



# POSGRADOS

Maestría en

## **ELECTRICIDAD, MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

RPC-SO-30-NO.508-2019

Opción de Titulación:

Proyectos de desarrollo

Tema:

Análisis de la eficiencia energética en  
líneas de distribución en media tensión,  
causas efectos y soluciones

Autor(es)

Cristian Gerardo Cacuangó Changoluisa

Director:

Jorge Luis Rojas Espinoza

QUITO – Ecuador

2026



**Autor(es):**



**Cristian Gerardo Cacuango Changoluisa**

Ingeniero en Electrónica y Automatización.

Candidato a Magíster en Electricidad Mención Sistemas Eléctricos de Potencia Sede Quito.

crisgerardo63@gmail.com

**Dirigido por:**



**Jorge Luis Rojas Espinoza**

Ingeniero Eléctrico

Maestro en Administración de la Energía y sus Fuentes Renovables

jrojase@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

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

DERECHOS RESERVADOS

2026 © Universidad Politécnica Salesiana.

QUITO– ECUADOR – SUDAMÉRICA

CRISTIAN GERARDO CACUANGO CHANGOLUISA

**ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN DE MEDIA TENSIÓN,  
CAUSAS, EFECTOS Y SOLUCIONES.**

## **DEDICATORIA**

Quiero agradecer a Dios por la salud y bienestar que me ha brindado todos estos años, dedicar este trabajo a mi familia mis papas y a todos los que han estado ahí en cualquier momento de la vida para darme un aliento de fuerza y esperanza en donde super que los sueños si se cumplen con dedicación y esfuerzo, agradecer nuevamente a mi madre y padre infinitamente por su apoyo y amor incondicional.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecer a Dios a la vida a mis padres mi familia que en cualquier etapa de la vida siempre han aportado grandes cosas para mi vida, agradecer siempre a todos las personas que de alguna manera me apoyaron, y como no volver agradecer a mis papas, a mi padre y a mi madre quien han sido ese bastón esa lucha diaria para querer seguir avanzando, como no agradecer a esas dos personas que son la vida y el mundo para mí, como no agradecer a mis padres por todo lo que han hecho para que el día de hoy pueda obtener el título de magister, infinitamente gracias a ellos.

# Índice

Resumen .....	8
Abstract .....	10
1.Introducción .....	11
2. Determinación del Problema.....	14
2.1    Antecedentes.....	14
2.2    Planteamiento del problema.....	15
2.3    Delimitación del problema .....	16
2.4    Definición operativa de la condición crítica .....	17
2.5    Justificación .....	17
2.6    Objetivos.....	18
2.6.1    Objetivo general .....	18
2.6.2    Objetivos específicos .....	18
3.    Marco teórico .....	19
3.1    REDES DE DISTRIBUCIÓN EN MEDIA TENSIÓN .....	19
3.2    Conductores utilizados en redes de media tensión .....	20
3.3    Parámetros eléctricos relevantes en líneas de media tensión .....	21
3.3.1    Resistencia del conductor.....	21
3.3.2    Reactancia inductiva.....	21
3.3.3    Reactancia capacitiva .....	22
3.4    Influencia de la distancia en la caída de tensión.....	22
3.5    Caída de tensión y eficiencia energética en redes de media tensión .....	23
3.6    Compensación de potencia reactiva mediante bancos de capacitores en media tensión .....	24
3.7    Regulación de tensión mediante reguladores de línea en media tensión.....	25
3.8    Compensación dinámica de potencia reactiva mediante SVC/SVG en redes de distribución .....	26
3.9    Regulación de tensión mediante ajuste de taps en transformadores .....	26
3.10    Síntesis teórica y criterios técnicos de evaluación .....	27
3.11    Marco normativo y criterios regulatorios aplicables .....	28
3.12    Compensador estático de potencia reactiva (SVS) .....	30
3.12.1    Ventajas .....	31
3.13    Ajuste de TAPs de transformadores.....	31

4. Metodología .....	32
4.1 Enfoque y diseño .....	32
4.2 Sistema objeto de estudio .....	32
4.3 Datos de entrada y caracterización eléctrica del alimentador .....	33
4.3.1 Parámetros del conductor del alimentador .....	33
4.3.2 Tramos y cargas del alimentador .....	34
4.3.3 Transformadores de distribución del alimentador .....	35
4.4 Herramienta de simulación y configuración del modelo .....	35
4.5 Escenarios de análisis .....	35
4.6 Variables e indicadores de evaluación .....	36
4.7 Procedimiento metodológico .....	36
5. Resultados .....	37
5.1 Verificación de parámetros eléctricos y validación de cálculos.....	37
5.1.1 Geometría de la línea y calculo referencial de reactancia .....	37
5.1.2 Verificación parcial en el tramo AA .....	39
5.2 Resultados del caso base sin mejoras .....	40
5.2.1 Pérdidas totales del alimentador en el caso base.....	42
5.3 Resultados del crecimiento de demanda .....	43
5.3.1 Comportamiento por barra/tramo a 3 y 5 años.....	43
5.3.2 PERDIDAS TOTALES CON CRECIMIENTO DE DEMANDA.....	44
5.4 Soluciones recomendadas para mejorar la caída de tensión en MV.....	45
5.3.1 Ajustar el TAP de transformadores. ....	45
5.3.2 Instalación de banco de capacitores, en barra AJ .....	47
5.3.3 Instalación de compensador estático de potencia reactiva.....	49
5.3.4 Aumento de sección de conductor desde tramo AI.....	51
5.3.5 Comparación final de alternativas.....	52
5.3.6 Cuadro comparativo de 4 alternativas presentadas .....	53
6. Discusiones .....	54
7. Conclusiones.....	56
8. Recomendaciones.....	57
9. Referencias .....	58

# Análisis de la eficiencia energética en líneas de distribución de medio voltaje, causas, efectos y soluciones.

Autor(es):

CRISTIAN GERARDO CACUANGO CHANGOLUISA

## Resumen

El análisis del alimentador La Esperanza 4 se evidencia que la eficiencia energética de la línea se ve comprometida principalmente en los tramos más lejanos, donde la distancia, el aumento de carga y la resistencia del conductor provocan caídas de voltaje significativas y pérdidas técnicas cada vez mayores. Mientras los primeros tramos mantienen un comportamiento estable, los sectores finales muestran valores que superan los límites permitidos del 6% de caída de voltaje, según la Regulacion-Nro.-ARCONEL-009-24, lo que afecta directamente la calidad del servicio eléctrico.

Las simulaciones realizadas demuestran que el nivel de voltaje mejora notablemente cuando se implementan soluciones como:

- 1) El ajuste del TAP de transformadores.
- 2) La Instalación de banco de capacitores.
- 3) La Incorporación de un compensador estático de potencia reactiva (SVS).
- 4) El Aumentar la sección del conductor.

Asimismo, los resultados obtenidos mediante simulaciones confirman que el alimentador La Esperanza 4 ya no responde adecuadamente a la demanda energética presente, y que una modernización del sistema es una solución efectiva para recuperar la estabilidad, reducir pérdidas, aumentar niveles de voltaje y garantizar un suministro confiable y eficiente para todos los usuarios del alimentador.

De igual manera en las simulaciones del alimentador y con datos obtenidos mediante software PowerFactory se observó que existen pérdidas de potencia activa y reactiva a lo largo del conductor, y estas pérdidas depende de la distancia, sección del conductor y así también de las cargas instaladas como los transformadores de distribución alojados a lo largo de todo el circuito.

**Palabras clave:**

Redes de distribución eléctrica; eficiencia energética; pérdidas técnicas; caída de voltaje; alimentadores de media tensión; compensación de potencia reactiva; ajuste de TAP; PowerFactory.

## Abstract

---

The analysis of the La Esperanza 4 feeder shows that the energy efficiency of the distribution line is mainly compromised in its most distant sections, where increased distance, load growth, and conductor resistance cause significant voltage drops and progressively higher technical losses. While the initial sections of the feeder exhibit stable operating conditions, the final segments exceed the allowable voltage drop limit of 6% established by Regulation No. ARCONEL-009-24, directly affecting the quality and reliability of the electrical service.

Simulation results indicate a substantial improvement in voltage levels when technical solutions such as transformer tap adjustment, installation of capacitor banks, implementation of static reactive power compensators (SVS), and increasing the conductor cross-sectional area are applied. Furthermore, the simulations confirm that the La Esperanza 4 feeder is no longer able to adequately meet the current demand, making system modernization an effective strategy to restore voltage stability, reduce technical losses, improve voltage profiles, and ensure a reliable and efficient power supply for all connected users.

Additionally, simulations performed using PowerFactory software reveal the presence of both active and reactive power losses along the feeder. These losses are strongly influenced by feeder length, conductor cross-section, and the distribution of installed loads, particularly distribution transformers located along the circuit.

### **Palabras clave:**

Electric power distribution networks; energy efficiency; technical losses; voltage drop; medium-voltage feeders; reactive power compensation; transformer tap adjustment; PowerFactory.

# 1.Introducción

Los sistemas eléctricos de potencia (SEP) están estructurados en las etapas de generación, transmisión y distribución, siendo esta última la encargada de suministrar la energía eléctrica directamente a los usuarios finales. Dentro de este nivel, los alimentadores de media tensión constituyen un elemento crítico del sistema, ya que su desempeño influye de manera directa en la calidad del servicio, la eficiencia energética y las pérdidas técnicas asociadas al transporte de energía eléctrica (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022).

En los sistemas de distribución, el crecimiento progresivo de la demanda eléctrica y la expansión de las cargas a lo largo de los alimentadores generan incrementos en la corriente circulante y en las pérdidas por efecto Joule, lo que se traduce en una degradación del perfil de tensión, especialmente en los tramos más alejados de la subestación. Esta condición se ve agravada cuando la longitud del alimentador es considerable y el calibre del conductor resulta limitado frente a los niveles de carga presentes, provocando caídas de voltaje que pueden superar los rangos permitidos por la normativa de calidad del servicio eléctrico (Kersting, s. f.).

El presente trabajo se centra en el análisis del alimentador La Esperanza 4, perteneciente a la subestación La Esperanza, el cual opera a un nivel de tensión de 13,8 kV y presenta una longitud aproximada de 18,3 km desde la cabecera hasta el tramo final. A lo largo de este alimentador se encuentran distribuidos 16 transformadores de distribución, cuyas cargas se incrementan progresivamente hacia los tramos finales del circuito. Estas características convierten al alimentador en un caso representativo para el estudio de problemas asociados a caídas de tensión y pérdidas técnicas en redes de media tensión.

De acuerdo con la regulación nacional vigente, la caída máxima de tensión permitida en redes de media tensión es del 6 % respecto al valor nominal, lo que establece un umbral mínimo de operación cercano a 12,97 kV para un sistema de

13,8 kV (*Regulacion-Nro.-ARCONEL-009-24-signed.pdf*, s. f.). Sin embargo, los resultados obtenidos en el escenario base del alimentador La Esperanza 4 evidencian que, en los tramos más alejados, la tensión desciende hasta valores del orden de 12,3 kV (0,89 p.u), valor que está por debajo del límite inferior normativo, lo cual compromete la calidad del suministro eléctrico. Adicionalmente, se registran pérdidas técnicas de potencia activa y reactiva asociadas a la longitud del circuito, la impedancia del conductor y la distribución de las cargas.

Con el fin de analizar el comportamiento del alimentador bajo diferentes condiciones operativas, se desarrolló un modelo detallado del sistema en el software DigSILENT PowerFactory, herramienta ampliamente utilizada para el estudio y simulación de sistemas eléctricos de potencia. La metodología aplicada es de tipo cuantitativo y analítico, basada en simulaciones computacionales del caso base y en escenarios de crecimiento de la demanda proyectados a tres y cinco años, considerando el incremento progresivo de la carga en los transformadores de distribución. En cada escenario se evaluaron parámetros eléctricos fundamentales como niveles de tensión, corrientes, pérdidas de potencia activa y reactiva, así como el cumplimiento de los límites normativos de caída de voltaje.

A partir de este análisis, se identificaron los tramos críticos del alimentador y se evaluaron diversas alternativas técnicas orientadas a mejorar la eficiencia energética y la regulación de tensión del sistema. Entre las soluciones analizadas se incluyen el ajuste de TAP de transformadores, la instalación de bancos de capacitores, la implementación de compensadores estáticos de potencia reactiva y el aumento de la sección del conductor. Estas estrategias han sido ampliamente estudiadas en la literatura reciente como mecanismos eficaces para reducir pérdidas técnicas, mejorar el perfil de tensión y garantizar el cumplimiento de los criterios de calidad del servicio en redes de distribución de media tensión (Granda et al., 2023; (Monga, 2023).

Los resultados obtenidos demuestran que, sin una intervención técnica adecuada, el alimentador La Esperanza 4 no logra responder de manera eficiente al crecimiento de la demanda eléctrica, presentando caídas de voltaje superiores a los

límites permitidos y un incremento progresivo de las pérdidas técnicas. En este contexto, la presente investigación aporta un análisis aplicado que permite sustentar técnicamente la necesidad de implementar medidas de mejora en redes de distribución de media tensión, con el objetivo de optimizar la eficiencia energética, garantizar la calidad del servicio eléctrico y fortalecer la operación confiable del sistema de distribución.

