



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE GUAYAQUIL**

**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**REGULACIÓN DEL VOLTAJE EN LOS ALIMENTADORES SANTA MARTHA  
Y PALENQUE DE CNEL UN LOS RÍOS MEDIANTE EXPRESIONES  
MATEMÁTICAS Y MODELADO DE FLUJO DE CARGA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Eléctrico

**AUTOR:** Rafael Ronald Vásquez Vinueza

**TUTOR:** Ing. Carlos Chávez

**Guayaquil – Ecuador**

**2026**

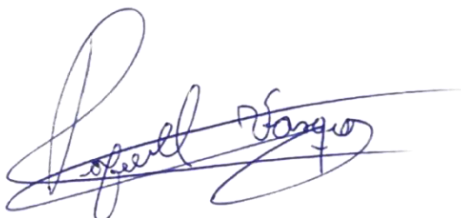
**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

Yo, Rafael Ronald Vásquez Vinueza con documento de identificación N° 0942059338 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo y autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 2 de febrero del año 2026

Atentamente;



---

Rafael Ronald Vásquez Vinueza  
CI: 0942059338

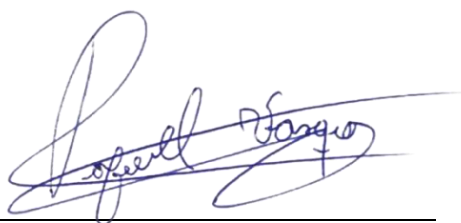
## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Rafael Ronald Vásquez Vinueza con número de identificación N° 0942059338, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de lo que soy autor del Proyecto Técnico: “REGULACIÓN DEL VOLTAJE EN LOS ALIMENTADORES SANTA MARTHA Y PALENQUE DE CNEL UN LOS RÍOS MEDIANTE EXPRESIONES MATEMÁTICAS Y MODELADO DE FLUJO DE CARGA”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero en Electricidad, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Guayaquil, 2 de febrero del año 2026

Atentamente;



---

Rafael Ronald Vásquez Vinueza  
CI: 0942059338

**CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Carlos Fernando Chávez Córdova con documento de identificación N° 0919553438 docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “REGULACIÓN DEL VOLTAJE EN LOS ALIMENTADORES SANTA MARTHA Y PALENQUE DE CNEL UN LOS RÍOS MEDIANTE EXPRESIONES MATEMÁTICAS Y MODELADO DE FLUJO DE CARGA”, realizado por Rafael Ronald Vásquez Vinueza con número de identificación N° 0942059338, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 2 de febrero del año 2026

Atentamente;



---

Carlos Fernando Chávez Córdova  
CI: 0919553438

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de titulación, en primer lugar, a Dios Todopoderoso, quien me ha dado la fortaleza y sabiduría para superar cada obstáculo en el camino. A mi familia, por ser mi mayor apoyo y mi fuente de inspiración: a mi padre, Rafael Vásquez, por su respaldo incondicional y por ser siempre un ejemplo de esfuerzo y perseverancia; a mi madre, Mariela Vinueza, por cuidarme y brindarme su amor inagotable durante todos los años de mi vida; a mis hermanos, Marcos y Valeria, por estar siempre a mi lado cuando más los he necesitado, ofreciéndome su compañía y apoyo inquebrantable; a mis primos, Martha y Javier Benitez, por su apoyo constante, su motivación incondicional y por impulsarme siempre a ser mejor; a mi abuela paterna, Zoila Freire, y a mi abuela materna, Isabel Morales, quienes con su cariño, enseñanzas y ejemplo han dejado una huella imborrable en mi vida. Este logro no es solo mío, sino de todos ellos, quienes han estado a mi lado en cada paso del camino.

Rafael Ronald Vásquez Vinueza

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de disfrutar de la vida, la salud y la fuerza necesaria para llegar a culminar mi carrera profesional. Su guía y bendiciones diarias han sido mi mayor fortaleza a lo largo de mi trayectoria como universitario. A mis padres con esfuerzo y amor me han apoyado en cada paso de este trayecto superando cada obstáculo con determinación y optimismo.

Agradezco a mi Ing. Tutor Carlos Chávez quien, con sus conocimientos de la carrera, su paciencia y gestos de apoyo han contribuido a mi formación académica. Su dedicación y esfuerzo por compartir su experiencia han sido fundamentales para alcanzar la elaboración de mi proyecto de titulación dejando en mí valores y aprendizajes que marcarán mi futuro.

Rafael Ronald Vásquez Vinueza

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	ii
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR .....	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN .....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	vii
RESUMEN .....	x
ABSTRACT .....	xi
ACRONIMOS .....	xii
CAPITULO I .....	1
1 TITULO.....	1
1.1 ANTECEDENTES .....	1
1.2 INTRODUCCIÓN .....	2
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	3
1.4 JUSTIFICACIÓN .....	4
1.5 ALCANCE.....	4
1.6 BENEFICIARIOS.....	5
1.7 OBJETIVOS .....	6
1.7.1 OBJETIVO GENERAL .....	6
1.7.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	6
CAPITULO II.....	8
2.1. FUNDAMENTO TEÓRICO .....	8
2.1.1. SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA .....	8
2.1.2. ELEMENTOS PRINCIPALES DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN .....	9
2.1.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS ALIMENTADORES DE MEDIA TENSIÓN.....	10
2.1.4. CONFIGURACIONES TÍPICAS DE ALIMENTADORES.....	10
2.1.4.2. RED EN ANILLO .....	11
2.1.4.3. RED EN MALLADA.....	11
2.1.5. CALIDAD DE PRODUCTO Y CALIDAD DE SERVICIO .....	12
2.1.6. NORMATIVA DE CALIDAD DE PRODUCTO EN ECUADOR.....	12

2.1.7.	CONCEPTO Y CAUSAS DE LA CAÍDA DE VOLTAJE.....	13
2.1.8.	IMPORTANCIA DE LA UBICACIÓN ESTRATÉGICA DE REGULADORES 13	
2.1.9.	SOFTWARE CYMDIST .....	14
2.1.10.	EXPRESIONES MATEMÁTICAS APLICADAS.....	15
<b>CAPITULO III .....</b>		<b>18</b>
3.	DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO .....	18
3.2.	SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELECTRICA.....	19
3.2.1.	SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICO DE S/E PALENQUE .....	21
3.2.2.	SISTEMA DE ALIMENTACIÓN EN DISTRIBUCIÓN .....	22
3.3.	PLANTEAMIENTO DE ESTUDIO .....	25
3.3.1.	DATOS DEL ALIMENTADOR SANTA MARTHA .....	26
3.3.2.	DATOS DEL ALIMENTADOR PALENQUE .....	29
<b>CAPITULO IV .....</b>		<b>33</b>
4.	DESARROLLO DEL ESTUDIO Y RESULTADOS .....	33
4.1.	EVALUACIÓN DE ALIMENTADORES SANTA MARTHA Y PALENQUE .	33
4.1.1.	CAÍDA DE VOLTAJE – ALIMENTADOR SANTA MARTHA.....	34
4.1.1.1.	ESCENARIO 1: DEMANDA MÍNIMA – SANTA MARTHA .....	34
4.1.1.2.	ESCENARIO 2: DEMANDA MEDIA – SANTA MARTHA.....	43
4.1.1.3.	ESCENARIO 3: DEMANDA MÁXIMA – SANTA MARTHA.....	53
4.1.1.4.	RESUMEN DE RESULTADOS DE CAÍDA DE VOLTAJE DEL ALIMENTADOR SANTA MARTHA .....	62
4.1.2.	CAÍDA DE VOLTAJE – ALIMENTADOR PALENQUE .....	64
4.1.2.1.	ESCENARIO 1: DEMANDA MÍNIMA – PALENQUE.....	64
4.1.2.2.	ESCENARIO 2: DEMANDA MEDIA – PALENQUE .....	73
4.1.2.3.	ESCENARIO 3: DEMANDA MÁXIMA – PALENQUE .....	81
4.1.2.4.	RESUMEN DE RESULTADOS DEL ALIMENTADOR PALENQUE.....	90
4.1.3.	REGULACIÓN DE VOLTAJE.....	91
4.1.3.1.	REGULACIÓN DE VOLTAJE – ALIMENTADOR SANTA MARTHA ...	92
4.1.3.2.	REGULACIÓN DE VOLTAJE – ALIMENTADOR PALENQUE.....	99
4.1.4.	FLUJO DE CARGA.....	104
4.1.5.	FLUJO DE CARGA – ALIMENTADOR PALENQUE .....	105
4.1.5.1.	ALIMENTADOR PALENQUE EN CONDICIONES INICIALES .....	105

4.1.5.2. UBICACIÓN DE BANCO DE REGULADORES DE VOLTAJE .....	108
.....	109
CAPÍTULO V.....	112
5. CONCLUSIONES.....	112
5.1. RECOMENDACIONES .....	112
CAPÍTULO VI.....	114
6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	114
6.1. ANEXOS.....	116

## RESUMEN

En el contexto del sistema eléctrico ecuatoriano, resulta fundamental que las empresas distribuidoras de energía cumplan con los parámetros de calidad establecidos por el ente regulador ARCONEL, particularmente en lo referente al nivel de voltaje suministrado a los usuarios. No obstante, en la operación de las redes de distribución se presentan diversas limitaciones que dificultan el mantenimiento de perfiles de tensión adecuados en determinados sectores. Estas limitaciones están asociadas, entre otros factores, a condiciones climáticas que afectan la infraestructura eléctrica, a la extensión de los alimentadores y a la ubicación geográfica de zonas de consumo que se encuentran considerablemente alejadas de los puntos de inyección de energía.

Esta problemática se evidencia en la CNEL EP – Unidad de Negocio Los Ríos, específicamente en el cantón Palenque, donde se han registrado incumplimientos en los criterios de calidad del producto eléctrico. Dicha situación se relaciona principalmente con la distancia existente entre este cantón y la subestación de subtransmisión Nuevo Babahoyo, perteneciente a CELEC EP, lo que provoca una disminución progresiva del nivel de voltaje a lo largo de los alimentadores de media tensión y, en consecuencia, la entrega de valores inferiores a los permitidos por la normativa vigente.

Ante este escenario, el presente trabajo desarrolla un estudio técnico orientado a estimar la ubicación adecuada de reguladores de voltaje en los alimentadores que abastecen al cantón Palenque. Para ello, se emplean expresiones matemáticas de caída y regulación de tensión, cuyos resultados son contrastados con los obtenidos mediante el modelado del flujo de carga en un software especializado. Adicionalmente, se realiza una comparación del comportamiento del sistema eléctrico antes y después de la implementación de los reguladores, con el propósito de verificar la mejora del perfil de voltaje y el cumplimiento de los límites establecidos por ARCONEL, contribuyendo así al fortalecimiento de la calidad del servicio eléctrico en la zona de estudio.

## ABSTRACT

In the Ecuadorian electrical system, it is essential for power distribution companies to comply with the quality parameters established by the regulatory authority ARCONEL, particularly those related to voltage levels supplied to end users. However, distribution networks often face operational limitations that make it difficult to maintain adequate voltage profiles in certain areas. These limitations are mainly associated with adverse climatic conditions, the physical length of distribution feeders, and the geographical location of service areas that are electrically distant from the main power injection points.

This situation is evident in CNEL EP – Los Ríos Business Unit, specifically in the Palenque canton, where noncompliance with power quality standards has been identified. The main cause of this condition is the considerable distance between Palenque and the Nuevo Babahoyo subtransmission substation, owned by CELEC EP. This long electrical distance leads to progressive voltage drops along the medium-voltage feeders, resulting in voltage levels below the limits established by current regulations.

In response to this issue, this work presents a technical study aimed at estimating the appropriate location of voltage regulators along the feeders supplying the Palenque canton. The study applies mathematical expressions for voltage drop and voltage regulation, and the obtained results are contrasted with those derived from load-flow modeling using specialized distribution system software. In addition, the performance of the electrical network is compared before and after the implementation of voltage regulators in order to verify improvements in the voltage profile and compliance with ARCONEL requirements, thereby contributing to the enhancement of power quality in the studied area.

## ACRONIMOS

**CNEL:** Corporación Nacional de Electricidad.

**CYMDIST:** Software de simulación para sistemas de distribución eléctrica.

**ARCONEL:** Agencia de regulación y control de energía.

**S/E:** Subestación Eléctrica.

**SCADA:** Supervisory Control and Data Acquisition.

**BIL:** Basic Insulation Level.

**MVA:** mega Voltio-amperio.

**KCMIL:** Unidad de medida de sección de conductores eléctricos.

**ACSR:** Aluminum Conductor Steel Reinforced

**RMS:** Root Mean Square.

**SNI:** Sistema Nacional Interconectado.

**MT:** Media Tensión.

**AT:** Alta Tensión.

**BT:** Baja Tensión.

**IEEE:** Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.

**AT:** Alto tensión.

**BT:** Bajo tensión.

**MV:** Medio Voltaje.

**DC:** Corriente Directa.

**AC:** Corriente Alterna.

**kVA:** Kilovoltio-amperio.

**kWh:** Kilovatio/hora.

**kV:** Kilovoltio.

**pu:** Por Unidad

## CAPITULO I

### 1 TITULO

Regulación del voltaje en los alimentadores Santa Martha y Palenque de CNEL UN Los Ríos mediante expresiones matemáticas y modelado de flujo de carga

#### 1.1 ANTECEDENTES

La Unidad de Negocio LRS dentro de su sistema eléctrico de distribución suministra energía eléctrica a 10 Cantones: 9 de la provincia de LRS y 1 de la provincia del Guayas.

Dentro de estos cantones se encuentra el Cantón de Palenque el mismo que contempla 4.568 usuarios. Aquí en este cantón existe una Subestación eléctrica de distribución con nivel de voltaje 69/13,8 kV, y una capacidad de potencia del transformador de poder de 10/12,5 kVA con un factor de potencia 0,94 y una cargabilidad del 38,62% con enfriamiento natural y 30,89% con ventilación forzada.

Esta subestación actualmente contempla dos alimentadores trifásicos en media tensión, el uno denominado Alimentador Palenque y el otro Alimentador Santa Martha.

El alimentador Palenque tiene las siguientes características:

- Nivel de tensión 13,8 kV con un factor de potencia 0,94
- Usuarios conectados = 2.687 y 492,14 MWh de energía entregada
- Conductor de aluminio ACSR número 4/0 con una longitud aproximado de 15 Km.
- Pérdidas de energía del 22%

El Alimentador Santa Martha con la siguiente característica.

- Nivel de tensión 13,8 Kv con un factor de potencia de 0,95
- Usuarios conectados = 1.881 y 804,85 MWh de energía entregada
- Conductor de aluminio ACSR número 4/0 con una longitud aproximado de 21 Km.
- Pérdidas de energía del 33%

Dentro de la problemática que se tiene en estos dos alimentadores está:

- En los niveles de voltaje o lo que se denomina calidad de producto, desde la cabecera fluctúa el nivel de voltaje de 13 a 12,8 kV estando estos por debajo de lo establecido de la regulación provocando que no se esté entregando los niveles de voltaje óptimos a los usuarios de este cantón.
- Pérdidas técnicas de energía por incumplir con la calidad del producto.
- Incumplimiento de la Regulación ARCONEL 009/24 y art. 137 de la Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica (ARCONEL, 2024).

Estos alimentadores son troncales principales, a partir de los cuales se derivan algunas líneas monofásicas. El medidor asociado a estos alimentadores se encuentra instalado en la cabecera, específicamente a nivel de barras (13,8 kV) dentro de la subestación. Los datos analizados corresponden al punto de inicio del alimentador, es decir, en la cabecera. La totalidad de la información presentada fue suministrada por la empresa eléctrica CNEL EP – Unidad de Negocio Los Ríos.

A pesar de que las mediciones se realizan en dicho punto, se han registrado caídas de voltaje significativas en determinados momentos, lo que ocasiona que la caída de tensión hacia el extremo final del alimentador (cola) sea aún mayor. De acuerdo con la normativa vigente, la regulación de voltaje establece que la variación no debe superar el 6%.

## **1.2 INTRODUCCIÓN**

El control adecuado del nivel de voltaje en los sistemas de distribución eléctrica constituye uno de los principales retos para las empresas distribuidoras de energía, especialmente en redes de media tensión con largos recorridos y alta variación de carga. Cuando el voltaje suministrado a los usuarios se desvía de los rangos permitidos, se generan impactos negativos tanto en la calidad del producto eléctrico como en la eficiencia del sistema, afectando la vida útil de los equipos y la continuidad del servicio.

En la provincia de Los Ríos, los alimentadores de media tensión *Santa Martha y Palenque*, pertenecientes a la CNEL EP Unidad de Negocio Los Ríos, abastecen a zonas con

características geográficas y de demanda que dificultan el mantenimiento de perfiles de voltaje adecuados, particularmente en los tramos más alejados de la subestación. Estas condiciones, sumadas al crecimiento progresivo de la carga y a la ubicación de la subestación “Nuevo Babahoyo”, han dado lugar a caídas de tensión que exceden los límites establecidos por la normativa vigente.

Ante este escenario, resulta necesario desarrollar estudios técnicos que permitan evaluar el comportamiento real del sistema y proponer soluciones que contribuyan a mejorar el nivel del voltaje. En este contexto, el empleo de expresiones matemáticas de caída y regulación de tensión, junto con el modelado del flujo de carga en herramientas especializadas, constituye una alternativa confiable para comprender el desempeño de la red y estimar la ubicación adecuada de reguladores de voltaje.

El presente trabajo se orienta a mejorar el perfil de voltaje en los alimentadores mencionados, utilizando el software CYMDIST como herramienta principal de simulación. A partir de la información técnica proporcionada por la empresa distribuidora, se abarcan distintos escenarios que permiten identificar tramos críticos y evaluar el impacto de la incorporación de reguladores de voltaje sobre el cumplimiento de los criterios de calidad del producto eléctrico establecidos por ARCONEL.

### **1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En el cantón Palenque, perteneciente a la Unidad de Negocio CNEL EP – Los Ríos, se evidencia un incumplimiento sostenido en los indicadores de calidad de producto establecidos por el ente regulador. El área es abastecida por dos alimentadores principales, denominados Palenque y Santa Marta, los cuales presentan una disminución en la magnitud del voltaje suministrado a los usuarios. Estas caídas de tensión se hacen más críticas en los tramos alejados de la subestación y en horarios de mayor demanda, ocasionando que los niveles de voltaje se encuentren fuera de los rangos permisibles establecidos por la normativa vigente [1].

## 1.4 JUSTIFICACIÓN

El correcto funcionamiento de los alimentadores “Santa Martha” y “Palenque” es fundamental para garantizar un suministro eléctrico estable y dentro de los parámetros establecidos por la normativa ecuatoriana. La presencia de caídas de voltaje, registradas desde el punto de partida de la subestación y con mayor impacto en las zonas terminales de las líneas, pone en riesgo la calidad del servicio eléctrico que reciben más de 4.500 usuarios en el cantón Palenque [2].

Este tipo de afectaciones no solo compromete la eficiencia en la entrega de energía, sino que también puede deteriorar equipos domésticos e industriales, reduciendo su vida útil y aumentando las quejas de los usuarios. La pérdida de energía registrada (22 % en Palenque y 33 % en Santa Martha) refleja un problema estructural que debe ser abordado mediante decisiones estratégicas sobre el refuerzo de infraestructura existente [3].

Aplicando fórmulas de caída y regulación de voltaje, modelado de flujo de carga y simulación de escenarios en software especializado como CYMDIST, es posible representar el comportamiento real de los alimentadores bajo diferentes condiciones operativas. A partir de esta representación se podrá proponer la ubicación de reguladores de voltaje que mejoren la entrega de energía en toda la extensión de las redes involucradas, permitiendo cumplir con los parámetros exigidos por ARCONEL.

## 1.5 ALCANCE

El presente estudio se enfoca en evaluar el comportamiento del voltaje observado en los alimentadores de media tensión *Santa Martha* y *Palenque*, pertenecientes a la CNEL EP Unidad de Negocio Los Ríos. El trabajo se desarrollará considerando las condiciones operativas actuales de la subestación “Nuevo Babahoyo” que alimenta ambos circuitos, así como la demanda real y proyectada de los usuarios residenciales, comerciales y productivos conectados a estas redes.

El alcance incluye la recopilación de información técnica proporcionada por la empresa eléctrica de los alimentadores, la construcción del modelo eléctrico en el software CYMDIST y la simulación de escenarios de demanda mínima, media y máxima para identificar los tramos con caídas de voltaje que superen los límites establecidos por la Regulación ARCONEL 009/24. El estudio abarca la aplicación de expresiones matemáticas de caída y regulación de tensión con el propósito de evaluar alternativas de mejora y determinar la ubicación técnica más adecuada para la instalación de reguladores de voltaje.

Este trabajo no abarca el análisis de índices de confiabilidad del sistema, tales como el FMIK o TTIK, debido a que dichos parámetros dependen de información operacional en tiempo real que no forma parte de los objetivos propuestos. Tampoco se realizará un estudio económico detallado relacionado con la adquisición o instalación física de los equipos, ya que el objetivo principal es presentar una solución técnica basada en simulación y evaluación de desempeño eléctrico. De igual manera, no se incluyen aspectos vinculados a la generación distribuida o fuentes renovables, dado que la investigación se limita estrictamente al comportamiento de la red de distribución existente. El desarrollo del estudio se orientará bajo las directrices técnicas establecidas por ARCONEL, asegurando que se mantenga dentro del marco regulatorio vigente.

