



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
PEDRO RUIZ GALLO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**TESIS**

**Para Optar el Título Profesional de:**

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**Ubicación óptima de condensadores empleando  
algoritmos genéticos para optimizar la calidad de  
energía eléctrica en el alimentador C-244 – J. L. Ortiz**

**Autor:**

**Bach. Heber Elkin Encalada Rodrigo**

**Asesor:**

**Dr. Ing. Daniel Carranza Montenegro**

**LAMBAYEQUE – PERÚ**

**2026**



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
PEDRO RUIZ GALLO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**TESIS**

**Para Optar el Título Profesional de:**

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**Ubicación óptima de condensadores empleando  
algoritmos genéticos para optimizar la calidad de  
energía eléctrica en el alimentador C-244 – J. L. Ortiz**

**Autor:**

**Bach. Heber Elkin Encalada Rodrigo**

**Aprobado por el Jurado Examinador**

**PRESIDENTE** : M.Sc. Ing. Jony Villalobos Cabrera.  
**SECRETARIO** : Dr. Ing. James Skinner Celada Padilla.  
**MIEMBRO** : M.Sc. Ing. Percy Edwar Niño Vásquez.  
**ASESOR** : Dr. Ing. Daniel Carranza Montenegro.

**LAMBAYEQUE – PERÚ**

**2026**



# UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO



**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**TESIS**

**TITULO:**

**Ubicación óptima de condensadores empleando  
algoritmos genéticos para optimizar la calidad de  
energía eléctrica en el alimentador C-244 – J. L. Ortiz**

## **CONTENIDOS**

<b>CAPITULO I</b>	<b>: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.</b>
<b>CAPITULO II</b>	<b>: MARCO TEÓRICO.</b>
<b>CAPITULO III</b>	<b>: MARCO METODOLÓGICO.</b>
<b>CAPITULO IV</b>	<b>: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.</b>
<b>CAPITULO V</b>	<b>: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b>

**Bach. Heber Elkin Encalada Rodrigo**

M.Sc. Ing. Jony Villalobos Cabrera.  
PRESIDENTE

Dr. Ing. James Skinner Celada Padilla.  
SECRETARIO

M.Sc. Ing. Percy Edwar Niño Vásquez.  
MIEMBRO

Dr. Ing. Daniel Carranza Montenegro.  
ASESOR

**LAMBAYEQUE – PERÚ**

**2026**



**ACTA DE SUSTENTACION N°0154-2026-FIME**



En la ciudad de Lambayeque, siendo las 09:00 a.m. del día jueves 23 de abril 2026. Se reunieron los miembros del jurado, designados mediante Resolución N°057-2026-D-FIME-UNPRG, de fecha 09 de abril 2026, con la finalidad de Evaluar y Calificar la sustentación de la Tesis, conformado por los siguientes catedráticos:

- |   |            |
|---|------------|
| ▪ M.Sc. Ing. JONY VILLALOBOS CABRERA    | PRESIDENTE |
| ▪ Dr. Ing. JAMES SKINNER CELADA PADILLA | SECRETARIO |
| ▪ M.Sc. Ing. PERCY EDWAR NIÑO VÁSQUEZ   | MIEMBRO    |
| ▪ Dr. Ing. DANIEL CARRANZA MONTENEGRO   | ASESOR     |

Se recibió la Tesis titulada:

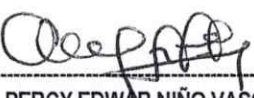
***“UBICACIÓN ÓPTIMA DE CONDENSADORES EMPLEANDO ALGORITMOS GENÉTICOS PARA OPTIMIZAR LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL ALIMENTADOR C-244 – J.L. ORTIZ”***


Presentada y sustentada por su autor, Bachiller: **ENCALADA RODRIGO HEBER ELKIN**. Finalizada la sustentación de la Tesis, el sustentante respondió las preguntas y observaciones de los miembros del jurado examinador, quienes procedieron a deliberar y acordaron otorgar el calificativo de **APROBADO**, Nota (16) en la escala vigesimal, mención Bueno. Quedando el sustentante apto para obtener el Título profesional de Ingeniero Mecánico Electricista, de acuerdo a la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente, de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

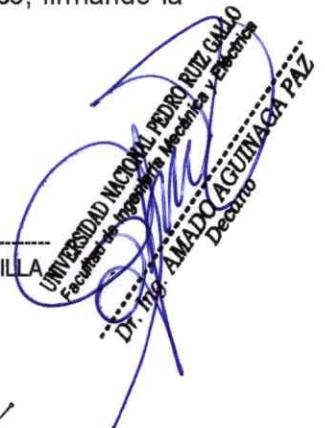
Siendo las 10:00 del mismo día se da por concluido el acto académico, firmando la presente acta el jurado respectivo:

  
-----  
M.Sc. Ing. JONY VILLALOBOS CABRERA  
PRESIDENTE

  
-----  
Dr. Ing. JAMES SKINNER CELADA PADILLA  
SECRETARIO

  
-----  
M.Sc. Ing. PERCY EDWAR NIÑO VÁSQUEZ  
MIEMBRO

  
-----  
Dr. Ing. DANIEL CARRANZA MONTENEGRO  
ASESOR

  
UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
Decanato  
Dr. Ing. AMADO ACUINAGA PAZ

ANEXO 01

**CONSTANCIA DE VERIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD**

Yo, **Dr. Ing. Daniel Carranza Montenegro**, usuario revisor del documento titulado: **“UBICACIÓN ÓPTIMA DE CONDENSADORES EMPLEANDO ALGORITMOS GENÉTICOS PARA OPTIMIZAR LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL ALIMENTADOR C-244 – J.L. ORTIZ”**.

Cuyo autor es, **Encalada Rodrigo Heber Elkin**, identificado con documento de identidad **N° 72926385** declaro que la evaluación realizada por el Programa informático, ha arrojado un porcentaje de similitud de **14%**, verificable en el Resumen de Reporte automatizado de similitudes que se acompaña.

El suscrito analizó dicho reporte y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas dentro del porcentaje de similitud permitido no constituyen plagio y que el documento cumple con la integridad científica y con las normas para el uso de citas y referencias establecidas en los protocolos respectivos.

Se cumple con adjuntar el Recibo Digital a efectos de la trazabilidad respectiva del proceso.

Lambayeque 30 de abril del 2026



.....  
**DR. ING. DANIEL CARRANZA MONTENEGRO**

**DNI: 16477153**

**ASESOR**

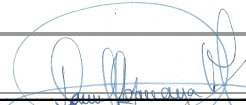
Se adjunta:

\*Resumen del Reporte automático de similitudes

\*Recibo Digital

# Ubicación óptima de condensadores empleando algoritmos genéticos para optimizar la calidad de energía eléctrica en el Alimentador C-244 – J.L.Ortiz

## INFORME DE ORIGINALIDAD



Dr. Ing. Daniel Carranza Montenegro  
DNI: 16477153  
ASESOR

14%

INDICE DE SIMILITUD

13%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

7%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="http://repositorio.unprg.edu.pe">repositorio.unprg.edu.pe</a> Fuente de Internet	4%
2	Submitted to Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo Trabajo del estudiante	3%
3	<a href="http://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	2%
4	<a href="http://repositorio.utc.edu.ec">repositorio.utc.edu.ec</a> Fuente de Internet	1%
5	<a href="http://1library.co">1library.co</a> Fuente de Internet	1%
6	<a href="http://repositorio.uss.edu.pe">repositorio.uss.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
7	<a href="http://dspace.ups.edu.ec">dspace.ups.edu.ec</a> Fuente de Internet	<1%
8	Submitted to University of the Andes Trabajo del estudiante	<1%



## Recibo digital

Dr. Ing. Daniel Carranza Montenegro  
DNI: 16477153  
ASESOR

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por Turnitin. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Heber Elkin Encalada Rodrigo  
Título del ejercicio: Quick Submit  
Título de la entrega: Ubicación óptima de condensadores empleando algoritmos g...  
Nombre del archivo: TESIS\_FINAL\_HEER.docx  
Tamaño del archivo: 948.18K  
Total páginas: 69  
Total de palabras: 10,871  
Total de caracteres: 63,250  
Fecha de entrega: 31-mar-2026 06:37p. m. (UTC-0500)  
Identificador de la entrega: 2919228952



UNIVERSIDAD NACIONAL  
PEDRO RUIZ GALLO



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

### TESIS

Para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

“Ubicación óptima de condensadores empleando algoritmos genéticos para optimizar la calidad de energía eléctrica en el Alimentador C-244 – J.L.Ortiz”

Autor:

Bach. Heber Elkin Encalada Rodrigo

Asesor:

Dr. Daniel Carranza Montenegro

LAMBAYEQUE – PERÚ

2026

## **DEDICATORIA**

Dedico el presente trabajo a mis padres y a mi hermano, por su apoyo incondicional y confianza en mí en todo momento.

Bach. Heber Elkin Encalada Rodrigo

## **AGRADECIMIENTO**

Expreso mi profunda gratitud a Dios por guiar mi camino y darme la fortaleza para cumplir mis metas. Asimismo, le agradezco por bendecirme con una familia maravillosa que, en todo momento, me ha brindado su apoyo incondicional.

Bach. Heber Elkin Encalada Rodrigo

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo determinar la ubicación óptima de bancos de condensadores mediante algoritmos genéticos para optimizar la calidad de energía eléctrica en el Alimentador C-244 del distrito de José Leonardo Ortiz, Chiclayo. El estudio fue de enfoque cuantitativo, tipo aplicada, nivel explicativo y diseño no experimental, empleando modelamiento y simulación en ETAP. En el diagnóstico inicial se identificó un factor de potencia promedio de 0,75, una caída de tensión promedio de 6,35 % y pérdidas técnicas de 12 %, evidenciando deficiencias en la compensación reactiva y en el desempeño eléctrico del alimentador. A partir de estos resultados, se diseñó un algoritmo genético para optimizar la ubicación y capacidad de condensadores, considerando como variables de decisión los nodos candidatos y la potencia reactiva de compensación, con una función objetivo orientada a minimizar pérdidas y mejorar el perfil de tensión. La solución obtenida fue validada mediante corrida de flujo de carga en ETAP, determinándose como configuración óptima la instalación de bancos de condensadores en los nodos 771, 2158, 2250 y 2131, con capacidades de 450 kVAr, 300 kVAr, 300 kVAr y 150 kVAr, respectivamente. Los resultados mostraron una mejora significativa en la calidad de energía eléctrica, al incrementarse el factor de potencia de 0,75 a 0,96, reducirse la caída de tensión de 6,35 % a 3,10 % y disminuir las pérdidas técnicas de 12 % a 7,2 %. Se concluye que la optimización propuesta fue eficaz para mejorar el desempeño técnico y energético del Alimentador C-244.

**Palabras clave:** algoritmos genéticos, bancos de condensadores, calidad de energía eléctrica, flujo de carga, ETAP.

## ABSTRACT

This research aimed to determine the optimal location of capacitor banks using genetic algorithms to optimize power quality in Feeder C-244 of the José Leonardo Ortiz district in Chiclayo. The study employed a quantitative, applied, explanatory, and non-experimental design, utilizing modeling and simulation in ETAP. The initial diagnosis identified an average power factor of 0.75, an average voltage drop of 6.35%, and technical losses of 12%, revealing deficiencies in reactive power compensation and the feeder's electrical performance. Based on these results, a genetic algorithm was designed to optimize capacitor location and capacity, considering candidate nodes and reactive power compensation as decision variables, with an objective function focused on minimizing losses and improving the voltage profile. The solution obtained was validated through a load flow run in ETAP, determining the optimal configuration to be the installation of capacitor banks at nodes 771, 2158, 2250, and 2131, with capacities of 450 kVAr, 300 kVAr, 300 kVAr, and 150 kVAr, respectively. The results showed a significant improvement in power quality, with the power factor increasing from 0.75 to 0.96, the voltage drop decreasing from 6.35% to 3.10%, and technical losses declining from 12% to 7.2%. It is concluded that the proposed optimization was effective in improving the technical and energy performance of Feeder C-244.