## 2. Determinación del Problema

### 2.1 Antecedentes

Los sistemas de distribución eléctrica en media tensión han adquirido un rol cada vez más crítico dentro del sistema eléctrico de potencia, debido al crecimiento sostenido de la demanda, la expansión de las zonas de consumo y la necesidad de garantizar estándares adecuados de calidad del servicio. En este contexto, los alimentadores de distribución se ven sometidos a condiciones operativas más exigentes, caracterizadas por mayores corrientes de carga, incrementos en las pérdidas técnicas y una degradación progresiva del perfil de tensión, especialmente en los tramos más alejados de las subestaciones.

Diversos estudios recientes señalan que los problemas de regulación de tensión y eficiencia energética en redes de media tensión están estrechamente relacionados con la longitud de los alimentadores, la impedancia de los conductores y la distribución espacial de las cargas. Cuando estos factores no son considerados adecuadamente en la planificación y operación del sistema, se generan caídas de voltaje que pueden superar los límites permitidos por la normativa vigente, afectando la calidad del suministro eléctrico y el desempeño de los equipos conectados a la red (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022).

En Ecuador, la regulación del servicio eléctrico establece criterios específicos para la calidad del suministro en sistemas de distribución, incluyendo límites máximos de variación y caída de tensión en redes de media tensión. El incumplimiento de estos criterios constituye una condición técnica no deseable que debe ser corregida mediante acciones de análisis, planificación y mejora del sistema eléctrico (*Regulacion-Nro.-ARCONEL-009-24-signed.pdf*, s. f.). En este escenario, el análisis detallado de alimentadores específicos permite identificar problemas reales de operación y sustentar técnicamente la aplicación de soluciones orientadas a mejorar la eficiencia energética y el cumplimiento normativo.

## 2.2 Planteamiento del problema

El alimentador La Esperanza 4, perteneciente a la subestación La Esperanza, opera a un nivel de tensión de 13,8 kV y presenta una extensión aproximada de 18,3 km desde la cabecera hasta los tramos finales del circuito, con un calibre 1/0 AWG de aluminio de tipo ACSR. A lo largo de este alimentador se encuentran conectados 16 transformadores de distribución, cuyas cargas se distribuyen de manera no uniforme, incrementándose progresivamente hacia los sectores más alejados de la subestación.

El análisis del escenario base del alimentador evidencia una degradación del perfil de tensión conforme aumenta la distancia a la cabecera, registrándose valores mínimos de tensión del orden de 12,3 kV, equivalentes aproximadamente a 0,89 p.u, en los tramos finales del circuito. Esta condición representa una caída de tensión superior al 6 % respecto al valor nominal del sistema, superando el límite establecido por la normativa ecuatoriana vigente para redes de media tensión (Regulacion-Nro.-ARCONEL-009-24-signed.pdf, s. f.). Como consecuencia, el alimentador presenta una condición de operación fuera de los rangos aceptables de calidad del servicio eléctrico.

Adicionalmente, el alimentador registra pérdidas técnicas de potencia activa y reactiva asociadas a la circulación de corriente a lo largo de un circuito extenso y con una impedancia significativa. Estas pérdidas se ven incrementadas bajo escenarios de crecimiento de la demanda, ya que el aumento de carga provoca mayores corrientes y, por ende, un incremento no lineal de las pérdidas por efecto Joule. En ausencia de medidas correctivas, esta situación compromete la eficiencia energética del alimentador y agrava los problemas de regulación de tensión (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022).

El problema técnico se acentúa cuando se consideran escenarios de crecimiento de la demanda a mediano plazo, típicamente proyectados a tres y cinco años, en los cuales la infraestructura existente puede resultar insuficiente para mantener niveles adecuados de tensión y pérdidas dentro de rangos aceptables. En este

contexto, se hace necesario evaluar el comportamiento del alimentador bajo dichos escenarios y analizar alternativas técnicas que permitan restituir el cumplimiento normativo y mejorar la eficiencia del sistema.

## 2.3 Delimitación del problema

Con el fin de abordar el problema de manera precisa y evitar ambigüedades, el presente estudio delimita el análisis en las siguientes dimensiones:

### **Delimitación espacial:**

El análisis se centra exclusivamente en el alimentador La Esperanza 4, perteneciente a la subestación La Esperanza, operado a 13,8 kV, considerando su configuración actual, longitud aproximada de 18,3 km y los transformadores de distribución conectados a lo largo del circuito.

### **Delimitación temporal:**

El estudio considera el escenario base de operación y escenarios de crecimiento de la demanda proyectados a tres y cinco años, con el objetivo de evaluar el impacto del incremento de carga sobre el perfil de tensión y las pérdidas técnicas del alimentador.

### **Delimitación técnica:**

El análisis se enfoca en la evaluación de:

el perfil de tensión a lo largo del alimentador,

el cumplimiento del límite normativo de caída de tensión,

las pérdidas técnicas de potencia activa y reactiva,

y el efecto del crecimiento de la demanda de transformadores de distribución en el alimentador.

## 2.4 Definición operativa de la condición crítica

Para efectos del presente estudio, la condición problemática del alimentador se define de manera operativa a partir de los siguientes criterios técnicos:

- **Criterio de calidad de tensión:** presencia de nodos o tramos con niveles de tensión inferiores al límite máximo de caída permitido por la normativa vigente en redes de media tensión.
- **Criterio de eficiencia energética:** incremento de las pérdidas técnicas de potencia activa y reactiva asociado al crecimiento de la demanda y a la circulación de potencia reactiva.
- **Criterio de sostenibilidad operativa:** incapacidad del alimentador para mantener el cumplimiento normativo bajo escenarios futuros de crecimiento sin la aplicación de medidas correctivas.

## 2.5 Justificación

Desde el punto de vista normativo, el cumplimiento de los límites de calidad del servicio eléctrico en redes de distribución constituye una obligación regulatoria cuya inobservancia afecta directamente a los usuarios finales y a la operación del sistema eléctrico (*Regulacion-Nro.-ARCONEL-009-24-signed.pdf*, s. f.). Desde una perspectiva técnica, la presencia de caídas de tensión y pérdidas elevadas reduce la eficiencia del alimentador, incrementa los costos operativos y limita la capacidad del sistema para atender el crecimiento futuro de la demanda.

Asimismo, el uso de herramientas de simulación reconocidas para el análisis de sistemas eléctricos de potencia permite evaluar escenarios y alternativas de mejora sin intervenir físicamente la red, facilitando la toma de decisiones técnicas fundamentadas. La literatura reciente respalda el uso de análisis de flujo de carga y estrategias de control de voltaje y potencia reactiva como mecanismos eficaces

para mejorar el desempeño de alimentadores de media tensión bajo condiciones de crecimiento de carga (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022).

En este contexto, el presente estudio se justifica como un aporte técnico aplicado orientado a identificar problemas reales de operación y a sustentar soluciones que contribuyan a mejorar la eficiencia energética y la calidad del servicio eléctrico en redes de distribución. |

## 2.6 Objetivos

### 2.6.1 Objetivo general

Analizar la eficiencia energética de líneas de distribución en media tensión, bajo condiciones de sobre carga eléctrica mediante simulaciones.

### 2.6.2 Objetivos específicos

Evaluar el comportamiento eléctrico de líneas de distribución en media tensión cuando se presentan sobrecargas.

Identificar las pérdidas eléctricas asociadas a la sobrecarga en las líneas de distribución.

Analizar estrategias para mejorar la eficiencia energética en presencia de sobrecargas.

## 3. Marco teórico

### 3.1 REDES DE DISTRIBUCIÓN EN MEDIA TENSIÓN

El sistema eléctrico de potencia se organiza en tres etapas fundamentales: generación, transmisión y distribución. La etapa de distribución cumple la función de suministrar la energía eléctrica desde las subestaciones hasta los usuarios finales, constituyéndose en el nivel del sistema con mayor interacción directa con la demanda y, por ende, con mayor impacto sobre la calidad y continuidad del servicio eléctrico.

Las redes de distribución en media tensión operan típicamente en rangos comprendidos entre 1 kV y 40 kV, dependiendo de las regulaciones nacionales y del diseño del sistema. En el contexto ecuatoriano, estos niveles permiten la interconexión directa entre las subestaciones de transmisión y los sistemas de baja tensión mediante transformadores de distribución, desempeñando un rol crítico en el desempeño global del sistema eléctrico (*Regulacion-Nro.-ARCONEL-009-24-signed.pdf*, s. f.).

Un sistema eléctrico de potencia (SEP) está conformado por tres etapas: generación, transmisión y distribución. En la etapa de generación se produce la energía eléctrica por medio de centrales de tipo: “hidroeléctricas, térmicas, solares, o renovables, en su segunda etapa la transmisión es aquella se transporta a grandes distancias niveles de alto voltaje, en su tercera etapa tenemos la distribución que es la encargada de llevar la energía eléctrica a los consumidores finales” (Pérez & Rodríguez, 2020).

Desde el punto de vista operativo, las redes de media tensión presentan una mayor sensibilidad frente a variaciones de carga, extensiones considerables de los alimentadores y características eléctricas propias de los conductores utilizados. Estas condiciones favorecen la aparición de fenómenos como la caída de tensión, el incremento de pérdidas técnicas y la degradación del perfil de voltaje,

especialmente en alimentadores extensos o con crecimiento progresivo de la demanda. Estudios recientes destacan que la mejora de la eficiencia energética y del perfil de tensión en redes de media tensión constituye uno de los principales desafíos actuales en la planificación y operación de sistemas de distribución (Gallego et al., 2022).

## 3.2 Conductores utilizados en redes de media tensión

Las redes de distribución en media tensión pueden estar constituidas por líneas aéreas o líneas subterráneas, cuya selección responde a criterios técnicos, económicos y ambientales. En sistemas aéreos, es común el empleo de conductores de aluminio con refuerzo de acero (ACSR) o aleaciones de aluminio (AAAC), suspendidos mediante postes, estructuras metálicas y sistemas de aislamiento. En redes subterráneas, se utilizan cables con aislamientos poliméricos, como XLPE, acompañados de cubiertas metálicas y sistemas de blindaje que garantizan la seguridad y confiabilidad del sistema.

Las propiedades eléctricas de los conductores, particularmente su resistencia y reactancia, influyen directamente en el comportamiento del alimentador, condicionando la magnitud de la caída de tensión y las pérdidas técnicas. La correcta selección del tipo y sección del conductor resulta, por tanto, un factor determinante para asegurar una operación eficiente del sistema de distribución, especialmente en redes sometidas a crecimiento de la demanda (Ouyang & Wang, 2023a).

“La distribución es considerada una de las más sensibles debido a que conecta directamente al consumidor final por medio de transformadores en media tensión, con lo cual impacta de forma directa con la calidad y continuidad de servicio” (Pérez & Rodríguez, 2020).

## 3.3 Parámetros eléctricos relevantes en líneas de media tensión

### 3.3.1 Resistencia del conductor

La resistencia eléctrica del conductor representa la oposición al paso de la corriente y está directamente asociada a las pérdidas de potencia por efecto Joule. En líneas de media tensión, la resistencia depende del material, la sección transversal y la temperatura de operación del conductor. La variación de la resistencia con la temperatura puede expresarse mediante la ecuación:

$$R_T = R_{20}[1 + \alpha(T - 20)] \quad (1)$$

donde  $R_T$  es la resistencia del conductor a la temperatura  $T$  (°C),

$R_{20}$  es la resistencia a 20 °C,

y  $\alpha$  es el coeficiente de temperatura del material conductor.

El incremento de la resistencia debido al calentamiento del conductor provoca un aumento de las pérdidas técnicas, lo que se traduce en una mayor caída de tensión y una reducción de la eficiencia energética del alimentador (Li et al., 2022).

### 3.3.2 Reactancia inductiva

La reactancia inductiva se presenta en líneas aéreas y elementos inductivos del sistema, generando un desfase entre la corriente y el voltaje. Este fenómeno es particularmente relevante en redes de media tensión, donde los flujos de potencia reactiva influyen significativamente en el perfil de tensión. La reactancia inductiva puede expresarse mediante la ecuación:

$$X_L = 2\pi fL \quad (2)$$

donde  $X_L$  es la reactancia inductiva ( $\Omega$ ),

$f$  es la frecuencia del sistema (Hz),

y  $L$  es la inductancia del conductor (H).

Un incremento de la reactancia inductiva contribuye a una mayor caída de tensión, incluso cuando la resistencia del conductor es reducida, afectando además el factor de potencia del sistema (Zhang et al., 2023).

### 3.3.3 Reactancia capacitiva

La reactancia capacitiva se origina por el campo eléctrico existente entre conductores, provocando un adelanto de la corriente respecto al voltaje. Su expresión matemática se define como:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (3)$$

donde  $X_c$  es la reactancia capacitiva ( $\Omega$ )

y  $C$  es la capacitancia del sistema (F).

La interacción entre la reactancia inductiva y capacitiva determina el comportamiento global del alimentador, influyendo tanto en el perfil de tensión como en la eficiencia energética del sistema de distribución.

## 3.4 Influencia de la distancia en la caída de tensión

La longitud del alimentador constituye uno de los factores más determinantes en la magnitud de la caída de tensión en redes de media tensión. A mayores distancias, se incrementan tanto la resistencia como la reactancia total de la línea, intensificando las pérdidas por efecto Joule y la reducción de tensión en los tramos finales del alimentador.

