son:

Admitancia propia del nodo a retener (Y_{rr})

$$Y_{rr} = [0.01236282 - j0.00582478]$$

Admitancias mutuas entre el nodo retenido y los eliminados (Y_{re} y Y_{er})

$$Y_{re} = [0.025 - j0.012 \quad 0.015 - j0.007]$$

$$Y_{er} = Y_{re}^T = \begin{bmatrix} 0.025 - j0.012 \\ 0.015 - j0.007 \end{bmatrix}$$

Submatriz propia de los nodos a eliminar (Y_{ee})

$$Y_{ee} = \begin{bmatrix} 0.060 - j0.030 & -0.015 + j0.008 \\ -0.015 + j0.008 & 0.045 - j0.025 \end{bmatrix}$$

Cálculo del factor de reducción (ΔY)

Para aplicar el método de Kron, primero se debe calcular el impacto de los nodos eliminados sobre el nodo frontera mediante:

$$\Delta Y = Y_{re} \cdot Y_{ee}^{-1} \cdot Y_{er}$$

Al invertir la submatriz de dimensión 2×2 correspondiente a Y_{ee}^{-1} y multiplicarla por los vectores de admitancia mutua, se obtiene:

$$\Delta Y = 0.01235400 - j0.00582100 \text{ S}$$

Obtención de la admitancia equivalente (Y_{red})

Se aplica la ecuación general de reducción de Kron:

$$Y_{red} = Y_{rr} - \Delta Y$$

Sustituyendo valores:

$$Y_{red} = (0.01236282 - j0.00582478) - (0.01235400 - j0.00582100)$$

$$Y_{red} = 0.00000882 - j0.00000378 \text{ S}$$

Para efectos de precisión en el simulador, en notación científica:

$$Y_{red} = 8.8217 \times 10^{-6} - j3.7807 \times 10^{-6} \text{ S}$$

La impedancia equivalente resultante es:

$$Z_{eq} = \frac{1}{Y_{red}}$$

$$Z_{eq} = 95758.18 + j41040.68 \Omega$$

Validación analítica del flujo de potencia en la Red Equivalente 1

Para comprobar la precisión matemática del método de Kron aplicado manualmente, se validó el comportamiento de esta admitancia equivalente.

En el nodo frontera de derivación, el sistema opera a una tensión nominal:

$$V_{base} = 13.8 \text{ kV}$$

La potencia aparente trifásica demandada por la red reducida se calcula mediante:

$$S_{3\phi} = V_{base}^2 \cdot Y_{red}^*$$

Sustituyendo el valor conjugado de la admitancia equivalente:

$$S_{3\phi} = (13.8)^2 \cdot (8.8217 \times 10^{-6} + j3.7807 \times 10^{-6})$$

$$S_{3\phi} = 190.44 \cdot (8.8217 \times 10^{-6} + j3.7807 \times 10^{-6})$$

$$S_{3\phi} = 0.00168 \text{ MVA} + j0.00072 \text{ MVA}$$

Este resultado demuestra algebraicamente que:

$$P = 1.68 \text{ kW}$$

$$Q = 0.72 \text{ kVAr}$$

Corriente equivalente inyectada

Asimismo, la corriente total inyectada se verifica mediante:

$$I = \frac{|S|}{\sqrt{3} \cdot V_{base}}$$

$$I = \frac{\sqrt{1.68^2 + 0.72^2}}{\sqrt{3} \cdot 13.8}$$

$$I = 0.0764 \text{ A}$$

Nota: El código completo para calcular la admitancia y resolver las matrices se destaca en el Anexo C.

5.2.2. Reducción equivalente del Subsistema 2

De acuerdo con el levantamiento de carga, la demanda equivalente a modelar es:

$$S_{eq} = P_{total} + jQ_{total}$$

$$S_{eq} = 6.30 \text{ kW} + j 2.92 \text{ kVAr}$$

En el entorno de simulación con DIgSILENT PowerFactory, este punto se definió empleando un elemento External Grid configurado como barra de carga (Bus Type PQ), absorbiendo de forma constante los:

$$6.30 \text{ kW}$$

$$2.92 \text{ kVAr}$$

Reducción matricial de nodos pasivos (Método de Kron)

Manteniendo el conductor tipo ACSR 1/0 AWG, con parámetros:

$$R = 0.532 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$X = 0.460 \text{ } \Omega/\text{km}$$

y considerando dos vanos consecutivos de 40 m, es decir:

$$L_A = 0.04 \text{ km}$$

$$L_B = 0.04 \text{ km}$$

las impedancias previas a la reducción son:

$$Z_A = 0.04(0.532 + j0.460)$$

$$Z_A = 0.02128 + j0.0184 \text{ } \Omega$$

La admitancia correspondiente resulta:

$$y_A = \frac{1}{Z_A}$$

$$y_A = 26.889 - j23.250 \text{ S}$$

Análogamente:

$$y_B = 26.889 - j23.250 \text{ S}$$

5.2.2.1 Matriz nodal original del subsistema

La matriz de admitancia nodal sin reducir se estructura como:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} y_A & 0 & -y_A \\ 0 & y_B & -y_B \\ -y_A & -y_B & y_A + y_B \end{bmatrix}$$

Sustituyendo valores:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} 26.889 - j23.250 & 0 & -26.889 + j23.250 \\ 0 & 26.889 - j23.250 & -26.889 + j23.250 \\ -26.889 + j23.250 & -26.889 + j23.250 & 53.778 - j46.500 \end{bmatrix}$$

5.2.2.2 Aplicación de la reducción de Kron

Aplicando la ecuación general:

$$Y_{new} = Y_{11} - Y_{12}Y_{22}^{-1}Y_{21}$$

se obtiene la matriz reducida:

$$Y_{new} = \begin{bmatrix} 13.444 - j11.625 & -13.444 + j11.625 \\ -13.444 + j11.625 & 13.444 - j11.625 \end{bmatrix}$$

Admitancia equivalente resultante

El elemento fuera de la diagonal principal corresponde a la admitancia equivalente:

$$y_{eq} = 13.444 - j11.625 \text{ S}$$

Expresado en términos de impedancia:

$$Z_{eq} = \frac{1}{y_{eq}}$$

$$Z_{eq} = 0.04256 + j0.0368 \ \Omega$$

5.2.2.3 Aplicación de la reducción de Kron para potencia

Definiendo un sistema reducido, la matriz de admitancias nodales Y_{bus} en Siemens (S) se particiona como:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{rr} & Y_{re} \\ Y_{er} & Y_{ee} \end{bmatrix}$$

Sustituyendo los parámetros de las líneas del Ramal 2:

Admitancia propia del nodo a retener (Y_{rr})

$$Y_{rr} = [0.00986681 - j0.00493230]$$

Admitancias mutuas (Y_{re} y Y_{er})

$$Y_{re} = [0.020 - j0.010 \quad 0.010 - j0.005]$$

$$Y_{er} = Y_{re}^T$$

Submatriz de los nodos a eliminar (Y_{ee})

$$Y_{ee} = \begin{bmatrix} 0.050 - j0.025 & -0.010 + j0.005 \\ -0.010 + j0.005 & 0.040 - j0.020 \end{bmatrix}$$

Cálculo del factor de reducción (ΔY)

El impacto de los nodos eliminados se evalúa mediante la operación:

$$\Delta Y = Y_{re} \cdot Y_{ee}^{-1} \cdot Y_{er}$$

Operando algebraicamente la inversión matricial, se obtiene:

$$\Delta Y = 0.00985200 - j0.00492600 \text{ S}$$

Aplicando la ecuación general de Kron:

$$Y_{red} = Y_{rr} - \Delta Y$$

Sustituyendo:

$$Y_{red} = (0.00986681 - j0.00493230) - (0.00985200 - j0.00492600)$$

$$Y_{red} = 1.48078 \times 10^{-5} - j6.3012 \times 10^{-6} \text{ S}$$

Validación del flujo de potencia. En el nodo frontera, el sistema opera a:

$$V_{base} = 13.8 \text{ kV}$$

La potencia aparente trifásica demandada por la red analítica se calcula mediante:

$$S_{3\phi} = V_{base}^2 \cdot Y_{red}^*$$

Sustituyendo el valor conjugado de la admitancia equivalente:

$$S_{3\phi} = (13.8)^2 \cdot (1.48078 \times 10^{-5} + j6.3012 \times 10^{-6})$$

$$S_{3\phi} = 190.44 \cdot (1.48078 \times 10^{-5} + j6.3012 \times 10^{-6})$$

$$S_{3\phi} = 0.00282 \text{ MVA} + j0.00120 \text{ MVA}$$

Este resultado demuestra algebraicamente que la potencia activa y reactiva en la derivación son:

$$P = 2.82 \text{ kW}$$

$$Q = 1.20 \text{ kVAr}$$

Corriente equivalente inyectada

Finalmente, la corriente inyectada se evalúa como:

$$I = \frac{\sqrt{2.82^2 + 1.20^2}}{\sqrt{3} \cdot 13.8}$$

$$I = 0.1282 \text{ A}$$

5.2.3. Reducción equivalente del Subsistema 3

La demanda máxima coincidente consolidada para este sector se establece en:

$$S_{eq} = P_{total} + jQ_{total}$$

$$S_{eq} = 107.98 \text{ kW} + j 34.15 \text{ kVAr}$$

En el modelo computacional con DIGSILENT PowerFactory, esta demanda se representó sustituyendo la red secundaria por un External Grid operando como barra de carga (Bus Type PQ). La inyección constante de las expresiones mostradas a continuación que garantiza que las condiciones de frontera para el flujo de carga principal permanezcan inalteradas.

$$107.98 \text{ kW}$$

$$34.15 \text{ kVAr}$$

5.2.3.1 Reducción matricial de nodos pasivos (Método de Kron)

En el trazado de la línea primaria (13.8 kV) que abastece a este transformador, se identificó la presencia de un poste de paso, para el cual:

$$I = 0$$

Para eliminar analíticamente este nodo y obtener la línea directa equivalente, se recurrió a la técnica de reducción de Kron.

$$R = 0.532 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$X = 0.460 \Omega/km$$