**Keywords:** genetic algorithms, capacitor banks, power quality, load flow, ETAP.: .

## ÍNDICE

<b>ACTA DE SUSTENTACIÓN .....</b>	<b>4</b>
<b>CONSTANCIA DE ORIGANILIDAD .....</b>	<b>5</b>
<b>REPORTE DEL TURNITIN .....</b>	<b>6</b>
<b>REGISTRO DEL TURNITIN .....</b>	<b>7</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>8</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>9</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>10</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>11</b>
<b>ÍNDICE .....</b>	<b>12</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>14</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>15</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>16</b>
<b>CAPITULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>18</b>
<b>1.1. Realidad Problemática .....</b>	<b>18</b>
<b>1.2. Formulación del Problema .....</b>	<b>20</b>
<b>1.3. Delimitación de la Investigación.....</b>	<b>20</b>
<b>1.4. Justificación e Importancia del estudio .....</b>	<b>21</b>
<b>1.5. Limitaciones de la Investigación .....</b>	<b>23</b>
<b>1.6. Objetivos de estudio .....</b>	<b>23</b>
<b>CAPITULO II: MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>25</b>
<b>2.1. Antecedentes de Estudios.....</b>	<b>25</b>
<b>2.2. Desarrollo de la temática correspondiente al tema desarrollado .....</b>	<b>29</b>
<b>CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO .....</b>	<b>33</b>
<b>3.1. Tipo y diseño de investigación.....</b>	<b>33</b>
<b>3.2. Población y muestra .....</b>	<b>33</b>
<b>3.3. Hipótesis .....</b>	<b>34</b>
<b>3.4. Variables - Operacionalización .....</b>	<b>34</b>
<b>3.5. Métodos y Técnicas de investigación .....</b>	<b>36</b>
<b>3.6. Descripción de los instrumentos utilizados .....</b>	<b>36</b>
<b>3.7. Análisis Estadístico e interpretación de los datos .....</b>	<b>37</b>
<b>CAPITULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS ..</b>	<b>38</b>
<b>4.1. Estado actual de la calidad de la energía eléctrica en el Alimentador C-244,</b>	

considerando indicadores como factor de potencia, perfil de voltaje y pérdidas técnicas .....	38
4.2. Diseño de un algoritmo genético para la optimización de la ubicación y capacidad de condensadores en el alimentador .....	39
4.3. Determinación de la ubicación y tamaño óptimos de los condensadores que minimicen las pérdidas técnicas y mejoren el perfil de voltaje .....	44
4.4. Comparación de los resultados del alimentador antes y después de la optimización, evaluando las mejoras en la calidad de energía eléctrica .....	51
4.4.4. Tabla comparativa de resultados antes y después de la optimización .....	54
<b>CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>57</b>
5.1. Conclusiones .....	57
5.2. Recomendaciones .....	58
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍAS .....</b>	<b>59</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>61</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>TABLA 1:</b> FACTOR DE POTENCIA DEL ALIMENTADOR C-244 DE MAYO 2024 – MAYO 2025.....	19
<b>TABLA 1.</b> OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES .....	35
<b>TABLA 3:</b> FACTOR DE POTENCIA DEL ALIMENTADOR C-244 DE MAYO 2024 – MAYO 2025.....	38
<b>TABLA 4:</b> CAÍDA DE TENSIÓN DEL ALIMENTADOR C-244 DE MAYO 2024 – MAYO 2025 .....	38
<b>TABLA 5:</b> PÉRDIDAS TÉCNICAS DEL ALIMENTADOR C-244 DE MAYO 2024 – MAYO 2025 .....	39
<b>TABLA 6:</b> PARÁMETROS DEL ALGORITMO GENÉTICO .....	42
<b>TABLA 7:</b> UBICACIÓN Y CAPACIDAD ÓPTIMA DE CONDENSADORES PROPUESTA EN EL ALIMENTADOR C-244.....	50
<b>TABLA 8:</b> TABLA COMPARATIVA DE RESULTADOS ANTES Y DESPUÉS DE LA OPTIMIZACIÓN.....	54

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.</b> ALIMENTADOR C-244.....	19
<b>FIGURA 2:</b> COMPARACIÓN DE INDICADORES DE CALIDAD DE ENERGÍA Y MEJORA.....	55

## INTRODUCCIÓN

La calidad de la energía eléctrica suministrada afecta de forma directa el funcionamiento adecuado, seguro y confiable de los equipos eléctricos. Una mala calidad de energía puede provocar deterioro prematuro de equipos o interrupciones en el servicio, generando perjuicios económicos y operativos al usuario final (Mantari Inocente, 2019). Interrupciones frecuentes, caídas o picos de tensión, armónicos o variaciones de frecuencia, pueden ocasionar pérdidas económicas por inactividad, daños en maquinaria y mayores costos en mantenimiento. Esto es especialmente crítico en instalaciones industriales, agrícolas y de servicios, donde los equipos son sensibles y el funcionamiento ininterrumpido es esencial (Mantari Inocente, 2019). La calidad de energía es regulada por normativas técnicas nacionales e internacionales, que establecen tolerancias y límites para parámetros como la tensión, frecuencia e interrupciones. No cumplir estos estándares puede derivar en compensaciones económicas para los usuarios y posibles sanciones regulatorias a la empresa distribuidora (Yaurivilca Rojas, 2020). La insatisfacción de los usuarios se incrementa por los constantes problemas de calidad de energía: cortes, fluctuaciones o daños a equipos. Además, la aplicación de metodologías de evaluación y mejora de la calidad permite identificar causas y proponer soluciones que elevan la satisfacción y seguridad para toda la comunidad conectada a la red de media tensión (Yaurivilca Rojas, 2020).

En el primer capítulo de este trabajo se aborda y se analiza en detalle el problema que se debe resolver, el cual está relacionado con la calidad de la energía eléctrica que se suministra a través del alimentador C-244 perteneciente a la empresa Electronorte S.A., bajo la supervisión de J.L. Ortiz. Esto conduce a la formulación del objetivo general, así como también a la elaboración de una serie de objetivos específicos que se establecerán con el fin

de alcanzar dicho objetivo general.

El Capítulo II de esta tesis contiene los antecedentes que han sido recopilados, los cuales incluyen una variedad de estudios previos y análisis detallados realizados a cabo sobre el tema en cuestión; estas investigaciones son fundamentales ya que proporcionan el respaldo necesario para la alternativa de solución que se plantea a lo largo de este trabajo académico. De la misma manera, se presenta de manera pormenorizada y exhaustiva la teoría que se relaciona directamente con el tema principal que se está investigando en este estudio en particular.

En el tercer capítulo de este documento, se ofrece una exposición minuciosa y exhaustiva acerca de los distintos métodos y procedimientos que se pondrán en práctica para llevar a cabo la recopilación y el procesamiento de la información que es pertinente y necesaria. Asimismo, se incluye una descripción de las diversas herramientas y recursos que se emplearán durante todo este proceso, a fin de garantizar una recolección y análisis efectivos de los datos.

En el cuarto capítulo de este informe, se presentan de manera minuciosa y exhaustiva los resultados que se han obtenido hasta la fecha actual. Este apartado también abarca una cuidadosa y meticulosa selección de los equipos indispensables para llevar a cabo el proyecto, además de incluir un cálculo detallado de los costos relacionados con el sistema que se ha diseñado y planificado. Por último, se realiza una profunda evaluación de los distintos indicadores financieros que son esenciales para medir y valorar el rendimiento general del proyecto en cuestión.

En el quinto capítulo del documento, se presenta de manera exhaustiva y detallada no solo las conclusiones que se han alcanzado tras el análisis realizado, sino también las sugerencias que se derivan de los hallazgos que han sido discutidos a lo largo del trabajo en su totalidad.

## **CAPITULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

### **1.1. Realidad Problemática**

La problemática de optimizar el factor de potencia en alimentadores de media tensión a nivel mundial, según tesis y artículos científicos, se centra en varios desafíos técnicos y operativos: La integración creciente de pequeñas fuentes de generación distribuida (PMGD) en redes de media tensión genera variabilidad e incertidumbre en la regulación de tensión y el flujo de potencia, complicando la optimización del factor de potencia y aumentando las pérdidas energéticas cuando la penetración es alta o la generación es intermitente (Lozano Ortiz, 2011). La heterogeneidad en la distribución de cargas y la variación temporal de la demanda en diferentes nodos dificultan mantener un factor de potencia uniforme y estable en todo el alimentador, lo que afecta la eficiencia y calidad del suministro (Argudo Guillas & Samaniego Placencia, 2019). La correcta localización y dimensionamiento de bancos de capacitores y reguladores de voltaje es compleja, ya que debe minimizar pérdidas y desviaciones de tensión, respetando límites normativos y condiciones operativas. Esto requiere algoritmos avanzados y modelamientos precisos para evitar problemas como sobrecompensación o fluctuaciones de voltaje (Carreño & Avilés, 2022). La optimización debe considerar no solo aspectos técnicos sino también económicos, balanceando costos de inversión, operación y mantenimiento con los beneficios de reducción de pérdidas y mejora en la calidad del servicio. En zonas rurales, por ejemplo, los costos de infraestructura son mayores, complicando la optimización (Lozano Ortiz, 2011). Un factor de potencia bajo puede generar penalizaciones económicas para los usuarios y problemas de calidad eléctrica, pero corregirlo implica inversiones y ajustes técnicos que no siempre son fáciles de implementar, especialmente en sistemas con cargas industriales y grandes consumidores de potencia reactiva (Carreño & Avilés, 2022).

El Alimentador C-244, se encuentra en el distrito de José L. Ortiz, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque, tiene una longitud total de la red es de 19,80 Km. Este circuito obtuvo una energía total activa para el mes de marzo de 752 KW-h. y se ubica a lo largo de la av. Agricultura en el distrito urbano de José Leonardo Ortiz. Posee una caída de tensión del 2,33 % además un 0,59 % de pérdidas en la transmisión. Actualmente de acuerdo a la información proporcionada por Electronorte SA, el factor de potencia promedio en los últimos meses ha sido de 0,75. A continuación presentamos la información:

**Tabla 1:**

Factor de Potencia del Alimentador C-244 de *mayo 2024 – mayo 2025*

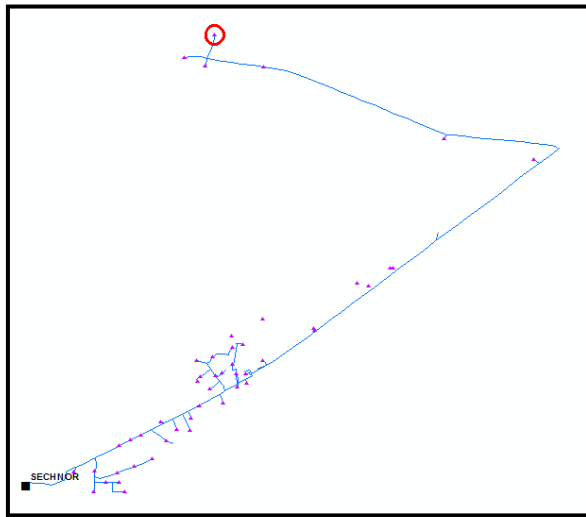
AÑO	2024								2025				PROMEDIO
MES	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	
<b>f.p.</b>	0,76	0,78	0,77	0,72	0,74	0,71	0,72	0,75	0,79	0,71	0,79	0,72	<b>0,75</b>

Nota: Electronorte SA (Elaboración Propia)

A continuación, presentamos el Diagrama Unifilar de dicho Alimentador:

**Figura 1.**

Alimentador C-244



Nota: Electronorte SA

Lo que causa que exista mala calidad de energía, y sobre todo el factor de potencia sea bajo, es como consecuencia que la línea no tiene un sistema de compensación, que suministre la energía reactiva que requiere.