La caída de tensión aproximada en una línea de distribución puede expresarse mediante la siguiente relación:

$$\Delta V = I(R \cos \varphi + X \sin \varphi) \quad (4)$$

donde  $I$  es la corriente de línea,

$R$  y  $X$  representan la resistencia y reactancia totales,

y  $\varphi$  es el ángulo de desfase entre corriente y voltaje.

Esta expresión evidencia que, aun cuando la resistencia sea reducida, la componente reactiva puede contribuir de forma significativa a la caída de tensión, especialmente en alimentadores extensos con cargas inductivas predominantes (Saw & Bohre, 2025).

### 3.5 Caída de tensión y eficiencia energética en redes de media tensión

La caída de tensión en alimentadores de media tensión constituye uno de los principales indicadores del desempeño técnico de una red de distribución, debido a que refleja el efecto combinado de la corriente demandada, la impedancia longitudinal del conductor y el comportamiento del factor de potencia de las cargas conectadas. En alimentadores radiales, este fenómeno se acentúa con la distancia eléctrica desde la subestación hacia los extremos del circuito, especialmente cuando existe alta penetración de cargas inductivas y condiciones de crecimiento progresivo de demanda.

Desde una aproximación práctica empleada en sistemas de distribución, la caída de tensión puede representarse mediante la relación mostrada en la Ecuación (4), donde la componente resistiva y reactiva contribuyen simultáneamente al descenso del voltaje en el punto de recepción.

Con el fin de evaluar el cumplimiento normativo, la caída de tensión se expresa comúnmente en porcentaje respecto del valor nominal del sistema, como se indica en la Ecuación (5). Esta forma de representación facilita la comparación directa con límites regulatorios de calidad del producto.

$$\%CT = \frac{V_{nom} - V_{oper}}{V_{nom}} \cdot 100 \quad (5)$$

En el marco regulatorio ecuatoriano, la Regulación Nro. ARCONEL-009/24 establece los parámetros de calidad del servicio, incluyendo criterios técnicos asociados al nivel de tensión y su variación permitida en redes de distribución (*Regulacion-Nro.-ARCONEL-009-24-signed.pdf*, s. f.).

En paralelo, la eficiencia energética del alimentador está fuertemente condicionada por las pérdidas técnicas, donde las pérdidas por efecto Joule se modelan, en primera aproximación, con la Ecuación (6). Este término evidencia que la reducción de corriente, por ejemplo, mediante compensación reactiva o mejora del factor de potencia tiene un impacto directo en la disminución de pérdidas.

$$P_{pérd} = I^2 \cdot R \quad (6)$$

En consecuencia, el control del perfil de tensión y la reducción de pérdidas deben abordarse de forma conjunta, debido a que ambos fenómenos comparten variables causales: impedancia del alimentador, magnitud de corriente y condición del factor de potencia. En estudios recientes sobre mitigación de caída de tensión y operación de dispositivos de regulación en alimentadores de media tensión, se destaca la necesidad de coordinar estrategias Volt/Var para evitar incrementos de pérdidas y excesivas operaciones de control en campo (Hernández-Gómez et al., 2024a).

### 3.6 Compensación de potencia reactiva mediante bancos de capacitores en media tensión

Los bancos de capacitores en redes de media tensión constituyen una solución ampliamente aplicada para mejorar el perfil de tensión y reducir pérdidas técnicas, al suministrar potencia reactiva capacitiva cercana a las cargas. En términos operativos, la compensación reactiva permite disminuir la potencia reactiva demandada a través del alimentador, reduciendo la corriente y, por tanto, las pérdidas y la caída de tensión descritas en las ecuaciones anteriores.

Para dimensionar la potencia reactiva requerida de un banco de capacitores orientado a la corrección del factor de potencia, se emplea de forma estándar la relación mostrada en la Ecuación (3.8), que vincula la potencia activa de la carga con el cambio entre el estado inicial y el estado objetivo del ángulo de desfase.

$$Q_c = P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (7)$$

Donde  $P$  representa la potencia activa,  $\varphi_1$  el ángulo asociado al factor de potencia inicial y  $\varphi_2$  el ángulo asociado al factor de potencia deseado. La aplicación práctica de compensación con elementos pasivos y su efecto sobre corrientes reactivas y desempeño del sistema ha sido analizada recientemente en literatura especializada, reforzando su rol como alternativa técnica válida cuando se requiere una mejora sostenida del factor de potencia sin control dinámico (Giha Yidi et al., 2024a).

Adicionalmente, investigaciones recientes sobre planificación y ubicación óptima de capacitores evidencian mejoras simultáneas en pérdidas y perfil de tensión, lo cual respalda su inclusión como medida técnica para alimentadores de distribución con problemas de desempeño (Sharma & Ghosh, 2025), (Ahmadi Kamarposhti et al., 2025).

### 3.7 Regulación de tensión mediante reguladores de línea en media tensión

Los reguladores de tensión instalados en alimentadores de media tensión (típicamente del tipo step-voltage regulator, SVR) permiten mantener el voltaje dentro de rangos aceptables a lo largo de la línea, ajustando su relación de transformación mediante cambios de toma (taps) en respuesta a variaciones de carga. En escenarios donde la demanda crece o se presentan condiciones de alta variabilidad, estos equipos reducen el riesgo de violaciones de tensión en los extremos del alimentador y contribuyen a sostener el nivel de servicio requerido.

Sin embargo, la operación frecuente de taps puede incrementarse en presencia de perfiles de demanda exigentes o nuevas condiciones de carga, por lo que estudios recientes recomiendan coordinar la regulación de tensión con estrategias de control de potencia reactiva para evitar operación excesiva del regulador y mantener el sistema dentro de condiciones técnicas estables («(PDF) Mitigating Voltage Drop and Excessive Step-Voltage Regulator Tap Operation in Distribution Networks Due to Electric Vehicle Fast Charging», 2025).

### 3.8 Compensación dinámica de potencia reactiva mediante SVC/SVG en redes de distribución

Además de soluciones pasivas, las redes modernas incorporan dispositivos basados en electrónica de potencia, capaces de inyectar o absorber potencia reactiva de manera rápida para sostener el perfil de tensión frente a cambios abruptos de carga. Entre estos dispositivos se encuentran el SVC (Static Var Compensator) y el SVG (Static Var Generator), que aportan soporte dinámico de tensión y pueden integrarse como parte de esquemas Volt/Var cuando se requiere respuesta más ágil que la ofrecida por bancos de capacitores convencionales.

En estudios recientes se reportan mejoras del perfil de tensión y del desempeño de la red al ubicar y dimensionar compensadores estáticos en sistemas de distribución, sustentando su aplicación como alternativa técnica para mitigación de problemas de tensión (Alemu & Meseret, 2025), (Giha Yidi et al., 2024b).

Asimismo, se han desarrollado modelos y estrategias de control para SVG orientados a mantener el equilibrio y el soporte de tensión, reforzando su relevancia en el contexto de redes de distribución (Teng et al., 2025).

### 3.9 Regulación de tensión mediante ajuste de taps en transformadores

El ajuste de tomas en transformadores, particularmente mediante OLTC (On-Load Tap Changer) en transformadores de subestación o mediante taps operativos en

transformadores según su configuración, constituye un mecanismo directo para desplazar el nivel de tensión hacia rangos de cumplimiento, sin modificar la carga ni “eliminar” la caída de tensión a lo largo del alimentador. En términos prácticos, el OLTC actúa elevando o reduciendo la tensión de salida en función de condiciones medidas y criterios de control.

Investigaciones recientes proponen estrategias de control óptimo del OLTC orientadas a maximizar el cumplimiento de voltaje en alimentadores, especialmente bajo escenarios donde la variabilidad operacional puede generar condiciones de sub-voltaje o sobre-voltaje (Lim et al., 2025) .

### 3.10 Síntesis teórica y criterios técnicos de evaluación

A partir del análisis de los fundamentos teóricos desarrollados en las secciones anteriores, es posible establecer una síntesis que permita identificar los principales criterios técnicos empleados para la evaluación del desempeño de redes de distribución en media tensión. La literatura especializada coincide en que la calidad operativa de un alimentador se encuentra estrechamente relacionada con el comportamiento del perfil de tensión, el nivel de pérdidas técnicas y el estado del factor de potencia, variables que se ven directamente afectadas por la configuración del sistema, la longitud del alimentador y las características de la carga.

Desde el punto de vista teórico, la caída de tensión constituye un indicador primario de desempeño, ya que refleja el efecto combinado de la impedancia longitudinal del conductor y la magnitud de la corriente que circula por el alimentador. Tal como se expuso previamente, este fenómeno no depende únicamente de la resistencia del conductor, sino que la componente reactiva adquiere un rol relevante en redes de media tensión, especialmente en presencia de cargas predominantemente inductivas. Por esta razón, la evaluación del perfil de tensión debe considerar tanto la magnitud del descenso de voltaje como su distribución a lo largo del alimentador, prestando especial atención a los tramos más alejados de la subestación.

De manera complementaria, las pérdidas técnicas por efecto Joule representan un criterio fundamental para analizar la eficiencia energética del sistema. Estas pérdidas dependen de la corriente y de la resistencia del conductor, por lo que se ven influenciadas por el nivel de carga, el factor de potencia y la sección de los conductores. La teoría demuestra que pequeñas mejoras en el factor de potencia o reducciones en la corriente pueden generar disminuciones significativas en las pérdidas totales del alimentador, lo que se traduce en una operación más eficiente del sistema de distribución (Zhang et al., 2022), (Yu et al., 2022).

Asimismo, el factor de potencia se reconoce como un parámetro clave para el análisis integral del desempeño del alimentador, debido a su impacto directo sobre la corriente de línea y, en consecuencia, sobre la caída de tensión y las pérdidas técnicas. La literatura señala que valores bajos de factor de potencia incrementan la demanda de potencia reactiva, agravando los problemas de regulación de tensión y reduciendo la eficiencia global del sistema (Ouyang & Wang, 2023b).

En este contexto, la teoría revisada establece que la evaluación técnica de redes de media tensión debe sustentarse en criterios cuantificables y comparables, tales como: el porcentaje de caída de tensión respecto al valor nominal, el nivel de pérdidas técnicas asociadas al flujo de corriente y el comportamiento del factor de potencia bajo distintos escenarios de operación. Estos criterios constituyen la base teórica que justifica la aplicación de estrategias de compensación reactiva, regulación de tensión y ajustes operativos, las cuales son analizadas posteriormente en el desarrollo metodológico del estudio.

### 3.11 Marco normativo y criterios regulatorios aplicables

El análisis del desempeño de redes de distribución en media tensión debe realizarse en concordancia con el marco normativo vigente, el cual define los límites técnicos aceptables para garantizar la calidad del suministro eléctrico. En el caso ecuatoriano, la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL) establece los parámetros de calidad del servicio mediante regulaciones específicas que rigen la operación de los sistemas de distribución.

La Regulación Nro. ARCONEL-009/24, relativa a la calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica, define los rangos permitidos de variación de tensión en redes de media tensión, estableciendo que la desviación respecto al valor nominal no debe exceder el  $\pm 6\%$  bajo condiciones normales de operación. Este criterio normativo se convierte en un umbral técnico fundamental para la evaluación del perfil de tensión en alimentadores de distribución, ya que permite identificar condiciones de sub voltaje o sobrevoltaje que afectan la calidad del servicio y la confiabilidad del sistema (*Regulacion-Nro.-ARCONEL-009-24-signed.pdf*, s. f.).

Desde una perspectiva técnica, el cumplimiento de los límites regulatorios no solo tiene implicaciones normativas, sino que también está directamente vinculado con la protección de equipos eléctricos, la estabilidad de la operación y la reducción de pérdidas técnicas. La literatura reciente destaca que la aplicación de estrategias de regulación de tensión y compensación reactiva debe orientarse prioritariamente a asegurar el cumplimiento de estos límites, especialmente en alimentadores extensos o con crecimiento progresivo de la demanda (Hernández-Gómez et al., 2024b).

En este sentido, el marco normativo proporciona el criterio de referencia frente al cual se evalúa el desempeño del sistema de distribución, permitiendo contrastar los resultados técnicos obtenidos con los valores aceptables establecidos por el ente regulador. La integración de estos criterios regulatorios en el análisis teórico refuerza la pertinencia del estudio y garantiza que las soluciones técnicas consideradas se alineen con las exigencias operativas y legales del sistema eléctrico nacional, Reguladores de voltaje en MV

Los reguladores en MV, son instalados directamente en las líneas, con el objetivo principal de mantener el nivel de voltaje dentro del rango permitido, así también se los conoce como reguladores trifásicos de línea.

Su funcionamiento se basa en un transformador con “TAPs automático el cual puede variar a lo largo del día dependiendo de la carga y este puede subir o bajar el voltaje entre un + 10% y – 10% en pasos pequeños de 0.75%” (Monga et al., 2023).

La configuración más común es utilizar “tres reguladores monofásicos que son muy utilizadas en zonas rurales, y se instalan a la mitad de la línea cuando existe presencia de caída de voltaje, también antes de carga industriales, después de ramales extensión de conductores y en puntos en donde la caída de tensión sobre pasa la regulación de la ARCONEL del 6%” (Monga et al., 2023).

El regulador “puede mejorar el voltaje hasta un 12% lo cual es indicado para alimentadores con extensiones de 10 a 20 km con una carga progresiva en proceso de crecimiento” (Monga et al., 2023).