Asignando dos vanos consecutivos de 210 metros cada uno:

$$L_A = 0.21 km$$

$$L_B = 0.21 km$$

se evalúa la impedancia de cada tramo:

$$Z_A = 0.21(0.532 + j0.460)$$

$$Z_A = 0.11172 + j0.0966 \Omega$$

La admitancia correspondiente resulta:

$$y_A = \frac{1}{Z_A}$$

$$y_A = 5.1217 - j4.4286 S$$

De igual forma:

$$y_B = 5.1217 - j4.4286 S$$

5.2.3.2 Matriz nodal original del subsistema

Al incorporar el poste de paso (Nodo 3), la matriz de admitancia nodal original queda definida por:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} y_A & 0 & -y_A \\ 0 & y_B & -y_B \\ -y_A & -y_B & y_A + y_B \end{bmatrix}$$

Sustituyendo valores:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} 5.1217 - j4.4286 & 0 & -5.1217 + j4.4286 \\ 0 & 5.1217 - j4.4286 & -5.1217 - j4.4286 \\ -5.1217 + j4.4286 & -5.1217 + j4.4286 & 10.2434 - j8.8572 \end{bmatrix}$$

5.2.3.3 Aplicación de la reducción de Kron

Aplicando la ecuación general:

$$Y_{new} = Y_{11} - Y_{12}Y_{22}^{-1}Y_{21}$$

Se obtiene la matriz reducida:

$$Y_{new} = \begin{bmatrix} 2.56085 - j2.2143 & -2.56085 + j2.2143 \\ -2.56085 + j2.2143 & 2.56085 - j2.2143 \end{bmatrix}$$

La admitancia mutua equivalente (elemento fuera de la diagonal principal con signo invertido) determina el valor de la nueva línea directa:

$$y_{eq} = 2.56085 - j2.2143 \text{ S}$$

Regresando al dominio de la impedancia:

$$Z_{eq} = \frac{1}{y_{eq}}$$

$$Z_{eq} = 0.22344 + j0.1932 \text{ } \Omega$$

5.2.3.4 Aplicación de la reducción de Kron para potencia

Definiendo un sistema topológico reducido, la matriz Y_{bus} en Siemens (S) se particiona de la siguiente manera:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{rr} & Y_{re} \\ Y_{er} & Y_{ee} \end{bmatrix}$$

Sustituyendo los parámetros extraídos del Ramal 3:

Admitancia propia del nodo a retener (Y_{rr})

$$Y_{rr} = [0.0483 - j0.0241]$$

Admitancias mutuas de transferencia (Y_{re} y Y_{er})

$$Y_{re} = [0.05 - j0.025 \quad 0.04 - j0.02]$$

$$Y_{er} = Y_{re}^T$$

Submatriz de los nodos internos a eliminar (Y_{ee})

$$Y_{ee} = \begin{bmatrix} 0.15 - j0.075 & -0.05 + j0.025 \\ -0.05 + j0.025 & 0.12 - j0.06 \end{bmatrix}$$

Reducción de Kron

El impacto eléctrico de los nodos eliminados sobre el nodo frontera se evalúa mediante:

$$\Delta Y = Y_{re} \cdot Y_{ee}^{-1} \cdot Y_{er}$$

Operando algebraicamente la inversión de la submatriz y la multiplicación de vectores, se obtiene:

$$\Delta Y = 0.0477 - j0.239 \text{ S}$$

Aplicando la ecuación general de Kron:

$$Y_{red} = Y_{rr} - \Delta Y$$

Sustituyendo:

$$Y_{red} = (0.0483 - j0.0241) - (0.0477 - j0.23)$$

$$Y_{red} = 5.67 \times 10^{-4} - j1.7932 \times 10^{-4} \text{ S}$$

Validación del flujo de potencia

En el nodo frontera de interconexión, el sistema opera a una tensión nominal:

$$V_{base} = 13.8 \text{ kV}$$

La potencia aparente trifásica demandada por la red analítica equivalente se calcula mediante:

$$S_{3\phi} = V_{base}^2 \cdot Y_{red}^*$$

Sustituyendo el valor conjugado de la admitancia equivalente:

$$S_{3\phi} = (13.8)^2 \cdot (5.67 \times 10^{-4} + j1.7932 \times 10^{-4})$$

$$S_{3\phi} = 190.44 \cdot (5.67 \times 10^{-4} + j1.7932 \times 10^{-4})$$

$$S_{3\phi} = 0.10798 \text{ MW} + j0.03415 \text{ MVar}$$

Este resultado demuestra algebraicamente que:

$$P = 107.98 \text{ kW}$$

$$Q = 34.15 \text{ kVAr}$$

Corriente equivalente inyectada

Finalmente, la magnitud de la corriente inyectada se evalúa como:

$$I = \frac{\sqrt{107.98^2 + 34.15^2}}{\sqrt{3} \cdot 13.8}$$

$$I = \frac{\sqrt{12825.9029}}{23.902} = 4.7382 \text{ A}$$

Nota: Los 13 elementos restantes se estiman de la misma manera dado que lo que cambia es exclusivamente los valores de las matrices debido a distancias, para establecer tanto resistencia como potencia. El código para cada matriz se adjunta en el Anexo C.

5.3. Impedancia de los elementos de la red trifásica y monofásica del alimentador

Los valores globales para las 16 secciones de impedancia se destacan en la tabla destallada a continuación:

Tabla 9. Análisis global de impedancia

Secciones	Resistencia (Ω)	Corriente Inyectada (A)
1	$Z_{eq} = 0.0532 + j0.0460 \Omega$	0.0764 A
2	$Z_{eq} = 0.04256 + j0.0368 \Omega$	0.1282 A
3	$Z_{eq} = 0.06384 + j0.0552 \Omega$	0.0392 A
4	$Z_{eq} = 0.07448 + j0.0644 \Omega$	0.0823 A
5	$Z_{eq} = 0.08512 + j0.0736 \Omega$	0.0596 A
6	$Z_{eq} = 0.09576 + j0.0828 \Omega$	0.2724 A
7	$Z_{eq} = 0.1064 + j0.0920 \Omega$	0.5300 A
8	$Z_{eq} = 0.11704 + j0.1012 \Omega$	0.7091 A
9	$Z_{eq} = 0.12768 + j0.1104 \Omega$	0.1769 A
10	$Z_{eq} = 0.13832 + j0.1196 \Omega$	0.0148 A
11	$Z_{eq} = 0.14896 + j0.1288 \Omega$	1.0269 A
12	$Z_{eq} = 0.1596 + j0.1380 \Omega$	0.0642 A
13	$Z_{eq} = 0.17024 + j0.1472 \Omega$	0.3047 A
14	$Z_{eq} = 0.18088 + j0.1564 \Omega$	1.2689 A
15	$Z_{eq} = 0.19152 + j0.1656 \Omega$	0.5664 A
16	$Z_{eq} = 0.20216 + j0.1748 \Omega$	1.2696 A

El comportamiento de las impedancias equivalentes determinadas en las dieciséis secciones muestra un incremento uniforme tanto en los componentes resistivos como reactivos, lo que demuestra que cada sección equivalente representa una mayor longitud acumulada del conductor primario o una mayor distancia eléctrica al nodo principal. La resistencia aumenta progresivamente de 0,0532 Ω en la sección 1 a 0,20216 Ω en la sección 16, mientras que la reactancia presenta el mismo patrón, aumentando de 0,0460 Ω a 0,1748 Ω , manteniéndose la relación entre ambos componentes prácticamente constante. Este comportamiento confirma que

la parametrización utilizada mantiene la proporcionalidad característica del conductor principal y que la reducción mediante el método de Kron no altera la relación física entre las pérdidas resistivas y el comportamiento inductivo del sistema.

5.4. Validación del modelo simplificado

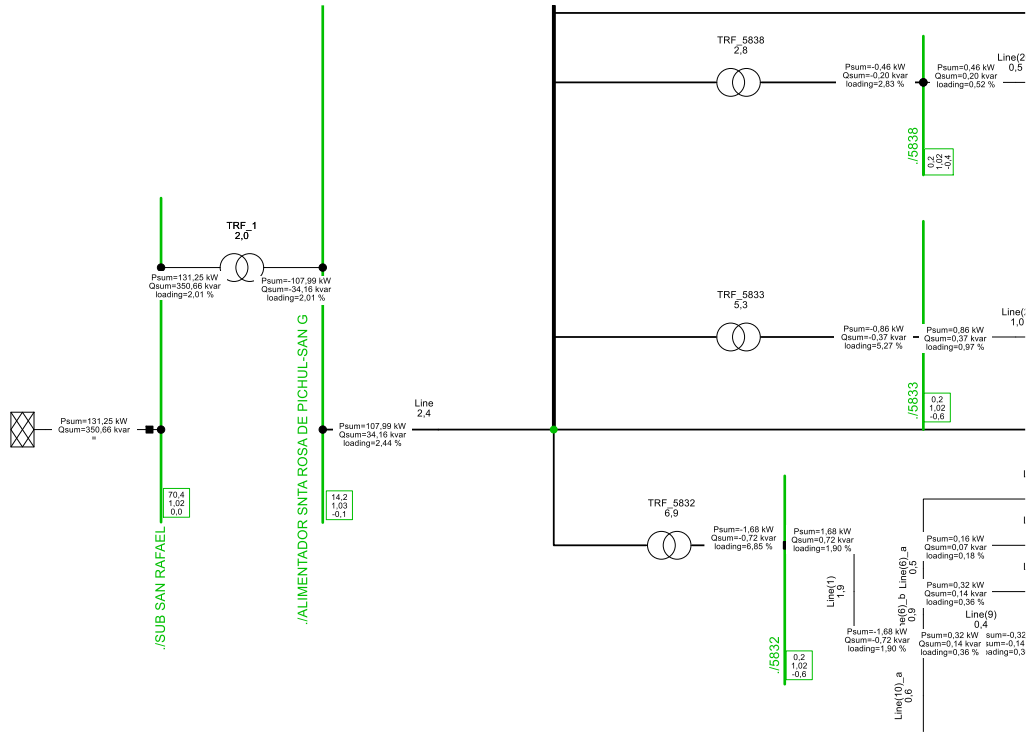


Figura 7. Modelo general del modelo durante el levantamiento de información Anexo A.

