



**Dimensionamiento y ubicación óptima de compensadores reactivos para el mejoramiento de los perfiles de voltaje en el Alimentador vía al Auca de la Subestación “Payamino” de la Empresa Eléctrica CNEL EP – UN Sucumbíos, mediante un estudio de estabilidad de voltaje en estado estable.**

Díaz Brito, Darwin Vladimir

Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Ingeniería en Electromecánica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Electromecánico

Ing. Freire Llerena, Washington Rodrigo

14 de febrero del 2023

Latacunga



CERTIFICADO DE ANÁLISIS  
magister

## TESIS-COMPILATIO

**3%** Similitudes  
**< 1%** Texto entre comillas  
 0% similitudes entre comillas  
**1%** Idioma no reconocido

Nombre del documento: TESIS-COMPILATIO.pdf  
 ID del documento: 3bd66a2a9954e503b956d1f5118f2323ec8e504d  
 Tamaño del documento original: 2.32 Mo

Depositante: WASHINGTON RODRIGO FREIRE LLERENA  
 Fecha de depósito: 10/2/2023  
 Tipo de carga: interface  
 fecha de fin de análisis: 10/2/2023

Número de palabras: 15.945  
 Número de caracteres: 97.160

Ubicación de las similitudes en el documento:



### Fuentes

#### Fuentes principales detectadas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	<a href="https://repositorio.espe.edu.ec/Amul/ha/ndle/21000/21164">repositorio.espe.edu.ec</a>   Análisis de estabilidad de voltaje en estado estable en el s... https://repositorio.espe.edu.ec/Amul/ha/ndle/21000/21164 2 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (107 palabras)
2	<a href="http://repositorio.espe.edu.ec/8080/bstream/21000/21164/4/7-ESPEL-EMI-0375.pdf.txt">repositorio.espe.edu.ec</a>   Análisis de estabilidad de voltaje en estado estable en el s... http://repositorio.espe.edu.ec/8080/bstream/21000/21164/4/7-ESPEL-EMI-0375.pdf.txt 2 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (98 palabras)
3	<a href="http://repositorio.utc.edu.ec/bstream/27000/7877/6/PI-001689.pdf.txt">repositorio.utc.edu.ec</a>   Aplicación de algoritmos genéticos para la ubicación óptim... http://repositorio.utc.edu.ec/bstream/27000/7877/6/PI-001689.pdf.txt	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (57 palabras)
4	<a href="https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/03/053-13-Proyect-Regul...">www.regulacionelectrica.gob.ec</a> https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/03/053-13-Proyect-Regul... 1 fuente similar	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (50 palabras)
5	<a href="http://space.ups.edu.ec/bstream/123456789/22761/1/UPS-GT009852.pdf">space.ups.edu.ec</a>   Determinación de los escenarios para reconfiguración de los ali... http://space.ups.edu.ec/bstream/123456789/22761/1/UPS-GT009852.pdf 1 fuente similar	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (41 palabras)

#### Fuentes con similitudes fortuitas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	Optimización de secuencias de maniobra en redes de distribución, para reconfigur... /var/ftp/pub/bstream/15000/20956/1/CD_10478.pdf	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (39 palabras)
2	<a href="http://repositorio.utc.edu.ec/bstream/27000/4561/3/PI-000726.pdf.txt">repositorio.utc.edu.ec</a>   Ubicación de capacitores para mejorar los perfiles de voltaj... http://repositorio.utc.edu.ec/bstream/27000/4561/3/PI-000726.pdf.txt	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (24 palabras)
3	<a href="https://bibliotecadigital.educal.com/Record/r-10554-15392">bibliotecadigital.educal.com</a>   Existencias: Estrategias de optimización con algoritm... https://bibliotecadigital.educal.com/Record/r-10554-15392	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (18 palabras)
4	<a href="http://space.ups.edu.ec/bstream/123456789/19593/1/UPS-GT003078.pdf">space.ups.edu.ec</a>   Estudios fundamentales para la interconexión de las subestacio... http://space.ups.edu.ec/bstream/123456789/19593/1/UPS-GT003078.pdf	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (19 palabras)
5	<a href="http://space.ucoenica.edu.ec/bstream/123456789/5428/3/Tesis.pdf.txt">space.ucoenica.edu.ec</a>   Diseño de esquemas de control integrado de tensión y pot... http://space.ucoenica.edu.ec/bstream/123456789/5428/3/Tesis.pdf.txt	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (18 palabras)

**Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas)** Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

- <https://doi.org/https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v7.n1.2011.201>
- <https://www.mathworks.com/help/gads/ga.html>
- <https://doi.org/10.1109/IIICE.2018.8709560>
- <https://www.recursoyenergia.gob.ec/plan-maestro-de>
- <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/GreenTech48523.2021.00055>



Firmado electrónicamente por:  
WASHINGTON RODRIGO  
FREIRE LLERENA

Ing. Freire Llerena, Washington Rodrigo

C.C.: 1721980801



Departamento de Eléctrica y Electrónica  
Carrera de Ingeniería Electromecánica

### Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: **“Dimensionamiento y ubicación óptima de compensadores reactivos para el mejoramiento de los perfiles de voltaje en el Alimentador vía al Auca de la Subestación “Payamino” de la Empresa Eléctrica CNEL EP – UN Sucumbíos, mediante un estudio de estabilidad de voltaje en estado estable”** fue realizado por el señor **Díaz Brito, Darwin Vladimir**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 14 de febrero de 2023



Firmado electrónicamente por:  
WASHINGTON RODRIGO  
FREIRE LLERENA

.....  
Ing. Freire Llerena, Washington Rodrigo

C.C.: 1721980801



Departamento de Eléctrica y Electrónica  
Carrera de Ingeniería Electromecánica

### Responsabilidad de Autoría

Yo, **Díaz Brito, Darwin Vladimir**, con cédula de ciudadanía n°1208027530, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Dimensionamiento y ubicación óptima de compensadores reactivos para el mejoramiento de los perfiles de voltaje en el Alimentador vía al Auca de la Subestación “Payamino” de la Empresa Eléctrica CNEL EP – UN Sucumbíos, mediante un estudio de estabilidad de voltaje en estado estable”**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

**Latacunga, 14 de febrero de 2023**

**Díaz Brito, Darwin Vladimir**

C.C.: 1208027530



Departamento de Eléctrica y Electrónica  
Carrera de Ingeniería Electromecánica

### Autorización de Publicación

Yo **Díaz Brito, Darwin Vladimir**, con cédula de ciudadanía n°1208027530, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Dimensionamiento y ubicación óptima de compensadores reactivos para el mejoramiento de los perfiles de voltaje en el Alimentador vía al Auca de la Subestación “Payamino” de la Empresa Eléctrica CNEL EP – UN Sucumbíos, mediante un estudio de estabilidad de voltaje en estado estable”**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 14 de febrero de 2023

**Díaz Brito Darwin Vladimir**

C.C.: 1208027530

## **Dedicatoria**

El presente trabajo de titulación se lo dedico a:

A Dios, porque él ha sido mi guía, mi fortaleza; y gracias a sus bendiciones he llegado a conocer a excelentes docentes, amigos, seres queridos que durante el viaje han formado parte importante de mi vida.

A mis padres Segundo D. e Inés B.; quienes con su amor, apoyo, paciencia y esfuerzo; me permitieron llegar a cumplir esta nueva meta; ya que inculcaron en mí, el ejemplo de esfuerzo, perseverancia y valentía; bases sumamente fuertes que me condujeron a este momento felicidad.

A mis hermanas y hermanos; Edith, Verónica, Christopher y Jerinson; por su cariño y apoyo incondicional; por esos ánimos y consejos que me impulsaron a seguir adelante y nunca perder de vista mi objetivo.

A mi esposa Jessica S.; por su amor, sus oraciones, consejos y palabras de aliento que hicieron de mí una mejor persona; y sé que, junto a ella, llegaremos a conseguir nuevos triunfos en esta vida.

**Díaz Darwin**

## **Agradecimiento**

Quiero agradecer a Dios por todas las bendiciones recibidas, que llenan mi vida y a toda mi familia por estar siempre presentes.

A mis padres, por ser los principales promotores para alcanzar esta nueva meta, debido a sus consejos, valores y principios que me han inculcado, por todo el esfuerzo que han realizado para poder lograr convertirme en un profesional.

A mi prima Yessenia T. y su esposo Luis S.; por su gran apoyo incondicional que me brindaron para culminar con mi carrera estudiantil, por sus consejos y sus grandes conocimientos sobre la vida que me dieron visión para nuevos objetivos por cumplir.

Agradezco a mi gran amigo Rolando H.; quien desde un inicio de la carrera universitaria me acompañó, le agradezco por su amistad, por los momentos inigualables que pasamos en las aulas de clases, por esos momentos de continuo esfuerzo y perseverancia que pasamos para culminar nuestra carrera.

A los docentes, en especial al tutor de este arduo trabajo Ing. Washington Freire por sus consejos, paciencia y el conocimiento compartido para desarrollar este trabajo.

Finalmente, quiero agradecer a mi alma mater Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L, que fue sede de los mejores años de mi vida, las experiencias buenas y malas han servido para crecer.

¡Gracias a todos quienes formaron parte de esta gran aventura!

***Díaz Darwin***

**ÍNDICE DE CONTENIDO**

<b>Carátula</b> .....	<b>1</b>
<b>Reporte de Verificación de Contenido</b> .....	<b>2</b>
<b>Certificación</b> .....	<b>3</b>
<b>Responsabilidad de Autoría</b> .....	<b>4</b>
<b>Autorización de Publicación</b> .....	<b>5</b>
<b>Dedicatoria</b> .....	<b>6</b>
<b>Agradecimiento</b> .....	<b>7</b>
<b>Índice de Contenido</b> .....	<b>8</b>
<b>Índice de Figuras</b> .....	<b>13</b>
<b>Índice de Tablas</b> .....	<b>16</b>
<b>Nomenclatura</b> .....	<b>17</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>18</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>19</b>
<b>Capítulo I: Problemática</b> .....	<b>20</b>
<b>Antecedentes</b> .....	<b>20</b>
<b>Justificación e Importancia</b> .....	<b>21</b>
<b>Alcance del Proyecto</b> .....	<b>21</b>
<b>Objetivos</b> .....	<b>22</b>
<b>Objetivo General</b> .....	<b>22</b>
<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>22</b>

Capítulo II: Estado del Arte.....	23
<b>Sistemas de Distribución de Energía .....</b>	<b>23</b>
<i>Infraestructura de un Sistema de Distribución de Energía.....</i>	<i>24</i>
<b>Calidad de Energía.....</b>	<b>24</b>
<i>ARCERNR 002/20.....</i>	<i>25</i>
<b>Control de Voltaje en Sistemas Eléctricos.....</b>	<b>26</b>
<b>Compensación Reactiva .....</b>	<b>27</b>
<i>Banco de Capacitores.....</i>	<i>28</i>
<b>Estabilidad de voltaje .....</b>	<b>29</b>
<i>Estabilidad de Voltaje ante Pequeños Disturbios.....</i>	<i>30</i>
<i>Estabilidad de Voltaje ante Grandes Disturbios.....</i>	<i>30</i>
<i>Estabilidad de Voltaje de Corto Plazo.....</i>	<i>30</i>
<i>Estabilidad de Voltaje de Largo Plazo .....</i>	<i>30</i>
<i>Colapso de Voltaje .....</i>	<i>31</i>
<i>Causas principales de disminución de reactivos y voltajes en los nodos .....</i>	<i>31</i>
<b>Métodos de análisis de estabilidad de voltaje.....</b>	<b>31</b>
<i>Método Curvas PV.....</i>	<i>32</i>
<i>Método Curvas QV .....</i>	<i>34</i>
<b>Algoritmos Genéticos.....</b>	<b>35</b>
<i>Estructura de un Algoritmo Genético.....</i>	<i>36</i>
<b>Estudios Relacionados.....</b>	<b>37</b>

<i>Análisis de Estabilidad de Voltaje de Sistemas Eléctricos de Potencia Usando Curvas Q-V</i> .....	37
<i>Análisis de Estabilidad de Voltaje en Estado Estable en el Sistema Eléctrico de Subtransmisión a Nivel de 69 kv de la Empresa Eléctrica Ambato Regional Centro Norte S.A</i> .....	37
<i>Aplicación de Algoritmos Genéticos para la Ubicación Óptima de Condensadores en el Alimentador Primario de Distribución Tipo Radial</i> .....	38
<i>Optimal Planning of VAR Compensator for Voltage Regulation Enhancement on Power Distribution Systems Against Volcanic Eruptions Events</i> .....	38
Capítulo III: Metodología .....	39
Primera etapa.....	40
<i>Modelo de líneas de distribución</i> .....	41
<i>Modelo de cargas</i> .....	43
<i>Modelo de regulador de voltaje</i> .....	43
<i>Modelo de compensador reactivo</i> .....	44
Segunda etapa.....	45
<i>Flujos de potencia</i> .....	45
<i>Obtención de curvas PV</i> .....	49
<i>Determinación de nodos candidatos</i> .....	49
Tercera etapa.....	49
<i>Optimización vía Simulación (OvS)</i> .....	50
<i>Algoritmos genéticos (AG)</i> .....	50