## **1.6 BENEFICIARIOS**

Los beneficiarios del proyecto técnico establecido se dividen en tres importantes:

- **La Universidad Politécnica Salesiana**, que incorporará un trabajo técnico con aplicación directa en redes reales de distribución, fortaleciendo la formación profesional de sus estudiantes y contribuyendo al desarrollo de propuestas que respondan a necesidades actuales del sector eléctrico.
- **La empresa eléctrica CNEL EP – Unidad de Negocio Los Ríos**, que obtendrá un proyecto técnico detallado sobre el desempeño de los alimentadores Santa Martha y Palenque, junto con una propuesta fundamentada para mejorar la calidad del voltaje

entregado a los usuarios. El estudio permitirá identificar alternativas que contribuyan al cumplimiento de los estándares regulatorios.

- **Los usuarios conectados a los alimentadores estudiados**, entre ellos hogares, comercios y actividades productivas que dependen de un suministro estable. La implementación de las mejoras propuestas contribuirá a reducir problemas relacionados con bajo voltaje, favorecer la operación adecuada de los equipos eléctricos y fortalecer el desarrollo económico local mediante un servicio eléctrico más efectivo.

## **1.7 OBJETIVOS**

### **1.7.1 OBJETIVO GENERAL**

Regular el nivel de voltaje en los alimentadores de media tensión “Santa Martha” y “Palenque” de CNEL Unidad de Negocio Los Ríos mediante la aplicación de las expresiones matemáticas de caída de tensión, regulación de voltaje y modelos de flujo de carga, estimando la localización de reguladores de voltaje.

### **1.7.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar las causas principales que provocan la reducción de voltaje en la red, considerando su ubicación geográfica, determinando los factores que influyen en la caída de voltaje.
- Determinar la ubicación adecuada de los reguladores de tensión, mediante la evaluación y comparación de 3 eventos, para proponer una solución técnica que estabilice el voltaje dentro de los parámetros regulados.
- Aplicar las expresiones matemáticas establecidas en las normativas eléctricas para el cálculo de caídas de voltaje y regulación de tensión en los alimentadores de distribución, con el fin de comparar dichos resultados con

los obtenidos en el software para la verificación de la ubicación de los reguladores de voltaje.

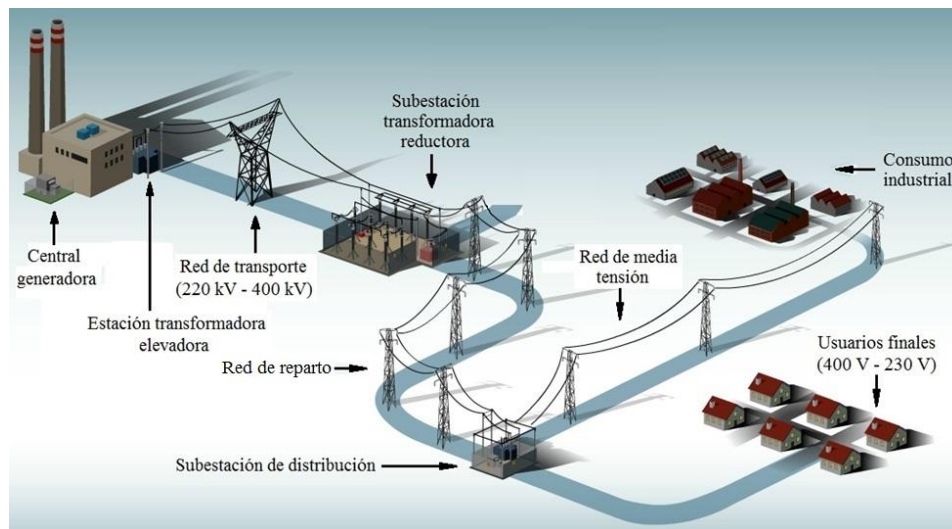
- Comparar el desempeño de la red antes y después de la implementación de reguladores. Realizando una comparación de los perfiles de voltaje obtenidos en ambas condiciones. Para verificar la mejora técnica lograda y demostrar el cumplimiento de los valores establecidos por ARCONEL.

## CAPITULO II

### 2.1. FUNDAMENTO TEÓRICO

#### 2.1.1. SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

El sistema de distribución, como se muestra en la **figura 1** es la etapa final del proceso eléctrico, cuyo propósito es transportar la energía desde los niveles de subtransmisión hasta los usuarios finales en condiciones adecuadas de seguridad, continuidad y calidad. A diferencia de los sistemas de transmisión que operan con altos niveles de tensión y tienden a cubrir grandes distancias, las redes de distribución deben enfrentar mayores variaciones de carga, topologías más complejas y demandas altamente dinámicas, lo que las convierte en una parte crítica del sistema eléctrico nacional. La estabilidad del voltaje del suministro depende en gran medida de la correcta operación de estas redes, así como del diseño de sus componentes principales. En Ecuador, estos sistemas operan bajo regulaciones técnicas establecidas por ARCONEL [2].



*Figura 1 Elementos de un sistema de distribución [2]*

### 2.1.2. ELEMENTOS PRINCIPALES DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Un sistema de distribución está conformado por diferentes componentes eléctricos que interactúan para entregar la energía de manera controlada:

- **Subestación de distribución:** Es el punto donde se reduce la tensión del sistema de subtransmisión para obtener niveles medios apropiados para alimentar los circuitos de distribución. Además de los transformadores reductores (por ejemplo, 69/13.8 kV), incorporan protecciones, interruptores, seccionadores y equipos de control que permiten mantener la estabilidad operativa.
- **Alimentadores de media tensión:** Son las líneas que transportan energía desde la subestación a las zonas de consumo. Debido a su extensión y distribución geográfica, pueden verse afectados por pérdidas, caídas de tensión y variaciones de carga a lo largo del día.
- **Transformadores de distribución:** Reducen la tensión media a niveles de uso residencial o comercial (como 120/240 V). Su correcto dimensionamiento contribuye a la eficiencia energética del sistema.
- **Líneas de distribución:** Transportan energía hacia los usuarios finales. Pueden ser aéreas o subterráneas, dependiendo del entorno y de la infraestructura disponible.
- **Cargas:** Representan la energía demandada por los usuarios. Su comportamiento puede ser equilibrado o desbalanceado, dependiendo del tipo de actividad que realicen.

Estos elementos se muestran de forma esquemática en la Figura 1, permitiendo observar su relevancia dentro de la red [2].

### 2.1.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS ALIMENTADORES DE MEDIA TENSIÓN

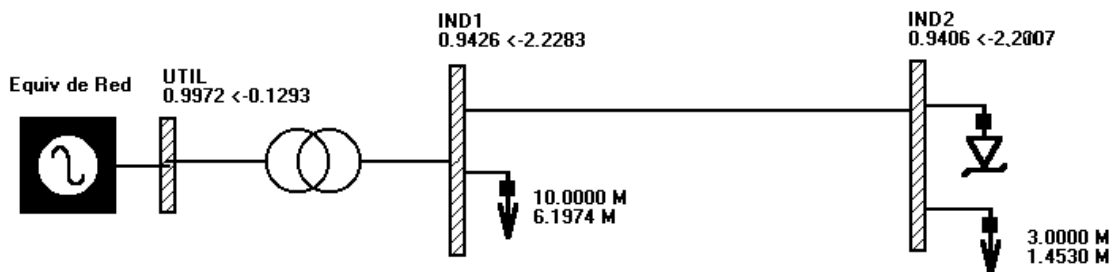
Los alimentadores de media tensión conforman la estructura principal del sistema de distribución primaria. Operan en un rango aproximado de 4 a 34.5 kV y se caracterizan por trabajar bajo configuraciones que responden a la demanda del usuario, la geografía del territorio y la densidad poblacional. Su desempeño depende de la longitud total de la línea, la resistencia y reactancia del conductor, el nivel de carga, el número de derivaciones y el tipo de terreno que atraviesan. En zonas rurales o extensas, estos alimentadores suelen presentar caídas de tensión progresivas conforme aumenta la distancia respecto a la subestación [4]

### 2.1.4. CONFIGURACIONES TÍPICAS DE ALIMENTADORES

La estructura topológica del alimentador incide directamente en la confiabilidad del servicio:

#### 2.1.4.1. RADIAL

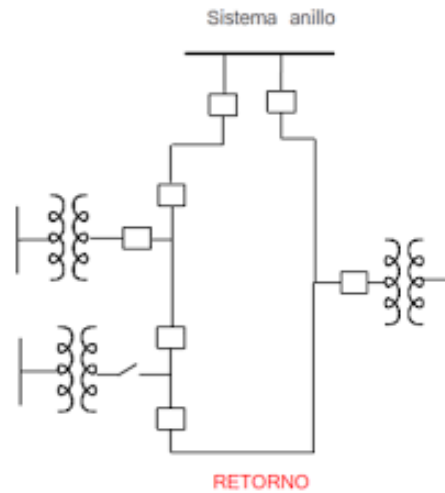
Es la configuración más común debido a su bajo costo y simplicidad. La energía fluye en un único sentido desde la subestación hacia los usuarios finales. Sin embargo, una falla en cualquier punto provoca la interrupción total del suministro. En la **figura 2** se muestra un ejemplo de una red radial.



*Figura 2 Diagrama de un sistema de distribución radial [2]*

### 2.1.4.2. RED EN ANILLO

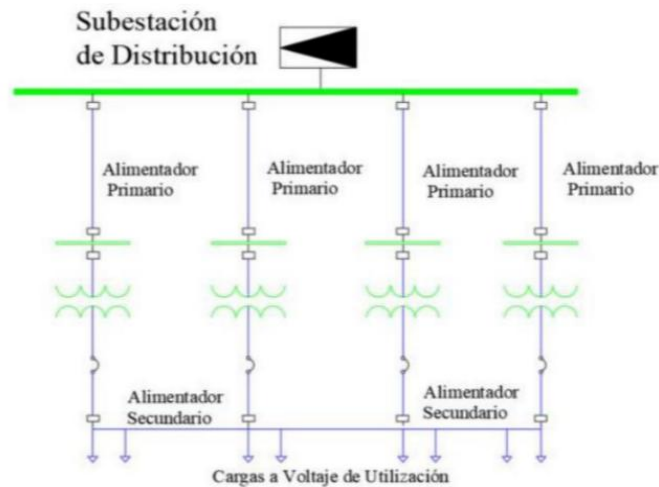
Permite alimentar la misma zona desde dos rutas distintas, aunque normalmente solo una se encuentra energizada. En caso de falla, el circuito puede reconfigurarse para mantener el servicio. En la **figura 3** se muestra un ejemplo de una red en anillo.



*Figura 3 Diagrama de un sistema de distribución en anillo [2]*

### 2.1.4.3. RED EN MALLADA

Presenta múltiples caminos para la circulación de energía, proporcionando alta confiabilidad, aunque con costos elevados de construcción y operación. En la **figura 4** se muestra un ejemplo de una red en mallada.



*Figura 4 Diagrama de un sistema de distribución en malla [2]*

### 2.1.5. CALIDAD DE PRODUCTO Y CALIDAD DE SERVICIO

En el contexto eléctrico ecuatoriano, la calidad del producto hace referencia a las características técnicas de la energía entregada: nivel de tensión, frecuencia y distorsión armónica. Por su parte, la calidad del servicio considera factores como la continuidad del suministro, tiempos de reposición ante fallas, atención al usuario y eficiencia comercial.

ARCONEL es la entidad encargada de supervisar ambos parámetros, verificando que los distribuidores cumplan con los niveles requeridos por la normativa vigente.

### 2.1.6. NORMATIVA DE CALIDAD DE PRODUCTO EN ECUADOR

Conforme a ARCONEL 016/2024 de la regulación 009/2024 “Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica”, la tensión suministrada a los usuarios debe mantenerse dentro de un rango de  $\pm 6\%$  respecto a su valor nominal. Si el sistema opera a 13.8 kV, los valores aceptables se ubican entre 12.972 kV y 14.628 KV [5].

Los rangos del nivel de voltaje que se permiten se muestran en la siguiente **tabla 1**:

Nivel de voltaje	Rango admisible
Alto voltaje (Grupo 1 y Grupo 2)	$\pm 5.0\%$
Medio voltaje	$\pm 6.0\%$
Bajo Voltaje	$\pm 8.0\%$

**Tabla 1** Límites para el índice de nivel de voltaje

Desviaciones mayores pueden provocar:

- sobrecalentamiento de equipos,
- fallas en motores,
- reducción de vida útil de electrodomésticos,
- pérdidas eléctricas elevadas.

Por ello, mantener el perfil de tensión dentro del rango permitido es un indicador clave de la calidad del producto.

### **2.1.7. CONCEPTO Y CAUSAS DE LA CAÍDA DE VOLTAJE**

La caída de voltaje es la diferencia entre la tensión enviada desde la subestación y la tensión recibida por un usuario o punto de carga. Esta disminución se produce por el paso de corriente a través de la resistencia y reactancia del conductor.

Las principales causas incluyen:

- Longitudes excesivas entre la subestación y el usuario,
- Incrementos significativos de carga,
- Conductores de sección reducida o deteriorados,
- Desbalance entre fases,
- Factor de potencia bajo,
- Existencia de múltiples derivaciones a lo largo del alimentador.

Estos factores pueden combinarse y provocar perfiles de tensión que se apartan de los límites normativos.

### **2.1.8. IMPORTANCIA DE LA UBICACIÓN ESTRATÉGICA DE REGULADORES**

La ubicación correcta de los reguladores determina su efectividad. Colocarlos muy cerca de la subestación puede no resolver los problemas en las zonas más alejadas, que suelen ser las más críticas. En cambio, instalarlos en los puntos donde el voltaje comienza a descender de

manera significativa mejora notablemente el desempeño de la red, reduce pérdidas y eleva la confiabilidad del sistema[6].



*Figura 5 Reguladores de voltaje monofásicos*

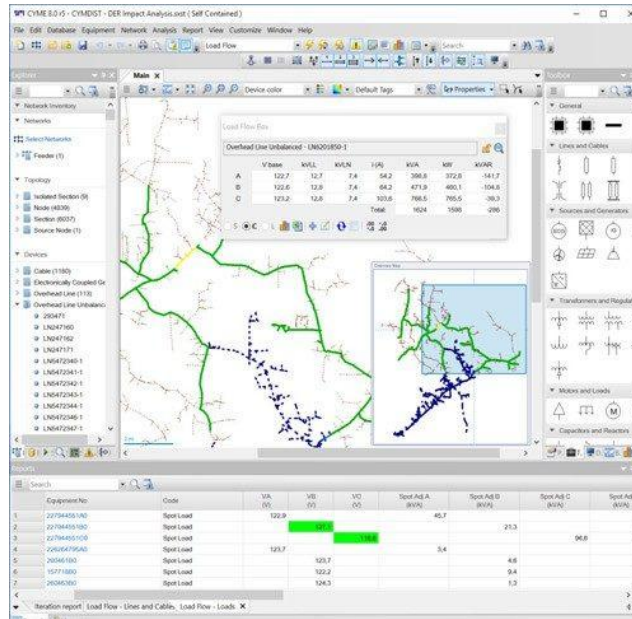
### **2.1.9. SOFTWARE CYMDIST**

CYMDIST es una herramienta especializada para el análisis de redes de distribución.

Permite:

- simular condiciones de carga (mínima, media y máxima),
- modelar elementos como transformadores, líneas, cargas y reguladores,
- analizar perfiles de tensión en tiempo real,
- evaluar el impacto de diferentes configuraciones de la red.

Su precisión lo convierte en un software ampliamente utilizado para estudios de planificación y operación de redes eléctricas, facilitando la toma de decisiones técnicas relacionadas con la ubicación de reguladores de voltaje.



*Figura 6 Software CYMDIST [7]*

## 2.1.10. EXPRESIONES MATEMÁTICAS APLICADAS

La caída de tensión en sistemas trifásicos se calcula mediante:

$$\Delta V = \sqrt{3}I (R \cos \alpha + X \sin \alpha) [8] \text{ --- Ecuación 1}$$

Donde:

$\Delta V$ : Caída de tensión en el tramo [V]

I: Corriente de carga [A]

R, X: Resistencia y reactancia de la línea [ $\Omega$ ]

$\cos\alpha, \sin\alpha$ : Factor de potencia

Esta expresión permite estimar de manera directa cuánto disminuye la tensión en un tramo determinado del alimentador, considerando la impedancia del conductor y el comportamiento de la carga.

Asimismo, las ecuaciones de regulación de tensión permiten determinar el efecto exacto que tendrá un regulador sobre el nivel de voltaje aguas abajo. A partir de la relación de transformación, la variación porcentual y el número de taps disponibles, es posible comparar la tensión antes y después de aplicar la regulación según las normativas IEEE y ANSI.

El resultado puede expresarse también en porcentaje respecto a la tensión nominal del alimentador:

$$\% \Delta V = 100 \times \frac{\Delta V}{V_{LL}} \quad [8] \text{ --- Ecuación 2}$$

Donde:

$\% \Delta V$ : Caída de tensión en porcentaje respecto a la tensión nominal

$V_{LL}$ : Tensión nominal línea - línea [V]

Normativas: IEC 60038

#### Regulación de tensión:

La siguiente fórmula se empleará para comparar el nivel de voltaje antes y después de los reguladores de voltaje, verificando la disminución de la caída y el cumplimiento de la normativa [9] [10].

Entonces la tensión nueva regulada se calcula de la siguiente manera:

$$V_{\text{nuevo}} = V_{\text{actual}} \times \left( 1 + N_{\text{taps}} \times \frac{\% \text{por\_tap}}{100} \right) \text{ --- Ecuación 3}$$

Donde:

$V_{\text{nuevo}}$ : Tensión corregida

$V_{\text{actual}}$ : Voltaje existente en el punto de entrada del regulador antes de realizar cualquier ajuste

$N_{\text{taps}}$ : Número de pasos (taps) activados por el regulador de voltaje

$\% \text{por\_tap}$ : Variación porcentual de voltaje asociada a cada tap del regulador

Normativas:

- IEEE Std 141
- IEEE Std 242 – Buff Book

La empresa CNEL EP dispone de especificaciones técnicas definidas para los equipos instalados, en las cuales se establecen el número de pasos del regulador y el nivel de tensión en la barra.

En la siguiente tabla se presentan los parámetros operativos del regulador que se establecen a partir de la información técnica proporcionada por el fabricante.

<b>Porcentaje de la corriente nominal</b>	<b>Límite Superior</b>	<b>Límite inferior</b>	<b>Porcentaje de la tensión</b>
Hasta el 100%	TAP +16	TAP -16	10%
Del 101% al 110%	TAP +14	TAP -14	8,75%
Del 111% al 120%	TAP +12	TAP -12	7,5%
Del 121% al 135%	TAP +10	TAP -10	6,25%
Del 136% al 160%	TAP +8	TAP -8	5%

*Tabla 2 Parámetros operativos del regulador de voltaje proporcionados por el fabricante[11]*

Para tal efecto utilizaremos estos datos en la ejecución de nuestros cálculos

## CAPITULO III

### 3. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

#### 3.1. SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE LA UNIDAD DE NEGOCIO CNEL EP LOS RÍOS

El suministro de energía eléctrica para la CNEL EP – Unidad de Negocio Los Ríos se origina en la Subestación Nuevo Babahoyo, infraestructura perteneciente a CELEC EP – Transelectric, la cual constituye el principal punto de entrega de energía en el nivel de subtransmisión para esta unidad de negocio. Desde esta subestación se abastece a un total de diez cantones, de los cuales nueve pertenecen a la provincia de Los Ríos y uno a la provincia del Guayas, configurándose como un nodo estratégico dentro del sistema eléctrico regional.

La Subestación Nuevo Babahoyo opera a un nivel de tensión de 138/69 kV y dispone de cuatro bahías de salida, de las cuales tres están destinadas al suministro de energía para CNEL EP – Unidad de Negocio Los Ríos, mientras que la bahía restante atiende a CNEL EP – Unidad de Negocio Bolívar.

Desde el punto de entrega en la Subestación Nuevo Babahoyo hasta la Subestación Palenque, que alimenta a los alimentadores de media tensión objeto de estudio, se tiene un recorrido aproximado de 68,18 km en el nivel de subtransmisión (69 kV). Esta longitud resulta considerable para un sistema de subtransmisión, y representa un factor determinante en el comportamiento eléctrico del sistema, particularmente en lo relacionado con caídas de tensión, pérdidas técnicas y limitaciones en la regulación del voltaje.

Adicionalmente, la ubicación geográfica de la Subestación Nuevo Babahoyo, situada en la zona sur del área de concesión de la Unidad de Negocio Los Ríos, implica que las subestaciones y alimentadores ubicados hacia la zona norte del sistema se encuentren eléctricamente más alejados del punto de inyección. Esta condición incrementa la impedancia total del trayecto eléctrico y reduce la capacidad del sistema para mantener perfiles de voltaje adecuados en condiciones de alta demanda, lo cual incide directamente en la calidad del producto eléctrico entregado a los usuarios finales.