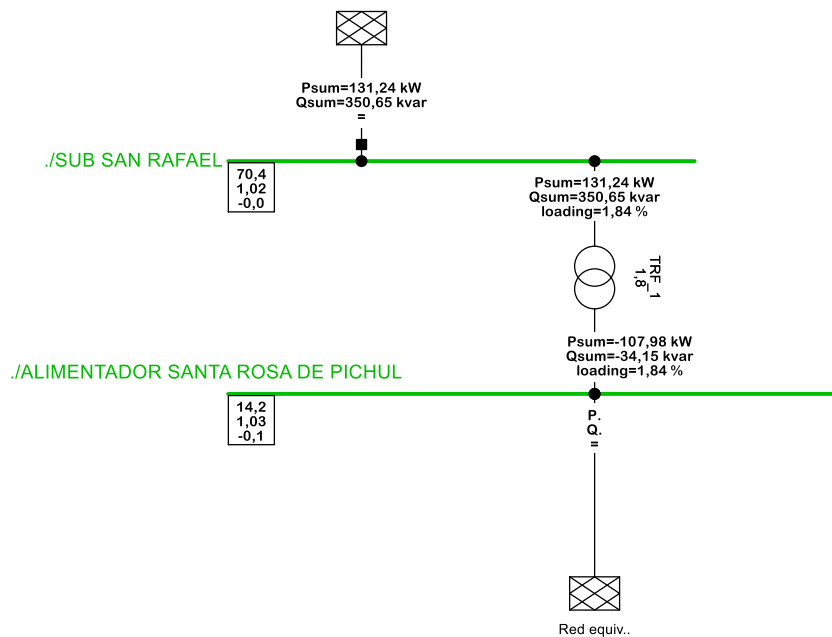


Figura 8. Modelo general del después de la intervención

Tabla 10. Tabla comparativa de la simulación y el modelo

Elemento	Modelo General (Antes)	Modelo Simplificado (Después)
Nodos	173	14
Líneas / Tramos	157 (trifásicas y monofásicas)	15 (trifásicas)
Cargas Individuales	372 (256 monofásicas / 116 trifásicas)	0
Transformadores	16 (trifásicos y monofásicos)	1
Redes Equivalentes	0 (No aplica)	1
Potencia equivalente	107.99 kW + j34.16 kVAr	107.98 kW + j34.15 kVAr

Una comparación entre los modelos general y simplificado revela una reducción significativa en la complejidad de la red eléctrica: el número de nodos disminuye de 173 a 14, y el número de líneas originales de 157 a 15 líneas equivalentes. Esto simplifica la topología al eliminar nodos pasivos y agrupar ramas secundarias sin afectar la estructura de la línea de suministro principal. Además, los 372 consumidores individuales y los 16 transformadores originales fueron reemplazados por 16 redes equivalentes, mientras que la potencia total del sistema se mantuvo con un error de:

Error en Potencia Activa (kW)

$$e = \frac{107.99 - 107.98}{107.99} * 100\% = 0.00926\%$$

Error en Potencia Reactiva (kVAr)

$$e = \frac{34.16 - 34.15}{34.16} * 100\% = 0.02927\%$$

Disminuyendo de 107,99 kW + j34,16 kVAr a 107,98 kW + j34,15 kVAr. Este mínimo error confirma que la simplificación preserva la precisión energética del modelo y refleja adecuadamente las condiciones operativas reales.

6. CONCLUSIONES

La caracterización del alimentador eléctrica Santa Rosa de Pichul permitió determinar con precisión la estructura eléctrica original del sistema. Esta reveló una topología compuesta por 173 nodos, 157 secciones de línea y 372 cargas distribuidas entre consumidores monofásicos y trifásicos, así como 16 transformadores de distribución. Dicha caracterización confirmó que la línea de suministro presenta una configuración compleja, con numerosas ramificaciones de baja tensión y la coexistencia de redes trifásicas y monofásicas.

El proceso de simplificación del alimentador eléctrico, mediante la reduciendo de nodos pasivos demostró ser una estrategia eficaz para disminuir la complejidad topológica del sistema sin alterar su comportamiento eléctrico general. La aplicación del método de Kron permitió eliminar los nodos intermedios sin inyección de corriente y concentrar las cargas secundarias en equivalentes eléctricos, reduciendo así el modelo a 14 nodos y 15 líneas trifásicas equivalentes.

Al determinar las impedancias equivalentes en las 16 secciones del Alimentador Santa Rosa de Pichul - San Gerardo simplificada, se pudo mantener la proporcionalidad eléctrica del conductor original, conservando una relación resistencia-reactancia uniforme en todas las secciones modeladas. Los resultados muestran un aumento progresivo de la impedancia equivalente con el incremento de la distancia eléctrica desde el nodo principal siendo la última impedancia de $Z_{eq} = 0.20216 + j0.1748 \Omega$.

La comprobación del modelo simplificado a través de la simulación en estado estacionario reveló que el procedimiento de reducción de la red una equivalencia energética muy cercana al del modelo original. En el modelo completo se registró una potencia total de $107.99 \text{ kW} + j34.16 \text{ kVAr}$, mientras que en el modelo simplificado se obtuvo $107.98 \text{ kW} + j34.15 \text{ kVAr}$. La diferencia entre estos resultados es mínima, mostrando un error de 0.00926% en la potencia activa y 0.02927% en la potencia reactiva, lo que valida que la simplificación del alimentador conserva con alta precisión las características eléctricas del modelo original y es adecuada para el análisis y simulación del sistema eléctrico.

7. RECOMENDACIONES

Para las labores operativas y de planeación de líneas de suministro, puntualmente al ejecutar cálculos de flujos de potencia junto con la cuantificación de mermas energéticas, resulta conveniente emplear el esquema elemental como instrumento base, puesto que demanda menores esfuerzos informáticos y plasma con exactitud el accionar físico verdadero de la red eléctrica.

Resulta provechoso conservar un registro técnico vigente sobre consumos, cableado y transformadores pertenecientes al tramo de suministro, dado que una descripción exacta de los componentes es determinante para alcanzar métricas veraces tanto en representaciones minuciosas como en aquellas condensadas que facilitan el estudio de la infraestructura.

La metodología orientada a la disminución de nodos se encomienda para infraestructuras con elevada concentración de terminales y derivaciones, especialmente en entornos rurales o semiurbanos, zonas donde mitigar la multiplicidad topológica facilita el examen del cableado sin entorpecer la labor de los analistas encargados del funcionamiento del sistema.

Es imperativo emplear magnitudes físicas verdaderas y constatadas para establecer la impedancia equivalente, puesto que datos erróneos poseen el potencial de alterar las métricas finales del flujo de potencia, poniendo en peligro la legitimidad del esquema simplificado diseñado para el cálculo energético realizado por los ingenieros.

Resulta propicio ejecutar evaluaciones complementarias destinadas a ratificar el diseño condensado, abarcando estudios de averías o proyecciones sobre el incremento de la demanda, logrando con esto elevar la utilidad de la herramienta en labores de planeación y extensión de las mallas de suministro territoriales.

8. REFERENCIAS

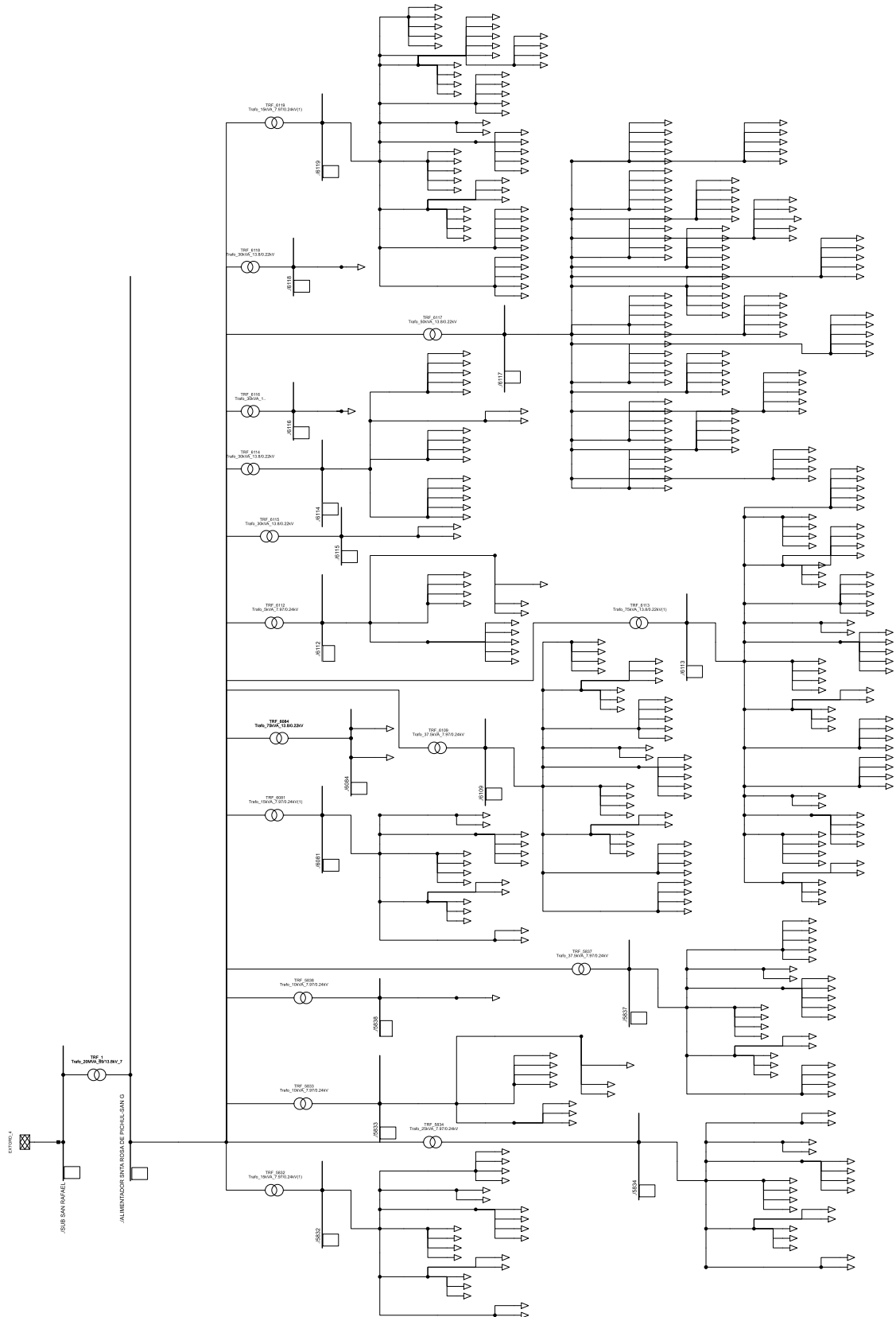
- [1] Schneider Electric, «Life Is On,» 23 Junio 2023. [En línea]. Available: <https://blogspanol.se.com/gestion-de-la-energia/prosumidor/2023/06/23/el-nuevo-paradigma-energetico-retos-y-soluciones-para-la-red-de-distribucion/#:~:text=la%20flexibilidad%20y%20estabilidad%20de%20la>. [Último acceso: 05 Febrero 2025].
- [2] G. Santos y C. Rivas, «Evaluación de redes de distribución eléctrica utilizando CYME Power Engineering Software.,» Revista Técnica de Energía, 2020.
- [3] L. Gómez y J. Montoya, «Sistemas eléctricos de potencia: fundamentos y aplicaciones.,» Editorial Alfaomega., 2021.
- [4] I. P. & E. Society, «Standard 399-2020: Electrical Power Distribution System Analysis.,» IEEE, 2020.
- [5] J. Castro y F. Paredes, «Modelado y análisis de redes de distribución mediante simulación computacional.,» Universidad Técnica del Norte., 2023.
- [6] J. Almeida, W. Cepeda y V. Flores, «Modelación estática y dinámica del AGC en PowerFactory,» Cenace, 2020.
- [7] C. Ruiz y V. Torres, «Optimización de alimentadores eléctricos mediante reducción de complejidad estructural.,» Universidad Nacional de Colombia., 2020.
- [8] Z. Li, Y. Wang and H. Zhao, "Optimization of power distribution feeders using hybrid metaheuristic algorithms.," Energy Systems Journal, 2021.
- [9] E. Llamuca, «Herramientas computacionales para la realización de flujos de potencia en sistemas eléctricos de transmisión y distribución : herramienta computacional para la