	11
Cuarta etapa.....	55
Capítulo IV: Desarrollo de la Investigación .....	56
Alimentador Vía al Auca.....	56
<i>Características Técnicas del Alimentador .....</i>	<i>57</i>
<i>Características Técnicas de la Central Dayuma.....</i>	<i>59</i>
<i>Características Técnicas del Regulador de Voltaje Monofásico.....</i>	<i>61</i>
Proyección de la Demanda .....	61
Condiciones de Operación de Entrada para el Algoritmo de Optimización .....	62
Análisis de Estabilidad de Voltaje del Alimentador Vía al Auca en Condiciones de Operación Actuales. ....	63
<i>Curvas PV en el Actual Alimentador Vía al Auca .....</i>	<i>63</i>
Nodos Candidatos para la Localización de Compensadores Reactivos .....	70
Análisis de Resultados.....	72
<i>Resultados de la Localización y Dimensionamiento Óptimo de Compensadores Reactivos en el Alimentador Vía el Auca .....</i>	<i>72</i>
<i>Curvas PV en el Alimentador Vía al Auca sin la Generación de la Central Dayuma Considerando la Instalación de Compensadores Reactivos.....</i>	<i>72</i>
<i>Curvas PV en el Alimentador Vía al Auca con la Generación de la Central Dayuma Considerando la Instalación de Compensadores Reactivos.....</i>	<i>79</i>
<i>Perfiles de voltaje del alimentador vía al Auca con la instalación de compensadores reactivos.....</i>	<i>86</i>
Conclusiones .....	90

<b>Recomendaciones .....</b>	<b>92</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>93</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>97</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	<i>Arquitectura representativa de un SEP</i> .....	23
<b>Figura 2</b>	<i>Curva PV típica</i> .....	32
<b>Figura 3</b>	<i>Zona estable e inestable en la curva PV</i> .....	33
<b>Figura 4</b>	<i>Margen de cargabilidad en una curva PV</i> .....	34
<b>Figura 5</b>	<i>Curva QV típica</i> .....	35
<b>Figura 6</b>	<i>Estructura básica del proceso de un AG</i> .....	36
<b>Figura 7</b>	<i>Metodología para la planificación óptima de compensadores reactivos mediante un análisis de estabilidad de voltaje</i> .....	39
<b>Figura 8</b>	<i>Sección de línea trifásica de 4 hilos entre los nodos j y k</i> .....	41
<b>Figura 9</b>	<i>Flujograma de Método Badward/Fordward Sweep</i> .....	47
<b>Figura 10</b>	<i>Método OvS para planificación de compensación reactiva</i> .....	50
<b>Figura 11</b>	<i>Flujograma de metodología de Algoritmos genéticos</i> .....	53
<b>Figura 12</b>	<i>Topología del alimentador vía el Auca de la subestación eléctrica Payamino</i> .....	56
<b>Figura 13</b>	<i>Curva de demanda diaria del alimentador vía al Auca</i> .....	57
<b>Figura 14</b>	<i>Curva de factor de potencia diario del alimentador vía al Auca</i> .....	58
<b>Figura 15</b>	<i>Curva de potencia activa suministrada por la central Dayuma</i> .....	60
<b>Figura 16</b>	<i>Curva de potencia reactiva suministrada por la central Dayuma</i> .....	60
<b>Figura 17</b>	<i>Crecimiento de demanda</i> .....	61
<b>Figura 18</b>	<i>Curva PV en la ubicación de los reguladores de voltaje sin la generación de la central Dayuma</i> .....	64

<b>Figura 19</b>	<i>Curva PV en los reguladores de voltaje con la generación de la central Dayuma...</i>	65
<b>Figura 20</b>	<i>Curva PV en un nodo de la parroquia Dayuma.....</i>	66
<b>Figura 21</b>	<i>Curva PV en un nodo de la parroquia Inés Arango.....</i>	67
<b>Figura 22</b>	<i>Curva PV en un nodo de la parroquia Taracoa.....</i>	68
<b>Figura 23</b>	<i>Curva PV en un nodo de la parroquia La Belleza.....</i>	69
<b>Figura 24</b>	<i>Nodos candidatos del alimentador vía al Auca para la localización de compensadores reactivos.....</i>	71
<b>Figura 25</b>	<i>Curva PV en el nodo de la ubicación de los reguladores de voltaje en el lado primario, considerando la instalación de compensadores y sin la generación de la central Dayuma.....</i>	73
<b>Figura 26</b>	<i>Curva PV con la instalación de compensadores reactivos en la ubicación reguladores de voltaje (Lado secundario), sin la generación de la central Dayuma.....</i>	75
<b>Figura 27</b>	<i>Curva PV en un nodo de la parroquia Dayuma considerando la instalación de compensadores reactivos, sin la generación de la central Dayuma.....</i>	76
<b>Figura 28</b>	<i>Curva PV en un nodo de la parroquia Inés Arango considerando la instalación de compensadores reactivos, sin la generación de la central Dayuma.....</i>	77
<b>Figura 29</b>	<i>Curva PV en un nodo de la parroquia Taracoa considerando la instalación de compensadores reactivos, sin la generación de la central Dayuma.....</i>	78
<b>Figura 30</b>	<i>Curva PV en un nodo de la parroquia La Belleza considerando la instalación de compensadores reactivos, sin la generación de la central Dayuma.....</i>	79
<b>Figura 31</b>	<i>Curva PV con la instalación de compensadores reactivos en la ubicación reguladores de voltaje (Lado primario) con la generación de la central Dayuma.....</i>	80

<b>Figura 32</b> <i>Curva PV con la instalación de compensadores reactivos en la ubicación reguladores de voltaje (Lado secundario), con la generación de la central Dayuma.</i> .....	81
<b>Figura 33</b> <i>Curva PV en un nodo de la parroquia Dayuma considerando la instalación de compensadores reactivos, con la generación de la central Dayuma.</i> .....	82
<b>Figura 34</b> <i>Curva PV en un nodo de la parroquia Inés Arango considerando la instalación de compensadores reactivos, con la generación de la central Dayuma.</i> .....	84
<b>Figura 35</b> <i>Curva PV en un nodo de la parroquia Taracoa considerando la instalación de compensadores reactivos, con la generación de la central Dayuma.</i> .....	85
<b>Figura 36</b> <i>Curva PV en un nodo de la parroquia La Belleza considerando la instalación de compensadores reactivos, con la generación de la central Dayuma.</i> .....	86
<b>Figura 37</b> <i>Perfiles de voltaje en el alimentador vía al Auca de la fase "A".</i> .....	87
<b>Figura 38</b> <i>Perfiles de voltaje en el alimentador vía al Auca de la fase "B".</i> .....	88
<b>Figura 39</b> <i>Perfiles de voltaje en el alimentador vía al Auca de la fase "C".</i> .....	89

**ÍNDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 1</b>	<i>Límites de voltajes admisibles en sistemas eléctricos</i> .....	26
<b>Tabla 2</b>	<i>Parámetros de configuración AG en Matlab</i> .....	54
<b>Tabla 3</b>	<i>Distribución de longitudes de la red</i> .....	59
<b>Tabla 4</b>	<i>Datos de entrada para el algoritmo de optimización</i> .....	62
<b>Tabla 5</b>	<i>Longitud y Latitud de los nodos candidatos del alimentador vía al Auca para la localización de compensadores reactivos</i> .....	71
<b>Tabla 6</b>	<i>Resultados de la localización y dimensionamiento óptimo de compensadores reactivos en el alimentador vía el Auca</i> .....	72

**Nomenclatura**

AG: Algoritmos Genéticos

ARCERNNR: Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables.

BFS: Backward/Fordward Sweep

DG: Generación Distribuida

ENS: Energía no suministrada

OvS: Optimización vía simulación

SEP: Sistema Eléctrico de Potencia.

## Resumen

En el presente trabajo se realiza la planificación óptima de compensadores reactivos en el alimentador vía al Auca de la Subestación “Payamino” de la Empresa Eléctrica CNEL EP–UN Sucumbíos para mejorar los perfiles de voltaje. El trabajo incluye el análisis de estabilidad de voltaje que se realiza mediante el método gráfico de obtención de curvas PV en nodos críticos del sistema en estado estable, para así poder determinar el margen de cargabilidad máximo y los puntos de colapso de voltaje. Además, los nodos críticos en estudio se consideran como posibles candidatos para el desarrollo del problema de optimización. El problema de optimización propuesto se resuelve mediante algoritmos genéticos (AG), donde se determina el dimensionamiento y la ubicación óptima de compensadores reactivos en el alimentador bajo estudio, con el objetivo de mejorar los perfiles de voltaje y mejorar la calidad de energía de servicio. El desarrollo del programa de optimización se realiza en el Software MATLAB, donde se considera el modelamiento de flujos de potencia trifásico desbalanceado. Y, mediante esta metodología se planificará y se propondrá los puntos óptimos para la colocación de los compensadores reactivos en el alimentador vía al Auca y así obtener los mejores resultados para el mejoramiento de los perfiles de voltaje en el sistema.

*Palabras Clave:* Compensadores reactivos, estabilidad de voltaje, algoritmos genéticos, energía eléctrica.

### **Abstract**

In this work, the optimal planning of reactive compensators in the feeder via Auca of the substation "Payamino" of the Electric Company CNEL EP-UN Sucumbíos to improve the voltage profiles is carried out. The work includes the voltage stability analysis that is performed by the graphical method of obtaining PV curves at critical nodes of the system in steady state, in order to determine the maximum loadability margin and voltage collapse points. In addition, the critical nodes under study are considered as possible candidates for the development of the optimization problem. The proposed optimization problem is solved by means of genetic algorithms (GA), where the optimal sizing and placement of reactive compensators in the feeder under study is determined, with the objective of improving the voltage profiles and improving the service power quality. The development of the optimization program is performed in MATLAB software, where the modeling of unbalanced three-phase power flows is considered. And, through this methodology the optimal points for the placement of reactive compensators in the feeder via Auca will be planned and proposed to obtain the best results for the improvement of the voltage profiles in the system.

*Key words:* Reactive compensators, voltage stability, genetic algorithms, electrical power.

## Capítulo I

### Problemática

#### Antecedentes

La empresa de distribución de CNEL EP Unidad de Negocio Sucumbíos cuenta con nueve subestaciones de reducción, siendo una de ellas la Subestación Payamino. El alimentador vía al Auca es el más grande de los alimentadores de la Subestación Payamino contando con 806 Km de longitud de la red de medio voltaje. Debido al continuo crecimiento de la demanda en el sistema y a la topología del alimentador, en el sistema se presenta bajos niveles de voltaje. En base a este problema, en el año 2019 se realizó un estudio por parte de CNEL EP para la instalación de tres reguladores de voltaje en el km 16 de la vía al Auca, con el fin de mejorar los perfiles de voltaje y por ende mejorar la calidad de servicio eléctrico.

En el estudio presentado por CNEL EP, se realiza la localización óptima de tres reguladores de voltaje monofásicos de 167/187 KVA que se encontraban en stock en las bodegas de la empresa CNEL EP-UN Sucumbíos. El estudio consideró condiciones de demanda mínima de 2032 kW y máxima de 2985 kW correspondiente a enero del 2019. En él estudió se determinó que la instalación de los reguladores de voltaje en el alimentador vía al Auca mejora los perfiles de voltaje significativamente, sin embargo, los niveles de voltajes alcanzados se mantienen por debajo del rango admisible dados por la regulación ARCERNR 002/20.

## **Justificación e Importancia**

El alimentador vía al Auca de la Subestación “Payamino” de la Empresa Eléctrica CNEL EP–UN Sucumbíos, ha experimentado niveles de voltaje por debajo de lo permitido por la regulación ARCCENNR 002/20, lo que podría desembocar a desconexiones de carga, y en casos más extremos a un colapso del sistema eléctrico. Razón por la cual, es necesario realizar la planificación de infraestructura eléctrica como compensadores reactivos que permitan mejorar los perfiles de voltaje en el sistema eléctrico de distribución y de esta manera mejorar la calidad de servicio eléctrico del alimentador vía al Auca. Para este fin, es fundamental realizar un análisis de estabilidad de voltaje en estado estable para determinar nodos del alimentador con mayores problemas de caída de voltaje.