En este contexto, la distancia eléctrica entre la subestación de subtransmisión y la subestación de distribución Palenque se constituye como uno de los factores principales que explican las variaciones de voltaje observadas en los alimentadores Santa Martha y Palenque, justificando la necesidad de realizar un estudio detallado del sistema y de proponer soluciones técnicas orientadas a mejorar la regulación del voltaje en la red de media tensión.



*Figura 7 subestación “Nuevo Babahoyo”[12]*

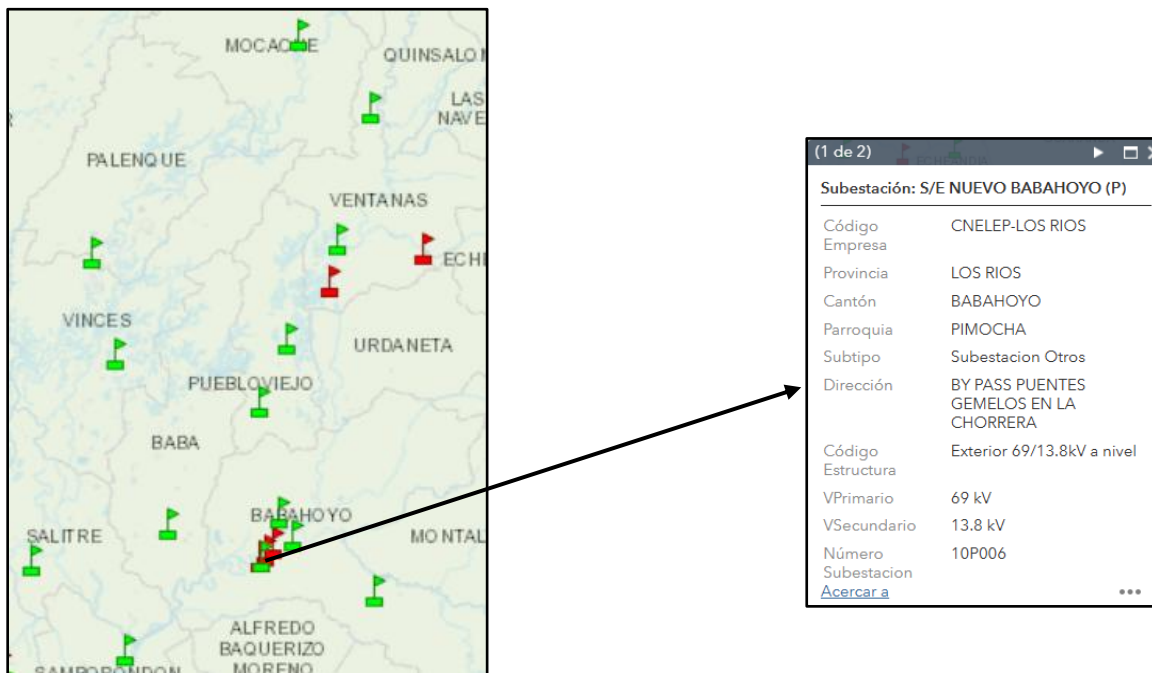
### **3.2. SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELECTRICA**

La Unidad de Negocio Los Ríos (UN LRS), a través de su sistema de distribución eléctrica, abastece energía a un total de diez cantones, de los cuales nueve pertenecen a la provincia de Los Ríos y uno a la provincia del Guayas. Entre las zonas atendidas se encuentra el cantón Palenque, que cuenta con aproximadamente 4.568 usuarios conectados al sistema eléctrico de distribución.

En este cantón opera la subestación de distribución “Palenque” que funciona con un nivel de tensión de 69/13,8 kV y dispone de un transformador de potencia con una capacidad nominal de 10/12,5 MVA, un factor de potencia de 0,94 y una cargabilidad aproximada del 38,62 % bajo enfriamiento natural y del 30,89 % con ventilación forzada. Desde esta subestación se alimentan dos circuitos trifásicos de media tensión, identificados como alimentador Palenque y alimentador Santa Martha.

Entre las principales problemáticas identificadas en ambos alimentadores se destaca la variación del nivel de voltaje registrada desde el punto de cabecera, donde se han observado valores comprendidos entre 13 kV y 12,8 kV, los cuales se ubican por debajo de los rangos permitidos por la normativa vigente. Esta situación se atribuye, en gran medida, a la ubicación de la subestación “Nuevo Babahoyo”, la cual se encuentra emplazada en la zona sur de la red de distribución como se muestra en la **figura 8**, generando una mayor distancia eléctrica entre el punto de inyección y los cantones localizados en la zona norte del área de servicio. Como consecuencia, se presentan caídas de voltaje progresivas a lo largo de los alimentadores, especialmente hacia los tramos finales. Esta condición afecta la calidad del producto eléctrico suministrado y ocasiona pérdidas técnicas de energía, además del incumplimiento de lo dispuesto en la Regulación ARCONEL 009/24 y en el artículo 137 de la Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica.

A pesar de que las mediciones se realizan en la cabecera, se han evidenciado caídas de voltaje significativas en ciertos períodos de operación, lo que implica que la disminución de tensión hacia el extremo final de los alimentadores sea aún más pronunciada. De acuerdo con la normativa vigente, la regulación del voltaje establece que estas variaciones no deben exceder el  $\pm 6\%$  respecto al valor nominal.



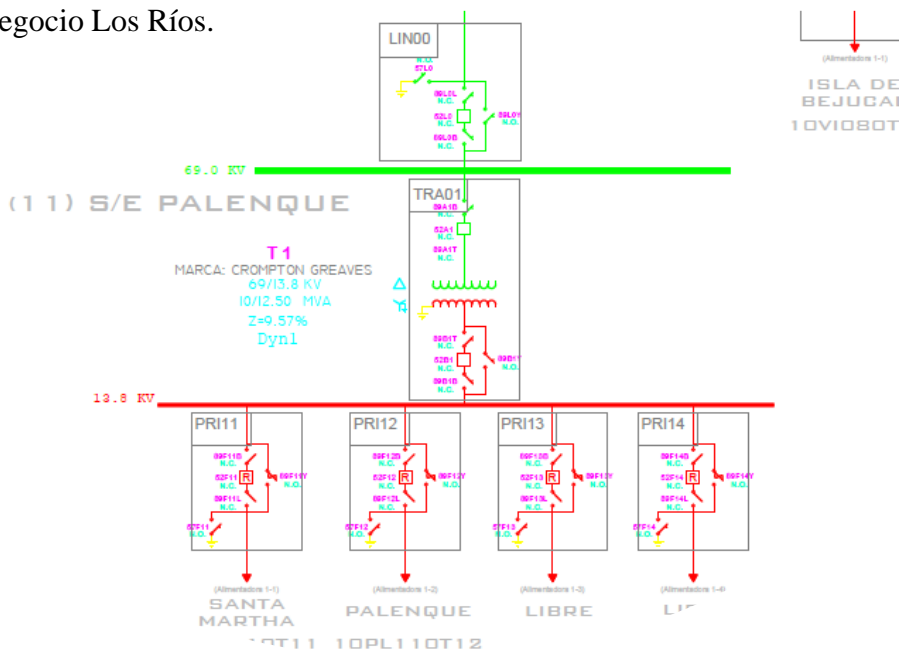
**Figura 8** Ubicación geográfica subestación “Nuevo Babahoyo”[13]

### 3.2.1. SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICO DE S/E PALENQUE

En la **figura 9** se muestra el alimentador Palenque que opera a un nivel de tensión de 13,8 kV, presenta un factor de potencia de 0,94 y abastece a 2.687 usuarios, con una energía entregada de 492,14 MWh. Este circuito utiliza conductor de aluminio tipo ACSR calibre 4/0 y posee una longitud aproximada de 15 km, registrando pérdidas técnicas cercanas al 22 %.

Por su parte, el alimentador Santa Martha también funciona a 13,8 kV, con un factor de potencia de 0,95. En este alimentador se encuentran conectados 1.881 usuarios y se registra una energía entregada de 804,85 MWh. Al igual que el alimentador Palenque, emplea conductor ACSR 4/0; sin embargo, su longitud es mayor, alcanzando aproximadamente 21 km, lo que se traduce en pérdidas de energía del orden del 33 %.

Estos alimentadores constituyen troncales principales de la red, a partir de los cuales se derivan diversas líneas monofásicas. El sistema de medición asociado se encuentra instalado en la cabecera de los circuitos, específicamente en las barras de 13,8 kV de la subestación, por lo que los datos evaluados corresponden al punto inicial de los alimentadores. Toda la información utilizada para el análisis fue proporcionada por la empresa eléctrica CNEL EP – Unidad de Negocio Los Ríos.



**Figura 9** Diagrama Unifilar S/E Palenque

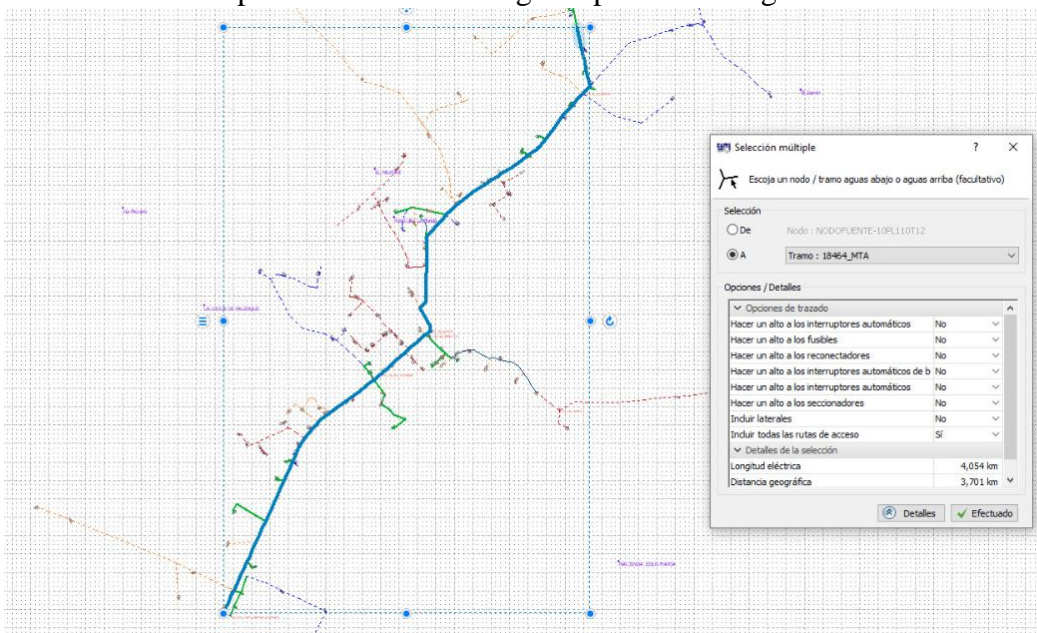
**Fuente:** Departamento de Planificación CNEL Babahoyo

### 3.2.2. SISTEMA DE ALIMENTACIÓN EN DISTRIBUCIÓN

Con el propósito de desarrollar el estudio de los alimentadores de la CNEL EP – Unidad de Negocio Los Ríos, se estableció una segmentación de cada uno de los circuitos en tres zonas operativas diferenciadas, definidas en función de su extensión y ubicación a lo largo del trazado del alimentador. Esta división permite representar de manera ordenada el comportamiento del sistema eléctrico desde la cabecera hasta los tramos más alejados.

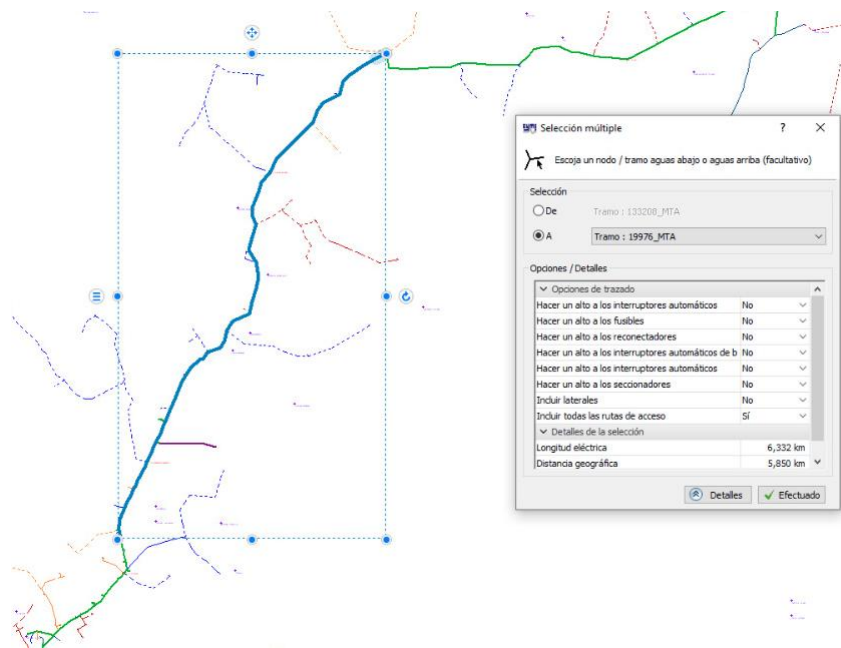
A partir de esta zonificación, se efectuarán los cálculos correspondientes para estimar la caída de voltaje en los puntos terminales de cada zona, empleando como base los valores de corriente de carga suministrados por la empresa distribuidora. Dichos cálculos permiten identificar la variación progresiva del nivel de tensión a lo largo del alimentador y verificar su comportamiento en la red.

La información obtenida a partir de este procedimiento facilitará evidenciar los sectores donde el voltaje se desvía de los rangos establecidos por la normativa vigente, particularmente en las zonas más distantes del punto de alimentación. De esta manera, se genera un sustento técnico que respalda la necesidad de proponer la colocación de reguladores orientados a mejorar el nivel de voltaje y garantizar el cumplimiento de los criterios de calidad del producto eléctrico exigidos por el ente regulador.



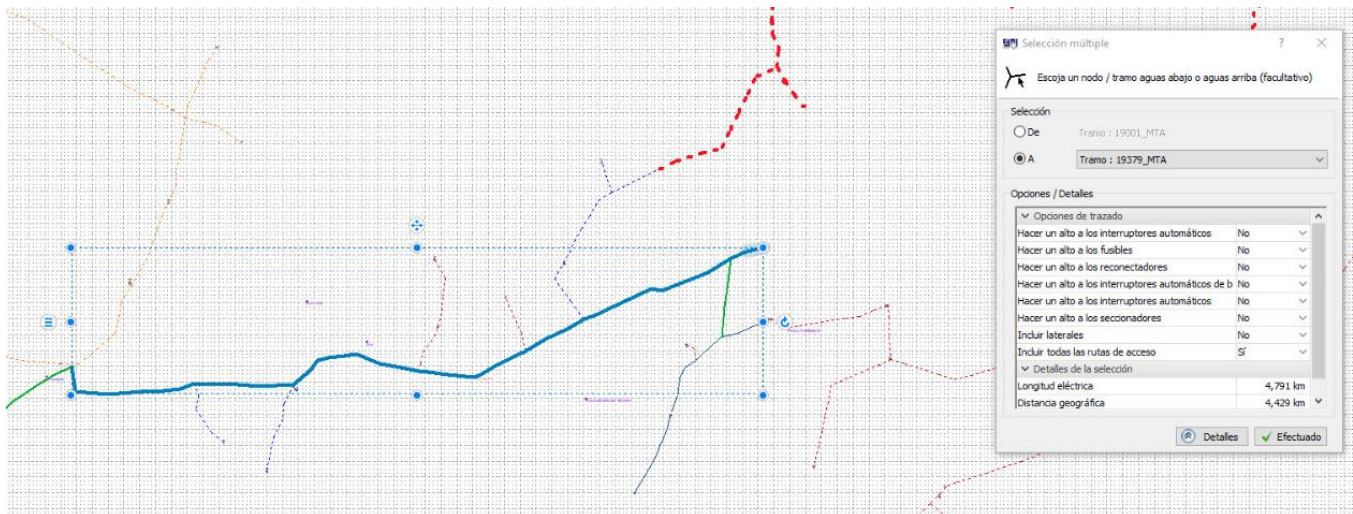
**Figura 10** Zona 1 Alimentador Palenque

En la **figura 11** se representa la Zona 2 del alimentador:



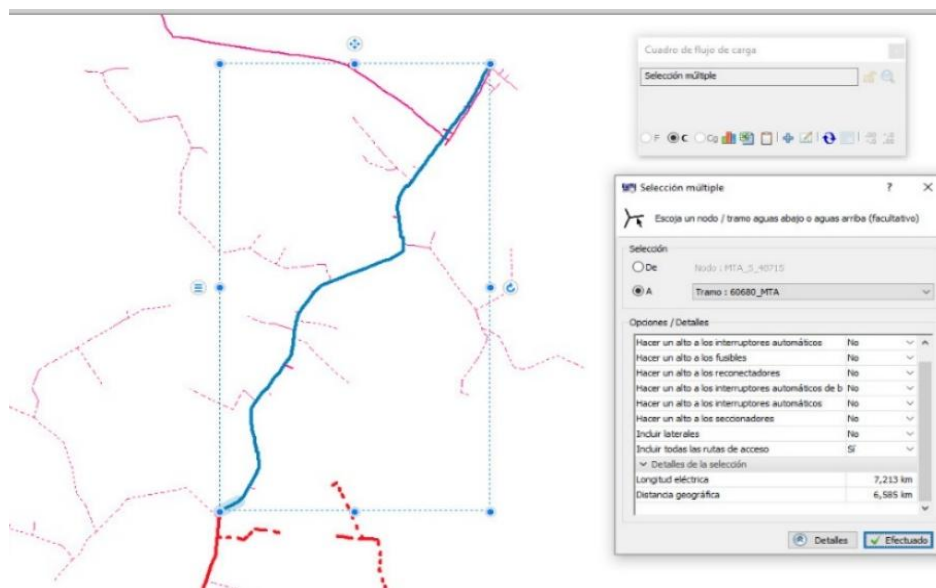
**Figura 11** Zona 2 Alimentador Palenque

En la **figura 12** se presenta la zona 3 del alimentador



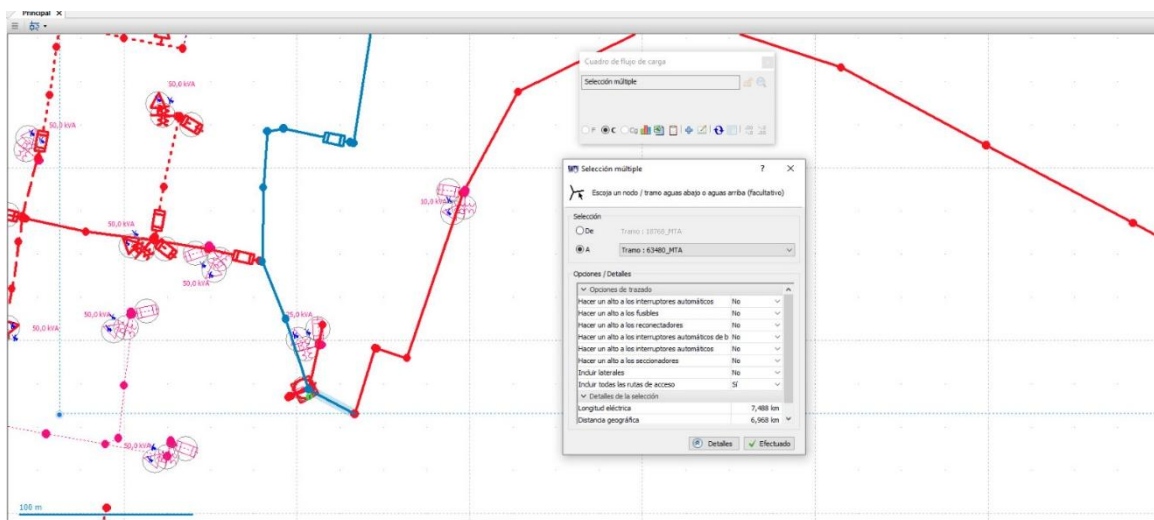
**Figura 12** Zona 3 Alimentador Palenque

A continuación, se presentan las Zonas del alimentador Santa Martha:



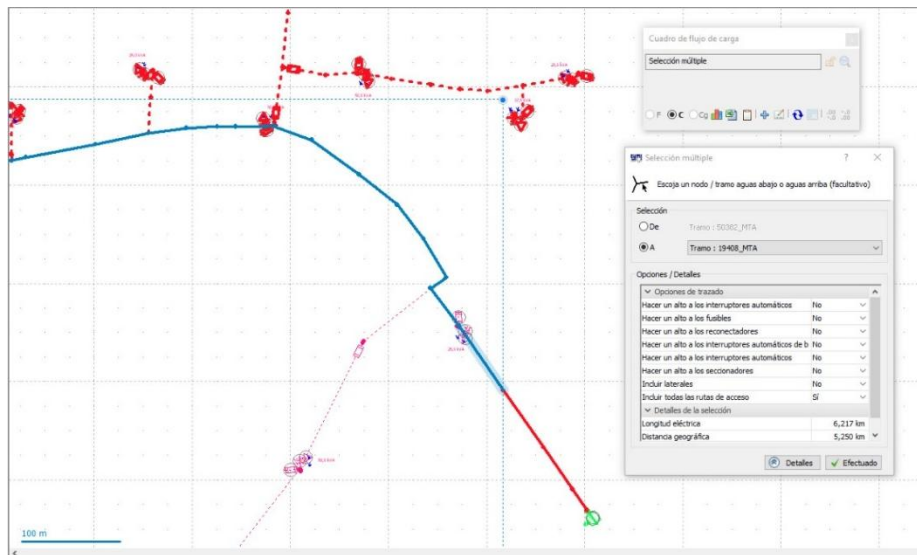
*Figura 13 Zona 1 alimentador Santa Martha*

La **figura 14** se presenta delimitada la zona 2 del alimentador Santa Martha:



*Figura 14 Zona 2 alimentador Santa Martha*

En la **figura 15** se presenta la Zona 3 del alimentador Santa Martha



*Figura 15 Zona 3 alimentador Santa Martha*

### 3.3. PLANTEAMIENTO DE ESTUDIO

En las tablas que se presentan a continuación se detallan los valores de corriente de carga, factor de potencia y la impedancia del conductor correspondientes a los tres escenarios operativos considerados: demanda mínima, media y máxima, para cada una de las zonas de los alimentadores Santa Martha y Palenque. Esta información constituye la base para el cálculo de las caídas de tensión, la aplicación de los criterios de regulación de voltaje y la determinación de ubicaciones óptimas para la instalación de reguladores de tensión.