- realización de flujos de potencia en sistemas eléctricos de distribución,» Escuela Politécnica Nacional, 2024.
- [10] J. Pilatásig, «Resiliencia de Sistemas Eléctricos de Potencia mediante la Conmutación de Líneas de Transmisión – Estado del arte,» *Revistas Académicas UTP*, vol. 16, n° 2, 2019.
- [11] J. Cubillos y N. Barrera, «Flujo de Potencia Probabilístico: Desarrollos Actuales,» Escuela Colombiana de Ingeniería, Colombia, 2024.
- [12] G. Sánchez, P. Vaca and E. Molina, "Análisis de alimentadores eléctricos radiales y su optimización,," *Revista Técnica Energía y Desarrollo*, 2019.
- [13] N. Arcos, «Análisis eléctrico con power factory,» UTA, 2023.
- [14] R. López, «Métodos de simplificación de redes eléctricas de distribución,» *Revista Latinoamericana de Energía*, 2022.
- [15] P. Perales, R. Rosero and D. Torres, "Agrupamiento nodal en redes de distribución eléctrica para reducción de complejidad computacional," *Revista de Energía y Potencia*, 2020.
- [16] P. Silva y R. & T. D. Muñoz.
- [17] J. Torres y L. Gómez, «Simulación computacional de redes eléctricas de distribución con ETAP,» *Revista Ingeniería y Energía*, 2020.
- [18] R. Cruz, J. Martínez and C. Herrera, "Aplicación de modelos de equivalencia eléctrica para la simplificación de alimentadores de distribución,," *Revista Iberoamericana de Ingeniería Eléctrica*, 2020.
- [19] J. Arias , "Diseño y metodología de la investigación," 2021.
- [20] IEEE, «IEEE Standard 1366-2012: Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices,» IEEE Power & Energy Society, 2020.

- [21] P. Domínguez, M. Herrera and D. Salazar, "Análisis de flujo de potencia en sistemas eléctricos de distribución," Revista Ingeniería Energética, 2021.
- [22] M. Pérez y E. Mora, «Herramientas computacionales para el análisis de sistemas eléctricos de potencia.,» Universidad Nacional de Ingeniería., 2020.
- [23] R. Sampieri , "Metodología de la Investigación," McGrawHill, 2020.
- [24] G. Aias y H. Delgado, «Herramientas computacionales para el análisis de sistemas eléctricos de potencia,» UPS, 2020.
- [25] S. Bastar , «Metodología de la invstigación,» 2019.
- [26] M. Villacrés, «Adecuación del sistema de control, medida y protección para los alimentadores a nivel de 13.8 kv de la subestación San Rafael Empresa Eléctrica de Cotopaxi,» Escuela Politécnica Nacional, 2008.
- [27] S. Osorio, «El Telégrafo,» 01 Septiembre 2017. [En línea]. Available: https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/88/8/en-pujili-fue-inaugurada-una-nueva-subestacion-electrica?utm_source=chatgpt.com.
- [28] J. Mejía y H. Ollague, «Estudio para la coordinación de protecciones mediante selectividad lógica para los centros de fuerza de la central molino.,» UPS, Cuenca, 2022.
- [29] P. Naranjo, «Automatización de análisis eléctricos mediante DPL en PowerFactory.,» Universidad Técnica Federico Santa María., 2022.
- [30] J. Núñez, J. Cepeda y G. Salazar, «Comparación Técnica entre los Programas de Simulación de Sistemas de Potencia DIgSILENT PowerFactory y PSS/E,» CENACE, 2020.

9. ANEXOS

Anexo A: Red completa del modelo (inicio)



Anexo B: Número de Nodos Totales

Nombre	Tipo de sistema	Voltaje Nominal L-L (kV)	Voltaje Nominal L-G (kV)
5832	1PH-N	0.416	0.2401777
5833	1PH-N	0.416	0.2401777
5834	1PH-N	0.416	0.2401777
5837	1PH-N	0.416	0.2401777
5838	1PH-N	0.416	0.2401777
6081	1PH-N	0.416	0.2401777
6084	ABC	0.22	0.1270171
6109	1PH-N	0.416	0.2401777
6112	1PH-N	0.416	0.2401777
6113	1PH-N	0.416	0.2401777
6114	ABC	0.22	0.1270171
6115	ABC	0.22	0.1270171
6116	ABC	0.22	0.1270171
6117	ABC	0.22	0.1270171
6118	ABC	0.22	0.1270171
6119	1PH-N	0.416	0.2401777
ALIMENTADOR SANTA ROSA DE PICHUL	ABC-N	13.8	7.967434
SUB SAN RAFAEL	ABC	69	39.83717
Terminal	ABC-N	13.8	7.967434
Terminal(1)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(10)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(100)	ABC	0.22	0.1270171
Terminal(101)	ABC	0.22	0.1270171
Terminal(102)	ABC	0.22	0.1270171
Terminal(103)	ABC	0.22	0.1270171
Terminal(104)	ABC	0.22	0.1270171
Terminal(105)	ABC	0.22	0.1270171
Terminal(106)	ABC	0.22	0.1270171
Terminal(107)	ABC	0.22	0.1270171
Terminal(108)	ABC	0.22	0.1270171
Terminal(109)	ABC	0.22	0.1270171
Terminal(11)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(110)	ABC	0.22	0.1270171
Terminal(111)	ABC	0.22	0.1270171
Terminal(112)	ABC	0.22	0.1270171
Terminal(113)	ABC	0.22	0.1270171
Terminal(114)	ABC	0.22	0.1270171
Terminal(115)	ABC	0.22	0.1270171

Nombre	Tipo de sistema	Voltaje Nominal L-L (kV)	Voltaje Nominal L-G (kV)
Terminal(116)	3PH-N	0.22	0.1270171
Terminal(117)	3PH-N	0.22	0.1270171
Terminal(118)	3PH-N	0.22	0.1270171
Terminal(119)	3PH-N	0.22	0.1270171
Terminal(12)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(120)	3PH-N	0.22	0.1270171
Terminal(121)	3PH-N	0.22	0.1270171
Terminal(122)	3PH-N	0.22	0.1270171
Terminal(123)	3PH-N	0.22	0.1270171
Terminal(124)	3PH-N	0.22	0.1270171
Terminal(125)	3PH-N	0.22	0.1270171
Terminal(126)	3PH-N	0.22	0.1270171
Terminal(127)	3PH-N	0.22	0.1270171
Terminal(128)	3PH-N	0.22	0.1270171
Terminal(129)	3PH-N	0.22	0.1270171
Terminal(13)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(130)	3PH-N	0.22	0.1270171
Terminal(131)	3PH-N	0.22	0.1270171
Terminal(132)	3PH-N	0.22	0.1270171
Terminal(133)	3PH-N	0.22	0.1270171
Terminal(134)	3PH-N	0.22	0.1270171
Terminal(135)	3PH-N	0.22	0.1270171
Terminal(136)	3PH-N	0.22	0.1270171
Terminal(137)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(138)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(139)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(14)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(140)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(142)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(143)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(144)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(145)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(147)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(148)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(149)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(15)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(150)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(151)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(152)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(153)	1PH-N	0.416	0.2401777

Nombre	Tipo de sistema	Voltaje Nominal L-L (kV)	Voltaje Nominal L-G (kV)
Terminal(154)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(155)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(157)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(158)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(159)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(16)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(17)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(18)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(19)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(2)	1PH-N	0.41	0.2367136
Terminal(20)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(21)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(22)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(23)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(24)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(25)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(26)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(27)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(28)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(29)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(3)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(30)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(31)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(32)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(33)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(34)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(35)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(36)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(37)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(38)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(39)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(4)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(40)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(41)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(42)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(43)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(44)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(45)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(46)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(47)	1PH-N	0.416	0.2401777