### 3.12 Compensador estático de potencia reactiva (SVS)

“Es parte de una solución moderna para mejorar el comportamiento eléctrico de redes en media tensión encargadas de la distinción de corriente eléctrica, en donde se presentan caídas de voltaje un bajo factor de potencia o variaciones en el tiempo de las cargas”. A diferencia de otras soluciones el (SVS) emplean electrónica de potencia que le permite actuar de forma casi instantánea los cambios de cargas y la demanda requerida (Monga et al., 2023).

La forma y la manera de actuar de un SVS, “es el inyectar o absorber de forma controlada potencia reactiva dependiendo de la necesidad de la red sin necesidad de modificar la relación de transformación o utilizar elementos de acción mecánica” (Hingorani & Gyugyi, 2000).

En la práctica “la instalación de SVS optimiza la calidad de servicio y suministro eléctrico así también contribuye al cumplimiento de normativas de voltaje, factor de potencia, establecida por los entes reguladores, lo que le convierte en una solución técnica eficaz, sólida y económicamente rentable en redes modernas actualmente” (Monga et al., 2023).

### 3.12.1 Ventajas

- Mejora el perfil de voltaje
- Aumenta la estabilidad del sistema
- Protección de equipos eléctricos frente de condiciones fuera de norma.

## 3.13 Ajuste de TAPs de transformadores

Esta es una de las soluciones más directas y efectivas que se puede encontrar para regular los niveles de voltaje en las redes de media tensión, “especialmente donde existen caídas de voltaje y mediante el TAPs se puede regular la relación de transformación sin alterar o afectar la potencia o demanda de la carga” (Martínez, Castillo, & Gómez, 2021).

Los TAPs pueden estar “ubicados en el lado de alto voltaje y ofrecen ajustes discretos entre el +- el 5% con pasos entre el 1.25 % o el 2.5% dependiendo del diseño del equipo”. Una característica principal del ajuste de los “TAPs es que no corrige la caída de tensión si no que la compensa por medio de la relación de vueltas de los devanados primario y secundario”, así también no corrige el factor de potencia, más bien actúa directamente en relación de mejorar los niveles de voltaje (IEEE, 2010).

En transformadores de distribución en el “ajuste del TAPS, se puede realizar en  $-3$  y  $+3$ , es decir se puede mejorar hasta un 7.5 %, tomando en cuenta que la regulación o los pasos del TAPs es del 2.5 % como comúnmente vienen en los transformadores” (Castillo, & Gómez, 2021).

## 4. Metodología

---

El estudio se desarrolló sobre un alimentador primario de 13,8 kV perteneciente a la Subestación La Esperanza, empleando un enfoque cuantitativo–analítico basado en modelado y simulación en el software DIGSILENT PowerFactory. La metodología se orientó a caracterizar el comportamiento del alimentador bajo condiciones actuales de carga y bajo condiciones de incremento de demanda (sobrecarga), evaluando variables eléctricas de operación como corriente, tensión, potencias activa y reactiva, y el cumplimiento del criterio de calidad de tensión definido por la normativa nacional.

### 4.1 Enfoque y diseño

El enfoque metodológico es cuantitativo, dado que se analizan magnitudes eléctricas expresadas en unidades de ingeniería (kV, A, MW, MVAR y p.u.) obtenidas mediante simulación computacional. El diseño es no experimental, con análisis comparativo de escenarios, donde se simulan condiciones operativas del mismo sistema sin intervención física en la red, permitiendo contrastar: 1 el caso base, 2 el escenario con crecimiento de demanda, y 3 escenarios con aplicación de mejoras.

### 4.2 Sistema objeto de estudio

El sistema objeto de estudio corresponde al alimentador “La Esperanza 4” de la Subestación La Esperanza. La topología georreferenciada del alimentador, obtenida del sistema GIS de una empresa distribuidora, se presenta en la Figura 1.

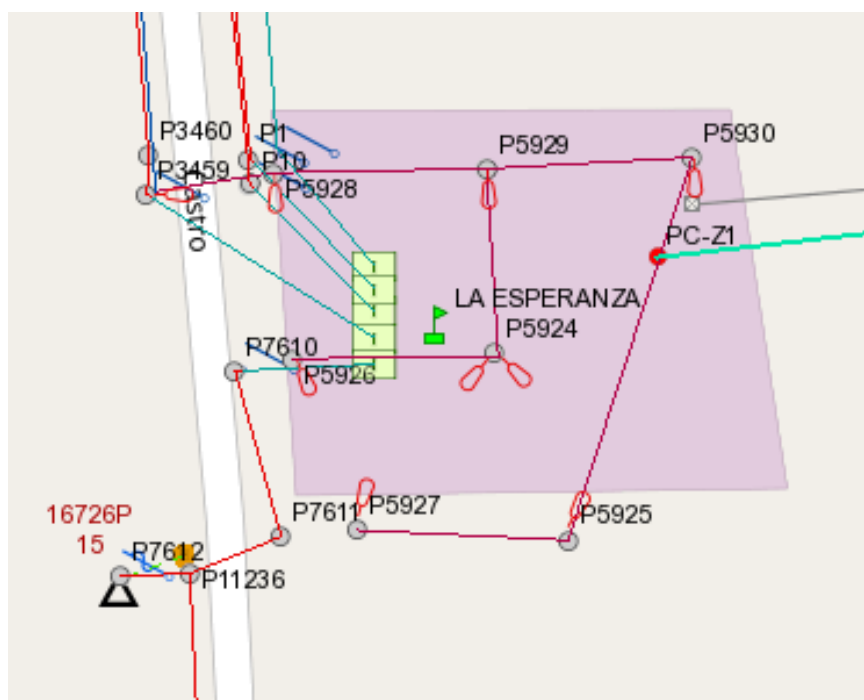


Figura 1 Topología georreferenciada del alimentador La Esperanza 4 (GIS).

### 4.3 Datos de entrada y caracterización eléctrica del alimentador

Para garantizar coherencia entre el sistema real y el modelo de simulación, se recopilaron datos técnicos de conductores, distancias, cargas y transformadores del alimentador.

#### 4.3.1 Parámetros del conductor del alimentador

Los parámetros eléctricos del conductor principal del alimentador (tipo, calibre, GMR, resistencias en diferentes condiciones térmicas y coeficiente de temperatura) se presentan en la Tabla 1.

Datos de Conductor Alimentador La Esperanza 4								
Tipo	Calibre	GMR (m)	Material	R DC 20° C	R AC 20° C	R AC 75° C	Coef .Tem Al	XL
ACSR Raven	1/0	0,00325	6 AU/1 Ac	0,522 $\Omega/km$	0,5869 $\Omega/km$	0,717 $\Omega/km$	0,0039 1/ K	0,4628 $\Omega/km$

Tabla 1. Datos del conductor del alimentador La Esperanza 4.

### 4.3.2 Tramos y cargas del alimentador

El diagrama unifilar general del alimentador se presenta en la Figura 2. Las distancias por tramo y cargas asociadas se reportan en la Tabla 2, lo cual permite establecer la distribución espacial de la demanda a lo largo del alimentador.

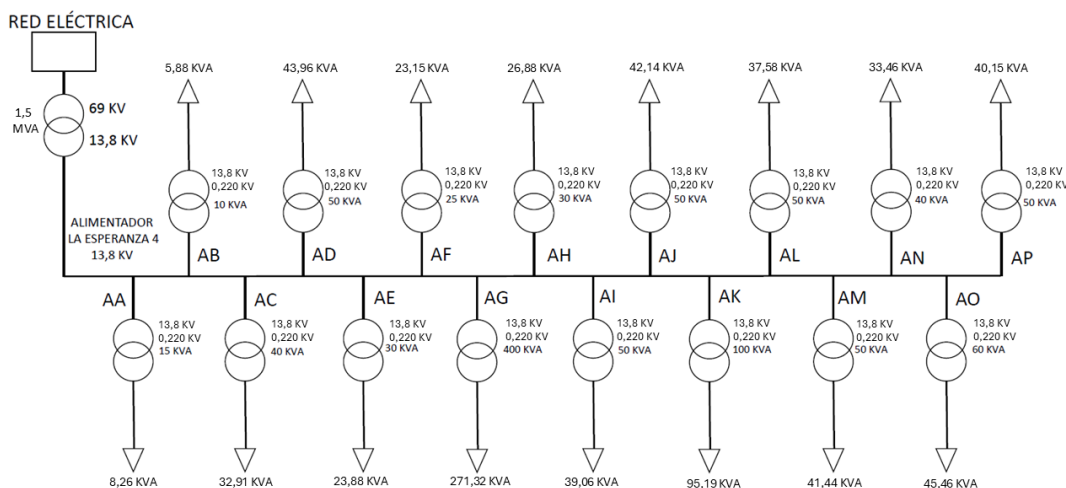


Figura 2 Diagrama unifilar del alimentador La Esperanza 4

La Tabla 2 presenta los valores de carga y las distancias entre los transformadores ubicados a lo largo de todo el alimentador La Esperanza 4. Asimismo, en la Tabla 3 se presentan los valores de cargabilidad y factor de potencia de las cargas situadas en el alimentador.

Distancia y cargas del Alimentador La Esperanza 4								
	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH
TRAMO (Km)	0.042	0.550	0.725	1.437	1.873	2.533	3.448	5.014
CARGA (KVA)	15	10	40	50	30	25	400	30
	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP
TRAMO (Km)	5.089	6.252	7.890	10.235	12.390	14.470	16.585	18.326
CARGA (KVA)	50	50	100	50	50	40	60	50

Tabla 2 Distancias y cargas por tramo del alimentador La Esperanza 4.

### 4.3.3 Transformadores de distribución del alimentador

Los datos nominales y operativos de transformadores (kVA nominal, kVA RMS, porcentaje de carga y factor de potencia) se presentan en la Tabla 3, utilizada como base para el modelado de carga en PowerFactory.

Datos de transformadores en Alimentador La Esperanza 4					
Barra #	Trafo	KVA (Nominal)	KVA (RMS)	% CARGA	FP
1	trafo-01	15	8,26	55,07	0,883
2	trafo-02	10	5,88	58,80	0,841
3	trafo-03	40	32,91	82,28	0,895
4	trafo-04	50	43,96	87,92	0,911
5	trafo-05	30	23,88	79,60	0,912
6	trafo-06	25	23,15	92,60	0,891
7	trafo-07	400	271,32	67,83	0,876
8	trafo-08	30	26,88	89,60	0,891
9	trafo-09	50	39,06	78,12	0,852
10	trafo-10	50	42,14	84,28	0,881
11	trafo-11	100	95,19	95,19	0,862
12	trafo-12	50	37,58	75,16	0,874
13	trafo-13	50	41,44	82,88	0,893
14	trafo-14	40	33,46	83,65	0,838
15	trafo-15	60	45,25	75,42	0,815
16	trafo-16	50	40,15	80,30	0,864

Tabla 3 Datos de transformadores del alimentador La Esperanza 4

## 4.4 Herramienta de simulación y configuración del modelo

Las simulaciones se realizaron en DigSILENT PowerFactory, construyendo el modelo del alimentador con base en la topología y parámetros recopilados (Sección 4.3). Se configuró un flujo de carga trifásico para obtener magnitudes operativas por barra y por tramo (tensión de línea VLL, corriente, potencias P y Q y tensión en p.u.).

## 4.5 Escenarios de análisis

Se definieron los siguientes escenarios, que permiten comparar el desempeño del sistema en el tiempo y bajo intervención:

Escenario 1. Caso base (sin mejoras): condición actual del alimentador con los datos de carga y equipo recopilados.

Escenario 2. Crecimiento de demanda: incremento de carga a 3 años y 5 años (según Tabla 6), evaluando su impacto en tensión, corriente y pérdidas.

Escenario 3. Medidas de mejora: evaluación individual de alternativas:

1 ajuste de TAP, 2 banco de capacitores, 3 SVS, 4 aumento de sección de conductor.

## 4.6 Variables e indicadores de evaluación

Los indicadores empleados para evaluar el desempeño del alimentador fueron:

- Tensión de línea VLL y tensión en p.u. (U) por barra.
- Corriente (I) por tramo.
- Potencias activa y reactiva (P, Q) asociadas al sistema.
- Pérdidas totales activas y reactivas del alimentador.
- Caída de tensión absoluta y porcentual frente al valor nominal.
- Ecuación (4.1) – Caída de tensión porcentual
- Ecuación (4.2) – Pérdidas por efecto Joule

## 4.7 Procedimiento metodológico

El procedimiento seguido fue:

- Recolección de datos (GIS, conductor, tramos/cargas, transformadores).
- Construcción del modelo en PowerFactory con la topología y parámetros eléctricos.
- Simulación del caso base y extracción de salidas por barra/tramo.
- Simulación del crecimiento de demanda (3 y 5 años) y comparación frente al caso base.
- Implementación de medidas de mejora y simulación individual de cada alternativa.
- Análisis comparativo de perfiles de tensión, pérdidas y cumplimiento del umbral normativo.