## **Alcance del Proyecto**

El trabajo de investigación tiene como propósito realizar la planificación óptima de compensadores reactivos que permitan mejorar los perfiles de voltaje del Alimentador Vía al Auca, mejorando así la calidad de servicio entregado por la empresa de distribución de energía.

El desarrollo de la propuesta se compone de tres etapas: modelamiento del alimentador en estudio, análisis de estabilidad de voltaje en estado estable y la planificación óptima de compensadores reactivos. El modelamiento del sistema se ejecuta en función de la proyección de la demanda tanto en demanda mínima como en demanda máxima, posteriormente se analiza la influencia de los compensadores reactivos en el sistema.

En el análisis de voltaje en estado estable se determina los márgenes de cargabilidad del sistema y los puntos de colapso. En base al análisis se selecciona nodos candidatos para ser utilizados en el problema de optimización propuesto.

En el problema de la localización y dimensionamiento óptimo de compensadores reactivos se simula flujos de potencia trifásicos desbalanceados con el que se determina el

costo de deslastre de demanda debido a bajos niveles de voltaje que es utilizado en el algoritmo genético desarrollado en el software MATLAB.

## **Objetivos**

### ***Objetivo General***

Realizar el dimensionamiento y ubicación óptima de compensadores reactivos para el mejoramiento de los perfiles de voltaje en el alimentador vía al Auca de la Subestación “Payamino” de la Empresa Eléctrica CNEL EP – UN Sucumbíos, mediante un estudio de estabilidad de voltaje en estado estable.

### ***Objetivos específicos***

- Realizar el modelamiento del Alimentador vía Auca de la Subestación “Payamino” de la Empresa Eléctrica CNEL EP-UN Sucumbíos.
- Realizar el estudio de estabilidad de voltaje para determinar zonas críticas en el sistema utilizando el método gráfico de Curvas PV.
- Determinar el dimensionamiento y ubicación óptima de compensadores reactivos para mejorar los perfiles de voltaje, mediante un algoritmo de optimización.
- Analizar la eficiencia de la solución encontrada mediante un estudio de estabilidad de voltaje en estado estable utilizando el método gráfico de Curvas PV.

## Capítulo II

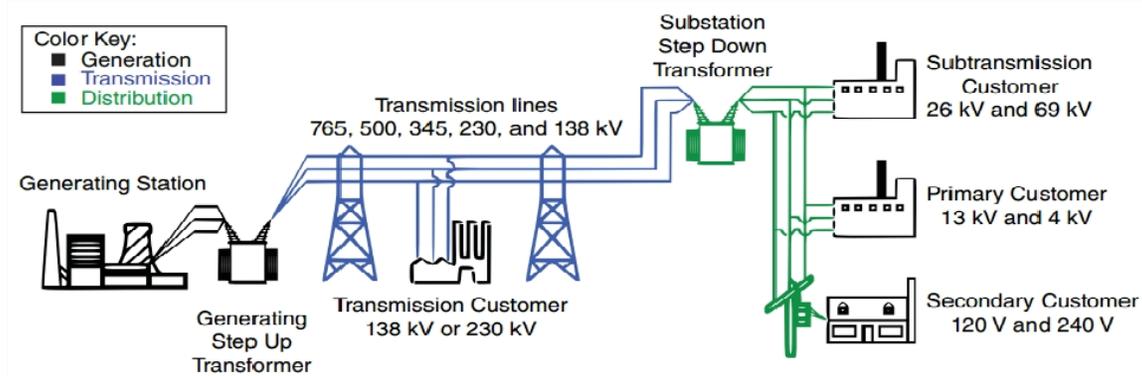
### Estado del Arte

#### Sistemas de Distribución de Energía

La infraestructura de un sistema eléctrico de potencia (SEP) como se muestra en la Figura 1, consta de varios elementos o etapas que van desde la generación de energía hasta la transmisión y distribución de la misma. En este contexto, un sistema de distribución de energía es la última etapa de los sistemas eléctricos de potencia, que tiene como finalidad llevar la energía eléctrica desde centros de subtransmisión hasta los consumidores finales de la forma más segura y cumpliendo con los estándares de calidad exigidos.

**Figura 1**

*Arquitectura representativa de un SEP*



*Nota.* El gráfico representa una estructura típica de un SEP. Tomado de (Ramos Guardarrama et al., 2019).

### ***Infraestructura de un Sistema de Distribución de Energía***

En un sistema de distribución de energía se encuentra una infraestructura muy amplia para poder entregar la energía eléctrica a los diferentes usuarios, ya sea en las ciudades, suburbios, o en regiones muy remotas. Entre los elementos o equipos principales que conforman un sistema de distribución de energía se tiene:

**Subestaciones de Distribución.** Se transforma la energía recibida de los sistemas de subtransmisión de energía y dan origen a los circuitos de distribución primarios (Ramirez Castaño, 1995).

**Circuitos Primarios o de Medio Voltaje.** Son los circuitos que recorren cada uno de los sectores urbanos marginales y rurales suministrando energía a los transformadores de distribución (Ramirez Castaño, 1995).

**Transformadores de Distribución.** Son los equipos que se conectan a los circuitos primarios y suministran a energía a los consumidores conectados al circuito secundario (Ramirez Castaño, 1995).

**Circuito Secundario o de Bajo Voltaje.** Son los circuitos encargados de distribuir la energía eléctrica a los usuarios desde los transformadores de distribución (Ramirez Castaño, 1995).

### **Calidad de Energía**

La calidad de la energía eléctrica se lo puede definir como un conjunto de propiedades inherentes tanto al servicio como a la señal de voltaje o corriente eléctrica que deben llegar al consumidor en condiciones normales, es decir sin presentarse perturbaciones o interrupciones del mismo y así poder satisfacer las necesidades del cliente (Riofrío Jirón & Haro Pico, 2013).

En base a lo anterior, cada país cuenta con la existencia de agentes reguladores y operadores del servicio eléctrico, los cuales son los encargados de operar y administrar el correcto funcionamiento de los sistemas eléctricos y así cumplir con la calidad de servicio eléctrico entregado a los clientes. En el Ecuador, estos agentes regulador y operador son la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR) y el Operador Nacional de Electricidad CENACE, respectivamente.

Para el desarrollo de este estudio se considera la Regulación Nro. ARCERNNR 002/20 donde se determina los rangos de voltajes admisibles en los sistemas eléctricos.

### **ARCERNNR 002/20**

De acuerdo a la regulación ARCERNNR 002/20 “Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica”, se describen indicadores, índices y límites de calidad del servicio eléctrico, donde se destaca la Calidad del Producto que está relacionado en la forma en la que las señales de voltaje son entregadas por las distribuidoras, y que se caracteriza por el nivel de voltaje, perturbaciones rápidas de voltaje y armónicos (ARCERNNR-002/20, 2020).

**Índice.** En la Regulación Nro. ARCERNNR-002/20, la calidad de nivel de voltaje en un punto del sistema de distribución se determina con el índice mostrado en la ecuación 1 (ARCERNNR-002/20, 2020).

$$\Delta V_k = \frac{V_k - V_N}{V_N} \times 100 [\%] \quad (1)$$

Donde:

$\Delta V_k$  = Variación de voltaje de suministro respecto al voltaje nominal en el punto  $k$ .

$V_k$  = Voltaje de suministro en el punto  $k$ , determinado como el promedio de las medidas registradas en un intervalo de 10 minutos.

$V_N$  = Voltaje nominal en el punto  $k$ .

**Límites.** Con respecto a la variación de voltaje en sistemas eléctricos, el ARCERNNR establece rangos admisibles de acuerdo al nivel de voltaje, estos rangos admisibles se presentan en la Tabla 1. Para este estudio, en sistemas de distribución se considera el rango admisible para medio voltaje.

**Tabla 1**

*Límites de voltajes admisibles en sistemas eléctricos*

Nivel de voltaje	Rango Admisible
Alto Voltaje	± 5.0 %
Medio Voltaje	± 6.0 %
Bajo Voltaje	± 8.0 %

*Nota.* Tomado de (ARCERNNR-002/20, 2020)

### **Control de Voltaje en Sistemas Eléctricos**

Debido a la creciente demanda de energía eléctrica, o a la presencia de perturbaciones en el sistema en función de salidas repentinas de diferentes elementos en un SEP, esto altera el comportamiento correcto del sistema lo que conlleva a la variación de los niveles de voltaje estableciéndose fuera de los rangos admisibles. Dado esto, existe un gran interés por establecer técnicas de control que permitan dar acciones rápidas y apropiadas frente a estas anomalías para poder minimizar la inestabilidad de los perfiles de voltaje en los sistemas eléctricos, y así poder cumplir con las exigencias de calidad de la energía entregada a los consumidores.

En la literatura especializada, existe varios métodos o utilizando equipos que permiten realizar el control de voltaje, entre ellos se tiene (Rojas Calderon, 2022):

- La utilización de capacitores e inductores (Compensación reactiva).
- Cambio de taps en transformadores.
- Ajuste del campo de excitación en generadores.
- Conexión y desconexión de líneas del sistema eléctrico,
- Desprendimiento de carga.
- Implementación de generación distribuida.

Hay que considerar que estos métodos deben ser analizados y planificados previamente para obtener efectos positivos esperados en los sistemas eléctricos, ya sea de carácter preventivo o de emergencia, ya que caso contrario podrían agravar la inestabilidad de los perfiles de voltaje.

Cada uno de estos métodos utilizados para el control o regulación de voltaje en los sistemas eléctricos tienen sus ventajas y desventajas al momento de su aplicación, pero cabe destacar que la implementación de controles discretos como relés, transformadores con taps, dispositivos de compensación reactiva, mejoran significativamente los perfiles de voltaje en condiciones normales o en casos de emergencia, además resultan ser dispositivos que tienen un menor costo y dan una mejor seguridad en el sistema eléctrico (Oleas Granizo, 2019).

### **Compensación Reactiva**

El control de voltaje en un SEP es mantener los valores de voltaje lo más cercano a los valores nominales del sistema, tanto en condiciones normales como en condiciones de emergencia. Si el voltaje excede su valor nominal, los equipos conectados al sistema pueden resultar dañados por los esfuerzos eléctricos a los que se ven sometidos. En cambio, si el voltaje se encuentra por muy debajo del nivel de voltaje nominal, existe el riesgo de inestabilidad y colapso del voltaje.

Por otro lado, el flujo de potencia reactiva en el sistema eléctrico también tiene un impacto directo en el comportamiento de los perfiles de voltaje. Si existe un incremento de potencia reactiva esto provoca la degradación de los perfiles de voltaje, además de que el flujo de potencia reactiva disminuye la capacidad de carga de las líneas eléctricas (Hernández Galicia, 2000).

En base a lo anterior, es importante lograr un correcto control de voltaje en los sistemas eléctricos y evitar en lo posible la circulación de potencia reactiva. La solución de estos problemas se logra mediante la utilización de compensadores reactivos, por lo que generalmente, hablar de compensación reactiva en los SEP se entiende fundamentalmente como el efecto de liberar la capacidad eléctrica del sistema y mejorar los perfiles de voltaje.

Para compensación reactiva en sistemas de distribución se utiliza bancos de capacitores ya sean fijos o automáticos, los cuales se ubican a la salida de las subestaciones de distribución, o a lo largo de las líneas de los alimentadores primarios, siendo lo más usual su conexión en paralelo (Borges Vasconcellos y Concepción Céspedes, 2017).

### ***Banco de Capacitores***

Los capacitores proveen muchos beneficios en el rendimiento de los sistemas eléctricos, entre estos beneficios se tiene notablemente la reducción de pérdidas, liberación de capacidad y reducen la caída de voltaje (Zhungur Procel y Calva Riofrío, 2014):

**Pérdidas.** Para minimizar el flujo de potencia reactiva desde las subestaciones de distribución a las cargas, los bancos de capacitores distribuidas en el sistema se encargan de entregar la potencia reactiva requerida, lo cual significa que habrá menos corriente que fluya por las líneas de distribución lo que conlleva a disminuir las pérdidas de las líneas; esto es debido a que las pérdidas por efecto Joule están relacionadas directamente con la corriente como se muestra en la ecuación 2.

$$P_{lineas} = I^2 R \quad (2)$$

Donde:

$P_{lineas}$  = Pérdidas por efecto Joule en líneas eléctricas.

$I$  = Corriente de la línea.

$R$  = Resistencia de la línea.

**Caída de Voltaje.** Los capacitores instalados en un circuito eléctrico proveen un incremento de voltaje, el cual es un gran beneficio en un sistema que tenga una gran demanda debido a que esto causa caídas de voltaje. Realizando un banco de capacitores conmutables, se puede realizar la regulación de voltaje en un sistema de energía.