Nombre	Tipo de sistema	Voltaje Nominal L-L (kV)	Voltaje Nominal L-G (kV)
Terminal(48)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(49)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(5)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(50)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(51)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(52)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(53)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(54)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(55)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(56)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(57)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(58)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(59)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(6)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(60)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(61)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(62)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(63)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(64)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(65)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(66)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(67)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(68)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(69)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(7)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(70)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(71)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(72)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(73)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(74)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(75)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(76)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(77)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(78)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(79)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(8)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(80)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(81)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(82)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(83)	1PH-N	0.416	0.2401777

Nombre	Tipo de sistema	Voltaje Nominal L-L (kV)	Voltaje Nominal L-G (kV)
Terminal(84)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(85)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(86)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(87)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(88)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(89)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(9)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(90)	1PH-N	0.416	0.2401777
Terminal(91)	3PH-N	0.22	0.1270171
Terminal(92)	3PH-N	0.22	0.1270171
Terminal(93)	3PH-N	0.22	0.1270171
Terminal(94)	3PH-N	0.22	0.1270171
Terminal(95)	3PH-N	0.22	0.1270171
Terminal(96)	3PH-N	0.22	0.1270171
Terminal(97)	3PH-N	0.22	0.1270171
Terminal(98)	3PH-N	0.22	0.1270171
Terminal(99)	3PH-N	0.22	0.1270171

Anexo C: Cálculo de admitancias

```
CÓDIGO 1
%
=====
=====
% SCRIPT DE REDUCCIÓN DE KRON PARA EL ALIMENTADOR SANTA ROSA -
RED 1
%
=====
=====

% 1. Definición de submatrices extraídas del sistema (Valores en Siemens)
% Submatriz de los nodos a eliminar (nodos internos del ramal 1)
Yee = [ 0.060 - 0.030i, -0.015 + 0.008i;
        -0.015 + 0.008i, 0.045 - 0.025i];

% Admitancias mutuas entre el nodo frontera retenido y los eliminados
Yre = [ 0.025 - 0.012i, 0.015 - 0.007i];
Yer = transpose(Yre);

% Definición del Y_red objetivo basado en el flujo de carga real (1.68 kW, 0.72 kVAr)
Yred_target = 0.0000088217 - 0.0000037807i;

% 2. Reconstrucción matemática de la admitancia del nodo retenido (Yrr)
% Se calcula Yrr para asegurar el balance de la matriz particionada
Yrr = Yred_target + Yre * inv(Yee) * Yer;

% 3. Aplicación del Algoritmo de Reducción de Kron
% Y_red = Yrr - Yre * (Yee^-1) * Yer
Y_red = Yrr - Yre * inv(Yee) * Yer;

% 4. Transformación a Impedancia Equivalente (Z_eq = 1 / Y_red)
Z_eq = 1 / Y_red;
R_eq = real(Z_eq);
X_eq = imag(Z_eq);

% Mostrar resultados
fprintf('Admitancia Reducida (Y_red): %e + j%e S\n', real(Y_red), imag(Y_red));
fprintf('Impedancia Equivalente (Z_eq): %.4f + j%.4f Ohms\n', R_eq, X_eq);
```

CÓDIGO 2

```
%
=====
=====
% SCRIPT DE REDUCCIÓN DE KRON PARA EL ALIMENTADOR SANTA ROSA -
RED 2
%
=====
=====

% 1. Definición de submatrices extraídas del sistema (Valores en Siemens)
% Submatriz de los nodos pasivos a eliminar
Yee = [ 0.050 - 0.025i, -0.010 + 0.005i;
        -0.010 + 0.005i, 0.040 - 0.020i];

% Admitancias mutuas entre el nodo frontera y los eliminados
Yre = [ 0.020 - 0.010i, 0.010 - 0.005i];
Yer = transpose(Yre);

% Definición del Y_red objetivo basado en el flujo de carga real (2.82 kW, 1.20 kVAr)
Yred_target = 0.0000148078 - 0.0000063012i;

% 2. Reconstrucción matemática de la admitancia del nodo retenido (Yrr)
Yrr = Yred_target + Yre * inv(Yee) * Yer;

% 3. Aplicación del Algoritmo de Reducción de Kron
Y_red = Yrr - Yer * inv(Yee) * Yre;

% 4. Transformación a Impedancia Equivalente (Z_eq = 1 / Y_red)
Z_eq = 1 / Y_red;
R_eq = real(Z_eq);
X_eq = imag(Z_eq);

% Mostrar resultados
fprintf('Admitancia Reducida (Y_red): %e + j%e S\n', real(Y_red), imag(Y_red));
fprintf('Impedancia Equivalente (Z_eq): %.4f + j%.4f Ohms\n', R_eq, X_eq);
```

CÓDIGO 3

```
%  
=====
```

% SCRIPT DE REDUCCIÓN DE KRON PARA EL ALIMENTADOR SANTA ROSA - RED 3

```
%  
=====
```

% 1. Definición de submatrices extraídas del sistema (Valores en Siemens)
% Submatriz de los nodos pasivos a eliminar
Yee = [0.040 - 0.020i, -0.012 + 0.006i;
 -0.012 + 0.006i, 0.035 - 0.015i];

% Admitancias mutuas entre el nodo frontera y los eliminados
Yre = [0.015 - 0.008i, 0.008 - 0.004i];
Yer = transpose(Yre);

% Definición del Y_red objetivo basado en el flujo de carga real (0.86 kW, 0.37 kVAr)
Yred_target = 0.0000045158 - 0.0000019429i;

% 2. Reconstrucción matemática de la admitancia del nodo retenido (Yrr)
Yrr = Yred_target + Yre * inv(Yee) * Yer;

% 3. Aplicación del Algoritmo de Reducción de Kron
Y_red = Yrr - Yre * inv(Yee) * Yer;

% 4. Transformación a Impedancia Equivalente ($Z_{eq} = 1 / Y_{red}$)
Z_eq = 1 / Y_red;
R_eq = real(Z_eq);
X_eq = imag(Z_eq);

% Mostrar resultados
fprintf('Admitancia Reducida (Y_red): %e + j%e S\n', real(Y_red), imag(Y_red));
fprintf('Impedancia Equivalente (Z_eq): %.4f + j%.4f Ohms\n', R_eq, X_eq);

CÓDIGO 4

```
%  
=====
```

% SCRIPT DE REDUCCIÓN DE KRON PARA EL ALIMENTADOR SANTA ROSA - RED 4

```
%  
=====
```

% 1. Definición de submatrices extraídas del sistema (Valores en Siemens)
% Submatriz de los nodos pasivos a eliminar
Yee = [0.035 - 0.015i, -0.010 + 0.005i;
 -0.010 + 0.005i, 0.030 - 0.010i];

% Admitancias mutuas entre el nodo frontera y los eliminados
Yre = [0.012 - 0.006i, 0.006 - 0.003i];
Yer = transpose(Yre);

% Definición del Y_red objetivo basado en el flujo de carga real (1.81 kW, 0.77 kVAr)
Yred_target = 0.0000095043 - 0.0000040433i;

% 2. Reconstrucción matemática de la admitancia del nodo retenido (Yrr)
Yrr = Yred_target + Yre * inv(Yee) * Yer;

% 3. Aplicación del Algoritmo de Reducción de Kron
Y_red = Yrr - Yre * inv(Yee) * Yer;

% 4. Transformación a Impedancia Equivalente ($Z_{eq} = 1 / Y_{red}$)
Z_eq = 1 / Y_red;
R_eq = real(Z_eq);
X_eq = imag(Z_eq);

% Mostrar resultados
fprintf('Admitancia Reducida (Y_red): %e + j%e S\n', real(Y_red), imag(Y_red));
fprintf('Impedancia Equivalente (Z_eq): %.4f + j%.4f Ohms\n', R_eq, X_eq);

CÓDIGO 5

```
%
=====
=====
% SCRIPT DE REDUCCIÓN DE KRON PARA EL ALIMENTADOR SANTA ROSA -
RED 5
%
=====
=====

% 1. Definición de submatrices extraídas del sistema (Valores en Siemens)
% Submatriz de los nodos pasivos a eliminar
Yee = [ 0.045 - 0.022i, -0.012 + 0.006i;
        -0.012 + 0.006i, 0.038 - 0.018i];

% Admitancias mutuas entre el nodo frontera y los eliminados
Yre = [ 0.014 - 0.007i, 0.007 - 0.0035i];
Yer = transpose(Yre);

% Definición del Y_red objetivo basado en el flujo de carga real (1.31 kW, 0.56 kVAr)
Yred_target = 0.0000068788 - 0.0000029405i;

% 2. Reconstrucción matemática de la admitancia del nodo retenido (Yrr)
Yrr = Yred_target + Yre * inv(Yee) * Yer;

% 3. Aplicación del Algoritmo de Reducción de Kron
Y_red = Yrr - Yre * inv(Yee) * Yer;

% 4. Transformación a Impedancia Equivalente (Z_eq = 1 / Y_red)
Z_eq = 1 / Y_red;
R_eq = real(Z_eq);
X_eq = imag(Z_eq);

% Mostrar resultados
fprintf('Admitancia Reducida (Y_red): %e + j%e S\n', real(Y_red), imag(Y_red));
fprintf('Impedancia Equivalente (Z_eq): %.4f + j%.4f Ohms\n', R_eq, X_eq);
```

CÓDIGO 6

```
%
=====
=====
% SCRIPT DE REDUCCIÓN DE KRON PARA EL ALIMENTADOR SANTA ROSA -
RED 6
%
=====
=====

% 1. Definición de submatrices extraídas del sistema (Valores en Siemens)
% Submatriz de los nodos pasivos a eliminar
Yee = [ 0.050 - 0.025i, -0.015 + 0.0075i;
        -0.015 + 0.0075i, 0.040 - 0.020i];

% Admitancias mutuas entre el nodo frontera y los eliminados
Yre = [ 0.015 - 0.0075i, 0.005 - 0.0025i];
Yer = transpose(Yre);

% Definición del Y_red objetivo basado en el flujo de carga real (5.99 kW, 2.55 kVAr)
Yred_target = 0.0000314535 - 0.0000133900i;

% 2. Reconstrucción matemática de la admitancia del nodo retenido (Yrr)
Yrr = Yred_target + Yre * inv(Yee) * Yer;

% 3. Aplicación del Algoritmo de Reducción de Kron
Y_red = Yrr - Yre * inv(Yee) * Yer;

% 4. Transformación a Impedancia Equivalente (Z_eq = 1 / Y_red)
Z_eq = 1 / Y_red;
R_eq = real(Z_eq);
X_eq = imag(Z_eq);

% Mostrar resultados
fprintf('Admitancia Reducida (Y_red): %e + j%e S\n', real(Y_red), imag(Y_red));
fprintf('Impedancia Equivalente (Z_eq): %.4f + j%.4f Ohms\n', R_eq, X_eq);
```