---

## 5. Resultados

Los resultados del estudio se obtuvieron a partir de simulaciones de flujo de carga realizadas en DigSILENT PowerFactory, complementadas con cálculos técnicos referenciales para documentar la coherencia de parámetros eléctricos del conductor y la estimación de variables de operación. En este capítulo se reportan resultados del caso base, escenarios de crecimiento de demanda (a 3 y 5 años) y escenarios con aplicación de mejoras, analizando las variables de interés: tensión de línea (VLL), tensión en por unidad (U (p.u.)), corriente (I), y potencias activa y reactiva (P y Q). Asimismo, se verifica el cumplimiento del criterio regulatorio de caída de tensión del 6 %, establecido por la normativa nacional vigente aplicada al sistema de distribución en media tensión.

### 5.1 Verificación de parámetros eléctricos y validación de cálculos

#### 5.1.1 Geometría de la línea y calculo referencial de reactancia

Para documentar la geometría del arreglo trifásico considerado en el alimentador, se utiliza la configuración horizontal centrada mostrada en la Figura 3, que sirve como referencia de las distancias entre fases.

#### **Reactancia (XL)**

##### **Arreglo horizontal cruceta de poste CENTRADA**

La figura 3 es una referencia de las distancias en el arreglo horizontal de una cruceta centrada en líneas de media tensión.

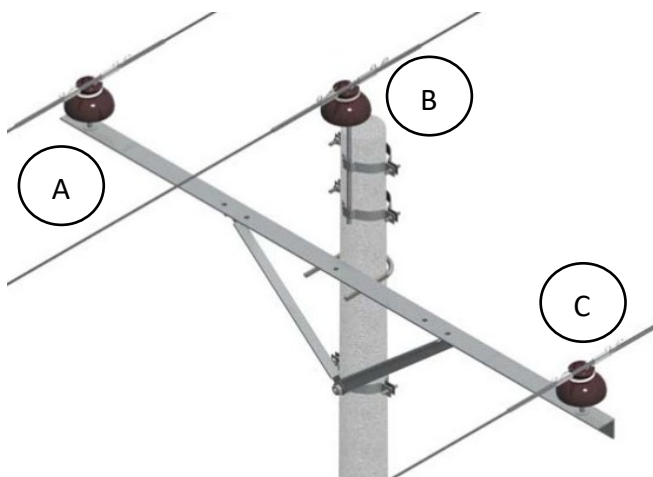


Figura 3 Estructura trifásica centrada en media tensión.

Con base en la geometría indicada (DAB, DBC y DCA), puede definirse la distancia media geométrica (GMD) empleada en formulaciones de parámetros de línea, conforme a:

Distancia entre fases: DAB = 120 m, DBC= 1.20m DCA =2.40 m

$$D_m = (1,20 \cdot 1,20 \cdot 2,40)^{1/3} = 1,506 \text{ metros}$$

$$XL = 0,0754 \ln \left( \frac{1,512}{0,00325} \right) = 0,4628 \text{ } \Omega/\text{km}$$

Resistencia AC a 75°C del Alimentador La Esperanza 4

Coficiente de aluminio= 228

R 75°C= 0,717  $\Omega/\text{km}$

$$R_{AC \text{ } 20^\circ\text{C}} = R_{75^\circ\text{C}} * \frac{\text{Cof. A} + 20}{\text{Cof. A} + 75} = 0,717 \text{ } \Omega/\text{km} \cdot \frac{228 + 20}{228 + 75} = 0,5849 \text{ } \Omega/\text{km}$$

Para el conductor seleccionado, la resistencia equivalente a la condición térmica de operación se adopta según la resistencia AC reportada en la Tabla 1. En este estudio se emplea la resistencia RAC a 75 °C, por ser representativa de condiciones de operación bajo carga.

### 5.1.2 Verificación parcial en el tramo AA

Con fines de verificación, se documenta el cálculo parcial en el tramo AA, incluyendo resistencia, reactancia, factor de potencia y pérdidas por efecto Joule. Este ejercicio permite corroborar consistencia entre parámetros teóricos y el comportamiento observado en la simulación.

En este apartado se calculó la resistencia y la reactancia de la línea en el tramo (AA), del alimentador La Esperanza 4

$$R_{AA} = 0,5869 \cdot 0,042 = 0,0246 \text{ ohm/fase}$$

$$XL_{AA} = 0,4628 \cdot 0,042 = 0,0194 \text{ ohm/fase}$$

Además, se obtuvo el factor de potencia de la línea en el tramo (AA):

$$Z = R + XL = 0,0246 + j0,0194 \text{ ohm/fase}$$

$$|Z| = \sqrt{(0,0246)^2 + (0,0194)^2} = 0,0313 \text{ ohm/fase}$$

$$Fp = \frac{R}{|Z|} = \frac{0,0246}{0,0313} = 0,79 \text{ Inductivo}$$

Para los cálculos realizados se utilizaron los valores de la Tabla 3, en la cual se presentan la potencia aparente (S), expresada en kVA, y el factor de potencia individual de cada transformador. Siguiendo con el cálculo de potencia activa y reactiva individuales de las cargas conectadas a los transformadores 01 a 16.

A continuación se obtienen las potencias para el trafo 01, alimentador La Esperanza 4

$$P_{01} = S_{\text{trafo 01}} \cdot Fp_{\text{trafo 01}}$$

$$P_{01} = 8,26 \text{ KVA} \cdot 0,883 = 7,29 \text{ KW}$$

$$Q_{01} = \sqrt{S_{\text{trafo 01}}^2 - P_{01}^2} = \sqrt{(8,26 \text{ KVA})^2 - (7,29 \text{ KW})^2} = 3,88 \text{ KVAr}$$

Siguiendo este mismo procedimiento para el resto de las cargas, se obtuvo la potencia activa, reactiva y factor de potencia total en el alimentador La Esperanza 4, tomando como datos los valores calculados parciales de cada transformador.

$$S_{TOTAL} = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(707,69 \text{ kVA})^2 + (393,48)^2} = 809,72 \text{ kVA}$$

Con el valor obtenido del cálculo de la potencia aparente total se calculó el factor de potencia total de la carga del alimentador la Esperanza 4

$$Fp = \frac{P \text{ Total}}{S \text{ Total}} = \frac{707,69 \text{ KW}}{809,72} = 0,874$$

Asumiendo que no existe caída de tensión en la barra del secundario del transformador de potencia de la subestación (barra de 13,8 kV), se determinó la corriente en el tramo (AA) del alimentador La Esperanza 4

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot Fp \cdot VLL} = \frac{707,69 \text{ KW}}{\sqrt{3} \cdot 0,874 \cdot 13,8 \text{ kV}} = 34 \text{ Amp}$$

## 5.2 Resultados del caso base sin mejoras

La simulación del alimentador La Esperanza 4 en PowerFactory se presenta en la Figura 4. Los resultados por tramo/barra del caso base se consolidan en la Tabla 4, donde se evidencia el comportamiento decreciente del nivel de tensión conforme aumenta la distancia desde la subestación.

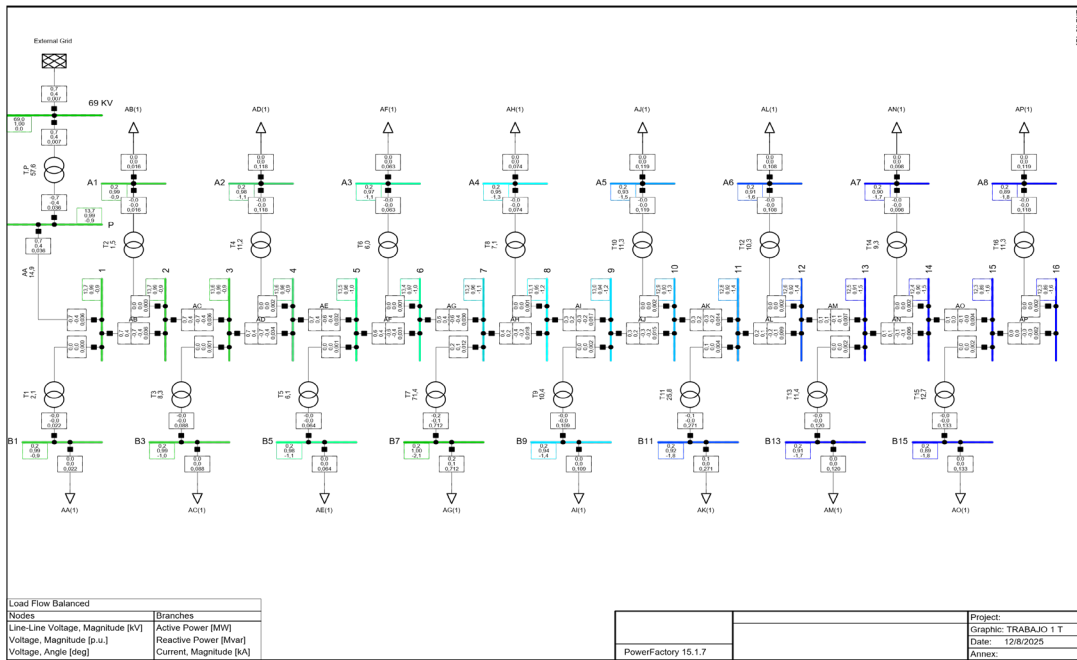


Figura 4 Simulación y datos de alimentador La Esperanza 4

En la Tabla 4 se mostraron los datos obtenidos mediante simulaciones, los cuales indicaron la existencia de pérdidas de voltaje incluso en tramos cercanos a la subestación. Así mismo el voltaje mostrado en el tramo AA, es la caída total que existe en la barra del secundario del transformador de potencia de la subestación. De igual manera, a partir del tramo AI se alcanzó la pérdida máxima permitida del 6 %, registrándose pérdidas de voltaje de aproximadamente 0,8 kV, las cuales aumentaron de forma progresiva hasta el último tramo del alimentador.

DATOS DE SIMULACIÓN DEL ALIMENTADOR LA ESPERANZA 4								
Barra #	Tramo	Long. (Km)	P (MW)	Q (MVAR)	S (MVA)	I (A)	kV	U (p.u)
1	AA	0,042	0,748	0,448	0,872	36	13,7	0,99
2	AB	0,55	0,738	0,427	0,853	36	13,7	0,99
3	AC	0,725	0,731	0,423	0,845	36	13,6	0,99
4	AD	1,437	0,695	0,404	0,804	34	13,6	0,98
5	AE	1,873	0,652	0,383	0,756	32	13,6	0,98
6	AF	2,533	0,627	0,37	0,728	31	13,4	0,97
7	AG	3,448	0,602	0,356	0,699	30	13,2	0,96
8	AH	5,014	0,359	0,217	0,419	18	13,1	0,95
9	AI	5,089	0,332	0,203	0,389	17	13,0	0,94
10	AJ	6,252	0,296	0,18	0,346	15	12,9	0,93
11	AK	7,89	0,257	0,158	0,302	14	12,8	0,92
12	AL	10,235	0,172	0,107	0,203	9	12,6	0,92

13	AM	12,39	0,138	0,087	0,163	7	12,5	0,91
14	AN	14,47	0,1	0,067	0,120	6	12,4	0,9
15	AO	16,585	0,072	0,048	0,087	4	12,3	0,89
16	AP	18,326	0,035	0,021	0,041	2	12,3	0,89

Tabla 4 Datos de simulación sin mejoras de Alimentador la Esperanza 4

Conforme a los datos de la Tabla 4, se observa que el alimentador alcanza condiciones críticas de caída de tensión a partir del tramo AI, aproximándose al límite normativo, y presentando una disminución progresiva hacia los tramos finales.

### 5.2.1 Pérdida parcial y total del alimentador en el caso base

En la Tabla 5 se presentaron los datos correspondientes a la carga instalada en el alimentador, la cual fue de 0,748 MW de potencia activa y 0,448 MVar de potencia reactiva. Asimismo, se registraron pérdidas de 0,037 MW y 0,043 MVar, lo que representó pérdidas del 4,94 % de potencia activa y del 9.59 % de potencia reactiva, respectivamente. Así también se puede observar que en el tramo AA no existe perdidas de potencia activa.

Datos de simulación de pérdida Parcial y total del alimentador La Esperanza 4						
Tramo	P envío (MW)	P recepción (MW)	$\Delta P$ (MW)	Q envío (MVar)	Q recepción (MVar)	$\Delta Q$ (MVar)
AA	0,748	0,748	0	0,448	0,433	0,015
AB	0,738	0,736	0,002	0,427	0,426	0,001
AC	0,731	0,73	0,001	0,423	0,421	0,002
AD	0,695	0,692	0,003	0,404	0,401	0,003
AE	0,652	0,648	0,004	0,383	0,38	0,003
AF	0,627	0,622	0,005	0,37	0,367	0,003
AG	0,602	0,596	0,006	0,356	0,352	0,004
AH	0,359	0,356	0,003	0,217	0,215	0,002
AI	0,332	0,329	0,003	0,203	0,201	0,002
AJ	0,296	0,294	0,002	0,18	0,178	0,002
AK	0,257	0,254	0,003	0,158	0,156	0,002
AL	0,172	0,171	0,001	0,107	0,106	0,001
AM	0,138	0,137	0,001	0,087	0,086	0,001
AN	0,1	0,099	0,001	0,067	0,066	0,001
AO	0,072	0,071	0,001	0,048	0,047	0,001
AP	0,035	0,034	0,001	0,021	0,021	0

		<b>Total, perdida</b>	<b>0,037</b>		<b>Total, perdida</b>	<b>0,043</b>
--	--	---------------------------	--------------	--	---------------------------	--------------

Tabla 5 Datos de simulación de pérdida parcial y total del alimentador La Esperanza 4.