### **Estabilidad de voltaje**

La estabilidad de voltaje en un sistema eléctrico establece en mantener los niveles de voltaje dentro de los valores admisibles en cada una de los nodos del sistema, bajo condiciones normales o en condiciones de contingencia. Como se mencionó anteriormente, al existir la presencia de una perturbación, incremento de la demanda o cambio en las condiciones del sistema, estas serían las posibles causas de una incontrolable y progresiva caída de voltaje. Según (Kundur, 1993), se establece uno de los criterios de estabilidad de voltaje, el que consiste que la magnitud de voltaje en cada nodo del sistema incrementa a medida que la inyección de la potencia reactiva en la misma barra incrementa. Caso contrario, si el voltaje decrece en la barra mientras la inyección de potencia reactiva crece, esto conlleva a la inestabilidad del voltaje en el sistema (Kundur, 1993).

Existen varios tipos de estabilidad de voltaje donde los sistemas eléctricos deben tener la capacidad de mantener los voltajes ante perturbaciones, a continuación, se definirá algunos de ellos.

### ***Estabilidad de Voltaje ante Pequeños Disturbios***

Este tipo de estabilidad como su nombre lo dice ocurre cuando el sistema debe mantener los voltajes después de pequeños disturbios. Entre estos disturbios está los cambios incrementales en la carga del sistema (Patiño Castrillón y Limas Getial, 2008).

### ***Estabilidad de Voltaje ante Grandes Disturbios***

Para este tipo de estabilidad, el sistema debe tener la capacidad de mantener los niveles de voltaje ante grandes disturbios. Los grandes disturbios son fallas que se presentan en el sistema de transmisión, pérdida de generación, o presencia de corto circuito en el sistema. Esta capacidad es determinada por las características del sistema, la carga y las interacciones de controles continuos y discretos y de las protecciones existentes en el sistema (Patiño Castrillón y Limas Getial, 2008).

### ***Estabilidad de Voltaje de Corto Plazo***

La dinámica en el tiempo de los componentes rápidos de la carga, tales como motores de inducción, cargas con controles electrónicos y convertidores HVDC se incluye en este tipo de estabilidad donde el sistema debe asumir los cambios en el tiempo debido a las cargas mencionadas (Patiño Castrillón y Limas Getial, 2008).

### ***Estabilidad de Voltaje de Largo Plazo***

En la estabilidad de voltaje de largo plazo se considera la dinámica de los equipos de respuesta lenta, tales como los cambiadores de tomas de los transformadores, cargas con control de temperatura y limitadores de corriente del generador (Patiño Castrillón y Limas Getial, 2008).

### ***Colapso de Voltaje***

El colapso de voltaje es el resultado catastrófico de una serie de eventos en el sistema que conlleva a la caída de voltaje en uno o varios nodos. Este evento ocurre cuando la potencia reactiva no satisface la demanda del sistema, ocasionando así la inestabilidad del voltaje (Patiño Castrillón y Limas Getial, 2008).

### ***Causas principales de disminución de reactivos y voltajes en los nodos***

Existen diferentes causas que conllevan a la disminución de inyección de reactivos a un sistema eléctrico, debido a esto los voltajes de los nodos del sistema varían. En (Patiño Castrillón y Limas Getial, 2008) describen los eventos más significativos los cuales son:

- Transferencia de potencia eléctrica.
- Salida de líneas importantes.
- Disminución del suministro de reactivos.
- Salida de generadores y equipos reactivos.
- Cambio de Taps de los transformadores.
- Variaciones de la carga en el sistema

### **Métodos de análisis de estabilidad de voltaje**

En la literatura especializada, se presentan varios métodos para un análisis de la estabilidad de voltaje, pero en este estudio se considera la utilización de métodos gráficos para problemas estáticos, con los cuales se determina puntos críticos de inestabilidad mediante cambios de potencia activa y reactiva en el sistema. Los métodos gráficos son mediante la utilización de Curvas PV y Curvas QV, las cuales se describen a continuación.

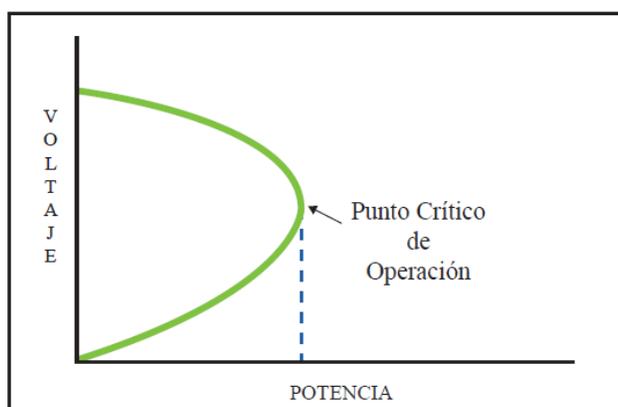
### **Método Curvas PV**

El método de las curvas PV, gráfica la variación del voltaje en un nodo en estudio con respecto al cambio de potencia activa de la carga del sistema. Es un método útil para analizar tanto redes radiales como redes malladas, donde P representa la potencia activa de la carga del sistema y V el voltaje del nodo en estudio (Domínguez Becerril, 2008).

En la Figura 2, se muestra una curva típica PV, donde se observa que el punto crítico de la curva es aquel que representa una disminución abrupta del voltaje el cual se conoce como punto de colapso (Chimborazo & Arcos, 2011).

### **Figura 2**

*Curva PV típica*



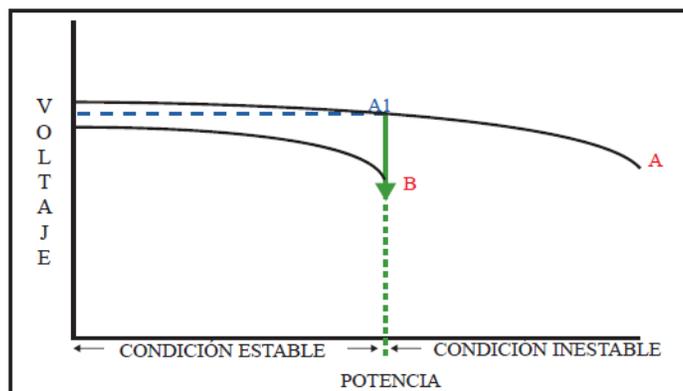
*Nota.* Tomado de (Chimborazo & Arcos, 2011)

En la Figura 3, se muestra la curva A que representa la curva PV de un nodo de un sistema en condiciones normales, se puede observar que los voltajes en la curva permanecen constantes hasta el punto A1, a partir de ese punto se evidencia una mayor caída de voltaje hasta llegar al punto A, siendo este el punto de colapso. Por otro lado, la curva B representa la curva PV del nodo de un sistema en condiciones de contingencia, por lo que el voltaje es menor a comparación del voltaje en condiciones normales. Como se observa en este caso el

punto de colapso de la curva B es mucho menor al punto de colapso en condiciones normales, lo cual para un estudio es muy importante considerar las curvas PV tanto para condiciones normales como para condiciones de contingencia (Chimborazo & Arcos, 2011).

### Figura 3

*Zona estable e inestable en la curva PV*

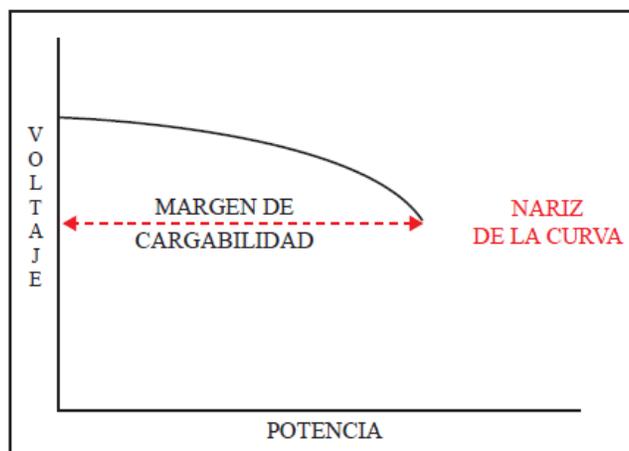


*Nota.* Tomado de (Chimborazo & Arcos, 2011)

En la Figura 4, se representa el margen de cargabilidad, que va desde el valor inicial hasta el punto de colapso o nariz de la curva. Este margen de cargabilidad se define como la máxima carga que puede soportar el sistema antes de llegar al colapso del voltaje (Chimborazo & Arcos, 2011).

## Figura 4

*Margen de cargabilidad en una curva PV*



*Nota.* Tomado de (Chimborazo & Arcos, 2011)

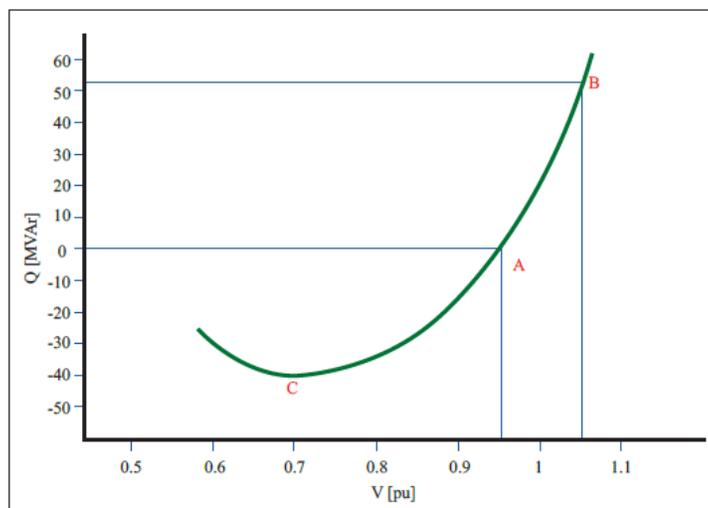
### **Método Curvas QV**

Las curvas QV son obtenidas por una serie de simulaciones de flujos de potencia, donde se simula la inyección de potencia reactiva en un nodo en estudio sin considerar límites, con el fin observar su influencia en los voltajes del nodo. El voltaje es la variable independiente y es la abscisa de la gráfica como se muestra en la Figura 5, por otro lado, la potencia reactiva va en el eje de las ordenadas y en este caso es una potencia reactiva capacitiva (Chimborazo & Arcos, 2011).

En relación a la Figura 5, el punto mínimo de la curva C (donde  $dQ/dV = 0$ ) es el punto crítico, es decir todos los puntos de la curva a la izquierda del valor mínimo son considerados como inestables. Los puntos a la derecha del mínimo son considerados estables (Domínguez Becerril, 2008).

## Figura 5

Curva QV típica



Nota. Tomado de (Chimborazo & Arcos, 2011)

## Algoritmos Genéticos

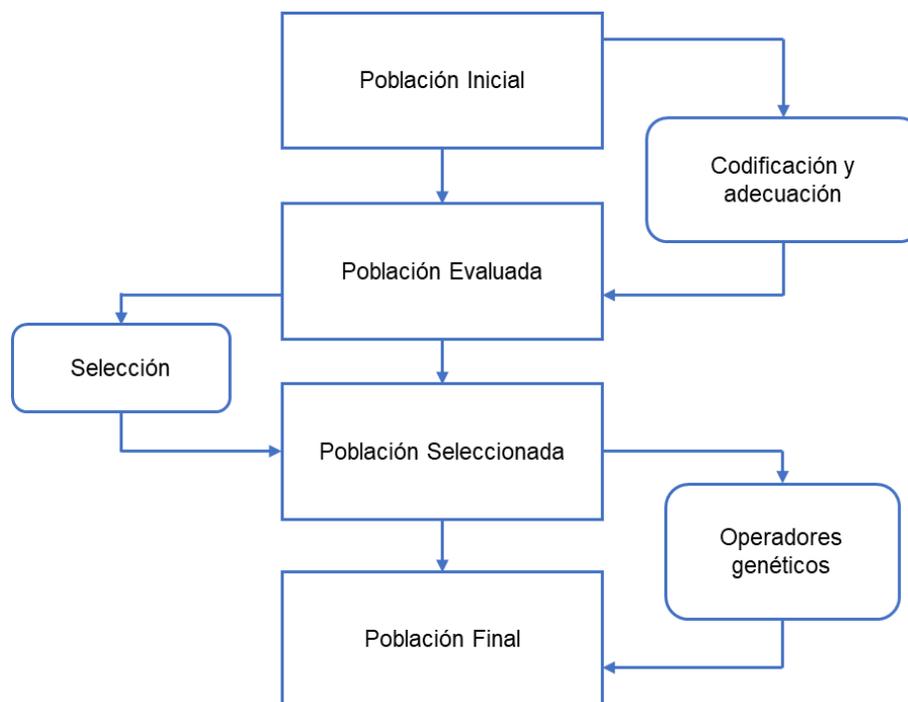
Los Algoritmos Genéticos (AG) es una técnica metaheurística para resolver problemas de optimización, que mediante un proceso iterativo de búsqueda encuentra la mejor solución bajo criterios específicos del problema planteado. Esta técnica de optimización se basa en la teoría biológica evolutiva como estrategia para resolver los problemas. El proceso de los AG empieza con una población inicial que pueden especificarse o generarse de forma aleatoria; a partir de esta población inicial se codifica y se evalúa mediante una función de aptitud permitiendo reconocer los mejores candidatos siendo estas posibles soluciones potenciales. Cada solución potencial constituye un individuo de la población y a estos se les asigna un valor de aptitud, para que los mejores tengan una mayor probabilidad de reproducirse, transmitiendo su información a los nuevos individuos (Castro García, 2007).