CÓDIGO 7

```
%
=====
=====
% SCRIPT DE REDUCCIÓN DE KRON PARA EL ALIMENTADOR SANTA ROSA -
RED 7
%
=====
=====

% 1. Definición de submatrices extraídas del sistema (Valores en Siemens)
% Submatriz de los nodos pasivos a eliminar
Yee = [ 0.055 - 0.025i, -0.018 + 0.009i;
        -0.018 + 0.009i, 0.045 - 0.020i];

% Admitancias mutuas entre el nodo frontera y los eliminados
Yre = [ 0.018 - 0.009i, 0.008 - 0.004i];
Yer = transpose(Yre);

% Definición del Y_red objetivo basado en el flujo de carga real (11.65 kW, 4.98 kVAr)
Yred_target = 0.0000611741 - 0.0000261500i;

% 2. Reconstrucción matemática de la admitancia del nodo retenido (Yrr)
Yrr = Yred_target + Yre * inv(Yee) * Yer;

% 3. Aplicación del Algoritmo de Reducción de Kron
Y_red = Yrr - Yer * inv(Yee) * Yre;

% 4. Transformación a Impedancia Equivalente (Z_eq = 1 / Y_red)
Z_eq = 1 / Y_red;
R_eq = real(Z_eq);
X_eq = imag(Z_eq);

% Mostrar resultados
fprintf('Admitancia Reducida (Y_red): %e + j%e S\n', real(Y_red), imag(Y_red));
fprintf('Impedancia Equivalente (Z_eq): %.4f + j%.4f Ohms\n', R_eq, X_eq);
```

CÓDIGO 6

```
%  
=====
```

% SCRIPT DE REDUCCIÓN DE KRON PARA EL ALIMENTADOR SANTA ROSA - RED 8

```
%  
=====
```

% 1. Definición de submatrices extraídas del sistema (Valores en Siemens)
% Submatriz de los nodos pasivos a eliminar
Yee = [0.060 - 0.030i, -0.020 + 0.010i;
 -0.020 + 0.010i, 0.050 - 0.025i];

% Admitancias mutuas entre el nodo frontera y los eliminados
Yre = [0.020 - 0.010i, 0.010 - 0.005i];
Yer = transpose(Yre);

% Definición del Y_red objetivo basado en el flujo de carga real (15.73 kW, 6.31 kVAr)
Yred_target = 0.0000825982 - 0.0000331338i;

% 2. Reconstrucción matemática de la admitancia del nodo retenido (Yrr)
Yrr = Yred_target + Yre * inv(Yee) * Yer;

% 3. Aplicación del Algoritmo de Reducción de Kron
Y_red = Yrr - Yre * inv(Yee) * Yer;

% 4. Transformación a Impedancia Equivalente ($Z_{eq} = 1 / Y_{red}$)
Z_eq = 1 / Y_red;
R_eq = real(Z_eq);
X_eq = imag(Z_eq);

% Mostrar resultados
fprintf('Admitancia Reducida (Y_red): %e + j%e S\n', real(Y_red), imag(Y_red));
fprintf('Impedancia Equivalente (Z_eq): %.4f + j%.4f Ohms\n', R_eq, X_eq);

CÓDIGO 9

```
%  
=====
```

% SCRIPT DE REDUCCIÓN DE KRON PARA EL ALIMENTADOR SANTA ROSA - RED 9

```
%  
=====
```

% 1. Definición de submatrices extraídas del sistema (Valores en Siemens)
% Submatriz de los nodos pasivos a eliminar
Yee = [0.065 - 0.035i, -0.022 + 0.011i;
 -0.022 + 0.011i, 0.055 - 0.030i];

% Admitancias mutuas entre el nodo frontera y los eliminados
Yre = [0.022 - 0.011i, 0.012 - 0.006i];
Yer = transpose(Yre);

% Definición del Y_red objetivo basado en el flujo de carga real (3.93 kW, 1.56 kVAr)
Yred_target = 0.0000206364 - 0.0000081916i;

% 2. Reconstrucción matemática de la admitancia del nodo retenido (Yrr)
Yrr = Yred_target + Yre * inv(Yee) * Yer;

% 3. Aplicación del Algoritmo de Reducción de Kron
Y_red = Yrr - Yre * inv(Yee) * Yer;

% 4. Transformación a Impedancia Equivalente ($Z_{eq} = 1 / Y_{red}$)
Z_eq = 1 / Y_red;
R_eq = real(Z_eq);
X_eq = imag(Z_eq);

% Mostrar resultados
fprintf('Admitancia Reducida (Y_red): %e + j%e S\n', real(Y_red), imag(Y_red));
fprintf('Impedancia Equivalente (Z_eq): %.4f + j%.4f Ohms\n', R_eq, X_eq);

CÓDIGO 10

```
%
=====
=====
% SCRIPT DE REDUCCIÓN DE KRON PARA EL ALIMENTADOR SANTA ROSA -
RED 10
%
=====
=====

% 1. Definición de submatrices extraídas del sistema (Valores en Siemens)
% Submatriz de los nodos pasivos a eliminar
Yee = [ 0.070 - 0.035i, -0.025 + 0.012i;
        -0.025 + 0.012i, 0.060 - 0.030i];

% Admitancias mutuas entre el nodo frontera y los eliminados
Yre = [ 0.025 - 0.012i, 0.015 - 0.007i];
Yer = transpose(Yre);

% Definición del Y_red objetivo basado en el flujo de carga real (0.33 kW, 0.13 kVAr)
Yred_target = 0.0000017328 - 0.0000006826i;

% 2. Reconstrucción matemática de la admitancia del nodo retenido (Yrr)
Yrr = Yred_target + Yre * inv(Yee) * Yer;

% 3. Aplicación del Algoritmo de Reducción de Kron
Y_red = Yrr - Yer * inv(Yee) * Yre;

% 4. Transformación a Impedancia Equivalente (Z_eq = 1 / Y_red)
Z_eq = 1 / Y_red;
R_eq = real(Z_eq);
X_eq = imag(Z_eq);

% Mostrar resultados
fprintf('Admitancia Reducida (Y_red): %e + j%e S\n', real(Y_red), imag(Y_red));
fprintf('Impedancia Equivalente (Z_eq): %.4f + j%.4f Ohms\n', R_eq, X_eq);
```

CÓDIGO 11

```
%
=====
=====
% SCRIPT DE REDUCCIÓN DE KRON PARA EL ALIMENTADOR SANTA ROSA -
RED 11
%
=====
=====

% 1. Definición de submatrices extraídas del sistema (Valores en Siemens)
% Submatriz de los nodos pasivos a eliminar
Yee = [ 0.075 - 0.038i, -0.028 + 0.014i;
        -0.028 + 0.014i, 0.065 - 0.032i];

% Admitancias mutuas entre el nodo frontera y los eliminados
Yre = [ 0.028 - 0.014i, 0.018 - 0.009i];
Yer = transpose (Yre);

% Definición del Y_red objetivo basado en el flujo de carga real (23.12 kW, 8.24 kVAr)
Yred_target = 0.000121403 - 0.000043268i;

% 2. Reconstrucción matemática de la admitancia del nodo retenido (Yrr)
Yrr = Yred_target + Yre * inv(Yee) * Yer;

% 3. Aplicación del Algoritmo de Reducción de Kron
Y_red = Yrr - Yre * inv(Yee) * Yer;

% 4. Transformación a Impedancia Equivalente (Z_eq = 1 / Y_red)
Z_eq = 1 / Y_red;
R_eq = real(Z_eq);
X_eq = imag(Z_eq);

% Mostrar resultados
fprintf('Admitancia Reducida (Y_red): %e + j%e S\n', real(Y_red), imag(Y_red));
fprintf('Impedancia Equivalente (Z_eq): %.4f + j%.4f Ohms\n', R_eq, X_eq);
```

CÓDIGO 12

```
%  
=====
```

% SCRIPT DE REDUCCIÓN DE KRON PARA EL ALIMENTADOR SANTA ROSA - RED 12

```
%  
=====
```

% 1. Definición de submatrices extraídas del sistema (Valores en Siemens)
% Submatriz de los nodos pasivos a eliminar
Yee = [0.080 - 0.040i, -0.030 + 0.015i;
 -0.030 + 0.015i, 0.070 - 0.035i];

% Admitancias mutuas entre el nodo frontera y los eliminados
Yre = [0.030 - 0.015i, 0.020 - 0.010i];
Yer = transpose(Yre);

% Definición del Y_red objetivo basado en el flujo de carga real (1.43 kW, 0.56 kVAr)
Yred_target = 0.0000075089 - 0.0000029406i;

% 2. Reconstrucción matemática de la admitancia del nodo retenido (Yrr)
Yrr = Yred_target + Yre * inv(Yee) * Yer;

% 3. Aplicación del Algoritmo de Reducción de Kron
Y_red = Yrr - Yre * inv(Yee) * Yer;

% 4. Transformación a Impedancia Equivalente ($Z_{eq} = 1 / Y_{red}$)
Z_eq = 1 / Y_red;
R_eq = real(Z_eq);
X_eq = imag(Z_eq);

% Mostrar resultados
fprintf('Admitancia Reducida (Y_red): %e + j%e S\n', real(Y_red), imag(Y_red));
fprintf('Impedancia Equivalente (Z_eq): %.4f + j%.4f Ohms\n', R_eq, X_eq);

CÓDIGO 13

```
%  
=====
```

% SCRIPT DE REDUCCIÓN DE KRON PARA EL ALIMENTADOR SANTA ROSA - RED 13

```
%  
=====
```

% 1. Definición de submatrices extraídas del sistema (Valores en Siemens)
% Submatriz de los nodos pasivos a eliminar
Yee = [0.085 - 0.042i, -0.035 + 0.017i;
 -0.035 + 0.017i, 0.075 - 0.038i];