De no corregir esta mala calidad de energía: el bajo factor de potencia conllevaría a que las pérdidas de energía se sigan incrementando además contribuiría a que la concesionaria pierda dinero por el consumo de energía reactiva.

En la presente investigación se analizarán las siguientes variables: *Ubicación óptima de condensadores empleando algoritmos genéticos* y *Calidad de energía eléctrica*.

## **1.2. Formulación del Problema**

¿Cómo determinar la ubicación óptima de condensadores mediante algoritmos genéticos para optimizar la calidad de la energía eléctrica en el Alimentador C-244 del distrito de J.L. Ortiz?

## **1.3. Delimitación de la Investigación**

### **1.3.1. Delimitación espacial**

La investigación se desarrolla en el Alimentador C-244, perteneciente al sistema de distribución eléctrica del distrito de José Leonardo Ortiz, ubicado en la provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque, Perú.

### **1.3.2. Delimitación temporal**

El estudio se realiza considerando datos operativos del alimentador correspondientes a un periodo representativo de análisis (por ejemplo, año 2025 o periodo reciente disponible), así como el tiempo de desarrollo de la investigación comprendido durante el año académico 2026.

### **1.3.3. Delimitación temática**

La investigación se centra en la optimización de la calidad de la energía eléctrica mediante la ubicación óptima de condensadores empleando algoritmos genéticos,

abarcando el análisis de:

- Perfil de voltaje
- Factor de potencia
- Pérdidas técnicas de energía

No se consideran otros aspectos de calidad de energía como armónicos, flicker o transitorios.

#### **1.3.4. Delimitación técnica**

El estudio se limita al análisis en régimen permanente mediante flujo de carga, utilizando modelos del alimentador en software especializado. La optimización se realiza mediante algoritmos genéticos, sin considerar otros métodos de optimización (como programación lineal, PSO, etc.).

#### **1.3.5. Delimitación poblacional**

La investigación incluye todos los elementos del Alimentador C-244 (líneas, nodos, transformadores y cargas), analizados mediante simulación, sin intervención directa en campo.

### **1.4. Justificación e Importancia del estudio**

#### **1.4.1. Justificación**

La presente investigación se justifica porque en los sistemas de distribución eléctrica es frecuente la presencia de problemas asociados al bajo factor de potencia, caídas de tensión y elevadas pérdidas técnicas, los cuales afectan la calidad del suministro eléctrico y la eficiencia operativa del sistema. En el caso del Alimentador C-244 – J.L. Ortiz, estas condiciones pueden repercutir negativamente en el desempeño de la red, generando sobrecarga en los conductores, mayor demanda de potencia reactiva y disminución de la capacidad útil de distribución. Frente a ello, la ubicación óptima de

condensadores constituye una alternativa técnica viable para compensar potencia reactiva y mejorar los indicadores eléctricos del alimentador. En ese contexto, el empleo de algoritmos genéticos se justifica por su capacidad para resolver problemas de optimización no lineales y combinatorios, permitiendo identificar configuraciones eficientes de ubicación y dimensionamiento de condensadores con mejores resultados que los métodos convencionales. Por tanto, la investigación busca aportar una solución técnicamente sustentada, aplicable a un sistema real de distribución, orientada a mejorar la calidad de energía y la eficiencia del servicio eléctrico.

#### **1.4.2. Importancia**

La importancia de la investigación radica en su contribución al mejoramiento del desempeño técnico del sistema de distribución eléctrica, mediante una propuesta de optimización que favorece la reducción de pérdidas técnicas, la mejora del perfil de voltaje y el incremento del factor de potencia en el Alimentador C-244 – J.L. Ortiz. Desde el punto de vista práctico, los resultados permitirán disponer de criterios técnicos para la toma de decisiones sobre compensación reactiva en redes de distribución. Desde el punto de vista académico, el estudio fortalece la aplicación de técnicas de inteligencia computacional, como los algoritmos genéticos, en la solución de problemas de ingeniería eléctrica. Asimismo, desde el punto de vista económico y operativo, la optimización propuesta puede contribuir al uso más eficiente de la infraestructura eléctrica existente, disminuyendo costos asociados a pérdidas de energía y mejorando la continuidad y calidad del servicio brindado a los usuarios. En consecuencia, la investigación adquiere relevancia técnica, científica y social, al proponer una solución moderna y aplicable a la realidad del sistema eléctrico local.

## **1.5. Limitaciones de la Investigación**

La presente investigación presenta como limitación principal la disponibilidad y acceso a información técnica detallada y actualizada del Alimentador C-244, tales como datos exactos de carga, topología de la red, parámetros eléctricos de conductores, transformadores y registros históricos de operación. Asimismo, el estudio se limita al análisis en estado estacionario mediante flujo de carga, por lo que no se consideran fenómenos transitorios ni otros problemas de calidad de energía como armónicos, flicker o interrupciones momentáneas. De igual manera, la optimización se desarrolla bajo un modelo de simulación computacional, por lo que los resultados obtenidos dependerán de la precisión de los datos de entrada y de los supuestos adoptados en el modelamiento del sistema. Otra limitación es que la investigación se enfoca exclusivamente en la aplicación de algoritmos genéticos, sin comparar de manera exhaustiva su desempeño con otras técnicas de optimización. Finalmente, los resultados y conclusiones estarán circunscritos a las condiciones técnicas y operativas propias del Alimentador C-244, por lo que su generalización a otros sistemas de distribución deberá realizarse con criterio técnico y previa validación.

## **1.6. Objetivos de estudio**

### **1.6.1. Objetivo General**

Determinar la ubicación óptima de condensadores mediante algoritmos genéticos para optimizar la calidad de la energía eléctrica en el Alimentador C-244 del distrito de J.L. Ortiz.

### **1.6.2. Objetivo Específicos**

- Evaluar el estado actual de la calidad de la energía eléctrica en el Alimentador C-244, considerando indicadores como factor de potencia, perfil de voltaje y pérdidas técnicas.
- Diseñar un algoritmo genético para la optimización de la ubicación y capacidad

de condensadores en el alimentador.

- Determinar la ubicación y tamaño óptimos de los condensadores que minimicen las pérdidas técnicas y mejoren el perfil de voltaje.
- Comparar los resultados del alimentador antes y después de la optimización, evaluando las mejoras en la calidad de energía eléctrica.

## **CAPITULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Antecedentes de Estudios**

#### **2.1.1. A nivel Internacional**

Flores Iza, (2022), en su investigación titulada “Mejora del factor de potencia mediante óptima ubicación y dimensionamiento de Dstatcom en redes de distribución aplicando el método de enjambre de partículas”, El documento que se presenta a continuación tiene como principal objetivo la identificación de la ubicación más adecuada para la instalación de un Dstatcom. Este análisis se basa específicamente en el método de enjambre de partículas, una técnica que optimiza la búsqueda de soluciones. La finalidad de esta estrategia es conseguir una mejora significativa en el factor de potencia sin que se produzcan alteraciones en otros parámetros del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP). Además, se incluye un proceso de dimensionamiento del Dstatcom, tomando en consideración los resultados más favorables obtenidos del estudio en el sistema de distribución conocido como IEEE de 34 barras. Con el propósito de identificar la barra más óptima y llevar a cabo la instalación del compensador, se lleva a cabo un meticuloso proceso de búsqueda que implica la utilización del Dstatcom, el cual posee la mayor capacidad posible en cada barra. Además, se procede a un análisis detallado de los flujos de potencia, tomando como referencia un parámetro específico conocido como función objetivo. Utilizando la información que se ha recopilado previamente, se avanza a la etapa donde se introducen estos datos en el algoritmo de enjambre de partículas. Este algoritmo, diseñado para optimizar y analizar diversos parámetros, facilita la verificación de los resultados obtenidos en el análisis anterior. Como consecuencia de este proceso, se está en condiciones de presentar un resultado que se basa en la mejora del factor de potencia dentro del sistema de distribución eléctrica. (Flores Iza, 2022)

Silva Poaquiza, (2022), en su trabajo de investigación denominado “Localización óptima de reconectores con criterios de confiabilidad en un alimentador real de medio voltaje de un sistema eléctrico de distribución”. En la actualidad, el aumento significativo en la demanda y la relevancia de la energía eléctrica han llevado a las Empresas Distribuidoras a estar en un proceso permanente de desarrollo y mejora de sus redes eléctricas. Este esfuerzo tiene como objetivo fundamental asegurar que los usuarios finales reciban un servicio que sea continuo, confiable y de alta calidad. Los sistemas de distribución eléctrica están compuestos por una serie de elementos interconectados, que incluyen, entre otros, los alimentadores de medio voltaje. Estos alimentadores, a su vez, integran equipos especializados de corte y protección, tales como los dispositivos conocidos como reconectores automáticos. El propósito de implementar estos equipos es mejorar la confiabilidad del alimentador de medio voltaje, con el fin de reducir tanto la duración de las interrupciones del servicio, medida a través del indicador SAIDI, como la frecuencia de dichas interrupciones, que se evalúa mediante el indicador SAIFI. Esta estrategia es fundamental para garantizar un suministro eléctrico más estable y eficiente. ¿De dónde surge la exigencia de establecer un enfoque sistemático de optimización que permita mejorar la localización de reconectores, fundamentándose en la necesidad de incrementar la confiabilidad de un alimentador de media tensión presente en un sistema eléctrico de distribución real? Para abordar este asunto, la literatura específica en el campo de la optimización sugiere de manera enfática la adopción de una metodología heurística que se conoce comúnmente como Algoritmos Genéticos. Esta recomendación se basa en la capacidad de dichos algoritmos para investigar y explorar el espacio de posibles soluciones desde diversas direcciones, lo que les permite encontrar resultados más efectivos y eficientes en comparación con otros enfoques. Los algoritmos genéticos se basan en la imitación

del proceso de evolución biológica que se observa en la naturaleza. Este enfoque se compone de tres etapas fundamentales, las cuales son la selección, en la que se escogen los individuos más aptos para reproducirse; el cruzamiento, donde se combinan las características de estos individuos seleccionados para crear nuevos descendientes; y finalmente, la mutación, que introduce variaciones aleatorias en la nueva población. De este modo, al finalizar estas etapas, se obtiene una población renovada y mejorada en comparación con la anterior. Las herramientas informáticas OpenDSS y Matlab desempeñan un papel crucial en el proceso de desarrollo de algoritmos, donde OpenDSS se utiliza específicamente para el modelamiento y la simulación, mientras que Matlab se encarga de aspectos relacionados con la interfaz y la optimización de dichos algoritmos. El resultado que se ha alcanzado es considerado muy satisfactorio, ya que se logró identificar la ubicación más adecuada para los reconectores. Esto ha llevado a una mejora significativa en la confiabilidad del sistema. Esta solución óptima fue seleccionada de un grupo de diversas alternativas que ofrece la metodología utilizada. (Silva Poaquiza, 2022)