### ***Estructura de un Algoritmo Genético***

Un AG contiene una serie de procesos basados en la teoría biológica evolutiva. La ejecución del algoritmo como se muestra en la Figura 6, empieza con la generación aleatoria de una población inicial de individuos que luego son codificados y adecuados para establecer una población a evaluar. De esta población evaluada se selecciona los individuos más idóneos. Algunos de los individuos sufren alteraciones, debidas a la acción de los operadores genéticos (cruce o mutación), para así formar nuevas soluciones que constituyen una generación nueva. Todo este proceso es iterativo, y termina hasta alcanzar alguna condición de parada (Castro García, 2007).

### **Figura 6**

*Estructura básica del proceso de un AG*



## **Estudios Relacionados**

### ***Análisis de Estabilidad de Voltaje de Sistemas Eléctricos de Potencia Usando Curvas Q-V***

En este proyecto se presenta una el estudio de análisis de estabilidad de voltaje en sistemas eléctricos de potencia fundamentándose del método de análisis de puntos de equilibrios mediante la interpretación de las curvas Q-V. La obtención de las curvas QV del estudio propuesto se realiza mediante un código realizado en el software MATLAB. Para validar la exactitud y precisión de los resultados obtenidos se modeló el sistema IEEE de 14 barras en el software DlgSILENT PowerFactory para obtener algunas curvas QV, las cuales se usaron para comparar con las curvas obtenidas en el código realizado por los autores (Herrera Torrealban, 2015).

### ***Análisis de Estabilidad de Voltaje en Estado Estable en el Sistema Eléctrico de Subtransmisión a Nivel de 69 kv de la Empresa Eléctrica Ambato Regional Centro Norte S.A***

En el presente trabajo se realiza un análisis de estabilidad de voltaje en estado estable del Sistema Eléctrico de Subtransmisión de la Empresa Eléctrica Ambato Regional Centro Norte S.A. El modelamiento del sistema eléctrico mencionado se lo realiza con datos en condición de demanda máxima en el software CYMDIST y mediante las herramientas el software se realiza el análisis de estabilidad de voltaje obteniendo curvas PV. La base del estudio es obtener los puntos de cargabilidad máxima o puntos de colapso de voltaje en cada subsistema y sus barras; además, en base a la Regulación ARCONEL 005/18 donde se describe los límites de voltaje admisibles en barras, se señala para cada curva PV el nivel de carga total antes de que dichos límites sean vulnerados (Lasluisa Robalino, 2019).

### ***Aplicación de Algoritmos Genéticos para la Ubicación Óptima de Condensadores en el Alimentador Primario de Distribución Tipo Radial***

El objetivo principal de este estudio es la aplicación de algoritmos genéticos para la ubicación óptima de condensadores en el alimentador primario de distribución tipo radial para reducir caídas de voltajes y pérdidas de energía. Los autores desarrollaron un programa en MATLAB implementado algoritmos genéticos, para dimensionar los capacitores adecuados de potencia reactiva en diferentes nodos del sistema en estudio. Todos los resultados obtenidos son comparados y validados mediante el modelamiento del sistema en estudio en el software DIgSILENT (Aguirre Morillo & Toapanta Barreiro, 2021).

### ***Optimal Planning of VAR Compensator for Voltage Regulation Enhancement on Power Distribution Systems Against Volcanic Eruptions Events***

En el presente artículo científico, se muestra una metodología práctica para el dimensionamiento y la ubicación óptimos de los compensadores VAR para la mejora de la regulación del voltaje en sistemas de distribución de energía contra la ocurrencia de erupciones volcánicas. En la metodología propuesta se basa en una optimización matemática, en donde se utiliza un modelo de flujo óptimo de potencia en AC. Además, los autores utilizan la simulación de Monte Carlo para estimar la indisponibilidad de la infraestructura, y mediante la resolución del problema de optimización estocástica se logra la colocación y el dimensionamiento óptimos del compensador VAR en un sistema de distribución de energía. El problema de optimización matemática se plantea usando el software FICO XPRESS y se evalúa en el sistema de prueba de 37 nodos del IEEE, donde los resultados muestran la eficacia de la metodología propuesta (Velásquez Lozano et al., 2021).

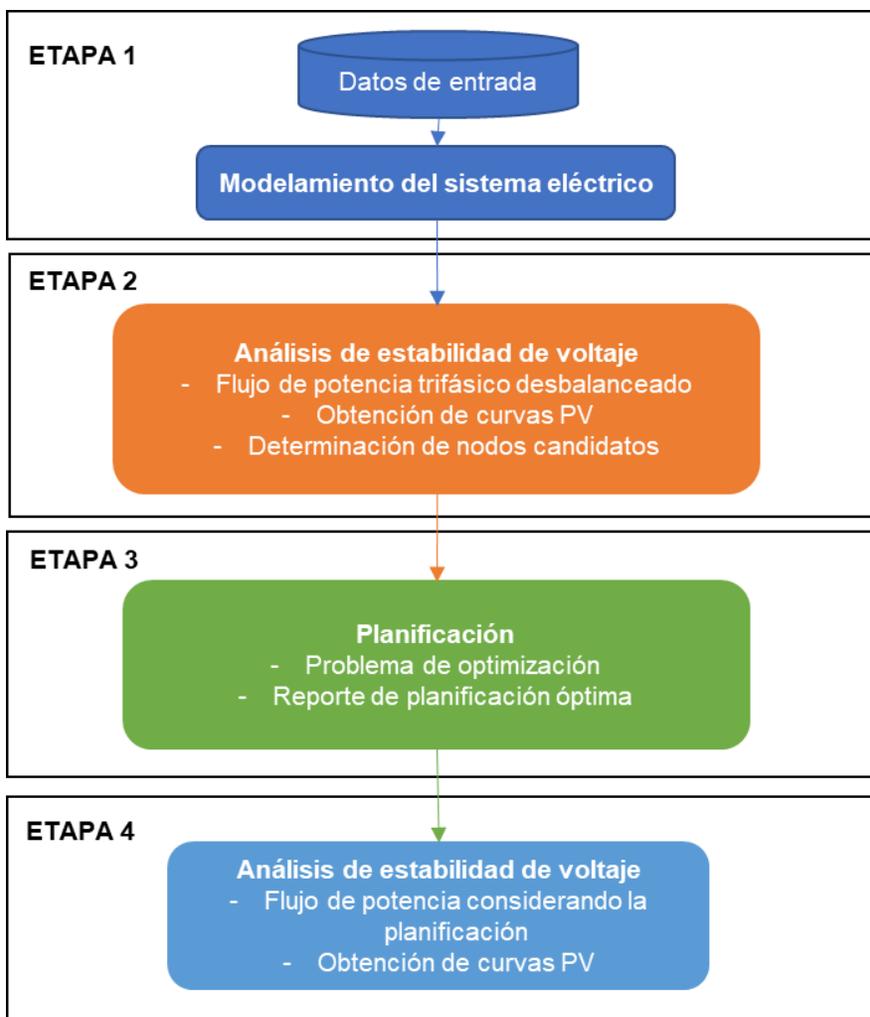
## Capítulo III

### Metodología

La metodología para el dimensionamiento y ubicación óptima de compensadores reactivos para mejorar los perfiles de voltaje mediante un estudio de estabilidad de voltaje en estado estable se muestra en la Figura 7.

**Figura 7**

*Metodología para la planificación óptima de compensadores reactivos mediante un análisis de estabilidad de voltaje*



Como se puede observar, la metodología desarrollada para este estudio se divide en cuatro etapas importantes. La primera etapa constituye al modelamiento del sistema eléctrico mediante la recopilación de datos actuales del sistema bajo estudio. La segunda etapa se considera la operación del sistema mediante la simulación de flujo de potencia AC trifásico desbalanceado, para luego realizar un análisis de estabilidad de voltaje con el fin de determinar zonas críticas del sistema de distribución. En la tercera etapa se desarrolla la planificación de compensación reactiva aplicando el método de Optimización vía Simulación (OvS) a través de un algoritmo genéticos (AG). Finalmente, en la cuarta etapa se realiza un análisis de estabilidad de voltaje mediante curvas PV considerando los resultados de planificación obtenidos en la etapa anterior. A continuación, se explican a detalle las etapas y subetapas de la metodología.

### **Primera etapa**

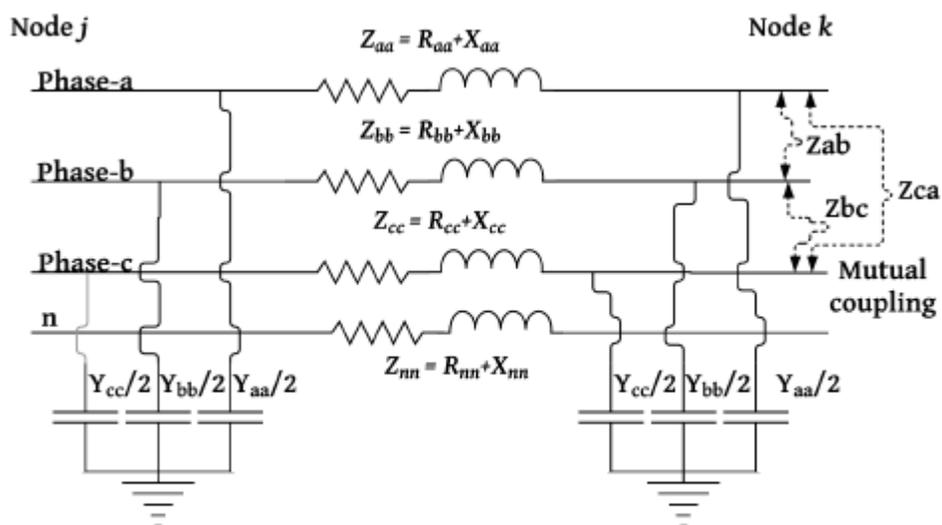
En la primera etapa de la metodología se realiza el modelamiento del sistema eléctrico, para lo cual es necesario contar con datos detallados que deben incluir la topología de la red, longitudes de las líneas por fase, cargas del sistema, impedancias de las líneas del sistema, características de elementos o equipos como reguladores de voltajes, generadores distribuidos, entre otros, con la finalidad de obtener un modelo más exacto para ser utilizado en el desarrollo de este estudio. Por otra parte, con el fin de facilitar el modelamiento del sistema eléctrico, se utiliza el método de la distancia eléctrica para reducir la cantidad de nodos, con el objetivo de minimizar el requerimiento computacional y por ende reducir tiempos de simulación. A continuación, se describe los modelos de elementos principales de un sistema de distribución.

### Modelo de líneas de distribución

Por lo general las redes de distribución de media voltaje constan de conductores trifásicos sin conductor neutro. En cambio, las redes de distribución de baja voltaje (BT) son sistemas trifásicos de 4 hilos con conductor neutro. En el modelo de línea trifásica, se necesitan 3x3 matrices de impedancia y admitancia para determinar los cálculos del flujo de potencia. El tamaño de las matrices será de 4x4 en el caso de un sistema de BT, pero generalmente se transforman en 3x3 (Meena et al., 2018). En la Figura 8, se muestra un modelo de línea de transmisión trifásica de 4 hilos. En la ecuación 3 y ecuación 4 se presentan las matrices de impedancia y admitancia de las líneas, respectivamente.

**Figura 8**

Sección de línea trifásica de 4 hilos entre los nodos  $j$  y  $k$ .