### 3.3.1. DATOS DEL ALIMENTADOR SANTHA MARTHA

En las siguientes tablas se presentan los datos de los voltajes de línea – línea, corrientes de carga, factor de potencia y distancias eléctricas por zona y en cada fase del alimentador Santa Martha.

<b>Zona 1</b>				
<b>Fase</b>	<b>KVLL</b>	<b>I(A)</b>	<b>FP</b>	<b>Distancia (Km)</b>
A	13,6	84,5	86,52	7,213
B	13,9	78,2	88,51	7,213
C	13,69	37,6	89,70	7,213
<b>Zona 2</b>				
<b>Fase</b>	<b>KVLL</b>	<b>I(A)</b>	<b>FP</b>	<b>Distancia (Km)</b>
A	13,6	63,2	86,97	7,488
B	13,9	31,5	89,34	7,488
C	13,69	24,3	89,15	7,488
<b>Zona 3</b>				
<b>Fase</b>	<b>KVLL</b>	<b>I(A)</b>	<b>FP</b>	<b>Distancia (Km)</b>
A	13,6	56,1	87,46	6,217
B	13,9	9,6	89,42	6,217
C	13,69	12,2	89,04	6,217
<b>Impedancia de la línea</b>				
<b>Tipo de conductor</b>		<b>Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°</b>	<b>Reactancia Inductiva</b>	
Penguin 2/0		0,4387 ohmios/km	0,5169 ohmios/km	

*Tabla 3 Datos del alimentador Santa Martha demanda mínima*

<b>Zona 1</b>				
<b>Fase</b>	<b>KVLL</b>	<b>I(A)</b>	<b>FP</b>	<b>Distancia (Km)</b>
A	13,1	95,1	94,2	7,213
B	13,38	110,4	95,16	7,213
C	13,19	51,2	95,97	7,213
<b>Zona 2</b>				
<b>Fase</b>	<b>KVLL</b>	<b>I(A)</b>	<b>FP</b>	<b>Distancia (Km)</b>
A	13,1	66,8	94,55	7,488
B	13,38	46,9	95,98	7,488
C	13,19	32,9	95,94	7,488
<b>Zona 3</b>				
<b>Fase</b>	<b>KVLL</b>	<b>I(A)</b>	<b>FP</b>	<b>Distancia (Km)</b>
A	13,1	54,2	94,91	6,217
B	13,38	15,6	96,11	6,217
C	13,19	16,6	95,90	6,217
<b>Impedancia de la línea</b>				
<b>Tipo de conductor</b>		<b>Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°</b>		<b>Reactancia Inductiva</b>
Penguin 2/0		0,4387 ohmios/km		0,5169 ohmios/km

**Tabla 4** Datos alimentador Santa Martha demanda media

<b>Zona 1</b>					
<b>Fase</b>	<b>Vbase</b>	<b>KVLL</b>	<b>I(A)</b>	<b>FP</b>	<b>Distancia (Km)</b>
A	120,8	13,02	143,4	92,98	7,213
B	120,8	13,3	125,5	95,91	7,213
C	120,8	13,2	61,1	97,06	7,213
<b>Zona 2</b>					
<b>Fase</b>	<b>Vbase</b>	<b>KVLL</b>	<b>I(A)</b>	<b>FP</b>	<b>Distancia (Km)</b>
A	112,9	13,02	112,0	93,32	7,488
B	118,4	13,3	70,6	96,61	7,488
C	119,3	13,2	50,4	96,99	7,488
<b>Zona 3</b>					
<b>Fase</b>	<b>Vbase</b>	<b>KVLL</b>	<b>I(A)</b>	<b>FP</b>	<b>Distancia (Km)</b>
A	103,5	13,02	97	94,95	6,217
B	118,8	13,3	15,5	96,97	6,217
C	116,1	13,2	20,0	96,71	6,217
<b>Impedancia de la línea</b>					
<b>Tipo de conductor</b>		<b>Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°</b>		<b>Reactancia Inductiva</b>	
Penguin 2/0		0,4387 ohmios/km		0,5169 ohmios/km	

*Tabla 5 Datos alimentador Santa Martha demanda máxima*

En las **Tablas 3, 4 y 5** se evidencian desbalances relevantes en los valores de corriente entre fases, los cuales se presentan bajo los distintos escenarios de demanda considerados. En el escenario de demanda mínima, las corrientes registradas son relativamente bajas, lo que se traduce en una menor caída de voltaje a lo largo del alimentador. No obstante, conforme la demanda se incrementa hacia los escenarios de demanda media y máxima, se observa un aumento progresivo de las corrientes, alcanzando sus valores más elevados especialmente en los tramos finales del alimentador.

En particular, en la Zona 3 se manifiestan reducciones más pronunciadas del nivel de voltaje, asociadas principalmente a la longitud total del alimentador y al incremento de la carga conectada en este sector. Estas condiciones operativas afectan el perfil de tensión del sistema

y ponen en evidencia limitaciones en la capacidad del alimentador para mantener los niveles de voltaje dentro de los rangos establecidos por la normativa vigente.

La información presentada sustenta la necesidad de desarrollar un estudio técnico orientado a la regulación del nivel de voltaje, con el propósito de mejorar el desempeño eléctrico de la red y garantizar una entrega de energía acorde a los criterios de calidad del producto exigidos por el ente regulador.

### 3.3.2. DATOS DEL ALIMENTADOR PALENQUE

En las siguientes tablas se presentan los datos de los voltajes de línea – línea, corrientes de carga, factor de potencia y distancias eléctricas por zona y en cada fase del alimentador Palenque.

<b>Zona 1</b>				
<b>Fase</b>	<b>KVLL</b>	<b>I(A)</b>	<b>FP</b>	<b>Distancia (Km)</b>
A	13,7	25,5	86,52	4,054
B	13,9	34,6	87,01	4,054
C	13,7	41,6	84,88	4,054
<b>Zona 2</b>				
<b>Fase</b>	<b>KVLL</b>	<b>I(A)</b>	<b>FP</b>	<b>Distancia (Km)</b>
A	13,7	4,9	92,72	6,33
B	13,9	20,4	88,05	6,33
C	13,7	5,6	89,92	6,33
<b>Zona 3</b>				
<b>Fase</b>	<b>KVLL</b>	<b>I(A)</b>	<b>FP</b>	<b>Distancia (Km)</b>
A	13,7	0,3	98,81	4,791
B	13,9	12,9	88,09	4,791
C	13,7	3,5	89,88	4,791
<b>Impedancia de la línea</b>				
<b>Tipo de conductor</b>		<b>Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°</b>	<b>Reactancia Inductiva</b>	
Penguin 2/0		0,4387 ohmios/km	0,5169 ohmios/km	

*Tabla 6 Datos alimentador Palenque demanda mínima*

<b>Zona 1</b>				
<b>Fase</b>	<b>KVLL</b>	<b>I(A)</b>	<b>FP</b>	<b>Distancia (Km)</b>
A	13,3	42,5	90,49	4,054
B	13,6	58,5	90,24	4,054
C	13,4	69,2	89,43	4,054
<b>Zona 2</b>				
<b>Fase</b>	<b>KVLL</b>	<b>I(A)</b>	<b>FP</b>	<b>Distancia (Km)</b>
A	13,3	8,2	93,85	6,33
B	13,6	34,9	90,63	6,33
C	13,4	9,5	92,20	6,33
<b>Zona 3</b>				
<b>Fase</b>	<b>KVLL</b>	<b>I(A)</b>	<b>FP</b>	<b>Distancia (Km)</b>
A	13,3	0,6	97,50	4,791
B	13,6	22,3	90,72	4,791
C	13,4	5,9	91,22	4,791
<b>Impedancia de la línea</b>				
<b>Tipo de conductor</b>		<b>Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°</b>		<b>Reactancia Inductiva</b>
Penguin 2/0		0,4387 ohmios/km		0,5169 ohmios/km

**Tabla 7** Datos alimentador Palenque demanda media

<b>Zona 1</b>				
<b>Fase</b>	<b>KVLL</b>	<b>I(A)</b>	<b>FP</b>	<b>Distancia (Km)</b>
A	12,8	58,0	92,56	4,054
B	13,1	81,0	91,84	4,054
C	12,9	94,4	91,67	4,054
<b>Zona 2</b>				
<b>Fase</b>	<b>KVLL</b>	<b>I(A)</b>	<b>FP</b>	<b>Distancia (Km)</b>
A	12,8	11,3	94,87	6,33
B	13,1	48,7	91,97	6,33
C	12,9	12,9	93,62	6,33
<b>Zona 3</b>				
<b>Fase</b>	<b>KVLL</b>	<b>I(A)</b>	<b>FP</b>	<b>Distancia (Km)</b>
A	12,8	5,6	95,94	4,791
B	13,1	31,3	92,10	4,791
C	12,9	8,0	92,95	4,791
<b>Impedancia de la línea</b>				
<b>Tipo de conductor</b>		<b>Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°</b>		<b>Reactancia Inductiva</b>
Penguin 2/0		0,4387 ohmios/km		0,5169 ohmios/km

**Tabla 8** Datos alimentador Palenque demanda máxima

En las **Tablas 6, 7 y 8** se presentan los valores de corriente por fase correspondientes a las tres zonas del alimentador Palenque, en los distintos escenarios de demanda considerados. A partir de estos datos se identifica una distribución no uniforme de la carga entre fases, lo cual es característico de redes de distribución con múltiples derivaciones y usuarios de distinta naturaleza.

Durante el escenario de demanda mínima, las corrientes registradas son bajas, especialmente en las zonas ubicadas a mayor distancia de la subestación. Esta condición se asocia con menores caídas de voltaje a lo largo del alimentador. No obstante, se mantienen diferencias entre las corrientes de cada fase, lo que indica la presencia de desbalances en la red incluso bajo condiciones de baja carga.

Para los escenarios de demanda media y máxima, se evidencia un incremento progresivo de las corrientes, principalmente en los tramos cercanos a la cabecera del alimentador y en

determinadas fases de las zonas intermedias y finales. Este aumento de corriente, junto con la longitud total del circuito y la impedancia del conductor tipo Penguin 2/0, contribuye a caídas de voltaje más significativas hacia el extremo final del alimentador. En particular, la zona 3 presenta las condiciones más desfavorables debido a su mayor distancia eléctrica respecto al punto de suministro.

Aunque los valores del factor de potencia se mantienen dentro de rangos aceptables, el aumento de la corriente en condiciones de mayor demanda incrementa los efectos de la resistencia y reactancia de la línea, lo que repercute en el perfil de voltaje. En consecuencia, bajo escenarios de carga elevada, el alimentador Palenque presenta condiciones que pueden derivar en niveles de tensión cercanos o fuera de los límites establecidos por la normativa vigente.

## CAPITULO IV

### 4. DESARROLLO DEL ESTUDIO Y RESULTADOS

En el presente capítulo se desarrolla el procedimiento de cálculo a partir de la información técnica suministrada por la empresa distribuidora, con el propósito de determinar las caídas de voltaje en los alimentadores estudiados y aplicar las expresiones correspondientes a la regulación de tensión. Los resultados obtenidos mediante el enfoque analítico se contrastan con la representación del sistema a través del modelado del flujo de carga en el software CYMDIST, lo que permite visualizar el comportamiento del perfil de voltaje y verificar el cumplimiento de los límites establecidos por la normativa vigente.

El estudio se desarrollará considerando los tres escenarios de operación: demanda mínima, demanda media y demanda máxima. A partir de estos escenarios se efectuará una comparación del comportamiento de la red eléctrica, con el fin de evaluar las variaciones en el perfil de voltaje y el desempeño del sistema bajo diferentes condiciones de carga.

#### 4.1. EVALUACIÓN DE ALIMENTADORES SANTA MARTHA Y PALENQUE

Conforme a lo dispuesto por la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL), en los sistemas de distribución la variación del nivel de voltaje debe mantenerse dentro de un margen de  $\pm 6\%$  respecto a su valor nominal. En esta sección se desarrolla el estudio de la caída de voltaje en los alimentadores, cuyos resultados se contrastan con los límites establecidos por la normativa vigente. Posteriormente, se aplican las expresiones de regulación de tensión y se realiza el modelado del flujo de carga en el software CYMDIST, con el fin de estimar la ubicación de los reguladores de voltaje y comparar el comportamiento del sistema antes y después de su implementación.

Para empezar, utilizaremos los valores de KVLL de las tablas 3, 4 y 5 para calcular la caída de tensión y el voltaje real de referencia para cada escenario a partir de las siguientes expresiones:

$$\Delta V = KVLL \times \frac{6}{100} \text{ --- Ecuación 2}$$

$$\text{Voltaje real} = KVLL - \Delta V \text{ --- Ecuación 4}$$

Considerando que los transformadores empleados por la empresa distribuidora operan a un nivel de tensión de 13,2 kV, este valor se utiliza en las expresiones correspondientes con el fin de determinar el voltaje real de referencia:

$$\Delta V = 13800 \times \frac{6}{100} = 828 \text{ V --- Ecuación 2}$$

$$\text{Voltaje en alta real de referencia} = 13800 - 828 = \mathbf{12972 \text{ V}}$$

Dado que el software CYMDIST genera los perfiles de tensión únicamente en el nivel de baja tensión, es necesario calcular previamente el voltaje de referencia correspondiente a este nivel para efectos de comparación, en este caso, según la normativa, para bajo voltaje se permite un mínimo de  $\pm 8\%$ :

$$V = 240 \times \frac{8}{100} = 19,2 \text{ V --- Ecuación 2}$$

$$\text{Voltaje en alta real de referencia} = 240 - 19,2 = \mathbf{220,8 \text{ V}}$$

La relación de transformación sería:

$$a = \frac{V_{alta}}{V_{baja}} = \frac{13200}{240} = 55 \text{ --- Ecuación 5}$$

#### **4.1.1. CAÍDA DE VOLTAJE – ALIMENTADOR SANTA MARTHA**

Se dará inicio al cálculo de la caída de voltaje para cada uno de los escenarios de operación considerados, empleando la expresión:  $\Delta V = \sqrt{3}I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$ . Para la aplicación de esta ecuación se utilizarán los valores de corriente de carga, así como los parámetros de resistencia y reactancia inductiva de la línea, los cuales se encuentran detallados en las **Tablas 3, 4 y 5**.

##### **4.1.1.1. ESCENARIO 1: DEMANDA MÍNIMA – SANTA MARTHA**

A continuación, se presenta el procedimiento seguido para la determinación de la caída de voltaje en el escenario de demanda mínima, empleando los parámetros correspondientes a cada fase de la **Zona 1**.

**Fase A:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 3**:

Distancia = 7,213 Km

Corriente de carga = 84,5 A

Factor de potencia = 0,86

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,2765 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,4816 ohmios/km

Inicialmente, se procede a calcular los valores totales de resistencia y reactancia para la longitud del tramo analizado. Para ello, se multiplican los parámetros eléctricos del conductor por la distancia correspondiente:

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,2765) (7,213 \text{ Km}) = 1,994 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,4816) (7,213) = 3,474 \text{ ohmios/km}$$

Posteriormente, a partir del factor de potencia de la carga, se determina el ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,86) = 30,68^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (30,68) = 0,51$$

Finalmente, se aplica la expresión para el cálculo de la caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (84,5) ((1,994 (0,86) + 3,474(0,51))$$

$$\Delta V = 510,29 \text{ V}$$

El valor obtenido representa la caída de voltaje en la Fase A del alimentador para el escenario de demanda mínima en el tramo considerado.

**Fase B:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 3**:

Distancia = 7,213 Km

Corriente de carga = 78,2 A

Factor de potencia = 0,88

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,2765 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,4816 ohmios/km

Se procede a calcular los valores totales de resistencia y reactancia para la longitud del tramo analizado. Para ello, se multiplican los parámetros eléctricos del conductor por la distancia correspondiente:

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,2765) (7,213 \text{ Km}) = 1,994 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,4816) (7,213) = 3,474 \text{ ohmios/km}$$

Posteriormente, a partir del factor de potencia de la carga, se determina el ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,88) = 28,36^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (28,36^\circ) = 0,475$$

Finalmente, se aplica la expresión para el cálculo de la caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (78,2) ((1,994 (0,88) + 3,474(0,475))$$

$$\Delta V = 461,18 \text{ V}$$

El valor obtenido representa la caída de voltaje en la Fase B del alimentador para el escenario de demanda mínima en el tramo considerado.

**Fase C:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 3**:

Distancia = 7,213 Km

Corriente de carga = 37,6 A

Factor de potencia = 0,897

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,2765 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,4816 ohmios/km

Se procede a calcular los valores totales de resistencia y reactancia para la longitud del tramo analizado. Para ello, se multiplican los parámetros eléctricos del conductor por la distancia correspondiente:

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,2765) (7,213 \text{ Km}) = 1,994 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,4816) (7,213) = 3,474 \text{ ohmios/km}$$

Posteriormente, a partir del factor de potencia de la carga, se determina el ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,897) = 26,233^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (26,233^\circ) = 0,442$$

Finalmente, se aplica la expresión para el cálculo de la caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (37,6) ((1,994 (0,897) + 3,474(0,442))$$

$$\Delta V = 216,48 \text{ V}$$

El valor obtenido representa la caída de voltaje en la Fase B del alimentador para el escenario de demanda mínima en el tramo considerado.

De forma similar, se desarrolla el cálculo de la caída de voltaje en las zonas 2 y 3, manteniendo el mismo criterio metodológico.

**Zona 2:****Fase A:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 3**:

Distancia = 7,488 Km

Corriente de carga = 63,2 A

Factor de potencia = 0,87

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (7,488 \text{ Km}) = 3,285 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (7,488) = 3,87 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,87) = 29,54^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (29,54^\circ) = 0,493$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3}I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (63,2) ((3,285 (0,87) + 3,87(0,493))$$

$$\Delta V = 521,7 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase A en la zona 1:

$$\Delta V = 521,7 \text{ V} + 510 \text{ V} = 1031,7 \text{ V}$$

**Fase B:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 3**:

Distancia = 7,488 Km

Corriente de carga = 31,5 A

Factor de potencia = 0,89

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (7,488 \text{ Km}) = 3,285 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (7,488) = 3,87 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,89) = 27,13^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (27,13^\circ) = 0,46$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (31,5) ((3,285 (0,89) + 3,87(0,46))$$

$$\Delta V = 256,349 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase B en la zona 1:

$$\Delta V = 256,349 \text{ V} + 461,18 \text{ V} = 717,529 \text{ V}$$

### **Fase C:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 3**:

Distancia = 7,488 Km

Corriente de carga = 24,4 A

Factor de potencia = 0,89

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (7,488 \text{ Km}) = 3,285 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (7,488) = 3,87 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,89) = 27,13^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (27,13^\circ) = 0,46$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (24,4) ((3,285 (0,89) + 3,87(0,46))$$

$$\Delta V = 197,755 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase C en la zona 1:

$$\Delta V = 197,755 \text{ V} + 216,48 \text{ V} = 414,235 \text{ V}$$

### **Zona 3:**

#### **Fase A:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 3**:

Distancia = 6,217 Km

Corriente de carga = 56,1 A

Factor de potencia = 0,87

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (6,217 \text{ Km}) = 2,727 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (6,217) = 3,213 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,87) = 29,54^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (29,54^\circ) = 0,493$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3}I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (56,1) (2,727 (0,87) + 3,213(0,493))$$

$$\Delta V = 384,445 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase A en la zona 3:

$$\Delta V = 384,445 \text{ V} + 1031,7 \text{ V} = 1416,145 \text{ V}$$

### **Fase B:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 3**:

Distancia = 6,217 Km

Corriente de carga = 9,6 A

Factor de potencia = 0,89

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (6,217 \text{ Km}) = 2,727 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (6,217) = 3,213 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,89) = 27,13^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (27,13^\circ) = 0,456$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (9,6) ((2,727 (0,89) + 3,213(0,456))$$

$$\Delta V = 64,717 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase B en la zona 2:

$$\Delta V = 64,717 \text{ V} + 717,529 \text{ V} = 782,246 \text{ V}$$

### Fase C:

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 3**:

Distancia = 6,217 Km

Corriente de carga = 12,2 A

Factor de potencia = 0,89

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (6,217 \text{ Km}) = 2,727 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (6,217) = 3,213 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,89) = 27,13^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (27,13^\circ) = 0,456$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3}I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (12,2) ((2,727 (0,89) + 3,213(0,456))$$

$$\Delta V = 82,245 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase C en la zona 2:

$$\Delta V = 82,245 \text{ V} + 414,235 \text{ V} = 496,48 \text{ V}$$

#### **4.1.1.2. ESCENARIO 2: DEMANDA MEDIA – SANTA MARTHA**

Se repite el procedimiento de cálculo de la caída de voltaje para el escenario de demanda media, utilizando los valores consignados en la **Tabla 4**.