Asimismo, se observó que en el tramo AA no se registraron pérdidas de potencia activa; sin embargo, la caída de tensión aproximada de 0,1 kV corresponde a la caída de tensión acumulada a lo largo de todo el alimentador. Esta condición se origina desde la subestación, específicamente desde el secundario del transformador de potencia.

## 5.3 Resultados del crecimiento de demanda

### 5.3.1 Comportamiento por barra/tramo a 3 y 5 años

El crecimiento de la demanda se presenta en la Tabla 6, donde se evidencia el incremento de carga por transformador y su efecto en tensión y corriente para horizontes de 3 y 5 años. La tendencia general muestra incremento de exigencia operativa, con mayores efectos hacia los tramos finales.

A partir de los datos presentados en la Tabla 6, se observó un crecimiento progresivo de la demanda en el alimentador La Esperanza 4, tanto a 3 como a 5 años. En general, la carga actual de los transformadores presentó incrementos moderados en la mayoría de las barras, siendo más notorios en los tramos finales del alimentador, donde el crecimiento de la demanda fue más significativo. Este aumento se reflejó principalmente en la potencia demandada, la corriente y la caída de voltaje, lo que evidenció una mayor exigencia sobre la red a medida que transcurrió el tiempo. Este comportamiento confirmó la necesidad de considerar medidas de mejora y refuerzo del sistema, con el fin de garantizar una operación adecuada y mantener los niveles de voltaje dentro de los límites permitidos.

Datos de crecimiento de carga en Alimentador La Esperanza 4									
Tramo	Trafos	Carga Trafos (KVA)		Carga Trafos (KVA)		Crecimiento 3 años		Crecimiento 5 años	
		Nominal	Actual	3 años	5 años	kV	I (A)	VLL	I (A)
1	AA	15	809,72	891,6	1050	13,7	40	13,6	48
2	AB	10	802,25	882,5	1035	13,6	40	13,6	47

3	AC	40	796,37	876,0	1025	13,6	39	13,6	47
4	AD	50	763,46	839,8	985	13,5	38	13,5	45
5	AE	30	719,5	791,5	935	13,4	36	13,4	43
6	AF	25	695,62	765,2	905	13,3	35	13,2	41
7	AG	400	672,47	739,8	880	13,2	34	13,1	40
8	AH	30	401,15	441,3	480	13,0	20	12,9	22
9	AI	50	374,27	411,7	450	12,9	19	12,8	21
10	AJ	50	335,21	368,8	400	12,8	17	12,6	19
11	AK	100	293,07	322,4	350	12,6	15	12,5	17
12	AL	50	197,88	217,7	250	12,5	10	12,3	12
13	AM	50	160,3	176,4	200	12,4	8	12,2	10
14	AN	40	118,86	130,8	150	12,3	6	12,0	7
15	AO	60	85,4	94,0	110	12,2	4	11,9	5
16	AP	50	40,15	44,2	50	12,1	2	11,9	2

Tabla 6 Datos de simulación de crecimiento anual del Alimentador la Esperanza 4

Nota: Con el crecimiento anual de la carga se observó un incremento en las caídas de voltaje desde el secundario del transformador de potencia de la subestación, lo que generó una acumulación progresiva de pérdidas en cada uno de los tramos hasta llegar al tramo 16, donde se registró una caída de tensión de 1,7 kV, tomando como referencia los 13, 8 KV de la red primaria.

### 5.3.2 PERDIDAS TOTALES CON CRECIMIENTO DE DEMANDA

Las pérdidas globales del alimentador bajo crecimiento de demanda se resumen en la Tabla 7, evidenciando el aumento de pérdidas conforme se incrementa la carga y se elevan las corrientes de operación.

<b>Crecimiento de carga de transformadores de Alimentador La Esperanza 4</b>							
Crecimiento a 3 años				Crecimiento a 5 años Carga Nominal			
Total, de carga		Total, de Pérdidas		Total, de carga		Total, de Pérdidas	
MW	MVAr	MW	MVAr	MW	MVAr	MW	MVAr
0,78	0,44	0,04	0,06	0,91	0,51	0,06	0,08

Tabla 7 Carga y pérdidas totales del alimentador con crecimiento a 3 y 5 años.

## 5.4 Soluciones recomendadas para mejorar la caída de tensión en MT

Con el fin de mejorar el desempeño eléctrico del alimentador La Esperanza 4 y mitigar los problemas asociados a las caídas de voltaje y a las pérdidas técnicas que se presentaron a lo largo del conductor, se plantearon diversas alternativas de solución. Estas recomendaciones permitieron optimizar la operación del sistema eléctrico y contribuyeron a garantizar una adecuada calidad del servicio frente al crecimiento de la demanda. Entre las principales alternativas consideradas se encontraron las siguientes:

- 1) Ajuste del TAP de transformadores.
- 2) Instalación de banco de capacitores.
- 3) Instalación de un compensador estático de potencia reactiva (SVS).
- 4) Aumento de sección del conductor.

### 5.3.1 Ajustar el TAP de transformadores.

En la Figura 5 se observaron los datos de la simulación en la que se realizó el ajuste de los TAP de los transformadores, el cual consistió en regular la relación de transformación entre el bobinado primario en media tensión (MV) y el bobinado secundario en baja tensión (BV). De este modo, en el simulador se efectuó el ajuste del TAP hasta en tres posiciones en aquellos transformadores donde se presentaron caídas de voltaje significativas, lo que permitió alcanzar una mejora de hasta el 7,5 % en el nivel de voltaje.

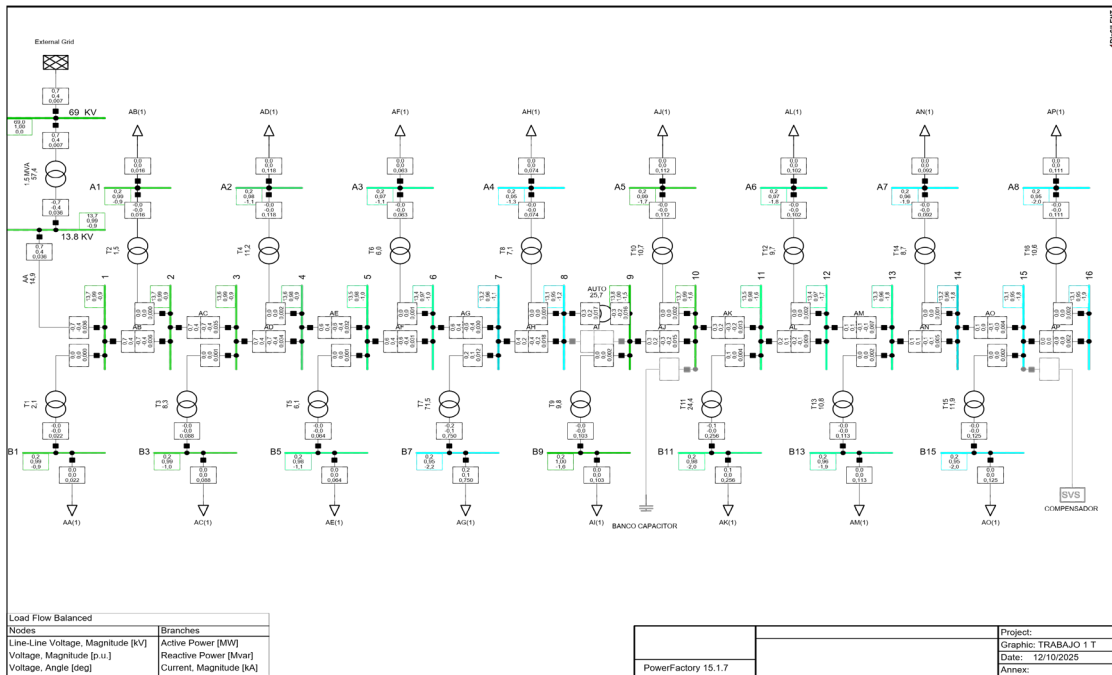


Figura 5 Simulación y datos con TAPs de transformadores

En la Tabla 8 se presentó una de las soluciones más rápidas y eficientes, correspondiente a la regulación de voltaje mediante el ajuste de TAP. A partir de los resultados obtenidos, se observó que no existieron puntos críticos que superaran el porcentaje máximo permitido de caída de voltaje, de acuerdo con la normativa de la ARCONEL. De este modo, se evidenció una mejora general en los niveles de voltaje a lo largo de todo el alimentador primario La Esperanza 4.

SIMULACIÓN CON TAP DE REGULADOR DE VOLTAJE EN LA BARRA 9, AI								
Barra #	Tramo	Long. (Km)	Carga (KVA)	I (A)	kV	U (p.u)	P (MW)	Q (MVar)
1	AA	0,042	809,72	36	13,7	0,99	0,7	0,4
2	AB	0,550	802,25	36	13,7	0,99	0,7	0,4
3	AC	0,725	796,37	36	13,6	0,99	0,7	0,4
4	AD	1,437	763,46	34	13,6	0,98	0,7	0,4
5	AE	1,873	719,5	31	13,6	0,98	0,6	0,4
6	AF	2,533	695,62	30	13,4	0,97	0,6	0,4
7	AG	3,448	672,47	30	13,2	0,96	0,6	0,4
8	AH	5,014	401,15	18	13,1	0,95	0,4	0,2
9	AI	5,089	374,27	17	13,8	0,99	0,3	0,2
10	AJ	6,252	335,21	15	13,7	0,99	0,3	0,2
11	AK	7,890	293,07	14	13,5	0,98	0,2	0,1
12	AL	10,235	197,88	9	13,4	0,97	0,2	0,1
13	AM	12,390	160,3	7	13,3	0,96	0,1	0,1
14	AN	14,470	118,86	6	13,2	0,96	0,1	0,75

<b>15</b>	<b>AO</b>	16,585	85,4	4	13,1	0,95	0,075	0,075
<b>16</b>	<b>AP</b>	18,326	40,15	2	13,1	0,95	0,05	0,05

Tabla 8 Datos de simulación con TAPs de transformador.

### 5.3.2 Instalación de banco de capacitores, en barra AJ

La Figura 6 presentó la instalación y los datos de simulación de un banco de capacitores, el cual inyectó una potencia reactiva capacitiva de 0,6 MVar a la red, contribuyendo a la mejora del factor de potencia y, en consecuencia, al incremento del nivel de voltaje. En la Tabla 10 se observaron las mejoras obtenidas en los perfiles de voltaje; el valor de 0,6 MVar correspondió a una inyección adecuada, ya que permitió mantener los niveles de voltaje iguales o inferiores a 13,8 kV, asegurando que no se produjera una sobrecompensación.

De igual manera, la inyección del banco de capacitores se realizó en la barra AJ, debido a que en este punto se presentó el mayor porcentaje permitido de caída de voltaje, lo que lo convirtió en el lugar más adecuado para aplicar la compensación y lograr un efecto más eficiente sobre el sistema.

<b>Datos Banco Capacitor</b>			
Voltaje (KV)	Tipo	MVar	# Fase
13,8	Capacitivo	0,6	3

Tabla 9 Datos de Banco de capacitor

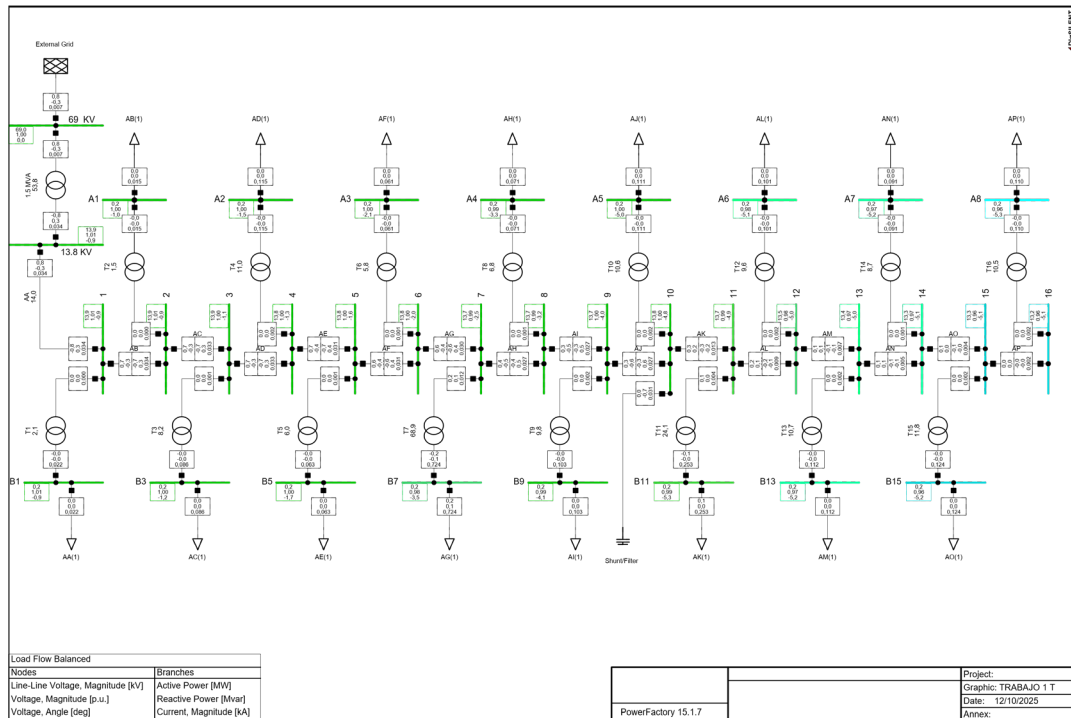


Figura 6 Simulación y datos con inyección de capacitor a la red

En la Tabla 10 se mostraron los valores y datos del banco de capacitores instalado en la barra 10, correspondiente al tramo AJ, el cual presentó mejoras significativas en el perfil de voltaje. El valor de potencia reactiva capacitiva inyectada fue de 0,6 MVAR, lo que permitió que todo el sistema saliera del rango crítico de caída de voltaje. Asimismo, este valor de potencia reactiva resultó adecuado, ya que la instalación de valores superiores a 0,6 MVAR tendió a elevar los niveles de voltaje por encima de 13,8 kV en las barras cercanas, lo cual evidenció un fenómeno de sobrecompensación.