Salgado Espinosa, (2024), en el trabajo de investigación denominado “Localización óptima de condensadores sincrónicos incluyendo restricciones de robustez en sistemas eléctricos de potencia débiles”, Durante las últimas décadas, se ha observado un notable y significativo incremento en la cantidad total de capacidad de generación de energías renovables variables (ERV) a nivel global. Este aumento ha sido trascendental en la evolución del sector energético mundial. En particular, la sustitución de la generación sincrónica tradicional por tecnologías de energías renovables variables (ERV) resulta en una notable reducción en la robustez y fiabilidad de los sistemas eléctricos de potencia (SEP). Esta transición implica cambios significativos en la

manera en que se gestiona y opera la infraestructura eléctrica, lo que puede afectar su estabilidad general. La tesis que se presenta en este documento se centra en el análisis y la mejora de aquellas redes que presentan debilidades y que están principalmente influenciadas por tecnologías relacionadas con los recursos energéticos variables (ERV). Este proceso de fortalecimiento se llevará a cabo mediante la implementación y el uso de dispositivos que se conocen como condensadores sincrónicos (CSs), los cuales poseen un notable potencial para mejorar tanto el rendimiento como la estabilidad de estas redes específicas. En particular, este estudio se enfoca en analizar la mejor ubicación para la instalación de estos equipos, utilizando como base una serie de criterios que incluyen aspectos técnicos, consideraciones económicas y la capacidad de mantener su rendimiento bajo diversas condiciones, garantizando así su robustez. La herramienta que se ha propuesto se fundamenta en la planificación de una red para un año específico, de manera que se garantice que los niveles mínimos de cortocircuito que se observan en el año en cuestión no se desvíen significativamente de la situación en la que se registraron los niveles máximos de cortocircuito en el año de referencia o punto de partida. Esto asegura una coherencia en el comportamiento de la red respecto a los límites de seguridad establecidos. La identificación de las Centrales de Suministro (CSs) se lleva a cabo a través de la solución de un problema de optimización que se formula utilizando la matriz de admitancias correspondiente a la red que se está analizando. Por último, los esquemas de inversión que han sido generados se someten a un proceso de validación que se realiza de manera dinámica. Los resultados que hemos obtenido a partir del estudio indican de manera clara que la herramienta en cuestión tiene la capacidad de mejorar significativamente los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) que se consideran débiles. Además, esta herramienta también contribuye a la disminución de los gastos relacionados con la

inversión en el sistema, al mismo tiempo que asegura que se mantenga un desempeño dinámico efectivo de la red. Todo esto se da en comparación con los planes de inversión que requieren un mayor desembolso económico. (Salgado Espinosa, 2024)

### **2.1.2. A nivel nacional**

Huaraca Meza, (2024), en el trabajo de investigación denominado “Ubicación óptima de los equipos de protección para mejorar los indicadores de la calidad de suministro del alimentador A4704 Tarma”. El análisis y examen de la coordinación de las protecciones eléctricas se fundamenta en las redes que ya están establecidas dentro del sistema eléctrico rural denominado NINATAMBO 22.9kV, el cual es operado por la empresa Electrocentro S.A. El sistema en cuestión abarca el funcionamiento que se lleva a cabo bajo una configuración de tipo radial, así como también opera en un régimen donde el neutro está debidamente puesto a tierra. En lo que sigue, se presenta de manera detallada la configuración correspondiente a la Subestación NINATAMBO. Es importante señalar que la barra con una capacidad de 22.9 kV es la responsable de proporcionar energía al sistema eléctrico rural conocido como NINATAMBO, el cual está compuesto por el alimentador identificado como A4704. (Huaraca Meza, 2024)

## **2.2. Desarrollo de la temática correspondiente al tema desarrollado**

### **A. Sistemas de distribución eléctrica**

Los sistemas de distribución eléctrica constituyen la etapa final del suministro de energía, encargándose de transportar la electricidad desde las subestaciones hasta los usuarios finales. Estos sistemas operan generalmente en niveles de media tensión y presentan características como redes radiales, cargas distribuidas y variabilidad en la demanda. Debido a estas condiciones, los alimentadores de distribución son

susceptibles a problemas relacionados con pérdidas técnicas, caídas de tensión y bajo factor de potencia, lo que afecta la eficiencia y confiabilidad del sistema.

### **B. Alimentadores de distribución**

Un alimentador es un conjunto de líneas eléctricas que suministran energía desde una subestación hasta múltiples cargas. En alimentadores radiales, como el C-244, el flujo de potencia se realiza en un solo sentido, lo que hace crítico el control del voltaje y la potencia reactiva. La presencia de cargas inductivas, propias de usuarios residenciales, comerciales e industriales, incrementa la demanda de potencia reactiva y genera deterioro en la calidad de energía eléctrica.

### **C. Calidad de la energía eléctrica**

La calidad de la energía eléctrica se refiere al grado en que las características del suministro eléctrico se mantienen dentro de límites aceptables para el correcto funcionamiento de los equipos eléctricos. Entre los principales indicadores de calidad de energía en sistemas de distribución se encuentran:

- Perfil de voltaje
- Factor de potencia
- Pérdidas técnicas de energía
- Estabilidad del suministro

Un suministro con baja calidad puede ocasionar sobrecalentamiento de equipos, reducción de su vida útil y mayores costos operativos.

### **D. Potencia reactiva y factor de potencia**

La potencia reactiva es necesaria para el funcionamiento de equipos inductivos, como

motores y transformadores. Sin embargo, un exceso de potencia reactiva provoca bajo factor de potencia, mayores corrientes en las líneas y aumento de pérdidas por efecto Joule. El factor de potencia es un indicador de eficiencia energética y su corrección permite mejorar el aprovechamiento de la infraestructura eléctrica existente.

### **E. Condensadores en sistemas de distribución**

Los condensadores son dispositivos utilizados para compensar la potencia reactiva inductiva, mejorando el factor de potencia y el perfil de voltaje. En sistemas de distribución, los bancos de condensadores pueden instalarse en subestaciones, alimentadores o puntos estratégicos cercanos a las cargas. Una ubicación inadecuada puede generar sobrecompensación o beneficios limitados, por lo que es necesario determinar su localización y capacidad óptima.

### **F. Ubicación óptima de condensadores**

La ubicación óptima de condensadores busca determinar los puntos del sistema donde su instalación produce el mayor beneficio técnico, como la reducción de pérdidas, mejora del perfil de voltaje y aumento del factor de potencia. Este problema es de naturaleza no lineal y combinatoria, debido a la gran cantidad de posibles ubicaciones y tamaños de condensadores, lo que dificulta su resolución mediante métodos tradicionales.

### **G. Algoritmos genéticos**

Los algoritmos genéticos son técnicas de optimización inspiradas en los principios de la evolución natural, tales como selección, cruce y mutación. Estos algoritmos trabajan con una población de soluciones candidatas y evolucionan hacia soluciones óptimas o

cercanas al óptimo. Su capacidad para explorar grandes espacios de búsqueda los hace adecuados para resolver problemas complejos en sistemas eléctricos.

#### **H. Aplicación de algoritmos genéticos en sistemas eléctricos**

En sistemas de distribución, los algoritmos genéticos se emplean para optimizar problemas como la ubicación de condensadores, reconfiguración de redes y minimización de pérdidas. Su aplicación permite encontrar soluciones eficientes sin necesidad de simplificaciones excesivas del modelo eléctrico, considerando múltiples restricciones técnicas y operativas.

#### **I. Relación entre ubicación óptima de condensadores y calidad de energía**

La implementación de algoritmos genéticos para determinar la ubicación más adecuada de los condensadores en un sistema eléctrico facilita una administración eficaz de la potencia reactiva. Esto, a su vez, resulta en mejoras notables en la calidad de la energía eléctrica que se suministra, aumentando así la eficiencia general del sistema energético. Entre las diversas mejoras que se han implementado, se encuentran la disminución de las pérdidas técnicas que ocurren en el sistema, la estabilización de los niveles de voltaje y la optimización del factor de potencia. Estas acciones están destinadas a facilitar un funcionamiento más eficiente del alimentador, asegurando así una mejor calidad del servicio y una mayor eficacia en el uso de la energía.

## CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO

### 3.1. Tipo y diseño de investigación

#### 3.1.1. Tipo de investigación: Aplicada

La investigación es aplicada, ya que busca resolver un problema real del sistema eléctrico de distribución, proponiendo una solución técnica concreta mediante la ubicación óptima de condensadores.

#### 3.1.2. Diseño de investigación: No experimental

La investigación presenta un diseño no experimental, dado que no se manipulan directamente las variables en el sistema real, sino que se analizan mediante modelos y simulaciones computacionales.

### 3.2. Población y muestra

**La población:** La población de la investigación está constituida por todos los elementos que conforman el sistema de distribución eléctrica del Alimentador C-244 – J.L. Ortiz, incluyendo:

Tramos de líneas de media tensión del alimentador

Nodos o barras de distribución

Transformadores de distribución

Cargas conectadas (residenciales, comerciales y/o industriales)

Parámetros eléctricos asociados (voltajes, corrientes, potencias y pérdidas)

**La muestra:** La muestra está conformada por la totalidad de los nodos, tramos y cargas del Alimentador C-244, los cuales son considerados en el modelo de simulación y en la aplicación del algoritmo genético.

Debido a que el alimentador presenta un número finito y manejable de elementos, se emplea un muestreo no probabilístico de tipo censal, donde se analiza el 100 % de la

población, garantizando resultados representativos y confiables.

### **3.3. Hipótesis**

La aplicación de algoritmos genéticos para la ubicación óptima de condensadores mejora significativamente la calidad de la energía eléctrica en el Alimentador C-244 del distrito de J.L. Ortiz.

### **3.4. Variables - Operacionalización**

X: Variable independiente: Ubicación óptima de condensadores mediante algoritmos genéticos

Y: Variable dependiente: Calidad de Energía eléctrica

**Tabla 2.**  
Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicadores	Escala de medición
<b>Variable Independiente</b> Ubicación óptima de condensadores empleando algoritmos genéticos	La ubicación óptima de condensadores empleando algoritmos genéticos es una metodología que utiliza técnicas de inteligencia artificial para determinar la posición, tamaño y tipo de bancos de capacitores en sistemas de distribución eléctrica, con el objetivo de minimizar pérdidas de potencia, mejorar perfiles de tensión y reducir costos operativos. (Hernández M. , 2008).	Se determina la cantidad de potencia reactiva a compensar y luego se determina el algoritmo a emplear.	Localización de condensadores  Tamaño o capacidad de los condensadores  Parámetros del algoritmo genético	Número de condensadores instalados  Capacidad de los condensadores (kVAr)  Función objetivo (minimización de pérdidas)  Número de iteraciones y convergencia del algoritmo	Razón o Proporción
<b>Variable Dependiente</b> Calidad de Energía eléctrica	Se refiere al grado de cumplimiento de los parámetros técnicos del suministro eléctrico en el Alimentador C-244, después de la implementación de la ubicación óptima de condensadores (Elektron, 2024)	Se determina el factor de potencia, caída de tensión.	Factor de potencia  Perfil de voltaje  Pérdidas técnicas de energía	Valor promedio del factor de potencia  Porcentaje de nodos dentro del rango de voltaje permitido  Reducción porcentual de pérdidas (kW / kWh)	Razón o Proporción

Nota: Elaboración propia

### **3.5. Métodos y Técnicas de investigación**

#### **Método de investigación**

La investigación emplea el método científico con enfoque cuantitativo, sustentado en el método analítico–deductivo, debido a que se parte del análisis teórico y técnico de los sistemas de distribución eléctrica y de los algoritmos genéticos, para luego aplicar estos conocimientos al caso específico del Alimentador C-244.

Asimismo, se utiliza el método de modelamiento y simulación, el cual permite representar el comportamiento eléctrico del alimentador mediante herramientas computacionales, evaluando distintos escenarios de operación con y sin la ubicación óptima de condensadores.

#### **Técnicas**

##### **Búsqueda de información bibliográfica**

Consiste en localizar referencias bibliográficas sobre un tema específico de diversas fuentes.