Nota. Tomado de (Meena et al., 2018)

$$Z_{abcn} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cn} \\ Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & Z_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$Y_{abcn} = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} & Y_{an} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} & Y_{bn} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} & Y_{cn} \\ Y_{na} & Y_{nb} & Y_{nc} & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Por otro lado, los flujos de corriente de los elementos en serie de la línea de distribución que conectan los nodos  $j$  y  $k$  se calculan como se presentan en la ecuación 5.

$$\begin{bmatrix} V_a^j \\ V_b^j \\ V_c^j \\ V_n^j \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_a^k \\ V_b^k \\ V_c^k \\ V_n^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa}^{jk} & Z_{ab}^{jk} & Z_{ac}^{jk} & Z_{an}^{jk} \\ Z_{ba}^{jk} & Z_{bb}^{jk} & Z_{bc}^{jk} & Z_{bn}^{jk} \\ Z_{ca}^{jk} & Z_{cb}^{jk} & Z_{cc}^{jk} & Z_{cn}^{jk} \\ Z_{na}^{jk} & Z_{nb}^{jk} & Z_{nc}^{jk} & Z_{nn}^{jk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^{jk} \\ I_b^{jk} \\ I_c^{jk} \\ I_n^{jk} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Del mismo modo, la inyección de corriente por los elementos en derivación de la línea de distribución en el nodo  $j$  se calculan como se presenta en la ecuación 6.

$$\begin{bmatrix} I_a^{j,sh} \\ I_b^{j,sh} \\ I_c^{j,sh} \\ I_n^{j,sh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{aa}^{jk} & Y_{ab}^{jk} & Y_{ac}^{jk} & Y_{an}^{jk} \\ Y_{ba}^{jk} & Y_{bb}^{jk} & Y_{bc}^{jk} & Y_{bn}^{jk} \\ Y_{ca}^{jk} & Y_{cb}^{jk} & Y_{cc}^{jk} & Y_{cn}^{jk} \\ Y_{na}^{jk} & Y_{nb}^{jk} & Y_{nc}^{jk} & Y_{nn}^{jk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a^j \\ V_b^j \\ V_c^j \\ V_n^j \end{bmatrix} \quad (6)$$

Donde,  $V_{a,b,c}^j$ ,  $I_{a,b,c}^{j,sh}$ , e  $I_{a,b,c}^{jk}$  representan los voltajes en los nodos, la corriente inyectada por los elementos shunt en el nodo  $j$ , y la corriente en la línea entre los nodos  $j$  y  $k$  respectivamente.

### **Modelo de cargas**

Las cargas en los sistemas de distribución pueden clasificarse en tres categorías impedancia constante (Z), corriente constante (I), y potencia constante (P), conocidas como el modelo ZIP. Las inyecciones de corriente de la carga tipo I se dan para cada nodo  $j$  como

$\left[ I_{abc}^{j,L} \right] = \left| I_{abc}^{j,nom} \right| \angle \left( \delta_{abc}^j - \theta_{abc}^j \right)$  sin embargo, las inyecciones de corriente de las cargas de potencia constante e impedancia constante se calculan como se muestra en la ecuación 7 y ecuación 8, respectivamente.

$$TipoP \begin{bmatrix} I_a^{j,L} \\ I_b^{j,L} \\ I_c^{j,L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left( \frac{S_a^j}{V_a^j} \right)^* \\ \left( \frac{S_b^j}{V_b^j} \right)^* \\ \left( \frac{S_c^j}{V_c^j} \right)^* \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$TipoZ \begin{bmatrix} I_a^{j,L} \\ I_b^{j,L} \\ I_c^{j,L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left( \frac{V_a^j}{Z_a^j} \right)^* \\ \left( \frac{V_b^j}{Z_b^j} \right)^* \\ \left( \frac{V_c^j}{Z_c^j} \right)^* \end{bmatrix} \quad (8)$$

### **Modelo de regulador de voltaje**

Un regulador de voltaje consta de un autotransformador y un mecanismo de cambio de tomas de carga. El cambio de voltaje se obtiene cambiando las tomas del devanado en serie

del autotransformador. La posición de la toma viene determinada por un circuito de control (compensador de caída de línea) (Grigsby, 2007).

El modelo de regulador de voltaje considerado en este estudio es tomado de (Grigsby, 2007), que corresponde a un regulador de voltaje típico de 32 pasos con regulación de total de  $\pm 10\%$ , cada paso tiene una regulación de  $5/8\%$  de voltaje lo que representa el 0.00625 por unidad. El modelo es representado por la ecuación 9 y ecuación 10.

$$V_S = a_r V_L \quad (9)$$

$$a_r = 1 \pm 0.00625 * Tap \quad (10)$$

Donde  $V_S$  es el voltaje con el ajuste del Tap en el nodo ubicado el regulador de voltaje,  $a_r$  es la relación efectiva del regulador de voltaje,  $V_L$  es el voltaje antes de la regulación de voltaje, y por último Tap es valor de toma de carga ajustado de 32 pasos (16 pasos positivos y 16 pasos negativos).

### ***Modelo de compensador reactivo***

El objetivo de este estudio es la ubicación óptima de compensadores reactivos para mejorar los perfiles de voltaje en un sistema de distribución de energía. Para lo cual se considera un modelo simplificado de una variable que simule la inyección de potencia reactiva en el sistema y esta debe cumplir con ciertas restricciones.

Como se explica en las secciones anteriores de este trabajo, los bancos de capacitores son utilizados comúnmente en sistemas de distribución para la compensación reactiva, donde sus beneficios es mejorar los perfiles de voltaje y aliviar la cargabilidad de las líneas de distribución; esto último ocurre debido a que se reducen los flujos de reactivos por las líneas, lo que significa que habrá menos corriente y por ende menos pérdidas por efecto Joule.

En base a este contexto, la restricción que se debe considerar en la planificación de compensadores reactivos es que la capacidad total de estos elementos no debe superar a la demanda de reactivos total del sistema. La ecuación 11 representa la restricción de límites de reactivos, donde  $\sum Q_{a,b,c}^c$  es la sumatoria de las capacidades compensadores reactivos instalados por cada fase del sistema, siendo menor o igual a la sumatoria de la carga por fase representado por  $\sum Q_{a,b,c}^{load}$ . Cabe mencionar que el problema de optimización se plantea como un problema de enteros mixto debido a que se considera varias potencias fijas a instalar en compensadores reactivos denominados como  $Q_{a,b,c}^c$ ,

$$\sum Q_{a,b,c}^c \leq \sum Q_{a,b,c}^{load} \quad (11)$$

## Segunda etapa

### *Flujos de potencia*

Para la simulación de flujos de potencia trifásicos desbalanceados se utiliza el software MATLAB, donde se desarrolla el programa aplicando el método Barrido hacia atrás/ hacia adelante (BFS por sus siglas en inglés Backward/Forward Sweep). El método BFS es eficiente y rápido para resolver flujos de potencia de los sistemas de distribución. El método se basa en la ley de corriente de Kirchhoff (LCK) y la ley de voltajes de Kirchhoff (LVK), utilizadas respectivamente en los barridos hacia atrás y hacia adelante. El método BFS es simple y tiene un mejor rendimiento de convergencia en comparación con los métodos convencionales de flujo de carga basados en Gauss y Newton debido a la adopción de estas leyes fundamentales para redes radiales (Meena et al., 2018).

En la Figura 9, se muestra un flujograma del método BFS aplicado para flujos de potencia. Inicialmente se considera los datos de entrada del modelo trifásico del sistema eléctrico. En base a estos datos, el primer paso es determinar los nodos terminales e

intermedios de todo el sistema. Como segundo paso, se asume que todos los voltajes iniciales del sistema tendrán el valor de 1 p.u. (valor por unidad) para luego ser recalculado en el proceso.

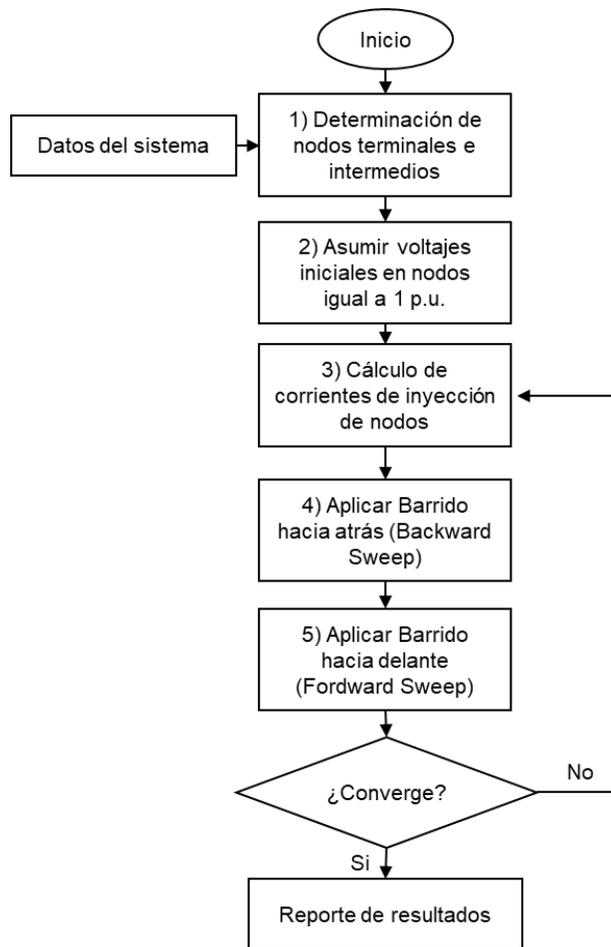
En el tercer paso, se calcula las corrientes de inyección en cada nodo utilizando la ecuación 12.

$$I_i^k = \text{conj} \left( \frac{S_i}{V_i^{k-1}} \right) \quad (12)$$

Donde  $I_i^k$  es la corriente de inyección en el nodo  $i$  en la iteración  $k$ .  $S_i$  es la inyección de potencia en el nodo  $i$  y  $V_i^{k-1}$  es el voltaje del nodo  $i$  en la iteración  $k-1$ .

Figura 9

Flujograma de Método Badward/Fordward Sweep



*Nota.* Diagrama de flujo del método BFS aplicado a flujos de potencia.

El cuarto paso, se realiza el barrido hacia atrás (Backward Sweep) utilizando la ecuación 13. El proceso hacia atrás implica que las soluciones de corriente de las líneas aplicando LKC, comiencen desde las líneas de los nodos finales y se muevan hacia la las líneas conectadas al nodo de referencia (Kawambwa et al., 2021).

$$J_{i-1,i}^k = I_i^k + \sum (J_{i,i+1}^k) \quad (13)$$

Donde  $J_{i-1,i}^k$  es la corriente de la línea que conecta el nodo  $i$  con su nodo aguas arriba  $(i-1)$ ,  $\sum(J_{i,i+1}^k)$  es la sumatoria de todas las corrientes de línea que fluyen desde el nodo  $i$ .

El paso número cinco del método BFS, es el barrido hacia delante (Forward Sweep). En este paso se calcula el voltaje en cada nodo desde el nodo de referencia hasta los nodos finales utilizando la ecuación 14.

$$V_i^k = V_{i-1}^k + J_{i-1,i}^k Z_{i-1,i} \quad (14)$$

Donde  $V_i^k$  es el voltaje del nodo  $i$  en la iteración  $k$  y  $V_{i-1}^k$  es el voltaje del nodo aguas arriba inmediato del nodo  $i$ .  $J_{i-1}^k$  es la corriente de la rama que conecta el nodo  $i$  con su nodo aguas arriba  $(i-1)$ , y por último  $Z_{i-1,i}$  representa la impedancia de la línea que conecta el nodo  $i$  con su nodo aguas arriba  $(i-1)$ .

Cabe destacar que, durante el barrido hacia atrás, el voltaje se mantiene constante, y durante el barrido hacia adelante, el valor de corriente o potencia se mantiene constante (Kawambwa et al., 2021).

Los criterios de parada más comunes para BFS son la convergencia de las magnitudes de voltaje obtenidas mediante el seguimiento de las diferencias de magnitud de voltaje entre dos iteraciones sucesivas (Kawambwa et al., 2021). El algoritmo se detiene cuando las condiciones en la ecuación 15 se cumplen.

$$\text{Max}(V^{k-1} - V^k) \leq \alpha = 10^{-6} \quad (15)$$

Donde  $\alpha$  son los límites de tolerancia para la convergencia del proceso. Todas estas ecuaciones son aplicadas para cada una de las fases, además, cabe destacar que se debe considerar el desfase del ángulo de 120° grados entre fases.

### ***Obtención de curvas PV***

En las secciones anteriores de estudio se presenta los métodos gráficos para realizar el análisis de estabilidad de voltaje en sistemas eléctricos. En este caso, se considera el uso del método de Curvas PV. Este método se basa en obtener gráficas de los valores de voltajes en un nodo en estudio frente al aumento progresivo de la carga activa en el mismo nodo hasta llegar a un punto de colapso, y en función de esto determinar el margen de cargabilidad del sistema.

### ***Determinación de nodos candidatos***

Para la determinación de nodos candidatos para la planificación de compensación reactiva se utiliza las gráficas de Curvas PV, mediante estas gráficas se determina los nodos más críticos del sistema, es decir los nodos que más rápidamente llegan al punto de colapso.

Con el fin de facilitar la obtención de Curvas PV y nodos candidatos, hay que considerar el gran número de nodos que puede tener un sistema de distribución de energía y que los valores de voltajes entre nodos son muy cercanos, por lo cual se realiza un análisis previo de perfiles de voltaje del sistema para determinar zonas estratégicas a lo largo del circuito.