Datos de Instalación de banco de capacitores, en la barra AJ								
Barra #	Tramo	Long. (Km)	Carga (KVA)	I (A)	kV	U (p.u)	P (MW)	Q (MVar)
1	AA	0,042	809,72	31	13,8	1	0,7	0,2
2	AB	0,550	802,25	31	13,8	1	0,7	0,2
3	AC	0,725	796,37	30	13,8	1	0,7	0,2
4	AD	1,437	763,46	28	13,8	1	0,7	0,2
5	AE	1,873	719,5	27	13,7	0,99	0,6	0,2
6	AF	2,533	695,62	26	13,7	0,99	0,6	0,2
7	AG	3,448	672,47	22	13,6	0,99	0,4	0,4
8	AH	5,014	401,15	21	13,6	0,99	0,3	0,4
9	AI	5,089	374,27	21	13,6	0,98	0,3	0,4
10	AJ	6,252	335,21	13	13,6	0,98	0,3	0,2

11	AK	7,890	293,07	9	13,5	0,98	0,2	0,1
12	AL	10,235	197,88	7	13,4	0,97	0,1	0,1
13	AM	12,390	160,3	15	13,3	0,96	0,1	0,1
14	AN	14,470	118,86	15	13,2	0,95	0,1	0,075
15	AO	16,585	85,4	16	13,1	0,95	0,1	0,075
16	AP	18,326	40,15	2	13,0	0,95	0,075	0,075

Tabla 10 Datos de simulación con inyección de banco de capacitores.

### 5.3.3 Instalación de compensador estático de potencia reactiva

En este apartado se realizó la simulación de la implementación de un compensador estático de potencia reactiva (SVS) de 1 MVar, seleccionando un primer paso de 0,33 MVar y considerando un crecimiento progresivo de la demanda hasta alcanzar el valor máximo de 1 MVar. Este dispositivo actuó sobre el alimentador La Esperanza 4, inyectando o absorbiendo potencia reactiva de forma controlada, de acuerdo con las necesidades operativas de la línea.

Entre las soluciones analizadas, esta alternativa presentó el mejor desempeño en la mejora de los niveles de voltaje en media tensión, debido a que el SVS respondió de manera instantánea a las variaciones de carga. Asimismo, el compensador se simuló en la barra AO, ya que este tipo de equipos se recomienda instalar en los tramos finales del circuito, donde pueden compensar eficazmente hacia ambos lados de la línea. Su instalación en la parte media del alimentador podría generar sobrecompensaciones, provocando niveles de voltaje superiores a 13,8 kV.

<b>Compensador estático (SVS)</b>			
Voltaje (KV)	Tipo	MVar paso 1	#Fase
13,8	Capacitivo	0,33	3

Tabla 11 Datos de compensador SVS

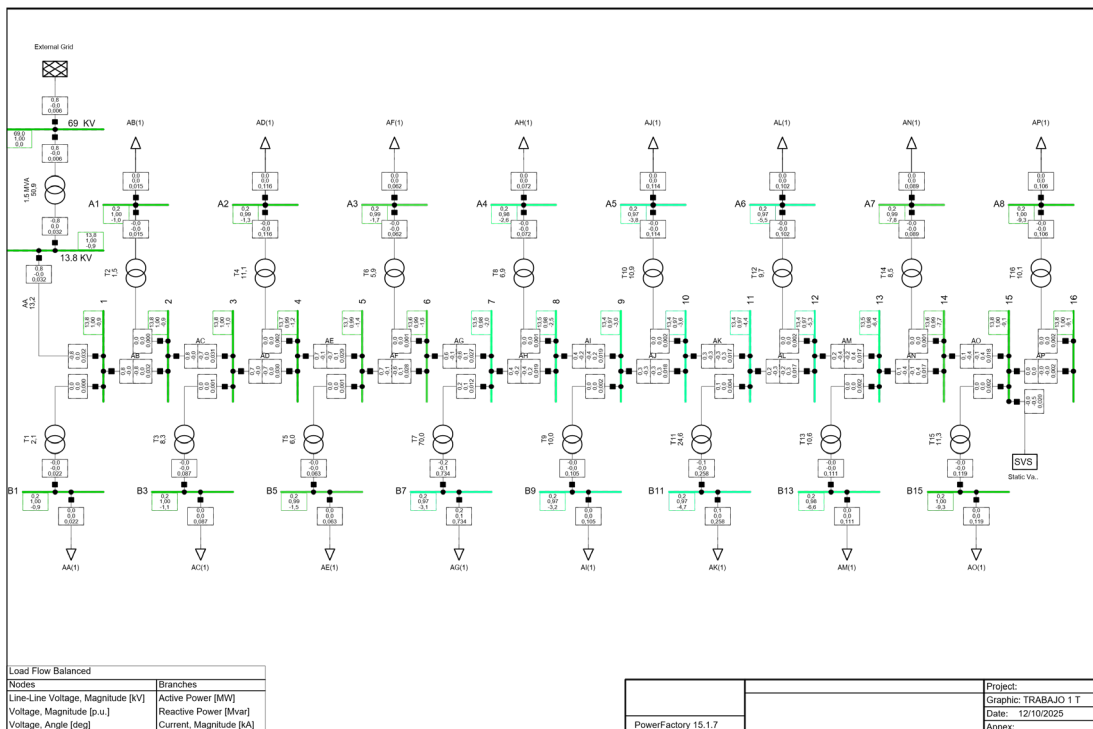


Figura 7 Simulación y datos con inyección de compensador estático SVS.

En la Tabla 12 se presentaron los datos obtenidos a partir de las simulaciones con la inyección del compensador estático SVS, donde se observó que los niveles de voltaje se mantuvieron por encima de 13,3 kV, evidenciando una mejora significativa del perfil de voltaje en todos los tramos del alimentador.

Datos de Instalación de compensador estático de potencia reactiva (SVS).								
Barra #	Tramo	Long. (Km)	Carga (KVA)	I (A)	VLL	U (p.u)	P (MW)	Q (MVar)
1	AA	0,042	809,72	31	13,8	1	0,7	0,015
2	AB	0,550	802,25	31	13,8	1	0,7	0,015
3	AC	0,725	796,37	30	13,7	0,99	0,7	0,015
4	AD	1,437	763,46	28	13,7	0,99	0,7	0,025
5	AE	1,873	719,5	27	13,6	0,98	0,6	0,035
6	AF	2,533	695,62	26	13,6	0,97	0,6	0,1
7	AG	3,448	672,47	18	13,5	0,97	0,4	0,2
8	AH	5,014	401,15	17	13,4	0,97	0,4	0,2
9	AI	5,089	374,27	16	13,4	0,97	0,3	0,2
10	AJ	6,252	335,21	16	13,4	0,97	0,3	0,2
11	AK	7,890	293,07	15	13,3	0,97	0,2	0,3
12	AL	10,235	197,88	15	13,3	0,97	0,2	0,3
13	AM	12,390	160,3	15	13,4	0,97	0,2	0,3
14	AN	14,470	118,86	15	13,5	0,98	0,1	0,3
15	AO	16,585	85,4	16	13,7	0,99	0,1	0,4
16	AP	18,326	40,15	2	13,7	0,99	0,015	0,015

Tabla 12 Datos de simulación con compensador SVS

### 5.3.4 Aumento de sección de conductor desde tramo AI.

Para esta solución se realizó el aumento progresivo de la sección del conductor, partiendo del calibre 1/0, correspondiente al conductor originalmente instalado, hasta alcanzar el calibre 4/0. Este análisis permitió observar mejoras en el comportamiento del circuito, principalmente debido a la reducción de la resistencia del conductor a lo largo del alimentador.

Asimismo, se simuló el cambio de conductor a partir de la barra AI, ya que desde este punto se comenzaron a presentar porcentajes de caída de tensión no permitidos, los cuales superaron el valor máximo del 6 %. Este criterio permitió focalizar la intervención en el tramo más crítico del sistema, optimizando el impacto de la mejora propuesta. De este modo, se concluyó que esta solución contribuyó a la mejora de los niveles de voltaje; sin embargo, no resultó la más recomendable, debido a que los incrementos obtenidos no fueron altamente significativos.

Datos de calibres conductores ASCR Aluminio					
Tipo	Calibre	Nominal (KA)	R AC 20° C $\Omega/km$	XL $\Omega/km$	GMR (m)
ACSR Raven	1/0	0,242	0,5869	0,4628	0,00325
ACSR Raven	2/0	0,275	0,478	0,4541	0,00365
ACSR Raven	3/0	0,313	0,3921	0,4453	0,0041
ACSR Raven	4/0	0,355	0,3241	0,4365	0,0046

Tabla 13 Datos de calibre de conductor ASCR.

En la Tabla 14 se presentaron los valores obtenidos al realizar el cambio del conductor a partir del tramo AI, punto en el cual comenzó a registrarse el valor máximo permitido de caída de voltaje. Se observó que con el calibre 4/0 se recuperaron aproximadamente 0,3 kV, lo que permitió que la barra correspondiente al tramo AI saliera de la zona crítica de caída de voltaje. Asimismo, el incremento del calibre del conductor desde 2/0 hasta 4/0 no generó mejoras significativas adicionales en el nivel de voltaje a lo largo del alimentador La Esperanza 4.

Cuadro comparativo de voltajes con aumento de calibre de conductor 1/0 - 4/0					
Barra #	Tramo	kV (1/0)	kV (2/0)	kV (3/0)	kV (4/0)
9	AI	13,0	13,0	13,0	13,1
10	AJ	12,9	12,9	12,9	13,0
11	AK	12,8	12,8	12,8	12,9
12	AL	12,6	12,7	12,8	12,8
13	AM	12,5	12,6	12,7	12,7
14	AN	12,4	12,5	12,6	12,6
15	AO	12,3	12,4	12,5	12,6
16	AP	12,3	12,4	12,5	12,6

Tabla 14 Datos comparativos de mejoras de voltaje por medio de aumento de sección de conductor

### 5.3.5 Comparación final de alternativas

En el gráfico correspondiente a la Tabla 14 se observa que el aumento de la sección del conductor hasta el calibre 4/0 no cumple con los requerimientos técnicos establecidos, ya que los tramos AO y AP no logran reducir la caída de tensión a valores inferiores al 6 %, límite exigido por la normativa vigente. En consecuencia, esta alternativa no resulta adecuada para corregir los niveles críticos de voltaje en los tramos finales del alimentador, a pesar de las mejoras parciales obtenidas en secciones intermedias del circuito.

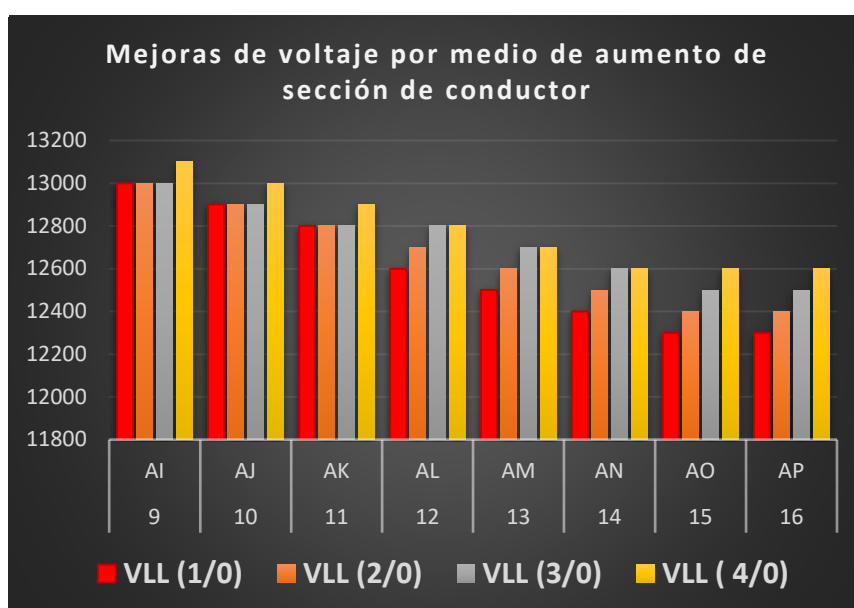


Figura 8 Diagrama de barras de mejoras de voltaje al aumentar la sección del conductor

Con base en los escenarios evaluados, se evidencia que el alimentador presenta degradación progresiva del perfil de tensión hacia los tramos finales, condición que se intensifica con el crecimiento de demanda. La aplicación de mejoras permite recuperar el perfil de tensión y reducir condiciones críticas asociadas al límite regulatorio, siendo necesario comparar las alternativas en función del cumplimiento de tensión, el riesgo de sobrecompensación y el impacto operativo en pérdidas del alimentador. La discusión técnica comparativa y la selección final se desarrollan en el capítulo de conclusiones y recomendaciones.