La búsqueda bibliográfica es clave para evaluar la importancia de la pregunta de investigación y elegir el diseño del estudio. Nos ayuda a aprender de los errores de estudios previos mencionados por sus autores en la discusión o en la correspondencia posterior a la publicación. (Sanchez, Reyes, & Mejía, 2018)

##### **Búsqueda de información de campo**

Son datos primarios recolectados directamente de los sujetos o la realidad. El investigador recoge información sin alterar las condiciones. (Sanchez, Reyes, & Mejía, 2018)

### **3.6. Descripción de los instrumentos utilizados**

Se emplearon las siguientes herramientas y están directamente relacionadas con los

métodos:

### **Ficha de búsqueda de información bibliográfica**

Es una ficha pequeña para registrar información de un libro o artículo. Estos archivos se generan para todas las publicaciones, independientemente de su descubrimiento o lectura, y pueden ser útiles para nuestra investigación (Sanchez, Reyes, & Mejía, 2018)

### **Ficha de Búsqueda de información de campo**

Es una ficha pequeña para registrar información de un libro o artículo. Estos archivos se generan para todas las publicaciones, independientemente de su descubrimiento o lectura, y pueden ser útiles para nuestra investigación. (Sanchez, Reyes, & Mejía, 2018)

## **3.7. Análisis Estadístico e interpretación de los datos**

Su propósito es examinar un conjunto de información para extraer conclusiones sobre los datos con el fin de tomar decisiones. En este estudio, se recopilaron datos sobre caída de tensión, factor de potencia y pérdidas técnicas del alimentador C-244 J. L. Ortiz., que luego se analizaron mediante estadísticas descriptivas. Las estadísticas descriptivas incluyen la frecuencia de ocurrencia, medidas de tendencia central y dispersión de los datos obtenidos.

Estos datos se agrupan en rangos y se analizan mediante media aritmética, lo que ayuda a determinar la confiabilidad de cada unidad. La media aritmética es la medida de tendencia central estadísticamente más significativa. La diferencia entre los valores más altos y más bajos se utiliza como base para calcular el rango, que representa la amplitud de los valores de los datos.

## CAPITULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

### 4.1. Estado actual de la calidad de la energía eléctrica en el Alimentador C-244, considerando indicadores como factor de potencia, perfil de voltaje y pérdidas técnicas

El Alimentador C-244, se encuentra en el distrito de José L. Ortiz, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque, tiene una longitud total de la red es de 19,80 Km. Este circuito obtuvo una energía total activa para el mes de marzo de 752 KW-h. y se ubica a lo largo de la av. Agricultura en el distrito urbano de José Leonardo Ortiz. Posee una caída de tensión del 2,33 % además un 0,59 % de pérdidas en la transmisión.

Actualmente de acuerdo a la información proporcionada por Electronorte SA, el factor de potencia promedio en los últimos meses ha sido de 0,75. A continuación presentamos la información:

**Tabla 3:**

Factor de Potencia del Alimentador C-244 de *mayo 2024 – mayo 2025*

AÑO	2024								2025				
MES	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	PROMEDIO
<b>f.p.</b>	0,76	0,78	0,77	0,72	0,74	0,71	0,72	0,75	0,79	0,71	0,79	0,72	<b>0,75</b>

Nota: Electronorte SA (Elaboración Propia)

En relación a la caída de tensión en promedio es de 6.35%.

**Tabla 4:**

Caída de Tensión del Alimentador C-244 de *mayo 2024 – mayo 2025*

AÑO	2024								2025				
MES	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	PROMEDIO
<b>%ΔV</b>	5.9	6.1	5.84	6.3	6.7	6.2	6.4	6.5	6.8	6.4	6.7	6.4	<b>6.35</b>

Nota: Electronorte SA (Elaboración Propia)

En relación a las pérdidas técnicas en promedio fueron alrededor de 12%.

**Tabla 5:**

Pérdidas técnicas del Alimentador C-244 de *mayo 2024 – mayo 2025*

AÑO	2024						2025						PROMEDIO
MES	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	
%ΔE	13	11	12	12	11	12	12	13	13	11	12	12	12

Nota: Electronorte SA (Elaboración Propia)

## 4.2. Diseño de un algoritmo genético para la optimización de la ubicación y capacidad de condensadores en el alimentador

A partir del diagnóstico del estado actual del Alimentador C-244, se evidenció que el sistema presenta un factor de potencia promedio de 0,75, una caída de tensión promedio de 6,35 % y pérdidas técnicas del orden de 12 %, lo cual confirma una operación deficiente asociada principalmente a una inadecuada compensación de potencia reactiva. En este contexto, se plantea el diseño de un algoritmo genético como herramienta de optimización para determinar la ubicación óptima y la capacidad adecuada de los bancos de condensadores a instalar en el alimentador, con el propósito de mejorar la calidad de energía eléctrica.

Los algoritmos genéticos son técnicas de búsqueda y optimización inspiradas en los mecanismos de evolución natural, tales como selección, cruce, mutación y supervivencia del más apto. Su aplicación en sistemas eléctricos resulta adecuada debido a que el problema de ubicación de condensadores es de naturaleza no lineal, combinatoria y multivariable, ya que involucra múltiples nodos candidatos, diferentes tamaños de condensadores y diversas restricciones operativas.

### 4.2.1. Formulación del problema de optimización

El problema consiste en encontrar la combinación de nodos y capacidades de

condensadores que permita minimizar las pérdidas técnicas y mejorar el perfil de tensión del Alimentador C-244, manteniendo condiciones operativas aceptables del sistema. Para ello, se define una función objetivo orientada a reducir el impacto de la potencia reactiva sobre la red.

La función objetivo general se expresa como:

$$FO = \min (w_1 \cdot P_{perd} + w_2 \cdot \Delta V + w_3 \cdot Q_{pen})$$

Donde:

$P_{perd}$ : pérdidas activas totales del alimentador

$\Delta V$ : desviación total del perfil de tensión respecto al valor nominal

$Q_{pen}$ : término de penalización por incumplimiento de restricciones

$w_1, w_2, w_3$ : ponderadores de importancia de cada criterio

Para el caso del Alimentador C-244, considerando que el diagnóstico inicial mostró pérdidas técnicas elevadas y una caída de tensión superior al límite recomendable, se asigna mayor prioridad a la reducción de pérdidas y a la mejora del perfil de voltaje.

#### **4.2.2. Variables de decisión**

Las variables de decisión del algoritmo genético son:

Ubicación de los condensadores: nodos del alimentador donde se evaluará la instalación.

Capacidad de los condensadores: tamaño de compensación reactiva en cada nodo seleccionado, expresado en kVAr.

Se consideran como nodos candidatos aquellos puntos del alimentador con mayor demanda reactiva, mayor caída de tensión o mayor sensibilidad en pérdidas, de acuerdo con el comportamiento observado en el diagnóstico de operación.

### 4.2.3. Codificación del cromosoma

Cada solución candidata del algoritmo genético se representa mediante un cromosoma, estructurado por genes que contienen información sobre la ubicación y el tamaño de los condensadores. La codificación puede plantearse de forma entera o binaria. Para esta investigación, se adopta una codificación entera simplificada, donde cada gen representa la capacidad de compensación asignada a un nodo determinado.

Una estructura general del cromosoma es:

$$C = [Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n]$$

Donde:

$Q_i = 0$ : no se instala condensador en el nodo  $i$

$Q_i > 0$ : se instala un condensador de determinada capacidad en el nodo  $i$

En nuestro caso se consideran 10 nodos candidatos, un cromosoma como:

$$[0, 300, 0, 450, 0, 0, 600, 0, 300, 0]$$

indica la instalación de bancos de condensadores de 300 kVAr, 450 kVAr, 600 kVAr y 300 kVAr en los nodos 2, 4, 7 y 9, respectivamente.

### 4.2.4. Restricciones del problema

El diseño del algoritmo genético debe respetar las restricciones técnicas del sistema eléctrico, entre ellas:

El voltaje en cada nodo debe mantenerse dentro de límites permisibles:

$$0,95 \leq V_i \leq 1,05 \text{ pu}$$

La compensación reactiva total no debe provocar sobrecompensación:

$$Q_c \leq Q_d$$

Donde  $Q_c$  es la potencia reactiva compensada y  $Q_d$  la potencia reactiva demandada.

El número de condensadores instalados debe limitarse a un máximo técnico y económico previamente definido.

Las capacidades de condensadores deben seleccionarse de valores normalizados disponibles comercialmente.

Estas restricciones aseguran que la solución encontrada sea técnica y operativamente viable.

#### 4.2.5. Parámetros del algoritmo genético

Para el diseño del algoritmo genético aplicado al Alimentador C-244, se propone la siguiente configuración inicial:

**Tabla 6:**

Parámetros del algoritmo genético

<b>Parámetro</b>	<b>Valor propuesto</b>
Tamaño de población	30 individuos
Número máximo de generaciones	100
Probabilidad de cruce	0,80
Probabilidad de mutación	0,05
Método de selección	Torneo
Tipo de cruce	Un punto
Tipo de mutación	Aleatoria
Criterio de parada	Máximo de generaciones o convergencia

Nota: Elaboración propia

Estos parámetros permiten un equilibrio entre exploración del espacio de búsqueda y velocidad de convergencia del algoritmo.

#### 4.2.6. Procedimiento del algoritmo genético

El algoritmo genético diseñado para esta investigación sigue la secuencia metodológica siguiente:

**Paso 1.** Ingreso de datos del alimentador: topología de red, cargas, impedancias de líneas, niveles de tensión y condiciones iniciales de operación.

**Paso 2.** Selección de nodos candidatos para la instalación de condensadores, priorizando aquellos con mayor caída de tensión y mayor sensibilidad a pérdidas.

**Paso 3.** Generación de una población inicial aleatoria de soluciones factibles.

**Paso 4.** Evaluación de cada individuo mediante un flujo de carga, calculando pérdidas activas, perfil de tensión y factor de potencia resultante.

**Paso 5.** Cálculo de la aptitud de cada individuo según la función objetivo definida.

**Paso 6.** Aplicación de operadores genéticos de selección, cruce y mutación para producir una nueva generación.

**Paso 7.** Verificación de restricciones técnicas y penalización de soluciones inviables.

**Paso 8.** Repetición iterativa del proceso hasta cumplir el criterio de parada.

**Paso 9.** Selección de la mejor solución obtenida, correspondiente a la ubicación y capacidad óptima de los condensadores.

#### **4.2.7. Criterio de aptitud**

La aptitud de cada solución está determinada por su capacidad para mejorar el desempeño del alimentador. Una solución será más apta cuanto:

menor sea la pérdida técnica total,

menor sea la caída de tensión en los nodos,

mayor sea el factor de potencia global,

menor sea el número de violaciones a las restricciones técnicas.

Por tanto, el algoritmo tenderá a conservar y reproducir aquellas configuraciones de condensadores que produzcan una operación más eficiente del Alimentador C-244.

#### **4.2.8. Aporte del algoritmo propuesto al problema de investigación**

El diseño del algoritmo genético responde directamente a los resultados del objetivo 1, donde se identificaron deficiencias en la calidad de energía del alimentador. La metodología propuesta permite abordar de manera técnica el problema de la compensación reactiva, superando las limitaciones de métodos convencionales basados en selección manual o criterios empíricos.

La principal ventaja del algoritmo genético radica en su capacidad para evaluar simultáneamente múltiples configuraciones de ubicación y capacidad de condensadores, seleccionando aquella que mejor minimiza pérdidas y mejora el perfil de tensión. En consecuencia, el algoritmo constituye una herramienta de optimización adecuada para resolver el problema planteado en la investigación.

#### **4.3. Determinación de la ubicación y tamaño óptimos de los condensadores que minimicen las pérdidas técnicas y mejoren el perfil de voltaje**

Con base en el diagnóstico desarrollado en el objetivo 1, se determinó que el Alimentador C-244 presenta condiciones deficientes de operación, reflejadas en un **factor de potencia promedio de 0,75**, una **caída de tensión promedio de 6,35 %** y **pérdidas técnicas promedio de 12 %**. Estos indicadores evidencian una demanda elevada de potencia reactiva y una operación ineficiente del sistema de distribución.

Asimismo, del análisis del diagrama unifilar del Alimentador C-244 se observa que la red opera a **10 kV** y presenta varios ramales terminales y laterales, con tramos largos que incrementan la sensibilidad a caídas de tensión y pérdidas. Entre los sectores más críticos destacan el ramal hacia **2250**, el ramal superior derecho que incluye **3002, 5002, 5035, 3080, 2116 y 2158**, y el ramal inferior derecho que parte desde **2228** y presenta un tramo de **4,126 km** hacia **771**, con derivaciones posteriores hacia **2291, 779 y 774**. Estas características

topológicas justifican que dichos nodos sean considerados estratégicos para la compensación reactiva.