**Zona 1:**

**Fase A:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 4**:

Distancia = 7,213 Km

Corriente de carga = 95

Factor de potencia = 0,94

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,2765 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,4816 ohmios/km

Se procede a calcular los valores totales de resistencia y reactancia para la longitud del tramo analizado. Para ello, se multiplican los parámetros eléctricos del conductor por la distancia correspondiente:

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,2765) (7,213 \text{ Km}) = 1,994 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,4816) (7,213) = 3,474 \text{ ohmios/km}$$

Posteriormente, a partir del factor de potencia de la carga, se determina el ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,94) = 19,95^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (19,95^\circ) = 0,341$$

Finalmente, se aplica la expresión para el cálculo de la caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (95) ((1,994 (0,94) + 3,474(0,341)))$$

$$\Delta V = 503,34 \text{ V}$$

El valor obtenido representa la caída de voltaje en la Fase A del alimentador para el escenario de demanda media en el tramo considerado.

### **Fase B:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 4**:

Distancia = 7,213 Km

Corriente de carga = 110,4 A

Factor de potencia = 0,95

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,2765 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,4816 ohmios/km

Inicialmente, se procede a calcular los valores totales de resistencia y reactancia para la longitud del tramo analizado. Para ello, se multiplican los parámetros eléctricos del conductor por la distancia correspondiente:

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,2765) (7,213 \text{ Km}) = 1,994 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,4816) (7,213) = 3,474 \text{ ohmios/km}$$

Posteriormente, a partir del factor de potencia de la carga, se determina el ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,95) = 18,19^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (18,19) = 0,312$$

Finalmente, se aplica la expresión para el cálculo de la caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (110,4) ((1,994 (0,95) + 3,474(0,312)))$$

$$\Delta V = 569,48 \text{ V}$$

El valor obtenido representa la caída de voltaje en la Fase B del alimentador para el escenario de demanda mínima en el tramo considerado.

### **Fase C:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 4**:

Distancia = 7,213 Km

Corriente de carga = 51,2 A

Factor de potencia = 0,96

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,2765 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,4816 ohmios/km

Se procede a calcular los valores totales de resistencia y reactancia para la longitud del tramo analizado. Para ello, se multiplican los parámetros eléctricos del conductor por la distancia correspondiente:

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,2765) (7,213 \text{ Km}) = 1,994 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,4816) (7,213) = 3,474 \text{ ohmios/km}$$

Posteriormente, a partir del factor de potencia de la carga, se determina el ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,96) = 16,26^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (16,26^\circ) = 0,28$$

Finalmente, se aplica la expresión para el cálculo de la caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3}I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (51,2) ((1,994 (0,96) + 3,474(0,28))$$

$$\Delta V = 256,018 \text{ V}$$

El valor obtenido representa la caída de voltaje en la Fase C del alimentador para el escenario de demanda mínima en el tramo considerado.

Continuamos realizando los cálculos con las **zonas 2 y 3**

**Zona 2:****Fase A:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 4**:

Distancia = 7,488 Km

Corriente de carga = 66,8 A

Factor de potencia = 0,94

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (7,488 \text{ Km}) = 3,285 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (7,488) = 3,87 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,94) = 19,95^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (19,95^\circ) = 0,341$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (66,8) (3,285 (0,94) + 3,87(0,341))$$

$$\Delta V = 509,96 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase A en la zona 1:

$$\Delta V = 509,96 \text{ V} + 503,34 \text{ V} = 1013,3 \text{ V}$$

**Fase B:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 4**:

Distancia = 7,488 Km

Corriente de carga = 46,9 A

Factor de potencia = 0,96

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (7,488 \text{ Km}) = 3,285 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (7,488) = 3,87 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,96) = 16,26^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (16,26^\circ) = 0,28$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (46,9) (3,285 (0,96) + 3,87(0,28))$$

$$\Delta V = 344,201 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase B en la zona 1:

$$\Delta V = 344,201 \text{ V} + 569,48 \text{ V} = 913,681 \text{ V}$$

**Fase C:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 4**:

Distancia = 7,488 Km

Corriente de carga = 32,9 A

Factor de potencia = 0,96

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (7,488 \text{ Km}) = 3,285 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (7,488) = 3,87 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,96) = 16,26^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (16,26^\circ) = 0,28$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (32,9) (3,285 (0,96) + 3,87(0,28))$$

$$\Delta V = 241,455 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase C en la zona 1:

$$\Delta V = 241,455 \text{ V} + 256,018 \text{ V} = 497,473 \text{ V}$$

**Zona 3:****Fase A**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 4**:

Distancia = 6,217 Km

Corriente de carga = 54,2 A

Factor de potencia = 0,95

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (6,217 \text{ Km}) = 2,727 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (6,217) = 3,213 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,95) = 18,19^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (18,19^\circ) = 0,312$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (54,2) (2,727 (0,95) + 3,213(0,312))$$

$$\Delta V = 337,31 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase A en la zona 2:

$$\Delta V = 337,31 \text{ V} + 1013,3 \text{ V} = 1350,61 \text{ V}$$

**Fase B:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 4**:

Distancia = 6,217 Km

Corriente de carga = 15,6 A

Factor de potencia = 0,96

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (6,217 \text{ Km}) = 2,727 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (6,217) = 3,213 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,96) = 16,26^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (16,26^\circ) = 0,28$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (15,6) (2,727 (0,96) + 3,213(0,28))$$

$$\Delta V = 95,04 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase B en la zona 2:

$$\Delta V = 95,04 \text{ V} + 913,681 \text{ V} = 1008,721 \text{ V}$$

**Fase C:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 4**:

Distancia = 6,217 Km

Corriente de carga = 16,6 A

Factor de potencia = 0,96

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (6,217 \text{ Km}) = 2,727 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (6,217) = 3,213 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,96) = 16,26^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (16,26^\circ) = 0,28$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3}I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (16,6) (2,727 (0,96) + 3,213(0,28))$$

$$\Delta V = 101,137 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase C en la zona 2:

$$\Delta V = 101,137 + 497,473 \text{ V} = 598,61 \text{ V}$$

#### 4.1.1.3. ESCENARIO 3: DEMANDA MÁXIMA – SANTA MARTHA

El procedimiento de cálculo de la caída de voltaje se aplica también para el escenario correspondiente a la demanda máxima, utilizando los valores registrados en la **Tabla 5**. Esta condición de operación se caracteriza por presentar los mayores niveles de carga en el sistema, lo que da lugar a un incremento de la corriente en los conductores y, por ende, a mayores variaciones de tensión a lo largo del alimentador. Por esta razón, los resultados obtenidos en este escenario permiten identificar los tramos con mayor exigencia eléctrica y evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones de carga elevada.

##### Zona 1:

##### Fase A:

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 5**:

Distancia = 7,213 Km

Corriente de carga = 143 A

Factor de potencia = 0,93

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,2765 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,4816 ohmios/km

Se procede a calcular los valores totales de resistencia y reactancia para la longitud del tramo analizado. Para ello, se multiplican los parámetros eléctricos del conductor por la distancia correspondiente:

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,2765) (7,213 \text{ Km}) = 1,994 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,4816) (7,213 \text{ KM}) = 3,474 \text{ ohmios/km}$$

Posteriormente, a partir del factor de potencia de la carga, se determina el ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,93) = 21,56^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (21,56^\circ) = 0,367$$

Finalmente, se aplica la expresión para el cálculo de la caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3}I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (143) ((1,994 (0,93) + 3,474(0,367))$$

$$\Delta V = 775,094 \text{ V}$$

El valor obtenido representa la caída de voltaje en la Fase A del alimentador para el escenario de demanda máxima en el tramo considerado.

### **Fase B:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 5**:

Distancia = 7,213 Km

Corriente de carga = 125,5 A

Factor de potencia = 0,96

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,2765 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,4816 ohmios/km

Inicialmente, se procede a calcular los valores totales de resistencia y reactancia para la longitud del tramo analizado. Para ello, se multiplican los parámetros eléctricos del conductor por la distancia correspondiente:

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,2765) (7,213 \text{ Km}) = 1,994 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,4816) (7,213) = 3,474 \text{ ohmios/km}$$

Posteriormente, a partir del factor de potencia de la carga, se determina el ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,96) = 16,26^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (16,26^\circ) = 0,28$$

Finalmente, se aplica la expresión para el cálculo de la caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (125,5) ((1,994 (0,96) + 3,474(0,28))$$

$$\Delta V = 680,24 \text{ V}$$

El valor obtenido representa la caída de voltaje en la Fase B del alimentador para el escenario de demanda máxima en el tramo considerado.

### **Fase C:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 5**:

Distancia = 7,213 Km

Corriente de carga = 61,1 A

Factor de potencia = 0,97

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,2765 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,4816 ohmios/km

Se procede a calcular los valores totales de resistencia y reactancia para la longitud del tramo analizado. Para ello, se multiplican los parámetros eléctricos del conductor por la distancia correspondiente:

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,2765) (7,213 \text{ Km}) = 1,994 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,4816) (7,213) = 3,474 \text{ ohmios/km}$$

Posteriormente, a partir del factor de potencia de la carga, se determina el ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,97) = 14,07^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (14,07^\circ) = 0,243$$

Finalmente, se aplica la expresión para el cálculo de la caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (61,1) ((1,994 (0,97) + 3,474(0,243))$$

$$\Delta V = 294,029 \text{ V}$$

El valor obtenido representa la caída de voltaje en la Fase C del alimentador para el escenario de demanda máxima en el tramo considerado.

Continuamos realizando los cálculos con las **zonas 2 y 3**

### **Zona 2:**

#### **Fase A:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 5**:

Distancia = 7,488 Km

Corriente de carga = 112 A

Factor de potencia = 0,93

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (7,488 \text{ Km}) = 3,285 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (7,488) = 3,87 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,93) = 21,565^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (21,565^\circ) = 0,367$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (112) (3,285 (0,93) + 3,87(0,367))$$

$$\Delta V = 868 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase A en la zona 1:

$$\Delta V = 868 \text{ V} + 775,094 \text{ V} = 1643,094 \text{ V}$$

### **Fase B:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 5**:

Distancia = 7,488 Km

Corriente de carga = 70,6 A

Factor de potencia = 0,97

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (7,488 \text{ Km}) = 3,285 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (7,488) = 3,87 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,97) = 14,07^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (14,07^\circ) = 0,243$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3}I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (70,6) (3,285 (0,97) + 3,87(0,243))$$

$$\Delta V = 504,644 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase B en la zona 1:

$$\Delta V = 504,644 \text{ V} + 680,24 \text{ V} = 1184,884 \text{ V}$$

### **Fase C:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 5**:

Distancia = 7,488 Km

Corriente de carga = 50,4 A

Factor de potencia = 0,97

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (7,488 \text{ Km}) = 3,285 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (7,488) = 3,87 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,97) = 14,07^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (14,07^\circ) = 0,243$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (50,4) (3,285 (0,96) + 3,87(0,28))$$

$$\Delta V = 360,256 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase C en la zona 1:

$$\Delta V = 360,256 \text{ V} + 294,029 \text{ V} = 654,285 \text{ V}$$

### **Zona 3:**

#### **Fase A**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 4**:

Distancia = 6,217 Km

Corriente de carga = 97 A

Factor de potencia = 0,97

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (6,217 \text{ Km}) = 2,727 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (6,217) = 3,213 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,97) = 14,07^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (14,07^\circ) = 0,243$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (97) (2,727 (0,97) + 3,213(0,243))$$

$$\Delta V = 575,59 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase A en la zona 2:

$$\Delta V = 575,59 \text{ V} + 1643,094 \text{ V} = 2218,684 \text{ V}$$

### **Fase B:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 5**:

Distancia = 6,217 Km

Corriente de carga = 15,5 A

Factor de potencia = 0,97

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (6,217 \text{ Km}) = 2,727 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (6,217) = 3,213 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,97) = 14,07^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (14,07^\circ) = 0,243$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (15,5) (2,727 (0,96) + 3,213(0,243))$$

$$\Delta V = 91,244 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase B en la zona 2:

$$\Delta V = 91,244 \text{ V} + 1184,884 \text{ V} = 1276,128 \text{ V}$$

### Fase C:

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 5**:

Distancia = 6,217 Km

Corriente de carga = 20 A

Factor de potencia = 0,97

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (6,217 \text{ Km}) = 2,727 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (6,217) = 3,213 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,97) = 14,07^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (14,07^\circ) = 0,243$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3}I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (20) (2,727 (0,97) + 3,213(0,243))$$

$$\Delta V = 118,678 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase C en la zona 2:

$$\Delta V = 118,678 + 654,285 \text{ V} = 772,963 \text{ V}$$

En la tabla correspondiente se sintetizan los resultados obtenidos del cálculo de las caídas de voltaje en el alimentador Santa Martha, organizados por zonas y para cada uno de los escenarios de operación considerados.

#### 4.1.1.4. RESUMEN DE RESULTADOS DE CAÍDA DE VOLTAJE DEL ALIMENTADOR SANTA MARTHA

En la tabla correspondiente se sintetizan los resultados obtenidos del cálculo de las caídas de voltaje en el alimentador Santa Martha, organizados por zonas y para cada uno de los escenarios de operación considerados, También se calcula el voltaje real a partir de la **ecuación 4**.

<b>Demanda mínima</b>			
<b>Zona</b>	<b>Fase</b>	<b>Caída de voltaje (<math>\Delta V</math>)</b>	<b>Voltaje real (VLL - <math>\Delta V</math>)</b>
1	A	510,29 V	13089,71 V
	B	461,18 V	13438,82 V
	C	216,48 V	13473,52 V

2	A	1031,7 V	12569 V
	B	717,529 V	12972,472 V
	C	414,235 V	13275,765 V
3	A	1416,145 V	12183,855 V
	B	782,246 V	13117,754 V
	C	496,48 V	13193,52 V
<b>Demanda media</b>			
<b>Zona</b>	<b>Fase</b>	<b>Caída de voltaje (<math>\Delta V</math>)</b>	<b>Voltaje real (VLL - <math>\Delta V</math>)</b>
1	A	503,34 V	12596,66 V
	B	569,48 V	12810,52 V
	C	256,018 V	12934V
2	A	1013,3 V	12087 V
	B	913,681 V	12467 V
	C	497,473 V	12692,527 V
3	A	1350,61 V	11750 V
	B	1008,721 V	12273,083 V
	C	598,61 V	12591,39 V
<b>Demanda máxima</b>			
<b>Zona</b>	<b>Fase</b>	<b>Caída de voltaje (<math>\Delta V</math>)</b>	<b>Voltaje real (VLL - <math>\Delta V</math>)</b>
1	A	775,094 V	12244,906 V
	B	680,24 V	12619,76 V
	C	294,029 V	12905,971 V
2	A	1643,094 V	11376,906 V
	B	1184,884 V	12115,12 V
	C	654,285 V	12545,715 V
3	A	2218,684 V	10801,316 V
	B	1276,128 V	12023,872 V
	C	772,963 V	12427,037 V

**Tabla 9** Resultados de caída de voltaje por zonas en el alimentador Santa Martha

En la **Tabla 9** se presentan los resultados correspondientes a los cálculos de la caída de voltaje en el alimentador Santa Martha. A partir de estos valores se evidencia que la magnitud de la caída de tensión tiende a incrementarse conforme aumenta el nivel de carga del sistema. Los valores resaltados en color rojo corresponden a aquellos niveles de voltaje que resultan inferiores a los valores de referencia previamente calculados, lo que indica que se encuentran fuera de los límites permitidos por la normativa vigente.

#### **4.1.2. CAÍDA DE VOLTAJE – ALIMENTADOR PALENQUE**

Una vez concluidos los cálculos correspondientes a la caída de voltaje en el alimentador Santa Martha, se procede a desarrollar el mismo procedimiento para el alimentador Palenque, con el fin de evaluar su comportamiento bajo los escenarios de operación considerados.

##### **4.1.2.1. ESCENARIO 1: DEMANDA MÍNIMA – PALENQUE**

###### **Zona 1:**

###### **Fase A**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 6**:

Distancia = 4,054 Km

Corriente de carga = 25 A

Factor de potencia = 0,86

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,2765 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,4816 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,2765) (4,054 \text{ Km}) = 1,12 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,4816) (4,054 \text{ Km}) = 1,952 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,86) = 30,683^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (14,07^\circ) = 0,51$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3}I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (25,5) (1,12 (0,86) + 1,952(0,51))$$

$$\Delta V = 86,453 \text{ V}$$

### **Fase B:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 6**:

Distancia = 4,054 Km

Corriente de carga = 34,6 A

Factor de potencia = 0,87

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,2765 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,4816 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,2765) (4,054 \text{ Km}) = 1,12 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,4816) (4,054 \text{ Km}) = 1,952 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,87) = 29,54^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (29,54^\circ) = 0,493$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3}I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (34,6) (1,12 (0,87) + 1,952(0,493))$$

$$\Delta V = 116 \text{ V}$$

### Fase C:

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 6**:

Distancia = 4,054 Km

Corriente de carga = 41,6 A

Factor de potencia = 0,85

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,2765 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,4816 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,2765) (4,054 \text{ Km}) = 1,12 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,4816) (4,054 \text{ Km}) = 1,952 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,85) = 31,79^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (31,79^\circ) = 0,526$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3}I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (41,6) (1,12 (0,85) + 1,952(0,526))$$

$$\Delta V = 142,479 \text{ V}$$

## Zona 2:

### Fase A

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 6**:

Distancia = 6,332 Km

Corriente de carga = 4,9 A

Factor de potencia = 0,927

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (6,332 \text{ Km}) = 2,779 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (6,332 \text{ Km}) = 3,273 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,927) = 22,028^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (22,78^\circ) = 0,375$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (4,9) (2,779 (0,86) + 3,273(0,51))$$

$$\Delta V = 32,233 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase A en la zona 1:

$$\Delta V = 32,233 \text{ V} + 86,453 \text{ V} = 118,686 \text{ V}$$

### **Fase B:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 6**:

Distancia = 6,332 Km

Corriente de carga = 20,4 A

Factor de potencia = 0,88

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (6,332 \text{ Km}) = 2,779 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (6,332 \text{ Km}) = 3,273 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,88) = 28,36^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (28,36^\circ) = 0,475$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3}I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (20) (2,779 (0,88) + 3,273(0,475))$$

$$\Delta V = 141,139 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase B en la zona 1:

$$\Delta V = 141,139 \text{ V} + 116 \text{ V} = 257,139 \text{ V}$$

**Fase C:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 6**:

Distancia = 6,332 Km

Corriente de carga = 5,6 A

Factor de potencia = 0,899

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (6,332 \text{ Km}) = 2,779 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (6,332 \text{ Km}) = 3,273 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,899) = 25,97^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (25,97^\circ) = 0,438$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (5,6) (2,779 (0,899) + 3,273(0,438))$$

$$\Delta V = 38,082 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase B en la zona 1:

$$\Delta V = 38,082 \text{ V} + 142,479 \text{ V} = 180,561 \text{ V}$$

**Zona 3:****Fase A**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 6**:

Distancia = 4,791 Km

Corriente de carga = 0,3 A

Factor de potencia = 0,988

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (4,791 \text{ Km}) = 2,102 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (4,791 \text{ Km}) = 2,476 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,988) = 8,88^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (8,88^\circ) = 0,154$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (0,3) (2,102 (0,988) + 2,476(0,154))$$

$$\Delta V = 1,276 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase A en la zona 2:

$$\Delta V = 1,276 \text{ V} + 118,686 \text{ V} = 119,962 \text{ V}$$

**Fase B:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 6**:

Distancia = 4,791 Km

Corriente de carga = 12,9 A

Factor de potencia = 0,88

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (4,791 \text{ Km}) = 2,102 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (4,791 \text{ Km}) = 2,476 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,88) = 28,36^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (28,36^\circ) = 0,475$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (12,9) (2,102 (0,88) + 2,476(0,475))$$

$$\Delta V = 67,529 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase B en la zona 2:

$$\Delta V = 67,529 \text{ V} + 257,139 \text{ V} = 324,668 \text{ V}$$

**Fase C:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 6**:

Distancia = 4,791 Km

Corriente de carga = 3,5 A

Factor de potencia = 0,899

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (4,791 \text{ Km}) = 2,102 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (4,791 \text{ Km}) = 2,476 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,899) = 25,97^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (25,97^\circ) = 0,438$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (3,5) (2,102 (0,899) + 2,476(0,438))$$

$$\Delta V = 18 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase C en la zona 2:

$$\Delta V = 18 \text{ V} + 180,561 \text{ V} = 198,561 \text{ V}$$

#### 4.1.2.2. ESCENARIO 2: DEMANDA MEDIA – PALENQUE

##### Zona 1:

##### Fase A:

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 7**:

Distancia = 4,054 Km

Corriente de carga = 42,5 A

Factor de potencia = 0,90

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,2765 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,4816 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,2765) (4,054 \text{ Km}) = 1,120931 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,4816) (4,054 \text{ Km}) = 1,9524064 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,90) = 25,84^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (25,84^\circ) = 0,346$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3}I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (42,5) (1,1209 (0,90) + 1,9524(0,346))$$

$$\Delta V = 123,843 \text{ V}$$

**Fase B:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 7**:

Distancia = 4,054 Km

Corriente de carga = 58,5 A

Factor de potencia = 0,90

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,2765 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,4816 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,2765) (4,054 \text{ Km}) = 1,120931 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,4816) (4,054 \text{ Km}) = 1,9524064 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,90) = 25,84^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (25,84^\circ) = 0,346$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (58,5) (1,1209 (0,90) + 1,952(0,346))$$

$$\Delta V = 170,467 \text{ V}$$

**Fase C:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 7**:

Distancia = 4,054 Km

Corriente de carga = 69,2 A

Factor de potencia = 0,89

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,2765 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,4816 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,2765) (4,054 \text{ Km}) = 1,120931 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,4816) (4,054 \text{ Km}) = 1,9524064 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,89) = 27,13^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (27,13^\circ) = 0,455$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (69,2) (1,1209 (0,89) + 1,9524(0,455))$$

$$\Delta V = 226 \text{ V}$$

## **Zona 2:**

### **Fase A:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 7**:

Distancia = 6,332 Km

Corriente de carga = 8 A

Factor de potencia = 0,938

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (6,332 \text{ Km}) = 2,7778484 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (6,332 \text{ Km}) = 3,2730108 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,938) = 20,28^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (20,28^\circ) = 0,347$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3}I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (8) (2,778 (0,938) + 3,273(0,347))$$

$$\Delta V = 51,84 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase A en la zona 2:

$$\Delta V = 123,843 + 51,84 \text{ V} = 175,683 \text{ V}$$

### **Fase B:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 7**:

Distancia = 6,332 Km

Corriente de carga = 34,9 A

Factor de potencia = 0,906

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (6,332 \text{ Km}) = 2,7778484 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (6,332 \text{ Km}) = 3,2730108 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,906) = 25,04^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (25,04^\circ) = 0,423$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3}I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (34,9) (2,778 (0,906) + 3,273(0,423))$$

$$\Delta V = 235,831 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase B en la zona 2:

$$\Delta V = 170,467 \text{ V} + 235,831 \text{ V} = 406,298 \text{ V}$$

### Fase C:

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 7**:

Distancia = 6,332 Km

Corriente de carga = 9,5 A

Factor de potencia = 0,92

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (6,332 \text{ Km}) = 2,7778484 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (6,332 \text{ Km}) = 3,2730108 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,92) = 23,07^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (23,07^\circ) = 0,392$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3}I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (9,5) (2,778 (0,92) + 3,273(0,392))$$

$$\Delta V = 63,165 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase C en la zona 2:

$$\Delta V = 226 \text{ V} + 63,165 \text{ V} = 289,165 \text{ V}$$

### **Zona 3:**

#### **Fase A:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 7**:

Distancia = 4,791 Km

Corriente de carga = 0,6 A

Factor de potencia = 0,975

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (4,791 \text{ Km}) = 2,1018117 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (4,791 \text{ Km}) = 2,4764679 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,975) = 12,84^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (12,84^\circ) = 0,222$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3}I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (0,6) (2,102 (0,975) + 2,476(0,222))$$

$$\Delta V = 2,7 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase A en la zona 3:

$$\Delta V = 175,683 \text{ V} + 2,7 \text{ V} = 178,383 \text{ V}$$

### **Fase B:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 7**:

Distancia = 4,791 Km

Corriente de carga = 22,3 A

Factor de potencia = 0,907

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (4,791 \text{ Km}) = 2,1018117 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (4,791 \text{ Km}) = 2,4764679 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,907) = 24,906^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (24,906^\circ) = 0,421$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3}I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (22,3) (2,102 (0,907) + 2,476(0,421))$$

$$\Delta V = 113,9 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase C en la zona 3:

$$\Delta V = 406,298 \text{ V} + 113,9 \text{ V} = 520,2 \text{ V}$$

### **Fase C:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 7**:

Distancia = 4,791 Km

Corriente de carga = 5,9 A

Factor de potencia = 0,92

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (4,791 \text{ Km}) = 2,1018117 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (4,791 \text{ Km}) = 2,4764679 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,92) = 23,07^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (23,07^\circ) = 0,392$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3}I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (5,9) (2,102 (0,92) + 2,476(0,392))$$

$$\Delta V = 29,68 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase C en la zona 3:

$$\Delta V = 289,165 \text{ V} + 29,68 \text{ V} = 318,846 \text{ V}$$

#### 4.1.2.3. ESCENARIO 3: DEMANDA MÁXIMA – PALENQUE

**Zona 1:**

**Fase A:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 8**:

Distancia = 4,054 Km

Corriente de carga = 58 A

Factor de potencia = 0,926

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,2765 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,4816 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,2765) (4,054 \text{ Km}) = 1,120931 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,4816) (4,054 \text{ Km}) = 1,9524064 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,926) = 22,18^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (22,18^\circ) = 0,377$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3}I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (58) (1,121 (0,926) + 1,952(0,377))$$

$$\Delta V = 178,209 \text{ V}$$

### **Fase B:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 8**:

Distancia = 4,054 Km

Corriente de carga = 81 A

Factor de potencia = 0,918

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,2765 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,4816 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,2765) (4,054 \text{ Km}) = 1,120931 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,4816) (4,054 \text{ Km}) = 1,9524064 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,918) = 23,36^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (23,36^\circ) = 0,396$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3}I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (81) (1,1209 (0,918) + 1,952(0,396))$$

$$\Delta V = 252,82 \text{ V}$$

**Fase C:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 8**:

Distancia = 4,054 Km

Corriente de carga = 94,4 A

Factor de potencia = 0,917

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,2765 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,4816 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,2765) (4,054 \text{ Km}) = 1,120931 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,4816) (4,054 \text{ Km}) = 1,9524064 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,917) = 23,51^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (23,51^\circ) = 0,399$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (94,4) (1,121 (0,917) + 1,952(0,399))$$

$$\Delta V = 295,422 \text{ V}$$

**Zona 2:****Fase A:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 8**:

Distancia = 6,332 Km

Corriente de carga = 11,3 A

Factor de potencia = 0,949

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (6,332 \text{ Km}) = 2,7778484 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (6,332 \text{ Km}) = 3,2730108 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,949) = 18,38^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (18,38^\circ) = 0,315$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (11,3) (2,778 (0,949) + 3,273(0,315))$$

$$\Delta V = 71,777 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase A en la zona 2:

$$\Delta V = 178,209 \text{ V} + 71,777 \text{ V} = 249,986 \text{ V}$$

**Fase B:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 8**:

Distancia = 6,332 Km

Corriente de carga = 48,7 A

Factor de potencia = 0,92

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (6,332 \text{ Km}) = 2,7778484 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (6,332 \text{ Km}) = 3,2730108 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,92) = 23,07^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (23,07^\circ) = 0,391$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (48,7) (2,778 (0,92) + 3,273(0,391))$$

$$\Delta V = 323,528 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase B en la zona 1:

$$\Delta V = 252,82 \text{ V} + 323,528 \text{ V} = 576,348 \text{ V}$$

**Fase C:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 8**:

Distancia = 6,332 Km

Corriente de carga = 12,9 A

Factor de potencia = 0,936

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (6,332 \text{ Km}) = 2,7778484 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (6,332 \text{ Km}) = 3,2730108 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,936) = 20,61^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (20,61^\circ) = 0,352$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (12,9) (2,778 (0,936) + 3,273(0,352))$$

$$\Delta V = 83,84 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase C en la zona 1:

$$\Delta V = 295,422 \text{ V} + 83,84 \text{ V} = 379,26 \text{ V}$$

**Zona 3:****Fase A:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 8**:

Distancia = 4,791 Km

Corriente de carga = 5,6 A

Factor de potencia = 0,959

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (4,791 \text{ Km}) = 2,1018117 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (4,791 \text{ Km}) = 2,4764679 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,959) = 16,463^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (16,463^\circ) = 0,283$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (5,6) (2,102 (0,949) + 2,476(0,283))$$

$$\Delta V = 26,145 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase A en la zona 2:

$$\Delta V = 249,986 \text{ V} + 26,145 \text{ V} = 276,13 \text{ V}$$

**Fase B:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 8**:

Distancia = 4,791 Km

Corriente de carga = 31,3 A

Factor de potencia = 0,921

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (4,791 \text{ Km}) = 2,1018117 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (4,791 \text{ Km}) = 2,4764679 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,921) = 22,93^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (22,93^\circ) = 0,389$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (31,2) (2,102 (0,921) + 2,476(0,389))$$

$$\Delta V = 156,668 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase B en la zona 2:

$$\Delta V = 576,348 \text{ V} + 156,668 \text{ V} = 733,016 \text{ V}$$

**Fase C:**

Se consideran los siguientes datos de entrada de la **tabla 8**:

Distancia = 4,791 Km

Corriente de carga = 8 A

Factor de potencia = 0,937

Resistencia eléctrica máxima CA 60 Hz 75°C = 0,4387 ohmios/km

Reactancia inductiva = 0,5169 ohmios/km

Resistencia equivalente del tramo:

$$R = (0,4387) (4,791 \text{ Km}) = 2,1018117 \text{ ohmios/km}$$

Reactancia inductiva equivalente del tramo:

$$X = (0,5169) (4,791 \text{ Km}) = 2,4764679 \text{ ohmios/km}$$

Ángulo de desfase:

$$\cos^{-1}(0,937) = 20,45^\circ$$

De donde se obtiene:

$$\sin \alpha = \sin (20,45^\circ) = 0,349$$

Caída de voltaje en sistemas trifásicos:

$$\Delta V = \sqrt{3}I (R \cos \alpha + X \sin \alpha)$$

reemplazando los datos:

$$\Delta V = \sqrt{3} (8) (2,102 (0,937) + 2,476(0,349))$$

$$\Delta V = 39,265 \text{ V}$$

Finalmente se suma la caída de voltaje de la fase C en la zona 2:

$$\Delta V = 379,26 \text{ V} + 39,265 \text{ V} = 457,79 \text{ V}$$

#### 4.1.2.4. RESUMEN DE RESULTADOS DEL ALIMENTADOR PALENQUE

En la **tabla 10** respectiva se presentan de forma resumida los resultados obtenidos del cálculo de las caídas de voltaje en el alimentador Palenque, organizados por zonas y para cada uno de los escenarios de operación considerados. También se calcula el voltaje real a partir de la **ecuación 4**.

<b>Demanda mínima</b>			
<b>Zona</b>	<b>Fase</b>	<b>Caída de voltaje (<math>\Delta V</math>)</b>	<b>Voltaje real (VLL - <math>\Delta V</math>)</b>
<b>1</b>	A	86,453	13613,54 V
	B	116	13784 V
	C	142,479	13557,521 V
<b>2</b>	A	118,686	13581,314 V
	B	257,139	13642,86 V
	C	180,561	13519,439 V
<b>3</b>	A	119,962	13580,038 V
	B	324,668	131575,332 V
	C	198,561	13501,439 V
<b>Demanda media</b>			
<b>Zona</b>	<b>Fase</b>	<b>Caída de voltaje (<math>\Delta V</math>)</b>	<b>Voltaje real (VLL - <math>\Delta V</math>)</b>
<b>1</b>	A	123,843	13176,157 V
	B	170,467	13429,533 V
	C	226	13174 V
<b>2</b>	A	175,683	13124,317 V
	B	406,298	13193,702 V
	C	289,165	13110,83 V
<b>3</b>	A	178,383	13121,61 V
	B	520,2	13079,8 V
	C	318,846	13081,154 V

<b>Demanda máxima</b>			
<b>Zona</b>	<b>Fase</b>	<b>Caída de voltaje (<math>\Delta V</math>)</b>	<b>Voltaje real (VLL - <math>\Delta V</math>)</b>
<b>1</b>	A	178,209	12621,79 V
	B	252,82	12847,18 V
	C	295,422	12604,578 V
<b>2</b>	A	249,986	12550,014 V
	B	576,348	12523,652 V
	C	379,26	12520,74 V
<b>3</b>	A	276,13	12523,87 V
	B	733,016	12366,984 V
	C	457,79	12442,21 V

**Tabla 10** Resultados de caída de voltaje por zonas en el alimentador Palenque

Con base en los resultados consignados en la Tabla 10, se evidencia que la caída de voltaje en el alimentador Palenque presenta un incremento progresivo a medida que aumentan los niveles de carga. Así mismo los valores que están de color rojo se encuentran fuera del límite permitido por la regulación.

#### 4.1.3. REGULACIÓN DE VOLTAJE

En esta sección se desarrollan los cálculos correspondientes a la regulación de voltaje mediante la aplicación de la **ecuación (2)**, expresada como:

$$V_{\text{nuevo}} = V_{\text{actual}} \times \left( 1 + N_{\text{taps}} \times \frac{\%_{\text{por\_tap}}}{100} \right) \text{ --- Ecuación 3}$$

Para este propósito, se consideran los valores de voltaje reales previamente obtenidos para los alimentadores, los cuales se presentan en las **Tablas 9 y 10** y que se encuentran fuera de los límites establecidos por la normativa vigente, siendo estos valores definidos como  $V_{\text{actual}}$ . Los parámetros correspondientes al número de pasos del regulador ( $N_{\text{taps}}$ ) y al porcentaje de variación por tap (%por tap) se toman de la primera fila de la **Tabla 2**, dado que corresponden a las especificaciones técnicas del regulador utilizado por CNEL EP –

Unidad de Negocio Los Ríos, según información proporcionada por el fabricante. Recordemos que el voltaje de referencia calculado anteriormente es 12408 V, por lo tanto, la regulación debe tener un mínimo de ese valor.

#### 4.1.3.1. REGULACIÓN DE VOLTAJE – ALIMENTADOR SANTA MARTHA

A continuación, se presentan los valores de voltaje que se encuentran fuera del límite permitido, sobre los cuales se aplica la ecuación de regulación de tensión correspondiente.

$$N_{taps} = 16$$

$$\%por\_tap = 10\%$$

#### **Demanda mínima**

#### **Zona 2:**

#### **Fase A:**

$$\text{Voltaje actual} = 12366,984 \text{ V}$$

Aplicando la fórmula de regulación de tensión:

$$V_{nuevo} = V_{actual} \times \left( 1 + N_{taps} \times \frac{\%por\_tap}{100} \right)$$

Reemplazando los datos:

$$V_{nuevo} = 12366,984 \times \left( 1 + 16 \times \frac{10\%}{100} \right)$$

$$V_{nuevo} = 12564,855 \text{ V}$$

Como resultado se obtuvo un valor menor a 12408 V, por lo que se procede a aumentar el porcentaje por tap:

$$V_{nuevo} = 12059,71 \times \left( 1 + 16 \times \frac{20\%}{100} \right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 12445,21 \text{ V}$$

### Zona 3:

#### Fase A:

Voltaje actual = 11675,273 V

Aplicando la fórmula de regulación de tensión:

$$V_{\text{nuevo}} = V_{\text{actual}} \times \left( 1 + N_{\text{taps}} \times \frac{\%_{\text{por\_tap}}}{100} \right)$$

Reemplazando los datos:

$$V_{\text{nuevo}} = 11675,273 \times \left( 1 + 16 \times \frac{20\%}{100} \right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 12048 \text{ V}$$

Debido a que este tramo no cumple con la normativa se procede a adicionar otro banco de reguladores:

$$V_{\text{nuevo}} = 12142,28 \times \left( 1 + 16 \times \frac{20\%}{100} \right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 12433,82 \text{ V}$$

### Demanda media

#### Zona 2:

#### Fase A:

Voltaje actual = 11923,184 V

Aplicando la fórmula de regulación de tensión:

$$V_{\text{nuevo}} = V_{\text{actual}} \times \left( 1 + N_{\text{taps}} \times \frac{\%_{\text{por\_tap}}}{100} \right)$$

Reemplazando los datos:

$$V_{\text{nuevo}} = 11923,184 \times \left( 1 + 16 \times \frac{20\%}{100} \right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 12304,726 \text{ V}$$

$$V_{\text{nuevo}} = 12304,726 \times \left( 1 + 16 \times \frac{20\%}{100} \right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 12698,477 \text{ V}$$

### **Fase B:**

Voltaje actual = 12368,123 V

Aplicando la fórmula de regulación de tensión:

$$V_{\text{nuevo}} = V_{\text{actual}} \times \left( 1 + N_{\text{taps}} \times \frac{\%_{\text{por\_tap}}}{100} \right)$$

Reemplazando los datos:

$$V_{\text{nuevo}} = 12368,123 \times \left( 1 + 16 \times \frac{20\%}{100} \right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 12763,90 \text{ V}$$

$$V_{\text{nuevo}} = 12763,90 \times \left( 1 + 16 \times \frac{20\%}{100} \right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 13172,345 \text{ V}$$

**Zona 3:****Fase A:**

Voltaje actual = 11584,874 V

Aplicando la fórmula de regulación de tensión:

$$V_{\text{nuevo}} = V_{\text{actual}} \times \left( 1 + N_{\text{taps}} \times \frac{\% \text{por\_tap}}{100} \right)$$

Reemplazando los datos:

$$V_{\text{nuevo}} = 11585,874 \times \left( 1 + 16 \times \frac{20\%}{100} \right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 11956,621 \text{ V}$$

$$V_{\text{nuevo}} = 11585,874 \times \left( 1 + 16 \times \frac{20\%}{100} \right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = \mathbf{12339,234 \text{ V}}$$

**Fase B:**

Voltaje actual = 12273,083 V

Aplicando la fórmula de regulación de tensión:

$$V_{\text{nuevo}} = V_{\text{actual}} \times \left( 1 + N_{\text{taps}} \times \frac{\% \text{por\_tap}}{100} \right)$$

Reemplazando los datos:

$$V_{\text{nuevo}} = 12273,083 \times \left( 1 + 16 \times \frac{20\%}{100} \right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 12665,822 \text{ V}$$

$$V_{\text{nuevo}} = 12665,822 \times \left( 1 + 16 \times \frac{20\%}{100} \right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 13071,13 \text{ V}$$

### **Demanda máxima**

#### **Zona 2:**

#### **Fase A:**

$$\text{Voltaje actual} = 10878,236 \text{ V}$$

Aplicando la fórmula de regulación de tensión:

$$V_{\text{nuevo}} = V_{\text{actual}} \times \left( 1 + N_{\text{taps}} \times \frac{\% \text{por\_tap}}{100} \right)$$

Reemplazando los datos:

$$V_{\text{nuevo}} = 10878,236 \times \left( 1 + 16 \times \frac{20\%}{100} \right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 11226,339 \text{ V}$$

$$V_{\text{nuevo}} = 11226,339 \times \left( 1 + 16 \times \frac{20\%}{100} \right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = \mathbf{11585,582 \text{ V}}$$

#### **Fase B:**

$$\text{Voltaje actual} = 11683,006 \text{ V}$$

Aplicando la fórmula de regulación de tensión:

$$V_{\text{nuevo}} = V_{\text{actual}} \times \left( 1 + N_{\text{taps}} \times \frac{\% \text{por\_tap}}{100} \right)$$

Reemplazando los datos:

$$V_{\text{nuevo}} = 11683,006 \times \left( 1 + 16 \times \frac{20\%}{100} \right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 12056,862 \text{ V}$$

$$V_{\text{nuevo}} = 12056,862 \times \left(1 + 16 \times \frac{20\%}{100}\right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 12442,682 \text{ V}$$

### Zona 3:

#### Fase A:

Voltaje actual = 10302,646 V

Aplicando la fórmula de regulación de tensión:

$$V_{\text{nuevo}} = V_{\text{actual}} \times \left(1 + N_{\text{taps}} \times \frac{\%_{\text{por\_tap}}}{100}\right)$$

Reemplazando los datos:

$$V_{\text{nuevo}} = 10302,646 \times \left(1 + 16 \times \frac{20\%}{100}\right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 10632,33 \text{ V}$$

$$V_{\text{nuevo}} = 10632,33 \times \left(1 + 16 \times \frac{20\%}{100}\right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 10972,564 \text{ V}$$

#### Fase B:

Voltaje actual = 11591,762 V

Aplicando la fórmula de regulación de tensión:

$$V_{\text{nuevo}} = V_{\text{actual}} \times \left(1 + N_{\text{taps}} \times \frac{\%_{\text{por\_tap}}}{100}\right)$$