### 5.3.6 Cuadro comparativo de 4 alternativas presentadas

A partir del cuadro comparativo se evidencia que las estrategias de compensación reactiva, en particular el uso de dispositivos dinámicos como el SVS, presentan el mejor desempeño técnico en términos de mejora del perfil de tensión y reducción de pérdidas. Su implementación implica una mayor complejidad operativa y costos superiores.

Por otro lado, el ajuste de TAP y la instalación de bancos de capacitores fijos constituyen alternativas técnicamente viables y económicamente atractivas, aunque con limitaciones frente a escenarios de variabilidad de carga. Finalmente, el cambio de calibre de conductor muestra beneficios reducidos en comparación con su impacto económico, por lo que no se considera una solución, para el alimentador La Esperanza 4.

<b>CUADRO COMPARTIVO DE ALTERNATIVAS PARA MEJORAS</b>						
<b>Alternativa técnica</b>	<b>Vmin (kV)</b>	<b>Vmax (kV)</b>	<b>Caída (%)</b>	<b>Pérdidas (MW)</b>	<b>Pérdidas (MVar)</b>	<b>Observaciones de implementación</b>
<b>Caso base sin mejoras</b>	12,3	13,7	10,87 %	0,7	0,4	El voltaje esta fuera de límites normativos en tramos finales; elevadas pérdidas técnicas.
<b>Ajuste de TAP Barra AI</b>	13,1	13,7	5,07 %	0,7	0,4	Mejora efectiva de voltaje, no existe sobrecompensación

<b>Banco de capacitor fijo Barra=AJ</b>	13,0	13,8	5,79 %	0,7	0,2	Mejora el nivel de voltaje, riesgo de sobrecompensación ante variaciones de carga.
<b>Compensador estático (SVS)</b>	13,7	13,8	0,72 %	0,7	0,01	Mejora casi en su totalidad el nivel de voltaje, mayor costo y complejidad de operación.
<b>Cambio de conductor (4/0) B=AI</b>	12,6	13,7	8,69 %	0,7	0,4	Esta alternativa no es viable, debido a que no mejora el perfil de voltaje considerablemente en los tramos AO, AP

Tabla 15 Datos comparativos de cuatro soluciones presentadas

## 6. Discusiones

El alimentador La Esperanza 4 presenta un comportamiento estable en los primeros tramos; sin embargo, se identifica una caída de tensión desde la barra del transformador de potencia, debido a que en este punto se concentra la totalidad de la carga del alimentador. Como consecuencia, se registra una caída de tensión aproximada de 0,1 kV desde la salida de la subestación. Asimismo, al analizar el tramo AA, no se observa una caída de tensión atribuible al tramo en sí; no obstante, el nivel de tensión en dicho punto ya se encuentra afectado por la caída de 0,1 kV originada en la subestación, lo cual confirma que esta variación no está asociada a la longitud del tramo AA, sino al efecto acumulado de la carga total del alimentador.

Los tramos AO y AP representan la condición más desfavorable del alimentador, alcanzando caídas de voltaje del 10.86 %, respectivamente. Además, las pérdidas de voltaje alcanzan valores cercanos a 1,5 kV, lo que refleja una combinación de longitudes elevadas, altos valores de resistencia y una fuerte demanda de carga. Estos niveles superan los límites de calidad establecidos para una red de media tensión y evidencian la necesidad de intervención.

La comparación entre las diferentes alternativas de mejora evidencia que el sistema responde de manera efectiva cuando se aplica la regulación de TAPs, ya que esta permite mejorar el nivel de voltaje al actuar directamente sobre la relación de transformación entre el primario y el secundario de los transformadores.

Asimismo, el aumento de la sección del conductor provoca una reducción de la resistencia eléctrica y del efecto Joule, lo que incrementa la capacidad de transporte del conductor. Con el uso de un conductor ACSR 4/0 se mejora muy poco el nivel de voltaje, por consecuencia esta alternativa no es aconsejable.

Finalmente, la inyección de potencia reactiva capacitiva, orientada a la compensación del factor de potencia, se consolida como la solución más eficiente entre las alternativas evaluadas. Esta estrategia permite que todos los tramos del alimentador mantengan los niveles de voltaje dentro de los límites normativos, además de reducir las pérdidas en media tensión.

## 7. Conclusiones

Los resultados demuestran que la baja calidad del servicio eléctrico en el alimentador La Esperanza 4 no constituye un problema inevitable, sino que es consecuencia directa de la longitud del alimentador, el crecimiento progresivo de la carga y las características del conductor instalado. La aplicación de estrategias adecuadas de compensación y regulación permite mejorar la eficiencia energética del sistema, garantizando niveles de voltaje aceptables y reduciendo las pérdidas asociadas a la operación bajo sobrecarga de transformadores en el alimentador La Esperanza 4.

A partir del análisis realizado mediante simulaciones en el software PowerFactory, se demuestra que la eficiencia energética de las líneas de distribución en media tensión del alimentador La Esperanza 4 se ve significativamente afectada bajo condiciones de sobrecarga de transformadores en alimentador. Los resultados evidencian que el crecimiento de la demanda, especialmente en los tramos más alejados del circuito, provoca incrementos en la caída de tensión y en las pérdidas técnicas, lo que compromete la calidad y eficiencia del suministro eléctrico.

El comportamiento eléctrico del alimentador muestra que los primeros tramos operan de manera estable, manteniendo niveles de voltaje dentro de los rangos permitidos; sin embargo, en los tramos finales (AO y AP) se presentan condiciones críticas, con caídas de tensión superiores al 6 %. Este comportamiento confirma que la sobrecarga de transformadores en el alimentador tiene un impacto directo en la regulación de voltaje, especialmente en alimentadores extensos con alta concentración de carga aguas abajo.

Las simulaciones permiten identificar que las pérdidas eléctricas aumentan progresivamente a lo largo del alimentador, siendo más pronunciadas en los tramos finales, donde la corriente es mayor debido a la acumulación de cargas. Estas pérdidas están asociadas principalmente al efecto Joule, el cual depende de la resistencia del conductor y del incremento de corriente generado por la sobrecarga de transformadores en el alimentador La Esperanza 4.

, afectando tanto la potencia activa como la reactiva del sistema.

El análisis comparativo de las alternativas evaluadas evidencia que la regulación de TAPs, la instalación de bancos de capacitores y la implementación de un compensador estático de potencia reactiva (SVS) permiten mejorar de forma efectiva el perfil de voltaje y reducir las pérdidas técnicas del alimentador. En contraste, el aumento de la sección del conductor hasta el calibre 4/0 no logra corregir los niveles críticos de caída de tensión en los tramos finales, por lo que se confirma que esta alternativa no resulta técnica ni económicamente eficiente para el caso de estudio.

## 8. Recomendaciones

En este caso de estudio se recomendará implementar, a corto y largo plazo, las soluciones planteadas anteriormente, siguiendo un orden lógico de ejecución y complejidad técnica.

Para mejorar los niveles críticos de voltaje presentes en el alimentador La Esperanza 4, se recomendará como primer paso la ejecución del ajuste de los TAP de los transformadores en los tramos donde se presenten caídas de voltaje.

Como segunda recomendación, se propondrá la implementación de un banco de capacitores, el cual será instalado en los tramos donde existan bajos niveles de voltaje, con el fin de mitigar los problemas de regulación presentes en el alimentador.

Asimismo, se recomendará la instalación de un compensador estático de potencia reactiva (SVS), el cual, de acuerdo con los criterios de simulación y los datos obtenidos, proporcionará los mayores niveles de eficiencia y mejora de voltaje en el alimentador, considerando además que es una de las soluciones más empleadas en la actualidad.

Finalmente, dentro del presente estudio se evaluará como alternativa de mejora del nivel de voltaje el aumento de la sección del conductor, considerando calibres desde 1/0 hasta 4/0. No obstante, a partir de los resultados obtenidos, se concluirá que esta alternativa no será recomendable para su implementación, debido a que no permite corregir de manera efectiva los niveles críticos de caída de tensión en los tramos finales del alimentador. Sin embargo, el análisis realizado resultará útil para descartar técnicamente esta opción y orientar la toma de decisiones hacia soluciones más eficientes y viables.

## 9. Referencias

- Ahmadi Kamarposhti, M., Ghandour, R., Abdel-Aty, M., Hafez, M., Alfiras, M., Alkhazaleh, S., Colak, I., & Solyman, A. (2025). Optimizing capacitor bank placement in distribution networks using a multi-objective particle swarm optimization approach for energy efficiency and cost reduction. *Scientific Reports*, 15(1), 12332. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-96341-8>
- Alemu, A. T., & Meseret, G. M. (2025). Optimal Location and Sizing of Static Var Compensator (SVC) to Improve Voltage Profile in Distribution Network. *Engineering Reports*, 7(10), e70435. <https://doi.org/10.1002/eng2.70435>
- Gallego, L. A., López-Lezama, J. M., & Carmona, O. G. (2022). A Mixed-Integer Linear Programming Model for Simultaneous Optimal Reconfiguration and Optimal Placement of Capacitor Banks in Distribution Networks. *IEEE Access*, 10, 52655-52673. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3175189>
- Giha Yidi, S. A., Sousa Santos, V., Berdugo Sarmiento, K., Candelo-Becerra, J. E., & De La Cruz, J. (2024a). Comparison of Reactive Power Compensation Methods in an

- Industrial Electrical System with Power Quality Problems. *Electricity*, 5(3), 642-661. <https://doi.org/10.3390/electricity5030032>
- Hernández-Gómez, O. M., Abreu Vieira, J. P., Muñoz Tabora, J., & Sales e Silva, L. E. (2024a). Mitigating Voltage Drop and Excessive Step-Voltage Regulator Tap Operation in Distribution Networks Due to Electric Vehicle Fast Charging. *Energies*, 17(17), 4378. <https://doi.org/10.3390/en17174378>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2022). *1782-2022—IEEE Guide for Collecting, Categorizing, and Utilizing Information Related to Electric Power Distribution Interruption Events*. IEEE.
- Kersting, W. H. (s. f.). Modelado y análisis de sistemas de distribución. En *Generación, transmisión y distribución de energía eléctrica*.
- Lim, H., Jo, J., & Chun, K.-H. (2025). Optimal On-Load Tap Changer Tap Control Method for Voltage Compliance Rate Improvement in Distribution Systems, Based on Field Measurement Data. *Energies*, 18(2), 439. <https://doi.org/10.3390/en18020439>
- Monga, D. P. (2023). Determinación de los Indicadores de Calidad Energética para el Caso de un Usuario Conectado en Media Tensión. *Revista Técnica energía*, 20(1), 9-15. <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v20.n1.2023.578>
- Ouyang, Y., & Wang, H. (2023a). Adaptive denoising combined model with SDAE for transient stability assessment. *Electric Power Systems Research*, 214, 108948. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108948>
- (PDF) Mitigating Voltage Drop and Excessive Step-Voltage Regulator Tap Operation in Distribution Networks Due to Electric Vehicle Fast Charging. (2025). *ResearchGate*. <https://doi.org/10.3390/en17174378>

*Regulacion-Nro.-ARCONEL-009-24-signed.pdf*. (s. f.). Recuperado 3 de febrero de 2026,

de [https://arconel.gob.ec/wp-](https://arconel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/12/Regulacion-Nro.-ARCONEL-009-24-signed.pdf)

[content/uploads/downloads/2024/12/Regulacion-Nro.-ARCONEL-009-24-](https://arconel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/12/Regulacion-Nro.-ARCONEL-009-24-signed.pdf)

[signed.pdf](https://arconel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/12/Regulacion-Nro.-ARCONEL-009-24-signed.pdf)

Saw, B. K., & Bohre, A. K. (2025). Sustainable Deployment of EV Charging Stations in Distribution Network Supported With Hybrid Solar-DG Integrated DSTACOM.

*IEEE Transactions on Industry Applications*, 61(5), 7750-7765.

<https://doi.org/10.1109/TIA.2025.3550143>

Sharma, S., & Ghosh, S. (2025). Optimal planning and placement of capacitor in distribution system based on Particle Swarm and Hybrid Bee-Cuckoo Search under Varying Load Conditions. *Energy Reports*, 13, 5219-5237.

<https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.04.010>

Teng, Y., Shi, P., Bai, J., Wang, X., Cao, T., Zheng, Z., Gao, S., Guan, X., & Dai, T. (2025).

Digital twin system framework and application outlook of grid-forming static

var generator. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 170,

110944. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.110944>

Yu, C., Shi, G., Chung, S.-J., Yue, Y., & Wierman, A. (2022). Competitive Control with

Delayed Imperfect Information. *2022 American Control Conference (ACC)*,

2604-2610. <https://doi.org/10.23919/ACC53348.2022.9867421>

Zhang, L., Liang, D., Wen, Q., Liu, H., Liu, Y., Li, D., Gao, Y., Xu, H., Li, W., & Sun, H.

(2022). Transient optimization control strategy of hybrid capacity regulating

transformer. *Electric Power Systems Research*, 206, 107803.

<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107803>