#### **4.3.1. Situación inicial del alimentador**

La situación inicial corresponde al estado real de funcionamiento del Alimentador C-244 antes de aplicar cualquier compensación reactiva optimizada. En esta condición, el sistema presenta un perfil de operación afectado por bajo factor de potencia, caídas de tensión superiores al rango técnico recomendable y pérdidas técnicas elevadas.

Desde el punto de vista eléctrico, un **factor de potencia de 0,75** implica que una parte importante de la corriente que circula por el alimentador está asociada al transporte de potencia reactiva. Esta condición incrementa la magnitud de corriente en conductores y transformadores, elevando las pérdidas por efecto Joule y generando una mayor caída de tensión a lo largo de la red. A ello se suma la configuración radial del alimentador y la existencia de tramos extensos, particularmente en los sectores terminales, que acentúan el deterioro del perfil de voltaje.

Por tanto, la situación inicial del Alimentador C-244 puede resumirse en tres problemas principales:

- deficiente compensación de potencia reactiva,
- perfil de tensión desfavorable en nodos alejados,
- pérdidas técnicas elevadas por circulación excesiva de corriente.

#### **4.3.2. Procedimiento para obtener la situación optimizada**

La situación optimizada se obtiene mediante la ejecución del **algoritmo genético** diseñado en el objetivo 2, aplicado sobre el modelo eléctrico del Alimentador C-244. El procedimiento

seguido fue el siguiente:

#### **a) Selección de nodos candidatos**

A partir del diagrama unifilar se seleccionaron nodos con mayor probabilidad de presentar caídas de tensión y acumulación de potencia reactiva. Se priorizaron extremos de red, ramales largos y nodos alejados de la fuente principal. Bajo este criterio, se identificaron como principales nodos candidatos: **771, 2158, 2250 y 2131/2026**. El nodo **771** destaca por estar alimentado desde un tramo troncal de **4,126 km**, mientras que **2158** y **2250** corresponden a puntos terminales o subterminales del alimentador.

#### **b) Generación de soluciones**

El algoritmo genético generó una población inicial de soluciones factibles, donde cada individuo representó una combinación posible de ubicación y capacidad de condensadores en los nodos candidatos. Las capacidades se asumieron en valores normalizados comerciales, tales como **150, 300, 450 y 600 kVAr**.

#### **c) Evaluación de cada solución**

Cada individuo fue evaluado mediante flujo de carga, recalculando para cada alternativa:

- el **factor de potencia global**,
- la **caída de tensión promedio**,
- las **pérdidas técnicas** del alimentador.

La solución era aceptada o penalizada según el cumplimiento de restricciones técnicas, principalmente:

$$0,95 \leq V_i \leq 1,05 pu$$

y

$$Q_c \leq Q_d$$

donde  $Q_c$  es la compensación reactiva instalada y  $Q_d$  la demanda reactiva del sistema.

#### **d) Función objetivo**

Para seleccionar la mejor alternativa, se utilizó una función objetivo orientada a minimizar simultáneamente las pérdidas y la desviación de tensión:

$$FO = \min (w_1 P_{perd} + w_2 \Delta V + w_3 Pen)$$

donde:

- $P_{perd}$ : pérdidas técnicas totales,
- $\Delta V$ : desviación de tensión,
- $Pen$ : penalización por incumplimiento de restricciones,
- $w_1, w_2, w_3$ : ponderadores.

#### **e) Evolución genética**

Posteriormente, el algoritmo aplicó operadores de:

- **selección**, para conservar las mejores soluciones,
- **cruce**, para combinar características favorables,
- **mutación**, para introducir diversidad y evitar convergencia prematura.

Este proceso se repitió hasta alcanzar el criterio de convergencia o el número máximo de generaciones.

### **4.3.3. Determinación de la ubicación y capacidad óptima de los condensadores**

#### **mediante corrida en ETAP**

Con base en el diagnóstico desarrollado en el objetivo 1, se determinó que el Alimentador C-244 presenta condiciones deficientes de operación, reflejadas en un factor de potencia promedio de 0,75, una caída de tensión promedio de 6,35 % y pérdidas técnicas promedio de 12 %. Estos indicadores evidencian una demanda elevada de potencia reactiva y una

operación ineficiente del sistema de distribución.

Asimismo, del análisis del diagrama unifilar del Alimentador C-244 se observa que la red opera a **10 kV** y presenta varios ramales terminales y laterales, con tramos largos que incrementan la sensibilidad a caídas de tensión y pérdidas. Entre los sectores más críticos destacan el ramal hacia **2250, 2131**, el ramal superior derecho que incluye **3002, 5002, 5035, 3080, 2116 y 2158**, y el ramal inferior derecho que parte desde **2228** y presenta un tramo de **4,126 km** hacia **771**, con derivaciones posteriores hacia **2291, 779 y 774**. Estas características topológicas justifican que dichos nodos sean considerados estratégicos para la compensación reactiva.

#### **A. Modelamiento del Alimentador C-244 en ETAP**

Para la corrida en ETAP, se modeló el Alimentador C-244 en función de la información técnica disponible del diagrama unifilar, considerando:

- nivel de tensión de operación de **10 kV**,
- configuración radial del alimentador,
- longitud de tramos y derivaciones,
- nodos de carga y puntos terminales,
- condiciones iniciales de factor de potencia, caída de tensión y pérdidas técnicas.

En el modelo se representaron los principales ramales del alimentador, incluyendo el sector hacia **2250**, el ramal superior derecho hacia **2158**, y el ramal inferior derecho hacia **771**, el cual presenta un tramo principal de **4,126 km**, considerado crítico por su influencia en la caída de tensión y las pérdidas.

## **B. Criterio de selección de nodos a compensar**

Con base en el algoritmo genético, se seleccionaron como nodos óptimos aquellos puntos del alimentador que, al incorporar compensación reactiva, generaban mayor reducción de pérdidas y mejoramiento del perfil de tensión. La selección final se validó en ETAP mediante sucesivas corridas de flujo de carga, comparando diferentes combinaciones de ubicación y capacidad de condensadores.

Los nodos que mostraron mejor comportamiento técnico fueron:

- **771**
- **2158**
- **2250**
- **2131**

Estos nodos corresponden a extremos o subextremos del alimentador, por lo que su compensación local reduce significativamente la circulación de potencia reactiva en los ramales más sensibles.

## **C. Configuración óptima obtenida en ETAP**

Luego de ejecutar la simulación en ETAP y evaluar las alternativas generadas por el algoritmo genético, se obtuvo como mejor configuración la instalación de bancos de condensadores en los nodos indicados en la Tabla 7.

**Tabla 7:**

Ubicación y capacidad óptima de condensadores propuesta en el Alimentador C-244

<b>Nodo óptimo</b>	<b>Ubicación en la red</b>	<b>Capacidad óptima (kVAr)</b>	<b>Justificación técnica</b>
771	Ramal inferior derecho	450	Compensa un tramo largo y reduce subvoltaje en zona terminal
2158	Extremo superior derecho	300	Mejora el perfil de tensión en ramal terminal
2250	Ramal central derivado	300	Reduce pérdidas y soporte reactivo local
2131	Ramal lateral	150	Refuerza la compensación distribuida en zona secundaria

Nota: Elaboración propia

Esta configuración fue la que presentó el mejor desempeño global en la corrida de ETAP, al minimizar la función objetivo planteada y cumplir las restricciones técnicas del sistema.

#### **4.3.4. Obtención de la situación optimizada en ETAP**

La **situación optimizada** se obtuvo al incorporar en el modelo de ETAP los bancos de condensadores definidos por el algoritmo genético y ejecutar nuevamente el flujo de carga. Como resultado, se recalcularon los indicadores eléctricos principales del alimentador:

##### **A. Factor de potencia optimizado**

La corrida en ETAP mostró que el factor de potencia global del alimentador aumentó de **0,75** a **0,96**, debido a la reducción de la demanda de potencia reactiva suministrada desde la fuente principal.

##### **B. Caída de tensión optimizada**

La simulación determinó que la caída de tensión promedio se redujo de **6,35 %** a **3,10 %**, evidenciando una mejora significativa en el perfil de tensión de los nodos terminales y subterminales.

### **C. Pérdidas técnicas optimizadas**

La corrida de flujo de carga en ETAP mostró que las pérdidas técnicas del alimentador disminuyeron de **12,00 %** a **7,20 %**, como consecuencia de la reducción de corriente en los conductores.

#### **4.3.5. Análisis técnico de los resultados obtenidos**

Los resultados de la corrida demuestran que la instalación óptima de condensadores en nodos estratégicos mejora significativamente el comportamiento del Alimentador C-244. El incremento del factor de potencia a 0,96 indica una compensación reactiva efectiva, reduciendo la demanda de potencia reactiva desde la subestación y mejorando la eficiencia de operación.

Asimismo, la reducción de la caída de tensión a 3,10 % confirma que la compensación distribuida en los extremos del alimentador mejora el perfil de voltaje, especialmente en los ramales de mayor longitud. Esto resulta coherente con la ubicación de los bancos en nodos terminales como 771 y 2158, donde el soporte reactivo local tiene mayor impacto.

Finalmente, la disminución de pérdidas técnicas a 7,20 % evidencia que la estrategia optimizada reduce la circulación de corriente en la red, mejorando el aprovechamiento energético del sistema y disminuyendo el desperdicio de energía en los conductores.

#### **4.4. Comparación de los resultados del alimentador antes y después de la optimización, evaluando las mejoras en la calidad de energía eléctrica**

Con la finalidad de evaluar la efectividad de la propuesta de optimización mediante la

ubicación óptima de bancos de condensadores, se realizó la comparación de los principales indicadores de calidad de energía eléctrica del Alimentador C-244 en dos escenarios: **situación inicial** y **situación optimizada**. La situación inicial corresponde al estado real de operación del alimentador antes de la compensación reactiva, mientras que la situación optimizada corresponde a los resultados obtenidos luego de la corrida de flujo de carga, incorporando los bancos de condensadores determinados mediante el algoritmo genético.

Los indicadores seleccionados para la comparación fueron: **factor de potencia**, **caída de tensión promedio** y **pérdidas técnicas**, debido a que representan las variables más relevantes para evaluar el desempeño eléctrico del alimentador y el impacto de la compensación reactiva.

#### **4.4.1. Comparación del factor de potencia**

En la condición inicial, el Alimentador C-244 presentó un **factor de potencia promedio de 0,75**, valor que evidencia una elevada demanda de potencia reactiva y una operación ineficiente del sistema. Luego de la optimización y de la incorporación de bancos de condensadores en los nodos estratégicos definidos, el factor de potencia se incrementó hasta **0,96**, según la corrida realizada.

La mejora porcentual del factor de potencia se calcula mediante:

$$\%Mejora = \frac{0,96 - 0,75}{0,75} \times 100$$

$$\%Mejora = 28,00\%$$

Este resultado demuestra que la compensación reactiva optimizada permitió reducir

significativamente la demanda de potencia reactiva suministrada por la red, mejorando el aprovechamiento de la capacidad instalada del alimentador y favoreciendo una operación más eficiente.

#### 4.4.2. Comparación de la caída de tensión

En la condición inicial, la **caída de tensión promedio** del Alimentador C-244 fue de **6,35 %**, valor que supera el rango técnico recomendable para sistemas de distribución. Después de aplicar la optimización, la caída de tensión promedio disminuyó a **3,10 %**, evidenciando una mejora importante en el perfil de voltaje del sistema.

La reducción porcentual se calcula como:

$$\%Reducción = \frac{6,35 - 3,10}{6,35} \times 100$$

$$\%Reducción = 51,18\%$$

Este resultado confirma que la ubicación estratégica de condensadores permite suministrar potencia reactiva localmente en los nodos más sensibles, reduciendo la corriente circulante y mejorando la regulación de tensión, especialmente en los extremos del alimentador.