Reemplazando los datos:

$$V_{\text{nuevo}} = 11591,762 \times \left(1 + 16 \times \frac{20\%}{100}\right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 11962,698 \text{ V}$$

$$V_{\text{nuevo}} = 11962,698 \times \left(1 + 16 \times \frac{20\%}{100}\right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 12345,504 \text{ V}$$

**Fase C:**

Voltaje actual = 11831,537 V

Aplicando la fórmula de regulación de tensión:

$$V_{\text{nuevo}} = V_{\text{actual}} \times \left(1 + N_{\text{taps}} \times \frac{\% \text{por\_tap}}{100}\right)$$

Reemplazando los datos:

$$V_{\text{nuevo}} = 11831,537 \times \left(1 + 16 \times \frac{20\%}{100}\right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 12210,146 \text{ V}$$

$$V_{\text{nuevo}} = 12210,146 \times \left(1 + 16 \times \frac{20\%}{100}\right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 12600,871 \text{ V}$$

#### 4.1.3.2. REGULACIÓN DE VOLTAJE – ALIMENTADOR PALENQUE

##### **Demanda media**

##### **Zona 3:**

##### **Fase B:**

Voltaje actual = 12366,984 V

Aplicando la fórmula de regulación de tensión:

$$V_{\text{nuevo}} = V_{\text{actual}} \times \left( 1 + N_{\text{taps}} \times \frac{\%_{\text{por\_tap}}}{100} \right)$$

Reemplazando los datos:

$$V_{\text{nuevo}} = 12366,984 \times \left( 1 + 16 \times \frac{10\%}{100} \right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 12564,855 \text{ V}$$

##### **Fase C:**

Voltaje actual = 12885,208 V

Aplicando la fórmula de regulación de tensión:

$$V_{\text{nuevo}} = V_{\text{actual}} \times \left( 1 + N_{\text{taps}} \times \frac{\%_{\text{por\_tap}}}{100} \right)$$

Reemplazando los datos:

$$V_{\text{nuevo}} = 12885,208 \times \left( 1 + 16 \times \frac{10\%}{100} \right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 13091.371 \text{ V}$$

**Demanda máxima****Zona 1:****Fase A:**

Voltaje actual = 12483,284 V

Aplicando la fórmula de regulación de tensión:

$$V_{\text{nuevo}} = V_{\text{actual}} \times \left( 1 + N_{\text{taps}} \times \frac{\% \text{por\_tap}}{100} \right)$$

Reemplazando los datos:

$$V_{\text{nuevo}} = 12483,284 \times \left( 1 + 16 \times \frac{10\%}{100} \right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 12683,016 \text{ V}$$

**Fase B:**

Voltaje actual = 12650,677 V

Aplicando la fórmula de regulación de tensión:

$$V_{\text{nuevo}} = V_{\text{actual}} \times \left( 1 + N_{\text{taps}} \times \frac{\% \text{por\_tap}}{100} \right)$$

Reemplazando los datos:

$$V_{\text{nuevo}} = 12650,677 \times \left( 1 + 16 \times \frac{10\%}{100} \right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 12853,089 \text{ V}$$

**Fase C:**

Voltaje actual = 12374,969 V

Aplicando la fórmula de regulación de tensión:

$$V_{\text{nuevo}} = V_{\text{actual}} \times \left( 1 + N_{\text{taps}} \times \frac{\% \text{por\_tap}}{100} \right)$$

Reemplazando los datos:

$$V_{\text{nuevo}} = 12374,969 \times \left( 1 + 16 \times \frac{10\%}{100} \right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 12572,968 \text{ V}$$

**Zona 2:**

**Fase A:**

Voltaje actual = 12398,506 V

Aplicando la fórmula de regulación de tensión:

$$V_{\text{nuevo}} = V_{\text{actual}} \times \left( 1 + N_{\text{taps}} \times \frac{\% \text{por\_tap}}{100} \right)$$

Reemplazando los datos:

$$V_{\text{nuevo}} = 12398,506 \times \left( 1 + 16 \times \frac{10\%}{100} \right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 12596,882 \text{ V}$$

**Fase B:**

Voltaje actual = 12268,551 V

Aplicando la fórmula de regulación de tensión:

$$V_{\text{nuevo}} = V_{\text{actual}} \times \left( 1 + N_{\text{taps}} \times \frac{\% \text{por\_tap}}{100} \right)$$

Reemplazando los datos:

$$V_{\text{nuevo}} = 12268,551 \times \left( 1 + 16 \times \frac{10\%}{100} \right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 12464,848 \text{ V}$$

**Fase C:**

Voltaje actual = 12275,945 V

Aplicando la fórmula de regulación de tensión:

$$V_{\text{nuevo}} = V_{\text{actual}} \times \left( 1 + N_{\text{taps}} \times \frac{\% \text{por\_tap}}{100} \right)$$

Reemplazando los datos:

$$V_{\text{nuevo}} = 12275,945 \times \left( 1 + 16 \times \frac{10\%}{100} \right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 12472,360 \text{ V}$$

**Zona 3:****Fase A:**

Voltaje actual = 12364,356 V

Aplicando la fórmula de regulación de tensión:

$$V_{\text{nuevo}} = V_{\text{actual}} \times \left( 1 + N_{\text{taps}} \times \frac{\% \text{por\_tap}}{100} \right)$$

Reemplazando los datos:

$$V_{\text{nuevo}} = 12364,356 \times \left( 1 + 16 \times \frac{10\%}{100} \right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 12562,186 \text{ V}$$

**Fase B:**

Voltaje actual = 12064,356 V

Aplicando la fórmula de regulación de tensión:

$$V_{\text{nuevo}} = V_{\text{actual}} \times \left( 1 + N_{\text{taps}} \times \frac{\% \text{por\_tap}}{100} \right)$$

Reemplazando los datos:

$$V_{\text{nuevo}} = 12064,356 \times \left( 1 + 16 \times \frac{10\%}{100} \right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 12257,386 \text{ V}$$

**Fase C:**

Voltaje actual = 12425,054 V

Aplicando la fórmula de regulación de tensión:

$$V_{\text{nuevo}} = V_{\text{actual}} \times \left( 1 + N_{\text{taps}} \times \frac{\% \text{por\_tap}}{100} \right)$$

Reemplazando los datos:

$$V_{\text{nuevo}} = 12425,054 \times \left( 1 + 16 \times \frac{10\%}{100} \right)$$

$$V_{\text{nuevo}} = 12623,855 \text{ V}$$

Finalmente, en la siguiente tabla cada voltaje regulado se divide para la relación de transformación correspondiente, con el fin de expresar los resultados en el nivel de tensión representado en CYMDIST y permitir su comparación directa, los resultados deben ser mayor al voltaje en baja tensión de referencia (220,8 V):

<b>Voltaje en alta tensión (V<sub>alta</sub>)</b>	<b>Voltaje en baja tensión</b> <i>(<math>\frac{\text{Voltaje en alta tensión}}{\text{relación de transformación}}</math>)</i>
13076,455 V	237,754 V
13091,371 V	238,025 V
12683,016 V	230,600 V
12853,089 V	233,693 V
12572,968 V	228,599 V
12596,882 V	229,034 V
12464,848 V	226,634 V
12472,360 V	226,770 V
12562,186 V	228,403 V
12257,386 V	222,862 V
12623,855 V	229,525 V

**Tabla 10** Voltaje regulado en baja tensión del alimentador Palenque

En la **Tabla 10** se presentan los valores del voltaje regulado en el lado de baja tensión, donde se observa que todos los resultados son superiores al voltaje de referencia calculado (220,8 V). En consecuencia, dichos valores se mantienen dentro del rango permitido por la normativa vigente.

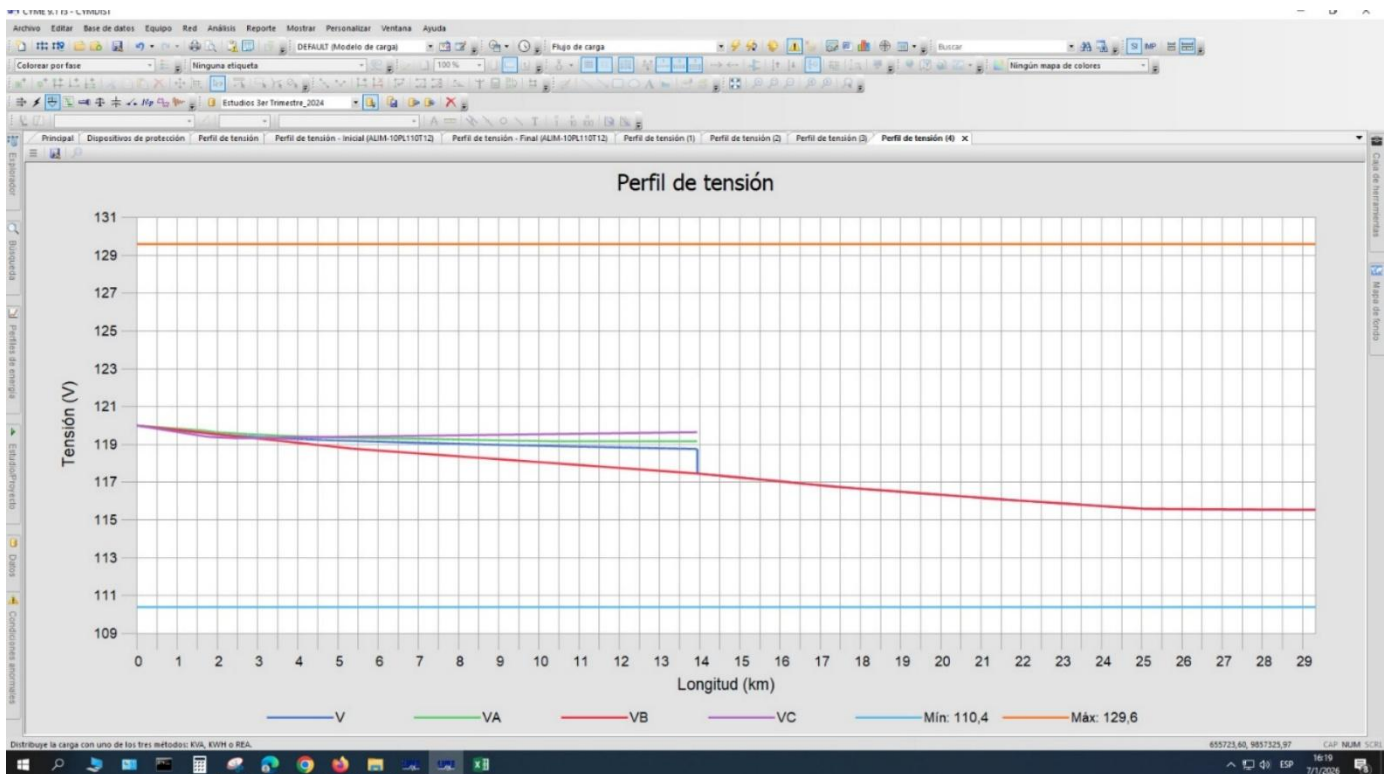
#### **4.1.4. FLUJO DE CARGA**

A continuación, se llevará a cabo el modelado del flujo de carga mediante el software CYMDIST, incorporando los datos correspondientes a los alimentadores, tales como corrientes de carga, factor de potencia, nivel de voltaje, así como los parámetros de resistencia y reactancia de las líneas.

## 4.1.5. FLUJO DE CARGA – ALIMENTADOR PALENQUE

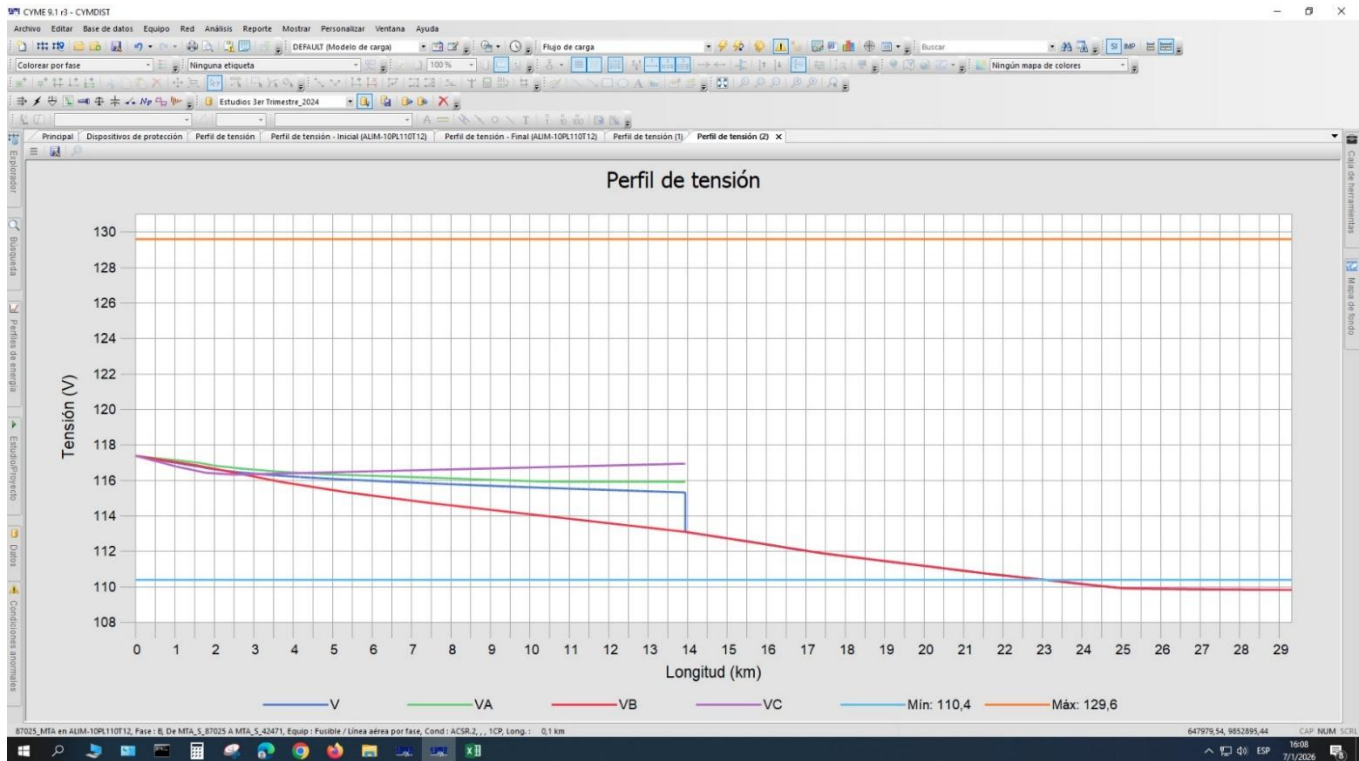
### 4.1.5.1. ALIMENTADOR PALENQUE EN CONDICIONES INICIALES

Se empleará el software CYMDIST para efectuar la simulación gráfica del sistema, con el propósito de visualizar las condiciones iniciales de operación del alimentador Palenque, previas a la incorporación del regulador de voltaje.



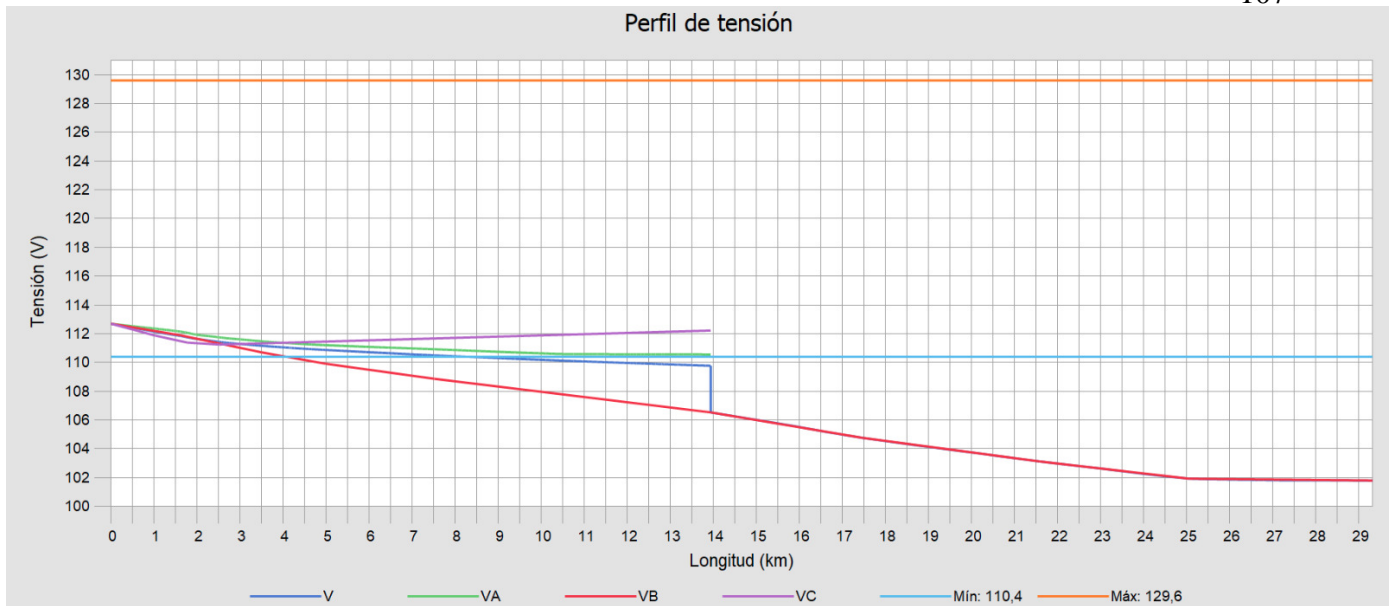
*Figura 16 Perfil de tensión del alimentador Palenque en condiciones iniciales – demanda mínima*

En la **Figura 16** se muestra el perfil de tensión del alimentador Palenque bajo el escenario de demanda mínima. Las curvas representadas en color naranja y celeste indican los límites establecidos por la normativa vigente. A partir de la gráfica se observa que los niveles de voltaje se mantienen dentro del rango permisible, por lo que no se requiere la aplicación de regulación de tensión para este escenario de operación.



*Figura 17 Perfil de tensión del alimentador Palenque en condiciones iniciales – demanda media*

En la **Figura 17** se presenta el perfil de tensión del alimentador Palenque para el escenario de demanda mínima. A partir de la distancia aproximada de 24 km se evidencia una disminución del nivel de voltaje que supera los límites permitidos por la normativa vigente.

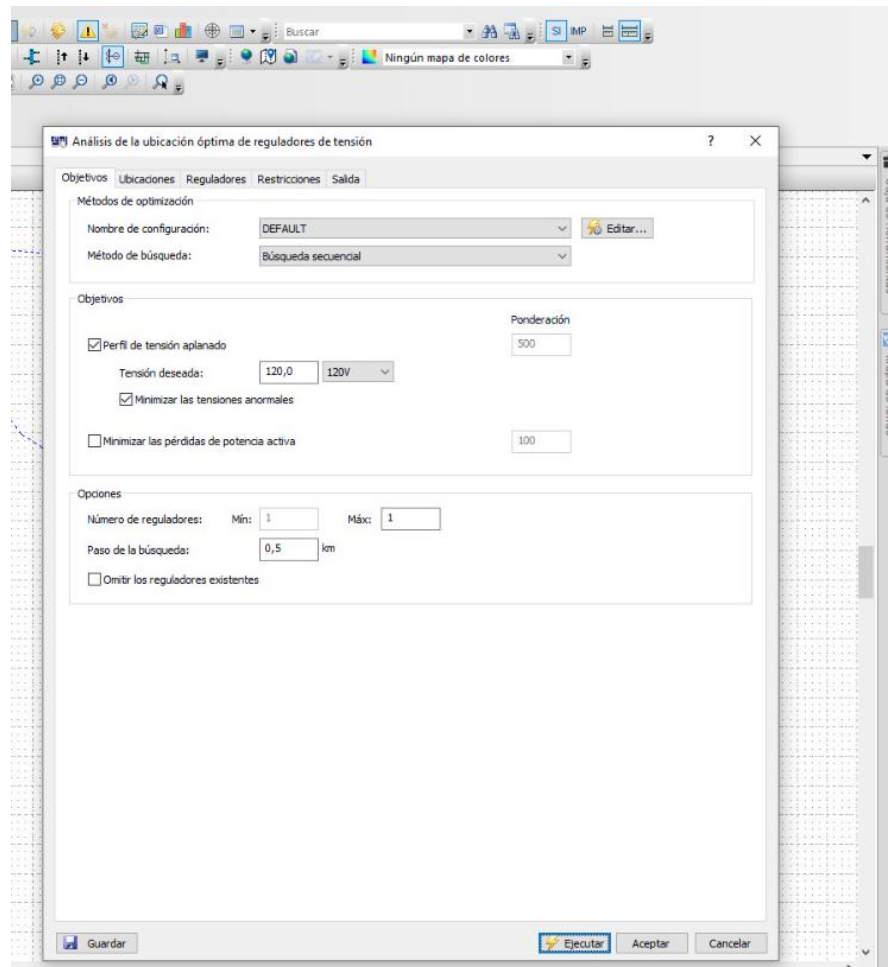


**Figura 18** Perfil de tensión del alimentador Palenque en condiciones iniciales – demanda máxima

En la **Figura 18** se observa una caída de voltaje más significativa a partir de aproximadamente 4 km de recorrido, lo cual se asocia al escenario de mayor carga considerado en el estudio.