### **Tercera etapa**

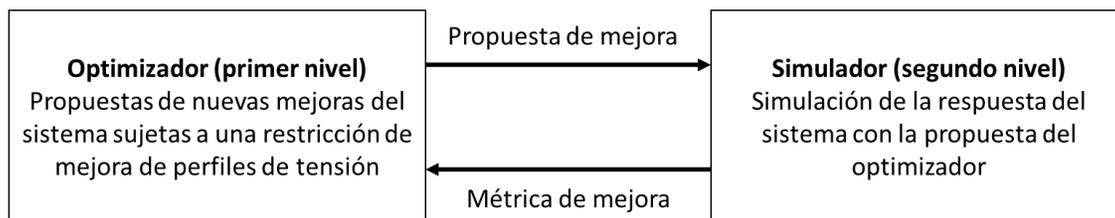
En la tercera etapa de la metodología presentada, se desarrolla el algoritmo de optimización aplicando algoritmos genéticos (AG) para obtener la planificación de compensadores reactivos en sistemas de distribución. Además, en este estudio se utiliza un enfoque de solución de optimización vía simulación (OvS), el cual tiene la capacidad de capturar un muy alto nivel de detalle y complejidad en la etapa de simulación, incluyendo un amplio conjunto de restricciones operativas y el proceso secuencial de desconexión y reconexión de carga. A continuación, se describe con mejor detalle estos métodos.

### **Optimización vía Simulación (OvS)**

El método OvS aprovecha la estructura de dos niveles del problema de planificación en sistemas eléctricos, según la cual, en un segundo nivel (el simulador), se simula la operación de la red sobre una infraestructura de red determinada en un primer nivel (el optimizador) (Rodrigo Moreno et al., 2020). Como esta aplicación se centra en la ubicación y dimensionamiento óptimo de compensadores reactivos para mejorar los perfiles de voltaje, nos interesa especialmente simular el funcionamiento del sistema dando soluciones propuestas por el optimizador de banco de capacitores para ser instalados en el sistema. El optimizador y el simulador iteran hasta encontrar una propuesta de mejora de la red aproximadamente óptima, como se ilustra en la Figura 10.

**Figura 10**

*Método OvS para planificación de compensación reactiva.*



Para el simulador se utiliza el modelo de flujo óptimo de potencia trifásico desbalanceado con el método Backward/Fordward Sweep (BFS) y para el optimizador se utiliza algoritmos genéticos descrito a continuación.

### **Algoritmos genéticos (AG)**

El algoritmo genético (AG) es un método adaptativo que puede utilizarse para resolver problemas de búsqueda y optimización. En la Figura 11, se detallan las etapas del

procedimiento de AG utilizado como optimizador para el método OvS. Los componentes comunes que constituyen un algoritmo genético son: función objetivo población inicial, selección de individuos, etapa de reproducción (cruce y mutación) y criterios de parada.

En la función objetivo ( $F.O$ ) mostrada en la ecuación 16 se considera la minimización el costo de operación ( $CO$ ) y el costo de inversión ( $CI$ ). En costo de operación se toma en cuenta el costo de deslastre de demanda debido a bajos niveles de voltaje ( $C_{ENS}$ ) y costos de pérdidas en el sistema. Por otro lado, en el costo de inversión se considera el costo de compensadores reactivos ( $C_Q$ ).

$$\begin{aligned}
 F.O &= CO + CI + M \cdot (X + Y) \\
 CO &= ENS \cdot C_{ENS} + P_{Pérdidas} \cdot C_{Pérdidas} \\
 CI &= \sum Q_{instalado} \cdot C_Q
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

Donde la ENS representa el deslastre de demanda debido a bajos niveles de voltaje el cual se obtiene a través del Algoritmo 1.

**Algoritmo 1:** Deslastre de demanda por bajo niveles de voltaje (DDBV)

- 
- 1: Ejecutar el algoritmo de flujos de potencia trifásicos desbalanceados BFS
  - 2: Asignar a todos los nodos por debajo del límite de voltaje establecido al conjunto **DDBV**
  - 3: **Mientras** El conjunto **DDBV** no sea un conjunto vacío
  - 4: Aplicar un porcentaje de deslastre de demanda en todos los nodos pertenecientes al conjunto DPBV
  - 5: **Fin**
  - 6: Cuantificar el deslastre de demanda total **ENS**
- 

Cabe mencionar que debido a que se ejecuta un flujo de potencia en el simulador, es necesario agregar en la función objetivo variables que nos permitan reconocer si la solución dada por el optimizador conduce a sobrecargas en las líneas y a sobrevoltajes en los nodos.

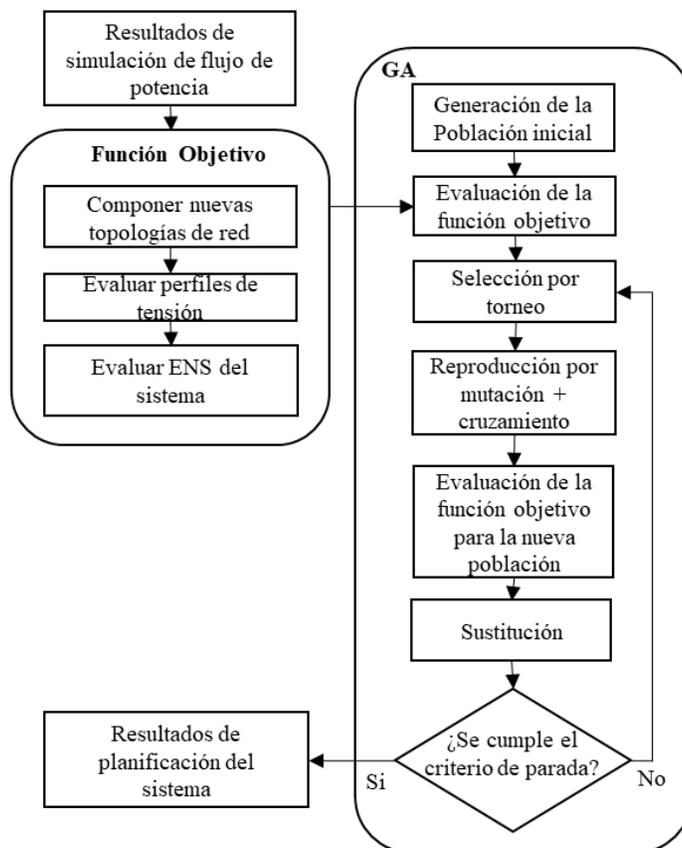
Para este fin, se agrega el término  $M \cdot (X + Y)$  en la función objetivo. Donde  $M$  es un número muy grande,  $X$  es la longitud del conjunto que contiene todos los nodos con sobrevoltaje y  $Y$  es la longitud del conjunto que contiene a todas las líneas con sobrecarga. De esta manera, dentro del AG solo los individuos que generen una menor longitud en los conjuntos  $X$  y  $Y$ , serán los que puedan llegar a ser considerados en la siguiente población, conduciendo a encontrar una solución que no genere sobrevoltajes y sobrecargas. Además, en la función objetivo se considera la ecuación 11 que restringe la potencia máxima de compensadores reactivos a instalar en el sistema.

La función objetivo es considerada como la métrica de mejorar en el método OvS, por ende, la solución encontrada va a ser la que reduzca la ENS debido a bajos niveles de voltaje con un menor costo de inversión y sin la generación de sobrevoltajes y sobrecargas en el alimentador. Nótese que, con el método OvS, se encontrará una solución óptima aproximada que depende de los candidatos seleccionados para la instalación de compensadores reactivos.

Inicialmente, en el proceso de un AG, se genera una población de soluciones aleatorias (individuos), que se utiliza para evaluar la función objetivo, dicha evaluación se realiza para cada uno de los individuos. Además, hay que considerar que la selección del tamaño de la población a generar es un factor importante para obtener una solución adecuada del problema de optimización, además de ser un valor que influye en la carga computacional, por lo tanto, el tamaño de la población debe ser razonable.

Figura 11

Flujograma de metodología de Algoritmos genéticos



En la etapa de reproducción, los individuos de la población son seleccionados para cruzarse y producir descendencia. Posteriormente, se aplica el operador de mutación, que consiste en la alteración aleatoria de los genes de cada individuo. En este caso, se establece el valor de la fracción de cruce, que representa la fracción de la población que se cruzará para obtener nuevos individuos que constituirán la siguiente generación. Este factor de cruce tiene una correlación con la mutación, tomando valores entre 0 y 1, por ejemplo, si el valor de la fracción de cruce es 0,8; el 80% de la población se cruzará y sólo el 20% mutará (Rodelo Torres, 2013).

Como se ha mencionado, el algoritmo de optimización se desarrolla en MATLAB. En este software se puede llamar la función de algoritmos genéticos el cual requiere de una serie

de parámetros de entrada que incluyen la definición del problema y la configuración deseada para el algoritmo genético (Hernández Romero et al., 2012). En la Tabla 2, se describe los parámetros que se han configurado del algoritmo genético en este trabajo. Se definen cinco operadores principales entre ellos población, selección, cruce, mutación y criterios de parada.

**Tabla 2**

*Parámetros de configuración AG en Matlab*

<b>Operador</b>	<b>Tipo</b>	<b>Valor</b>
<b>Población inicial</b>	Uniforme entero	-
	Tamaño de población	100
<b>Selección</b>	Por torneo	-
	Fracción de cruzamiento	0.8
<b>Cruzamiento y mutación</b>	Cruzamiento por Laplace	-
	Mutación de potencia	-
	Generaciones máximas	150
<b>Criterio de parada</b>	Generación de pérdida máxima (Max stall generation)	80
	Función Tolerancia	0.001

En el operador población se establecen dos opciones de configuración, la primera corresponde a la creación de una población inicial aleatoria con una distribución uniforme para problemas con restricciones enteras. A continuación, se establece el tamaño de la población con un valor de 100; este valor se establece en base a las pruebas realizadas previamente. Para el operador de selección se establece la selección por torneo, que permite realizar un barrido por toda la población y tomar los individuos con mejores aptitudes. La diversidad está garantizada en la selección por torneo, ya que todos los individuos tienen la misma oportunidad de ser seleccionados. Para la etapa de reproducción (cruce y mutación) se establece una fracción de cruce de 0,8 definida en las pruebas realizadas. Se define un cruce de Laplace y una mutación de potencia, establecidos para problemas con restricciones enteras.

En los criterios de parada se consideran tres criterios, siendo el primero el número máximo de generaciones. El segundo criterio corresponde a max stall generation que detiene la simulación cuando no se produce un cambio máximo en el valor de la función objetivo en un

número de generaciones consecutivas. La generación máxima y max stall generation se fijan en valores de 150 y 80, respectivamente, en función de las pruebas realizadas. Por último, el criterio de la función de tolerancia se fija con un valor de 0,01. Este último define una tolerancia admisible de finalización en el valor de la función objetivo en ausencia de cualquier cambio. Todos estos parámetros del algoritmo genético fueron tomados de (MATLAB, 2023), donde se describen a mayor detalle cada uno de ellos.

#### **Cuarta etapa**

La cuarta y última etapa de la metodología de este estudio, es similar a lo que se realiza en la segunda etapa con la diferencia de que se considera tanto para el flujo de potencia trifásico desbalanceado como la obtención de curvas PV los resultados de planificación de compensadores reactivos. Los resultados de esta etapa servirán para analizar el impacto de la planificación en el sistema.

## Capítulo IV

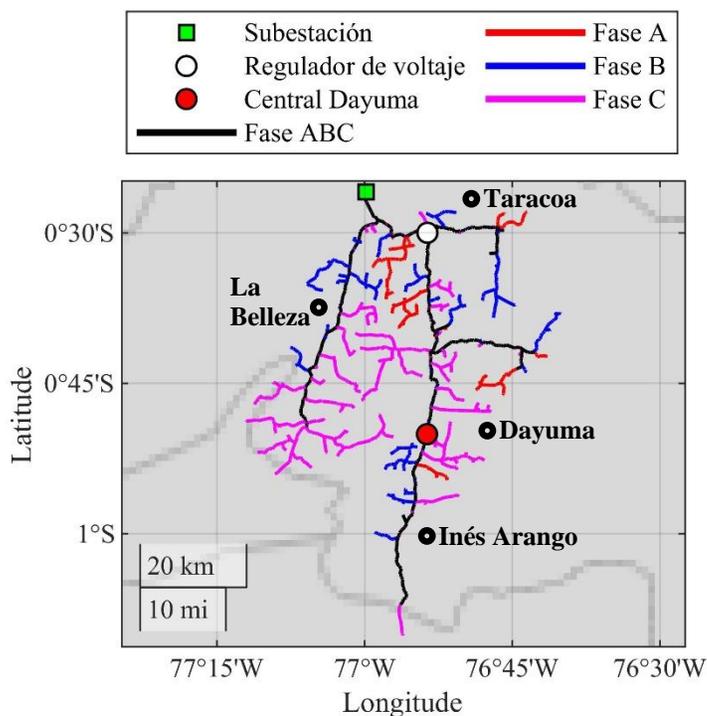
### Desarrollo de la Investigación

#### Alimentador Vía al Auca

El alimentador Vía al Auca se encarga de la distribución de energía a los usuarios de las parroquias Taracoa, Dayuma, Inés Arango y La Belleza. Las tres primeras parroquias son zonas petroleras donde existen además de pozos de extracción de crudo; campamentos y muchos negocios hoteleros, que se han visto afectados por la deficiente calidad de energía que entrega actualmente CNEL EP UN Sucumbíos mediante este alimentador. En la Figura 12, se puede observar la topología del alimentador Vía al Auca con sus respectivos ramales monofásicos.