#### 4.4.3. Comparación de pérdidas técnicas

Las **pérdidas técnicas** en la condición inicial fueron del **12,00 %**, lo cual refleja una operación energéticamente ineficiente. Después de implementar la compensación reactiva óptima, las pérdidas técnicas se redujeron a **7,20 %**.

La reducción porcentual de pérdidas se obtiene mediante:

$$\%Reducción = \frac{12,00 - 7,20}{12,00} \times 100$$

$$\%Reducción = 40,00\%$$

La disminución de pérdidas se explica por la reducción de corriente en los conductores del alimentador, ya que al mejorar el factor de potencia disminuye la potencia reactiva transportada y, en consecuencia, se reducen las pérdidas por efecto Joule.

#### 4.4.4. Tabla comparativa de resultados antes y después de la optimización

**Tabla 8:**

Tabla comparativa de resultados antes y después de la optimización

<b>Indicador</b>	<b>Situación inicial</b>	<b>Situación optimizada</b>	<b>Variación</b>	<b>Mejora (%)</b>
Factor de potencia	0,75	0,96	+0,21	28,00 %
Caída de tensión promedio	6,35 %	3,10 %	-3,25 %	51,18 %
Pérdidas técnicas	12,00 %	7,20 %	-4,80 %	40,00 %

Nota: Elaboración propia con base en datos de diagnóstico y corrida del ETAP

#### 4.4.5. Análisis integral de resultados

La comparación de resultados evidencia que la optimización propuesta generó mejoras sustanciales en la calidad de energía eléctrica del Alimentador C-244. El aumento del factor de potencia de 0,75 a 0,96 demuestra que la red opera con mayor eficiencia, reduciendo la demanda de potencia reactiva desde la fuente y mejorando la utilización de la infraestructura eléctrica existente.

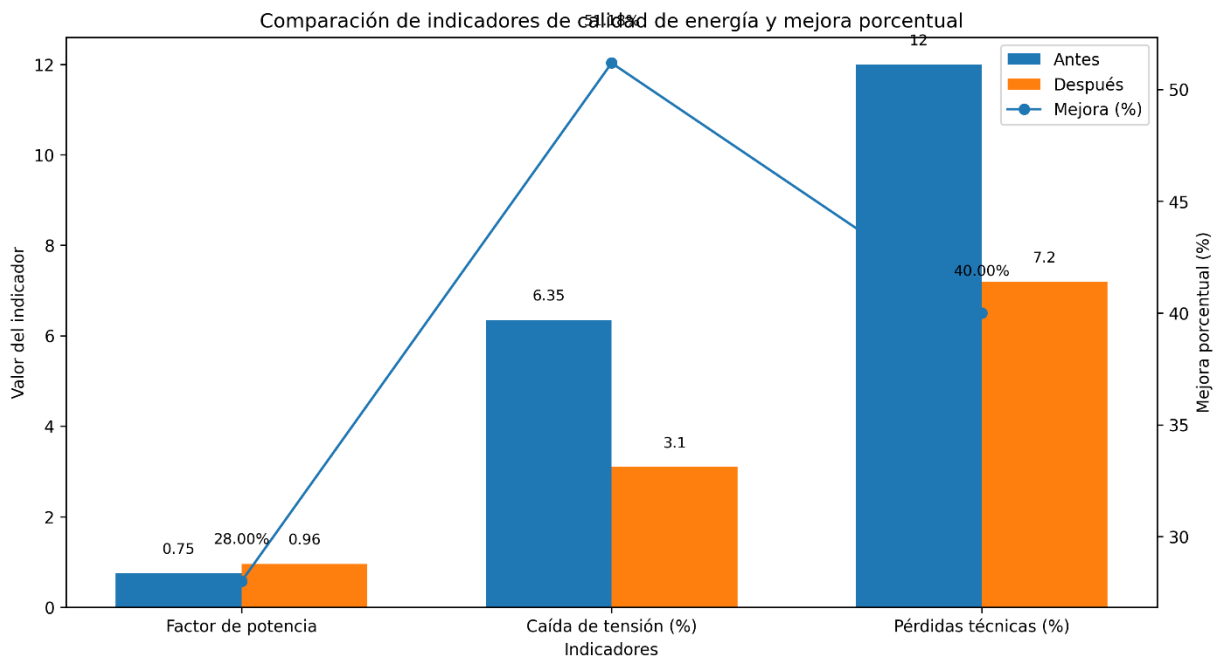
Asimismo, la disminución de la caída de tensión de 6,35 % a 3,10 % evidencia una mejora del perfil de voltaje, lo cual contribuye a que los usuarios ubicados en los extremos del alimentador reciban un suministro dentro de parámetros técnicos más adecuados. Este aspecto resulta particularmente relevante en redes radiales extensas, donde la distancia entre la fuente y la carga acentúa los problemas de regulación de tensión.

Por otra parte, la reducción de las pérdidas técnicas de 12,00 % a 7,20 % confirma que la propuesta de compensación reactiva no solo mejora parámetros eléctricos de calidad de energía, sino que también contribuye al uso más eficiente de la energía transportada, generando beneficios técnicos y económicos para la operación del sistema.

En conjunto, los resultados obtenidos validan la eficacia del algoritmo genético aplicado a la ubicación y capacidad de bancos de condensadores, demostrando que esta metodología constituye una herramienta adecuada para optimizar la calidad de energía eléctrica en alimentadores de distribución.

La Figura 2 presenta la comparación del factor de potencia, la caída de tensión y las pérdidas técnicas del Alimentador C-244 antes y después de la optimización, incorporando además la mejora porcentual obtenida en cada indicador. Se aprecia un aumento del factor de potencia de 0,75 a 0,96, equivalente a una mejora de 28,00 %, así como reducciones de 51,18 % en la caída de tensión y de 40,00 % en las pérdidas técnicas.

**Figura 2:**  
Comparación de indicadores de calidad de energía y mejora porcentual



Nota: Elaboración propia

El gráfico evidencia que la optimización mediante algoritmo genético y su validación en ETAP produjo mejoras significativas en los indicadores de calidad de energía, siendo la mayor variación relativa la reducción de la caída de tensión promedio del alimentador.

## CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

Como conclusiones arribadas en la presente investigación científica:

- Se diagnosticó el estado actual de la calidad de la energía eléctrica en el Alimentador C-244 – J.L. Ortiz, determinándose un factor de potencia promedio de 0,75, una caída de tensión promedio de 6,35 % y pérdidas técnicas promedio de 12 %, evidenciando una operación deficiente del sistema, asociada a una inadecuada compensación de potencia reactiva y a la presencia de ramales con alta sensibilidad eléctrica.
- Se diseñó un algoritmo genético para optimizar la ubicación y capacidad de bancos de condensadores en el alimentador, estableciendo una función objetivo orientada a minimizar pérdidas técnicas y mejorar el perfil de tensión, bajo restricciones operativas de voltaje y compensación reactiva, lo que permitió formular una metodología técnica adecuada para resolver el problema de optimización planteado.
- Mediante la corrida de flujo de carga en ETAP, se determinó que la configuración óptima de compensación reactiva corresponde a la instalación de bancos de condensadores en los nodos 771, 2158, 2250 y 2131, con capacidades de 450 kVAr, 300 kVAr, 300 kVAr y 150 kVAr, respectivamente, alcanzando una compensación total de 1 200 kVAr, técnicamente coherente con la topología y condiciones operativas del Alimentador C-244.
- La comparación de resultados antes y después de la optimización demostró que la propuesta mejora significativamente la calidad de energía eléctrica del alimentador, al incrementar el factor de potencia de 0,75 a 0,96, reducir la caída de tensión de 6,35 % a 3,10 % y disminuir las pérdidas técnicas de 12 % a 7,2 %, validando así la efectividad de la ubicación óptima de condensadores mediante algoritmos genéticos como

alternativa técnica para mejorar el desempeño energético del sistema

## 5.2. Recomendaciones

Se recomienda:

- Implementar la configuración óptima de bancos de condensadores propuesta para el Alimentador C-244, priorizando los nodos **771, 2158, 2250 y 2131**, a fin de mejorar el factor de potencia, reducir la caída de tensión y disminuir las pérdidas técnicas del sistema.
- Validar en campo los resultados obtenidos en la simulación de **ETAP**, mediante mediciones eléctricas de tensión, corriente, factor de potencia y demanda reactiva, con el propósito de verificar el comportamiento real del alimentador y ajustar, de ser necesario, la capacidad de compensación reactiva instalada.
- Ampliar futuras investigaciones incorporando otros criterios de optimización, como análisis económico, coordinación de protecciones, variación horaria de la carga y comparación con técnicas metaheurísticas alternativas, para obtener soluciones aún más robustas y aplicables a otros alimentadores de distribución.
- Considerar la aplicación de la metodología desarrollada en otros alimentadores de la red de distribución de Electronorte S.A., debido a que el uso de algoritmos genéticos para la ubicación óptima de condensadores constituye una herramienta eficaz para mejorar la calidad de energía y la eficiencia operativa de sistemas eléctricos radiales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