#### 4.1.5.2. UBICACIÓN DE BANCO DE REGULADORES DE VOLTAJE

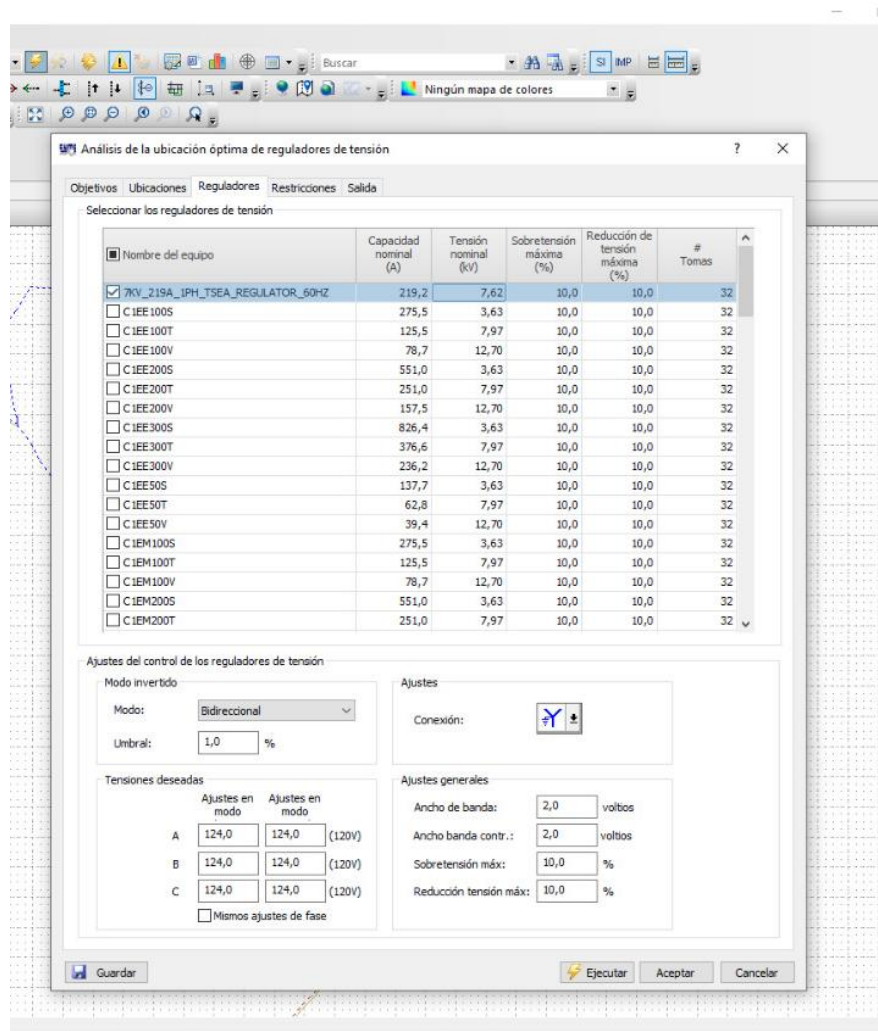
Para empezar, primero definimos el tipo de tensión deseada y la cantidad de reguladores que se van a colocar.



*Figura 19 Número de reguladores*

Tal como se observa en la **Figura 19**, en la ventana correspondiente a los objetivos de simulación se selecciona el nivel de tensión requerido y el número de reguladores a implementar. Dado que se requiere la instalación de un banco de reguladores, se configura la opción de un regulador por fase, lo que equivale a seleccionar un total de un regulador por cada fase del sistema.

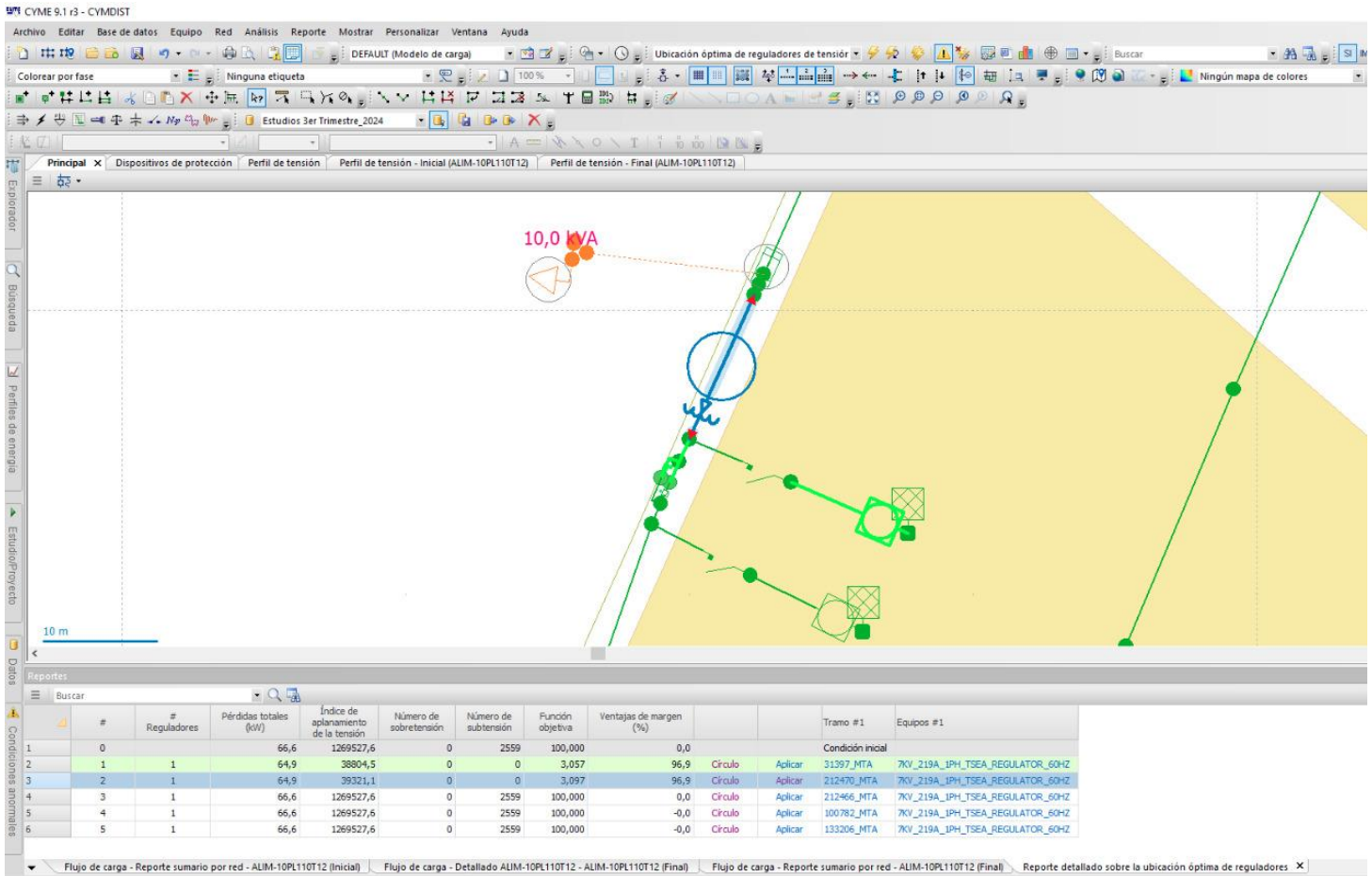
Luego seleccionamos el tipo de regulador:



*Figura 20 Tipo de regulador*

En la **figura 20** se selecciona el tipo de regulador de voltaje a emplear en la simulación. Aquí se definen las características técnicas del equipo, tales como la capacidad nominal, el nivel de tensión, el rango de regulación y el número de pasos disponibles, de acuerdo con los modelos incluidos en la biblioteca del programa. La selección del regulador se realiza considerando la compatibilidad con los niveles de tensión del alimentador y las especificaciones técnicas utilizadas por la empresa distribuidora.

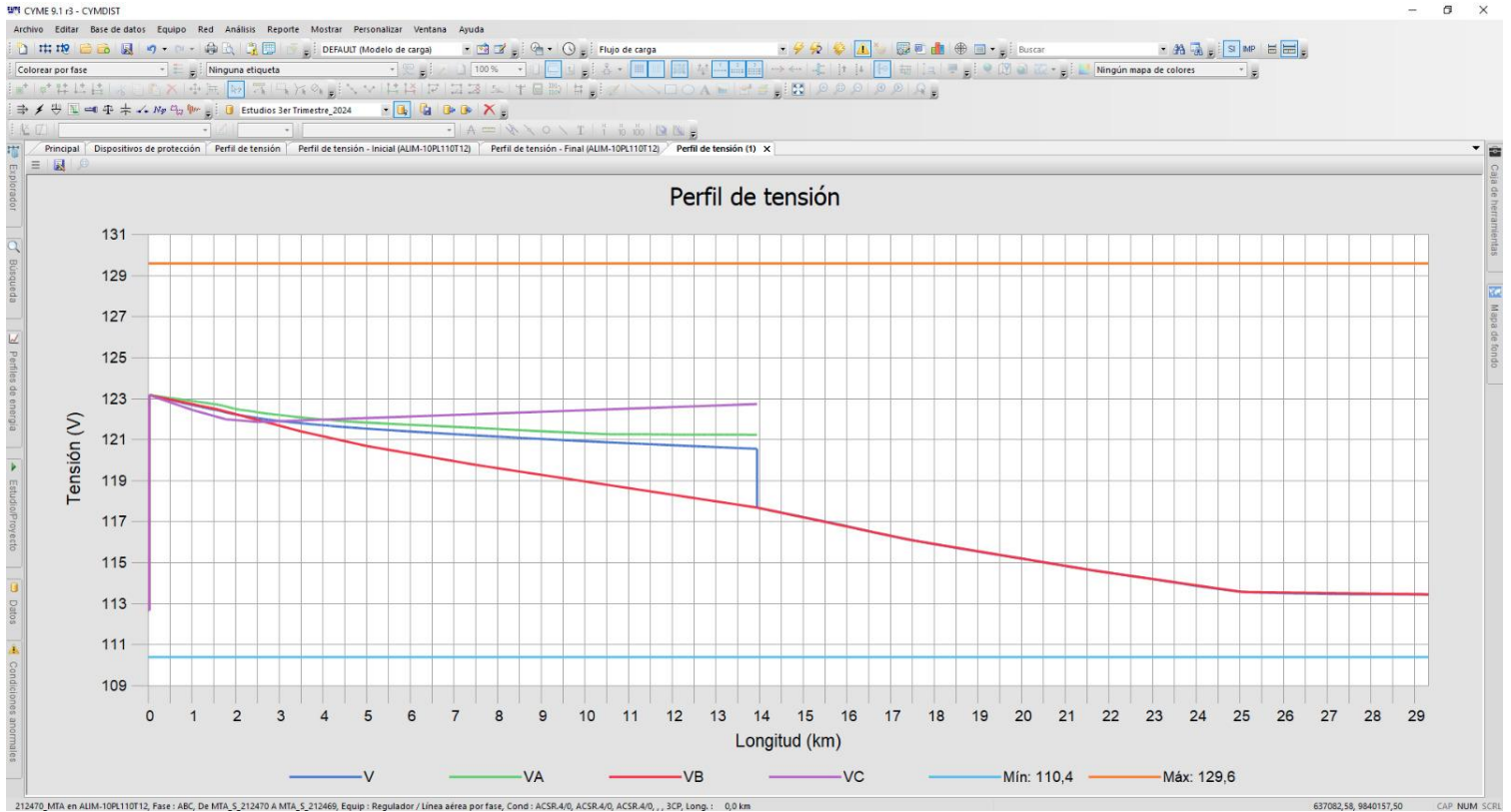
Colocamos el regulador de forma manual:



**Figura 21** Tipo de regulador

En la **figura 21** se realizó la ubicación manual del regulador de voltaje sobre el alimentador, considerando los criterios operativos establecidos por la empresa distribuidora. De acuerdo con CNEL EP, el regulador fue instalado a una distancia aproximada de 1 km desde la subestación, con el fin de mejorar el perfil de tensión a lo largo del alimentador.

Para finalizar se realizará la simulación del perfil de tensión luego de colocar el banco de reguladores.



**Figura 22** Perfil de tensión con el banco de reguladores instalado

Tal como se observa en la gráfica de la Figura 22, después de la instalación del banco de reguladores de voltaje, los niveles de tensión se mantienen dentro del rango permitido, dando cumplimiento a los criterios establecidos por la normativa vigente.

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES

- Tras la realización de los cálculos de caída de voltaje en los alimentadores Santa Martha y Palenque, se determinó que los perfiles de tensión presentaban desviaciones respecto a los límites establecidos por la normativa vigente, registrándose valores que superaban el  $\pm 6$  % permitido.
- Mediante la aplicación de las ecuaciones de regulación y considerando los parámetros técnicos definidos por la empresa eléctrica, fue posible ajustar los niveles de voltaje, logrando que los perfiles se mantengan dentro del rango exigido por la regulación.
- Asimismo, la simulación del sistema a través del flujo de carga en el software CYMDIST permitió validar de forma gráfica los resultados obtenidos, evidenciando que los perfiles de voltaje cumplen con los límites normativos una vez implementadas las medidas de regulación.

#### 5.1. RECOMENDACIONES

- En CNEL EP Los Ríos se manejan parámetros estándar para los reguladores de tensión, como el porcentaje de regulación por tap, el cual usualmente es del 10 %. No obstante, los resultados obtenidos en este estudio evidencian la necesidad de disponer de un rango de regulación del 20 %, por lo que se recomienda considerar este aspecto dentro de las especificaciones técnicas al momento de la selección e instalación de bancos de reguladores.
- Adicionalmente, se recomienda realizar evaluaciones periódicas de los perfiles de voltaje en los alimentadores, especialmente en condiciones de demanda máxima, con el fin de anticipar posibles incumplimientos de la normativa y aplicar medidas correctivas de manera oportuna.

- Finalmente, se sugiere complementar los estudios con simulaciones en software especializado como CYMDIST antes de la implementación de equipos de regulación, a fin de estimar su ubicación y garantizar una mejora efectiva en la calidad del servicio eléctrico.

## CAPÍTULO VI

### 6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] “UN Los Ríos archivos - CNEL EP.” Accessed: Nov. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.cnelep.gob.ec/category/noticias/un-los-rios/>
- [2] C. De *et al.*, “Diseño de un alimentador de 13.8 KV para mejorar la calidad del suministro eléctrico de los sectores cercanos a la ciudad de Babahoyo”.
- [3] M. A. Cevallos, R. Quito, and A. 1 977 Ooi’, “ESTUDIO DJ3L CAMBIO DE VOI.TAJ13 DE LA EMPRESA ELECTIUCA LOS 11 IOS”.
- [4] “Vista de Estabilidad de Voltaje en Redes de Distribución Eléctrica Monofásicas de Medio Voltaje, Aplicando Reguladores Quick Drive Tap en Estado Estable.” Accessed: Nov. 16, 2025. [Online]. Available: <https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/INGENIO/article/view/3067/3683>
- [5] ARCONEL, “EL DIRECTORIO DE LA AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD-ARCONEL,” 2024.
- [6] A. De *et al.*, “Asignación de caídas de voltaje por zonas en el área de servicio de la Empresa Eléctrica Quito,” Sep. 2017, Accessed: Oct. 27, 2025. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18789>
- [7] “Paquete de análisis del sistema de distribución (CYMDIST).” Accessed: Dec. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.eaton.com/mx/es-mx/products/utility-grid-solutions/software-modules/distribution-system-analysis-package-CYMDIST.html>
- [8] Y. E. P. Bachari, Y. Mohamad, T. I. Yusuf, and L. M. K. Amali, “Analysis of Voltage Drop and Power Losses on Medium Voltage 20 KV Distribution System Kotamobagu Area Supplied from PLTD Kotamobagu,” *JEECS (Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences)*, vol. 9, no. 1, pp. 79–88, Jun. 2024, doi: 10.54732/jeeecs.v9i1.9.
- [9] C. Carreño and Avilés Juan, “Vista de la Ubicación Óptima de Equipos de Regulación de Voltaje y Compensación de Reactivos para Alimentadores de Media Tensión, Utilizando Algoritmos Evolutivos.” Accessed: Oct. 27, 2025. [Online]. Available: <https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/INGENIO/article/view/3578/4684>
- [10] P. Systems Division, “Voltage regulator compensation settings”, Accessed: Nov. 16, 2025. [Online]. Available: [www.eaton.com/cooperpowerseries](http://www.eaton.com/cooperpowerseries)
- [11] Corporación Nacional De Electricidad CNEL EP Unidad de Negocios Guayas Los Ríos, “ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE REGULADORES DE TENSIÓN AUTOMÁTICOS MONOPOLARES, 32 PASOS INCLUYE SECCIONADORES BY PASS CORPORACIÓN NACIONAL DE ELECTRICIDAD CNEL EP

UNIDAD DE NEGOCIOS GUAYAS LOS RÍOS Guayaquil, junio de 2022,” Jun. 2022.

- [12] “TSK.” Accessed: Dec. 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.grupotsk.com/proyecto/subestacion-babahoyo-138-69-kv/>
- [13] “Geoportal CNEL EP.” Accessed: Nov. 15, 2025. [Online]. Available: <https://geoportal.cnelep.gob.ec/cnel/>

## 6.1. ANEXOS

A continuación, se muestra la comunicación remitida a la empresa eléctrica CNEL EP – Unidad de Negocio Los Ríos, mediante la cual se solicitó la información técnica correspondiente a los alimentadores Palenque y Santa Martha.

Babahoyo, 12 de septiembre 2025

Asunto: Solicitud de autorización para el desarrollo de la Tesis del Tercer Nivel.

Magister  
Pedro Orellana Zúñiga  
ADMINISTRADOR CNEL EP Unidad de Negocio Los Ríos  
En su despacho:


De mi consideración:


Yo, Rafael Ronald Vásquez Vinueza, con cédula de ciudadanía No. 0942059338, estudiante del último semestre de Ing. Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana – UPS, me dirijo a usted muy respetuosamente para solicitar la autorización necesaria para llevar a cabo mi Tesis de Grado en las instalaciones de CNEL EP- Unidad de Negocio Los Ríos, específicamente en el área de Distribución.

El tema propuesto para mi trabajo de titulación es: "Propuesta de solución a la caída de voltaje en los alimentadores de media tensión "Santa Martha" y "Palenque" de CNEL EP Unidad de Negocio Los Ríos, a través del modelado y simulación de la red, con el fin de definir estratégicamente la ubicación de reguladores de voltaje".

Agradezco de antemano la atención y el apoyo que se pueda brindar a mi petición.

Atentamente,

  
Rafael Ronald Vásquez Vinueza  
C.I. 0942059338



*Figura 23 Solicitud para la obtención de datos de los alimentadores*



REPÚBLICA  
DEL ECUADOR

## Hoja de Ruta

Fecha y hora generación: 2025-11-20 10:35:34 (GMT-5)

Generado por: Fernando Andres Almeida Alcivar

Información del Documento			
No. Documento:	CNEL-LRS-ADM-2025-1741-E	Doc. Referencia:	--
De:	Rafael Ronald Vasquez Vinueza, .	Para:	Sr. Mgs. Pedro Enrique Orellana Zuniga, Administrador de Unidad de Negocio Los Rios, Encargado, Empresa Eléctrica Pública Estratégica Corporación Nacional de Electricidad CNEL EP
Asunto:	El señor Rafael Vásquez Vinueza. Estudiante de ingeniería eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana-UPS, me dirijo a usted muy respetuosamente para solicitarle la autorización necesaria para llevar a cabo mi tesis de grado, el tema de titulación es "Propuesta de solución a la caída de voltaje en los alimentadores de media tensión"	Descripción Anexos:	--
Fecha Documento:	2025-09-17 (GMT-5)	Fecha Registro:	2025-09-17 (GMT-5)

Ruta del documento						
Área	De	Fecha/Hora	Acción	Para	No. Días	Comentario
Unidad de Negocio CNEL EP Los Ríos	Pedro Enrique Orellana Zuniga (CNEL)	2025-09-17 23:08:49 (GMT-5)	Reasignar	Fernando Andres Almeida Alcivar (CNEL)	0	Estimado Fernando. Autorizado. Favor continuar con los trámites respectivos. Saludos Cordiales.
Unidad de Negocio CNEL EP Los Ríos	Fernando Andres Almeida Alcivar (CNEL)	2025-09-17 10:32:40 (GMT-5)	Envío Electrónico del Documento	Pedro Enrique Orellana Zuniga (CNEL)	0	
Unidad de Negocio CNEL EP Los Ríos	Fernando Andres Almeida Alcivar (CNEL)	2025-09-17 10:32:40 (GMT-5)	Registro	Pedro Enrique Orellana Zuniga (CNEL)	0	ADM: para vuestro conocimiento y fines pertinentes

*Figura 24 Autorización emitida por la empresa eléctrica*