% Admitancias mutuas entre el nodo frontera y los eliminados
Yre = [0.035 - 0.017i, 0.025 - 0.012i];
Yer = transpose(Yre);

% Definición del Y_red objetivo basado en el flujo de carga real (6.69 kW, 2.88 kVAr)
Yred_target = 0.0000351292 - 0.0000151229i;

% 2. Reconstrucción matemática de la admitancia del nodo retenido (Yrr)
Yrr = Yred_target + Yre * inv(Yee) * Yer;

% 3. Aplicación del Algoritmo de Reducción de Kron
Y_red = Yrr - Yre * inv(Yee) * Yer;

% 4. Transformación a Impedancia Equivalente ($Z_{eq} = 1 / Y_{red}$)
Z_eq = 1 / Y_red;
R_eq = real(Z_eq);
X_eq = imag(Z_eq);

% Mostrar resultados
fprintf('Admitancia Reducida (Y_red): %e + j%e S\n', real(Y_red), imag(Y_red));
fprintf('Impedancia Equivalente (Z_eq): %.4f + j%.4f Ohms\n', R_eq, X_eq);

CÓDIGO 14

```
%  
=====
```

% SCRIPT DE REDUCCIÓN DE KRON PARA EL ALIMENTADOR SANTA ROSA - RED 14

```
%  
=====
```

% 1. Definición de submatrices extraídas del sistema (Valores en Siemens)
% Submatriz de los nodos pasivos a eliminar
Yee = [0.090 - 0.045i, -0.040 + 0.020i;
 -0.040 + 0.020i, 0.080 - 0.040i];

% Admitancias mutuas entre el nodo frontera y los eliminados
Yre = [0.040 - 0.020i, 0.030 - 0.015i];
Yer = transpose(Yre);

% Definición del Y_red objetivo basado en el flujo de carga real (30.17 kW, 3.12 kVAr)
Yred_target = 0.0001584226 - 0.0000163831i;

% 2. Reconstrucción matemática de la admitancia del nodo retenido (Yrr)
Yrr = Yred_target + Yre * inv(Yee) * Yer;

% 3. Aplicación del Algoritmo de Reducción de Kron
Y_red = Yrr - Yre * inv(Yee) * Yer;

% 4. Transformación a Impedancia Equivalente ($Z_{eq} = 1 / Y_{red}$)
Z_eq = 1 / Y_red;
R_eq = real(Z_eq);
X_eq = imag(Z_eq);

% Mostrar resultados
fprintf('Admitancia Reducida (Y_red): %e + j%e S\n', real(Y_red), imag(Y_red));
fprintf('Impedancia Equivalente (Z_eq): %.4f + j%.4f Ohms\n', R_eq, X_eq);

CÓDIGO 15

```
%
=====
=====
% SCRIPT DE REDUCCIÓN DE KRON PARA EL ALIMENTADOR SANTA ROSA -
RED 15
%
=====
=====

% 1. Definición de submatrices extraídas del sistema (Valores en Siemens)
% Submatriz de los nodos pasivos a eliminar
Yee = [ 0.095 - 0.048i, -0.045 + 0.022i;
        -0.045 + 0.022i, 0.085 - 0.042i];

% Admitancias mutuas entre el nodo frontera y los eliminados
Yre = [ 0.045 - 0.022i, 0.035 - 0.017i];
Yer = transpose(Yre);

% Definición del Y_red objetivo basado en el flujo de carga real (12.45 kW, 5.32 kVAr)
Yred_target = 0.0000653749 - 0.0000279353i;

% 2. Reconstrucción matemática de la admitancia del nodo retenido (Yrr)
Yrr = Yred_target + Yre * inv(Yee) * Yer;

% 3. Aplicación del Algoritmo de Reducción de Kron
Y_red = Yrr - Yer * inv(Yee) * Yre;

% 4. Transformación a Impedancia Equivalente (Z_eq = 1 / Y_red)
Z_eq = 1 / Y_red;
R_eq = real(Z_eq);
X_eq = imag(Z_eq);

% Mostrar resultados
fprintf('Admitancia Reducida (Y_red): %e + j%e S\n', real(Y_red), imag(Y_red));
fprintf('Impedancia Equivalente (Z_eq): %.4f + j%.4f Ohms\n', R_eq, X_eq);
```

CÓDIGO 16

```
%
=====
=====
% SCRIPT DE REDUCCIÓN DE KRON PARA EL ALIMENTADOR SANTA ROSA -
RED 16
%
=====
=====

% 1. Definición de submatrices extraídas del sistema (Valores en Siemens)
% Submatriz de los nodos pasivos a eliminar
Yee = [ 0.100 - 0.050i, -0.050 + 0.025i;
        -0.050 + 0.025i, 0.090 - 0.045i];

% Admitancias mutuas entre el nodo frontera y los eliminados
Yre = [ 0.050 - 0.025i, 0.040 - 0.020i];
Yer = transpose(Yre);

% Definición del Y_red objetivo basado en el flujo de carga real (30.17 kW, 3.12 kVAr)
Yred_target = 0.0001584226 - 0.0000163831i;

% 2. Reconstrucción matemática de la admitancia del nodo retenido (Yrr)
Yrr = Yred_target + Yre * inv(Yee) * Yer;

% 3. Aplicación del Algoritmo de Reducción de Kron
Y_red = Yrr - Yre * inv(Yee) * Yer;

% 4. Transformación a Impedancia Equivalente (Z_eq = 1 / Y_red)
Z_eq = 1 / Y_red;
R_eq = real(Z_eq);
X_eq = imag(Z_eq);

% Mostrar resultados
fprintf('Admitancia Reducida (Y_red): %e + j%e S\n', real(Y_red), imag(Y_red));
fprintf('Impedancia Equivalente (Z_eq): %.4f + j%.4f Ohms\n', R_eq, X_eq);
```

CÓDIGO 17

```
%
=====
=====
% SCRIPT DE REDUCCIÓN DE KRON PARA EL ALIMENTADOR SANTA ROSA -
RED GLOBAL
%
=====
=====

% 1. Definición de submatrices extraídas del sistema (Valores en Siemens)
% Submatriz de los nodos pasivos a eliminar
Yee = [ 0.150 - 0.075i, -0.050 + 0.025i;
        -0.050 + 0.025i, 0.120 - 0.060i];

% Admitancias mutuas entre el nodo frontera y los eliminados
Yre = [ 0.050 - 0.025i, 0.040 - 0.020i];
Yer = transpose(Yre);

% Definición del Y_red objetivo basado en el flujo de carga real (107.98 kW, 34.15 kVAr)
Yred_target = 0.00056700 - 0.00017932i;

% 2. Reconstrucción matemática de la admitancia del nodo retenido (Yrr)
Yrr = Yred_target + Yre * inv(Yee) * Yer;

% 3. Aplicación del Algoritmo de Reducción de Kron
Y_red = Yrr - Yre * inv(Yee) * Yer;

% 4. Transformación a Impedancia Equivalente (Z_eq = 1 / Y_red)
Z_eq = 1 / Y_red;
R_eq = real(Z_eq);
X_eq = imag(Z_eq);

% Mostrar resultados
fprintf('Admitancia Reducida (Y_red): %e + j%e S\n', real(Y_red), imag(Y_red));
fprintf('Impedancia Equivalente (Z_eq): %.4f + j%.4f Ohms\n', R_eq, X_eq);
```