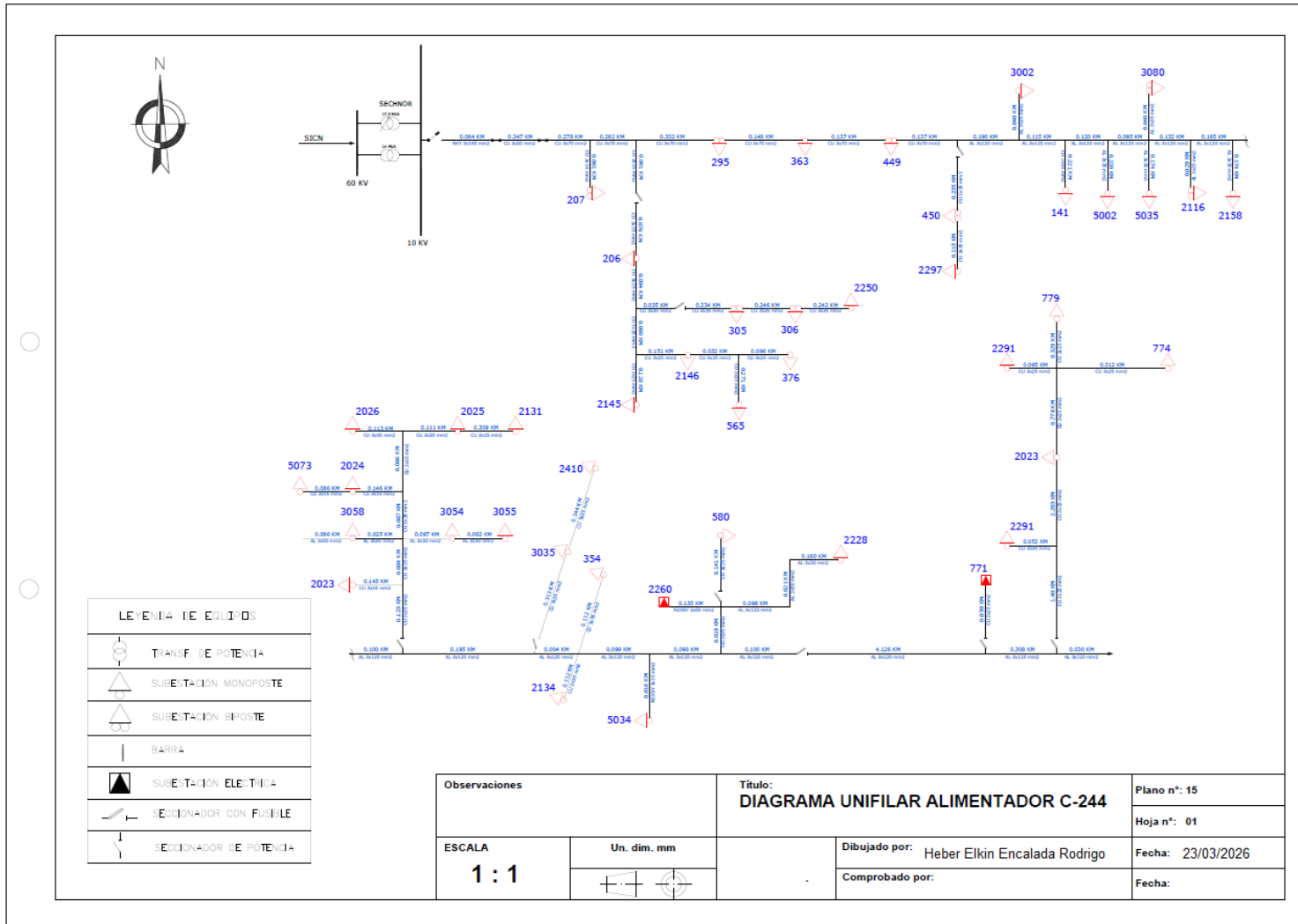
- Argudo Guallas, G. A., & Samaniego Placencia, J. P. (2019). Optimización de los alimentadores de media tensión y transformadores de distribución de la S/E 17 Los Cerezos proyectada por la Centrosur. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Carreño, C., & Avilés, J. (2022). Localización óptima de equipos de regulación de voltaje y compensación de reactivos para alimentadores de medio voltaje, mediante algoritmos evolutivos. Ecuador: Universidad Central del Ecuador. Obtenido de <https://doi.org/10.29166/>
- Elektron. (2024). Importancia del análisis de la calidad de la energía eléctrica. México.
- Flores Iza, L. E. (2022). Mejora del factor de potencia mediante óptima ubicación y dimensionamiento de Dstatcom en redes de distribución aplicando el método de enjambre de partículas. Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana. Obtenido de <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23300>
- Huaraca Meza, A. (2024). Ubicación óptima de los equipos de protección para mejorar los indicadores de la calidad de suministro del alimentador A4704 Tarma. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12894/11490>
- Lozano Ortiz, C. A. (2011). Planificación de alimentadores de distribución de media tensión en función de la penetración de generación distribuida en baja tensión. Chile: Universidad de Chile. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/102660/Planificacion-de-alimentadores-de%20distribucion-de-media-tension-en%20funcion-de-la-penetracion.pdf?sequence=3>
- Mantari Inocente, K. S. (2019). Análisis de la calidad de tensión en el suministro de energía eléctrica a la Localidad de Panti, Distrito de Pariahuanca. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú. Obtenido de [https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/5214/T010\\_4786638\\_1\\_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/5214/T010_4786638_1_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Salgado Espinosa, P. I. (2024). Localización óptima de condensadores sincrónicos incluyendo restricciones de robustez en sistemas eléctricos de potencia débiles. Chile: Universidad de Chile. Obtenido de URI: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/200932>
- Sanchez, H., Reyes, C., & Mejía, K. (2018). Manual de términos en investigación científica, tecnológica y humanística. Lima: Universidad Ricardo Palma. Obtenido de <https://www.urp.edu.pe/pdf/id/13350/n/libro-manual-de-terminos-en-investigacion.pdf>
- Silva Poaquiza, M. V. (2022). Localización óptima de reconectores con criterios de confiabilidad en un alimentador real de medio voltaje de un sistema eléctrico de

distribución. Ecuador: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC). Obtenido de <https://repositorio.utc.edu.ec/items/babb7281-6bf8-4a07-9959-609d9d7572b2>

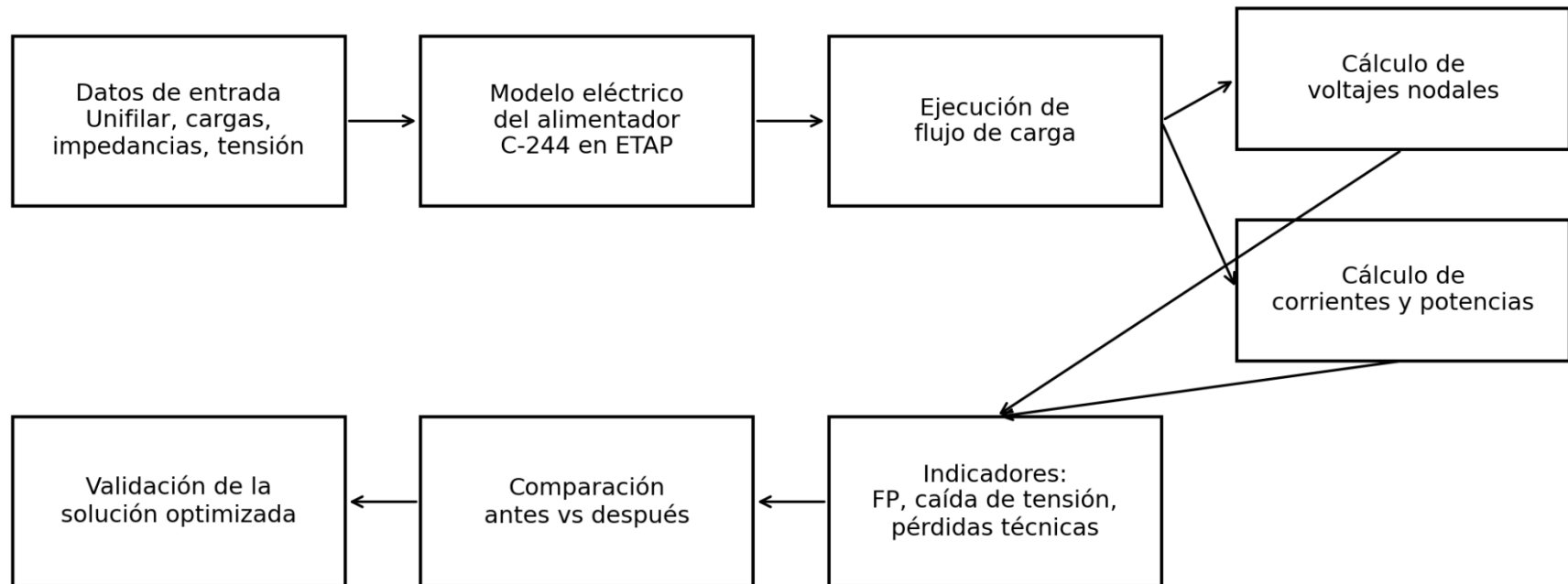
Yaurivilca Rojas, J. P. (2020). Evaluación de la calidad de energía eléctrica dentro de horarios punta y fuera de punta en la estación de fibra óptica en la ciudad de Tayacaja - Huancavelica 2020. Huancayo: Universidad Continental. Obtenido de [https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/10380/3/IV\\_FIN\\_109\\_TI\\_Yaurivilca\\_Rojas\\_2020.pdf](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/10380/3/IV_FIN_109_TI_Yaurivilca_Rojas_2020.pdf)

## ANEXOS

## ANEXO 01: Diagrama Unifilar del Alimentador C-244



## ANEXO 02: Secuencia de cálculo del flujo de carga en ETAP



### ANEXO 03: Expresiones técnicas empleadas para interpretar los resultados del ETAP

Cálculo del factor de potencia

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

Donde:

P = potencia activa

Q = potencia reactiva

Cálculo de la caída de tensión

$$\Delta V \propto I(R \cos \varphi + X \sin \varphi)$$

Donde:

I = corriente

R, X = parámetros de línea

Cálculo de pérdidas técnicas

$$P_{\text{perd}} = I^2 R$$

La reducción de corriente disminuye las pérdidas por efecto Joule.

Criterio de mejora con condensadores

Menor Q demandada por la red

→ menor corriente

→ mejor perfil de tensión

→ menores pérdidas

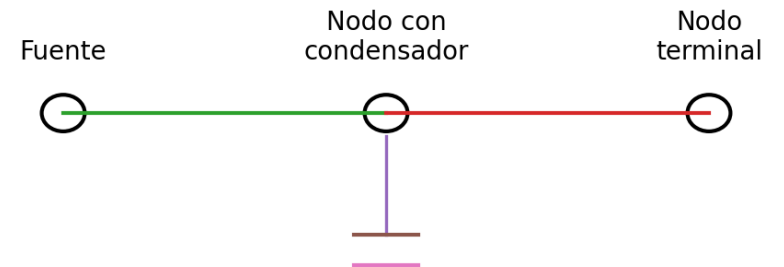
#### ANEXO 04: Efecto de la compensación reactiva en el cálculo del ETAP

Antes de la compensación



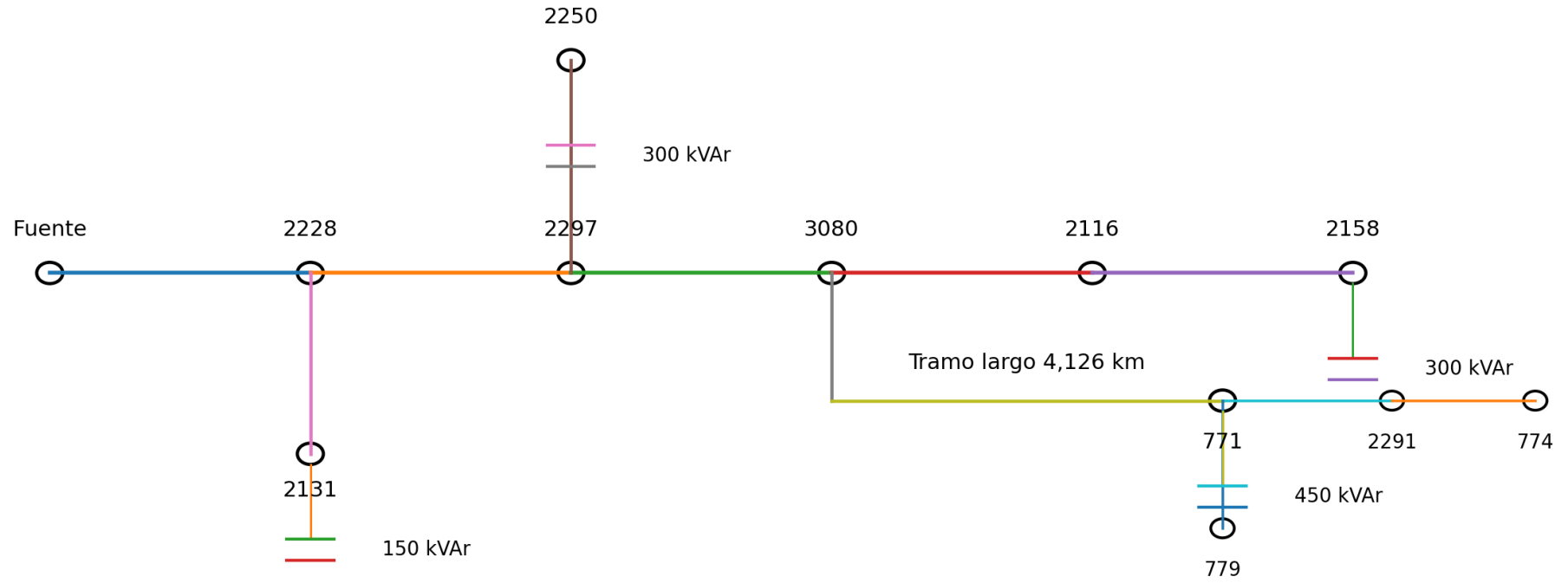
Mayor flujo reactivo  
Mayor corriente  
Mayor caída de tensión  
Mayores pérdidas

Después de la compensación



Menor flujo reactivo  
Menor corriente  
Mejor perfil de tensión  
Menores pérdidas

**ANEXO 05: Esquema unifilar simplificado del Alimentador C-244 con ubicación óptima de condensadores**



### ANEXO 06: Integración del algoritmo genético con ETAP para la optimización del Alimentador C-244