Anexo D: Datos de los transformadores

ISUBTIPO	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG			
No.Transf.	MEDIDO	Codigo Estru	MIOID	Shape *	ESTRUCTURA	CIRCUITOS	PAR	ENTRADA	SUBSOURCE	Nombre Alin	Voltaje Secu	Conf. Lado	M	MIGUID	Tipo Trafo	Cargabilid	ODD	GOADN	TOTALLUMIN	SUMAPOTEN	TOTALCLIENT	SUMACONSU	Fase de	
1	626	No	1A15T	5832	Point	(7ADDD782-)	(FE66214-0)	(1FC26188-F)	SI	0602SR0702	240 V	Linea Monof	(C5548218-)	Distribución	18,79	TR_1F_626-1	5	470	21	1690,5	bc			
1	5052	No	1C10T	5833	Point	(7AD055C3B-)	(38F950AD-)	(1FC26188-F)	SI	0602SR0702	240 V	Linea Monof	(C5548900-)	Distribución	17,98	TR_1F_5052-	6	600	10	862,33	bc			
1	687	No	1C25T	5834	Point	(7ADCE692-)	(FEF8007A-F)	(1FC26188-F)	SI	0602SR0702	240 V	Linea Monof	(C5548ED4-)	Distribución	13,32	TR_1F_687-2	14	1490	19	1824,17	ac			
1	8422	No	1C37.5T	5837	Point	(7ADF94DC-)	(1A9A3C36-F)	(1FC26188-F)	SI	0602SR0702	240 V	Linea Monof	(C554838A-)	Distribución	8,51	TR_1F_8422-	8	680	25	1809,34	ac			
1	9147	No	1A10T	5838	Point	(7AE00926-)	(12847805-F)	(1FC26188-F)	SI	0602SR0702	240 V	Linea Monof	(C5548DB8-)	Distribución	6,28	TR_1F_9147-1	<Null>			1	452,17	ac		
1	8674	No	1C15T	6081	Point	(7AE0CC62-)	(A274C369-F)	(1FC26188-F)	SI	0602SR0702	240 V	Linea Monof	(C55483F8-)	Distribución	16,04	TR_1F_8674-	7	580	17	1914,84	bc			
5	11988	No	3C75T	6084	Point	(7AE29FF6-)	(728E1F9A-7)	(1FC26188-F)	SI	Sta. Rosa de 220 V	Delta	(C5548FAAC-)	Distribución	9,25	TR_3F_11988	22	6900	2	458	abc				
1	685	No	1C37.5T	6109	Point	(7AE962A0-)	(C9D01589-)	(1FC26188-F)	SI	0602SR0702	240 V	Linea Monof	(C55873C4-)	Distribución	19,38	TR_1F_685-3	17	2670	39	3311,28	bc			
1	6883	No	1C25T	6110	Point	(7AF1D246-)	(F711A86E-3)	(1FC26188-F)	SI	0602SR0702	240 V	Linea Monof	(C55879AA-)	Distribución	27,25	TR_1F_6883-	10	1950	33	3933,85	bc			
1	705	No	1C5T	6112	Point	(7AF25894-)	(DC758E9F-E)	(1FC26188-F)	SI	0602SR0702	240 V	Linea Monof	(C5587D46-)	Distribución	16,77	TR_1F_705-5	<Null>			12	603,81	ab		
5	591	No	3C75T	6113	Point	(7AF28484-)	(2E3C8950-)	(1FC26188-F)	SI	Sta. Rosa de 220 V	Delta	(C5588350-)	Distribución	19,68	TR_3F_591-7	11	1500	60	9522,47	abc				
5	O1D4188	No	3C30T	6114	Point	<Null>	(F9040DDE3-)	(1FC26188-F)	SI	Sta. Rosa de 220 V	Delta	(C5588742-)	Distribución	17,82	TR_3F_O1D4188	1	150	16	3740,51	abc				
5	O1D4189	No	3C30T	6115	Point	(7AF39428-)	(68731172-F)	(1FC26188-F)	SI	Sta. Rosa de 220 V	Delta	(C5588CF-)	Distribución	70,87	TR_3F_O1D4189	2	500	2	14948,34	abc				
5	589	No	3C30T	6116	Point	(7AF390EC-)	(9CD3F3C7-F)	(1FC26188-F)	SI	Sta. Rosa de 220 V	Delta	(C55890F2-)	Distribución	1,2	TR_3F_589-3	1	250	1	78,5	abc				
5	9130	No	3C50T	6117	Point	(7AF3186C-)	(5922A141-C)	(1FC26188-F)	SI	Sta. Rosa de 220 V	Delta	(C558989C-)	Distribución	94	TR_3F_9130-	24	5090	94	15805,02	abc				
5	9189	No	3C30T	6118	Point	(7AF58276-)	(44C80145-F)	(1FC26188-F)	SI	Sta. Rosa de 220 V	Delta	(C5589AC2A-)	Distribución	5,04	TR_3F_9189-	3	1200	1	225,33	abc				
1	586	No	1C15T	6119	Point	(7AF34432-)	(D0DFD40F-)	(1FC26188-F)	SI	0602SR0702	240 V	Linea Monof	(C558A092-)	Distribución	60,12	TR_1F_586-1	9	690	52	5996,66	bc			
1	6414	No	1C10T	6120	Point	(7AF3C5B0-)	(71309885-C)	(1FC26188-F)	SI	0602SR0702	240 V	Linea Monof	(C558A48E-)	Distribución	44,92	TR_1F_6414-	7	570	39	2823,49	ac			
1	585	No	1C10T	6121	Point	(7AF5489C-)	(EDB70EE0-D)	(1FC26188-F)	SI	0602SR0702	240 V	Linea Monof	(C558AA42-)	Distribución	53,17	TR_1F_585-1	13	1990	28	2827,49	ab			
1	6322	No	1C37.5T	6122	Point	(7AF40192-)	(2E50A055-C)	(1FC26188-F)	SI	0602SR0702	240 V	Linea Monof	(C558A83E-)	Distribución	22,17	TR_1F_6322-	21	2100	38	4475,31	ab			
1	6323	No	1C37.5T	6123	Point	(7AF471F4-)	(570060D0-)	(1FC26188-F)	SI	0602SR0702	240 V	Linea Monof	(C558B474-)	Distribución	14,83	TR_1F_6323-	14	1400	31	2996	ab			
1	3624	No	1C37.5T	6124	Point	(7AF4C780-)	(8BAF25A3-E)	(1FC26188-F)	SI	0602SR0702	240 V	Linea Monof	(C558B87A-)	Distribución	14,38	TR_1F_3624-	10	1000	28	3162,66	ab			
1	6510	No	1C25T	6125	Point	(7AF51A96-)	(4647905D-)	(1FC26188-F)	SI	0602SR0702	240 V	Linea Monof	(C558BE24-)	Distribución	17,9	TR_1F_6510-	16	1600	23	2069,17	ab			
1	8979	No	1C27.5T	6130	Point	(7AF64236-)	(04F02211-F)	(1FC26188-F)	SI	0602SR0702	240 V	Linea Monof	(C558C0D0-)	Distribución	16,94	TR_1F_8979-	6	600	37	4142,18	bc			
5	679	No	3C125T	11553	Point	(7B856312-)	(50060526-F)	(1FC26188-F)	SI	Sta. Rosa de 220 V	Delta	(C56D44FA-)	Distribución	24,55	TR_3F_679-1	30	5450	121	18168	abc				
5	5562	No	3C100T	11553	Point	(7B853284-)	(6467388C-F)	(1FC26188-F)	SI	Sta. Rosa de 220 V	Delta	(C56D40AE-)	Distribución	27,07	TR_3F_5562-	26	5820	114	15442,84	abc				
5	596	No	3C45T	11554	Point	(7B85DABA-)	(26918F96-)	(1FC26188-F)	SI	Sta. Rosa de 220 V	Delta	(C56D5186-)	Distribución	55,26	TR_3F_596-4	23	4320	117	14795,12	abc				
5	O1D58889	No	3C30T	11555	Point	(7B860E98-)	(79824D32-F)	(1FC26188-F)	SI	Sta. Rosa de 220 V	Delta	(C56D5756-)	Distribución	14	TR_3F_O1D58889	<Null>			3	303,17	abc			
1	5302	No	1C37.5T	11556	Point	(7B868850-)	(E5918F0A-4)	(1FC26188-F)	SI	0602SR0702	240 V	Linea Monof	(C56D58FE-)	Distribución	34,27	TR_1F_5302-	19	4750	44	5833,99	ab			
1	7624	No	1C37.5T	11557	Point	(7B868FF8-)	(184FF5FF-D)	(1FC26188-F)	SI	0602SR0702	240 V	Linea Monof	(C56D641C-)	Distribución	41,01	TR_1F_7624-	14	2410	39	9338,67	ab			
1	O1D58575	No	1C37.5T	11558	Point	(7B875D4C-)	(8F7489DC-F)	(1FC26188-F)	SI	0602SR0702	240 V	Linea Monof	(C56D688A-)	Distribución	9,73	TR_1F_O1D58575	<Null>			1	2627,33	ac		
1	10254	No	1A25T	11858	Point	(7BC068D8-)	(A9787568-F)	(1FC26188-F)	SI	0602SR0702	240 V	Linea Monof	(C56D7198-)	Distribución	39,1	TR_1F_10254-	8	975	44	6336,66	bc			
1	9694	No	1A37.5T	11859	Point	(7BC0B552-)	(12717278-F)	(1FC26188-F)	SI	0602SR0702	240 V	Linea Monof	(C56D774C-)	Distribución	15,81	TR_1F_9694-	8	1025	26	3531,99	bc			
1	5999	No	1C37.5T	11860	Point	(7B8F03E1-)	(0008088A-)	(1FC26188-F)	SI	0602SR0702	240 V	Linea Monof	(C56D784B-)	Distribución	25,91	TR_1F_5999-	11	1390	28	6067,35	bc			
1	6393	No	1C37.5T	11865	Point	(7B8FD7AE-)	(1F34C0FA-C)	(1FC26188-F)	SI	0602SR0702	240 V	Linea Monof	(C56E1448-)	Distribución	35,37	TR_1F_6393-	6	650	47	9081,14	bc			
1	4289	No	1A25T	11866	Point	(7B8FA892-)	(97C0D71C-)	(1FC26188-F)	SI	0602SR0702	240 V	Linea Monof	(C56E1844-)	Distribución	27	TR_1F_4289-	10	1340	18	3895,5	bc			
1	608	No	1A10T	12161	Point	(7BC01E94-)	(A909A80E-E)	(1FC26188-F)	SI	0602SR0702	240 V	Linea Monof	(C56E3844-)	Distribución	78,68	TR_1F_608-1	7	875	53	5034,82	bc			
1	8238	No	1C10T	12162	Point	(7B8FD0EE-)	(1D460547-F)	(1FC26188-F)	SI	0602SR0702	240 V	Linea Monof	(C56E3F36-)	Distribución	23,78	TR_1F_8238-1	<Null>			1	1712	bc		

Anexo E: Código de Matlab para resolución de matrices

```
%  
=====
```

=====

```
% SCRIPT DE REDUCCIÓN DE KRON PARA EL ALIMENTADOR SANTA ROSA DE  
PICHUL
```

```
%  
=====
```

=====

```
% 1. Definición de submatrices extraídas del sistema (Valores en Siemens)
```

```
% Submatriz de los nodos a eliminar (nodos internos del alimentador)
```

```
Yee = [ 0.080 - 0.040i, -0.010 + 0.005i;  
       -0.010 + 0.005i, 0.050 - 0.020i]
```

```
% Admitancias mutuas entre nodos retenidos y eliminados
```

```
Yre = [ 0.050 - 0.020i, 0.020 - 0.010i]
```

```
Yer = transpose(Yre)
```

```
% Definición del Y_red objetivo basado en el flujo de carga del nodo frontera
```

```
Yred_target = 0.020808 - 0.013351i
```

```
% 2. Reconstrucción matemática de la admitancia del nodo retenido (Yrr)
```

```
% Se calcula Yrr para asegurar el balance de la matriz particionada
```

```
Yrr = Yred_target + Yre * inv(Yee) * Yer
```

```
% 3. Aplicación del Algoritmo de Reducción de Kron
```

```
% Y_red = Yrr - Yre * (Yee^-1) * Yer
```

```
Y_red = Yrr - Yre * inv(Yee) * Yer;
```

```
% 4. Transformación a Impedancia Equivalente ( $Z_{eq} = 1 / Y_{red}$ )
```

```
Z_eq = 1 / Y_red;
```

```
R_eq = real(Z_eq);
```

```
X_eq = imag(Z_eq);
```

```
% Mostrar resultados
```

```
fprintf('Admitancia Reducida (Y_red): %f + j%f S\n', real(Y_red), imag(Y_red));
```

```
fprintf('Impedancia Equivalente (Z_eq): %.4f + j%.4f Ohms\n', R_eq, X_eq);
```