#### Figura 12

*Topología del alimentador vía el Auca de la subestación eléctrica Payamino*



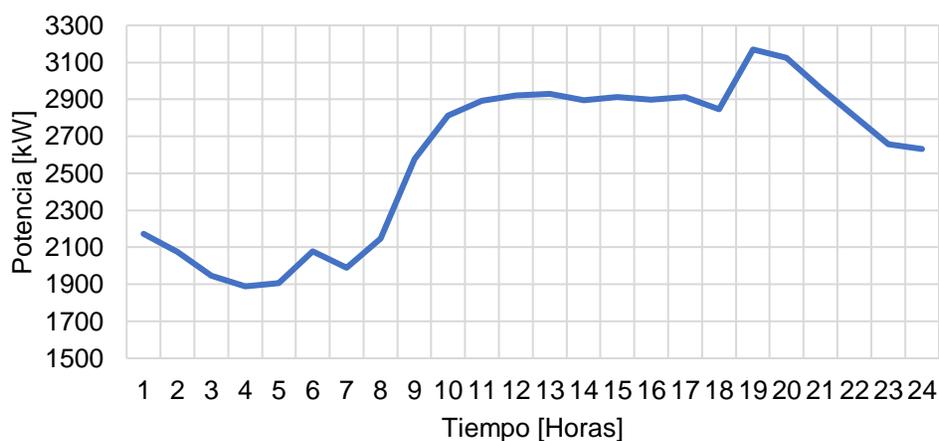
El alimentador Vía al Auca, actualmente dispone de un centro de generación distribuida propiedad de CELEC TERMOPICHINCHA ubicado en la parroquia Dayuma, para contribuir con la mejora de los niveles de voltaje en algunas zonas pobladas por las que atraviesa el alimentador. La central de generación se encuentra ubicada en las coordenadas UTM WGS84, Zona 17S X=957176.22, Y=9907544.84. Adicionalmente posee tres reguladores de voltaje monofásicos de 167/187 kVA en las coordenadas UTM WGS84 Zona 17S X=957260.31, Y=9944615.3 (ver Figura 12).

### **Características Técnicas del Alimentador**

En el alimentador existen 10328 clientes conectados a la red y están repartidos entre consumidores residenciales, comerciales, industriales y alumbrado público convencional. En la Figura 13 y Figura 14 se muestra las curvas de demanda diaria y de factor de potencia del alimentador vía al Auca, respectivamente.

### **Figura 13**

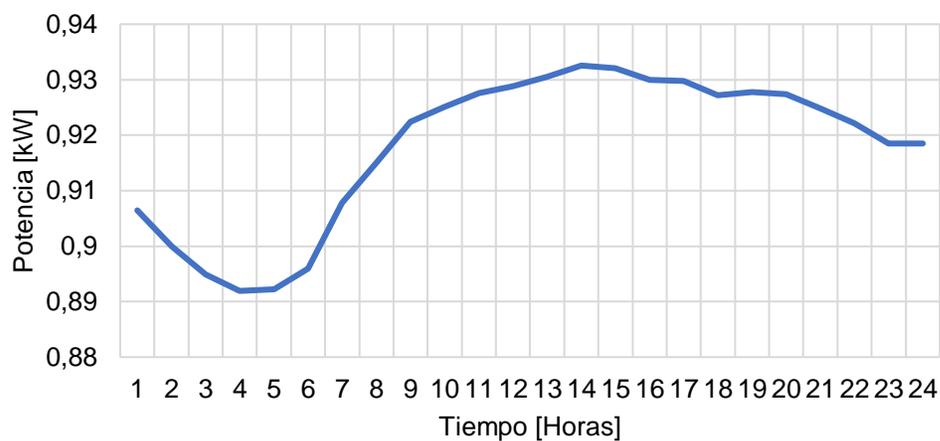
*Curva de demanda diaria del alimentador vía al Auca*



Como se puede observar en la curva se presenta una demanda mínima de 2142,39 kW y una demanda máxima de 3311,63 kW. Los datos fueron obtenidos a partir de los datos técnicos del alimentador en el software CYMDIST, donde se desagregan las pérdidas técnicas del alimentador.

### Figura 14

*Curva de factor de potencia diario del alimentador vía al Auca*



La longitud del alimentador vía al Auca es de 806 Km, donde 210,27 km de red corresponde al sistema trifásico y 595,75 km a los ramales monofásicos con conductor ACSR #1/0 en su gran mayoría. En la Tabla 3 se muestra la distribución de las longitudes de la red.

**Tabla 3***Distribución de longitudes de la red*

	<b>Longitud</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>Fases</b>	<b>[Km]</b>	<b>(%)</b>
<b>A</b>	99,94	12,00%
<b>B</b>	169,21	21,00%
<b>C</b>	326,60	41,00%
<b>ABC</b>	210,27	26,00%
<b>Total</b>	<b>806,02 km</b>	<b>100,00%</b>

Como se puede observar en la Tabla 3, el alimentador Vía al Auca de la Subestación Payamino presenta una extensa longitud de red, esto provoca la presencia de bajos niveles de voltaje. Adicionalmente, los ramales monofásicos extensos generan desbalance a nivel de cabecera, afectando principalmente la calidad del servicio eléctrico en los sectores poblados de la zona.

### ***Características Técnicas de la Central Dayuma***

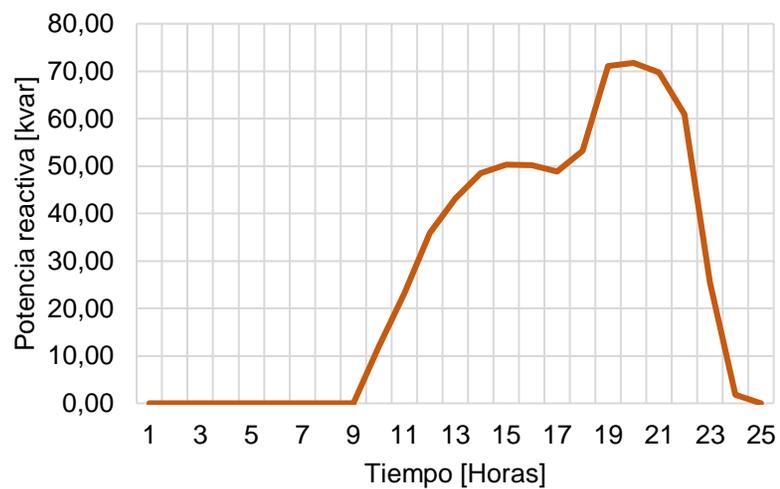
La central Dayuma se encuentra localizada en las coordenadas UTM WGS84, Zona 17S X=957176.22, Y=9907544.84, el cual posee una potencia instalada de 1 MW. En la Figura 15 y Figura 16 se muestra el perfil de suministro de la central Dayuma de potencia activa y reactiva, respectivamente. Como se puede observar, en horas de demanda mínima (4:00 horas) no se suministra energía desde la central Dayuma al alimentador. Por otro lado, se observa que en horas de demanda máxima (19:00 horas) se suministra 394,13 kW de potencia activa y 71,06 kVAr de potencia reactiva a la red.

**Figura 15**

Curva de potencia activa suministrada por la central Dayuma

**Figura 16**

Curva de potencia reactiva suministrada por la central Dayuma



### **Características Técnicas del Regulador de Voltaje Monofásico**

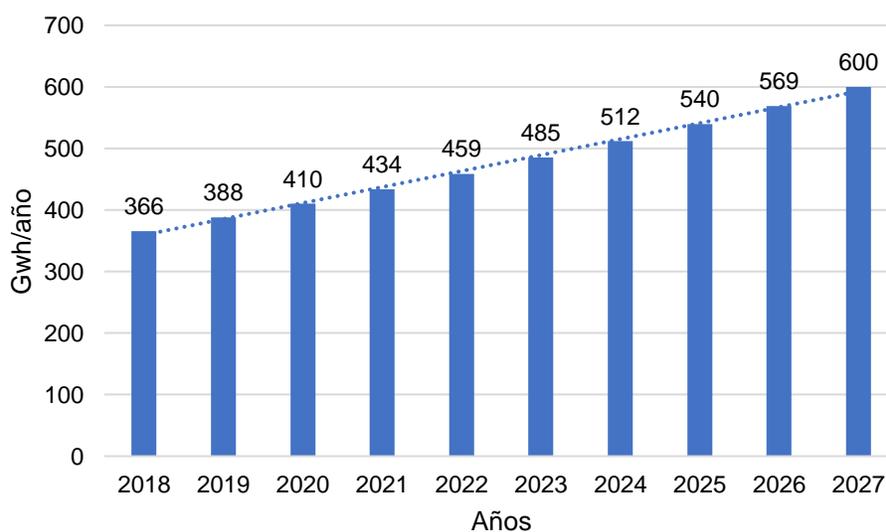
El alimentador vía al Auca posee tres reguladores monofásicos de la marca TOSHIBA de 167/187 kVA con voltaje nominal de 13.2/7,62 kV y una regulación de  $\pm 10\%$  en 32 posiciones con escalones de 0,625% los mismos que se seleccionan automáticamente de acuerdo a la demanda.

### **Proyección de la Demanda**

La proyección de la demanda se realizó utilizando los datos disponibles en el plan maestro de electricidad (Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables, 2022). En la Figura 17 se muestra el consumo de demanda de años históricos (2018-2022) y el crecimiento en cada uno de ellos (2023 hasta 2027) de la empresa CNEL-Sucumbíos. En este estudio se utiliza la proyección de demanda de 5 años (2023-2027) el cual es de 600 GWh/año lo que representa un 30% de crecimiento de demanda desde el año 2022.

**Figura 17**

*Crecimiento de demanda*



*Nota.* Proyección de demanda de la empresa CNEL-Sucumbíos al año 2027 tomado de (Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables, 2022).

### **Condiciones de Operación de Entrada para el Algoritmo de Optimización**

Para el algoritmo de optimización es necesario definir dos condiciones de operación del alimentador (demanda mínima y máxima proyectada), los mismos que se muestran en la Tabla 4. Las condiciones de operación en demanda mínima se utilizan con el fin de garantizar que no existan sobrevoltajes en el alimentador con la inversión de compensadores reactivos. Por otro lado, se define condiciones de demanda máxima proyectada a 5 años con un incremento porcentual total del 30%, y se considera un suministro de potencia activa y reactiva de la central Dayuma de 512,37 kW y 92,38 kVAr, con el objetivo de asegurar que la inversión en compensadores reactivos sea capaz de mejorar los perfiles de voltaje en el alimentador con condiciones de demanda máxima proyectada.

**Tabla 4**

*Datos de entrada para el algoritmo de optimización*

<b>Demanda</b>	<b>Fase A [kW]</b>	<b>Fase B [kW]</b>	<b>Fase C [kW]</b>	<b>Total [kW]</b>	<b>Central Dayuma [kW]</b>	<b>Central Dayuma [kVAr]</b>
<b>Mínima</b>	604,12	708,85	829,42	2142,39	0,00	0,00
<b>Máxima actual</b>	937,82	1112,06	1261,75	3311,63	394,13	71,06
<b>Máxima proyectada</b>	1219,17	1445,68	1640,28	4305,13	512,37	92,38

## **Análisis de Estabilidad de Voltaje del Alimentador Vía al Auca en Condiciones de Operación Actuales.**

Para el análisis de estabilidad de voltaje se ejecutan flujos de potencia trifásicos desbalanceados utilizando el algoritmo de barrido hacia adelante/atrás (BFS) descrito en la metodología de este trabajo. En base a los resultados obtenidos al simular flujos de potencias se realiza el análisis de curvas PV para determinar el comportamiento del voltaje en nodos del alimentador en las parroquias Taracoa, Dayuma, Inés Arango y La Belleza.

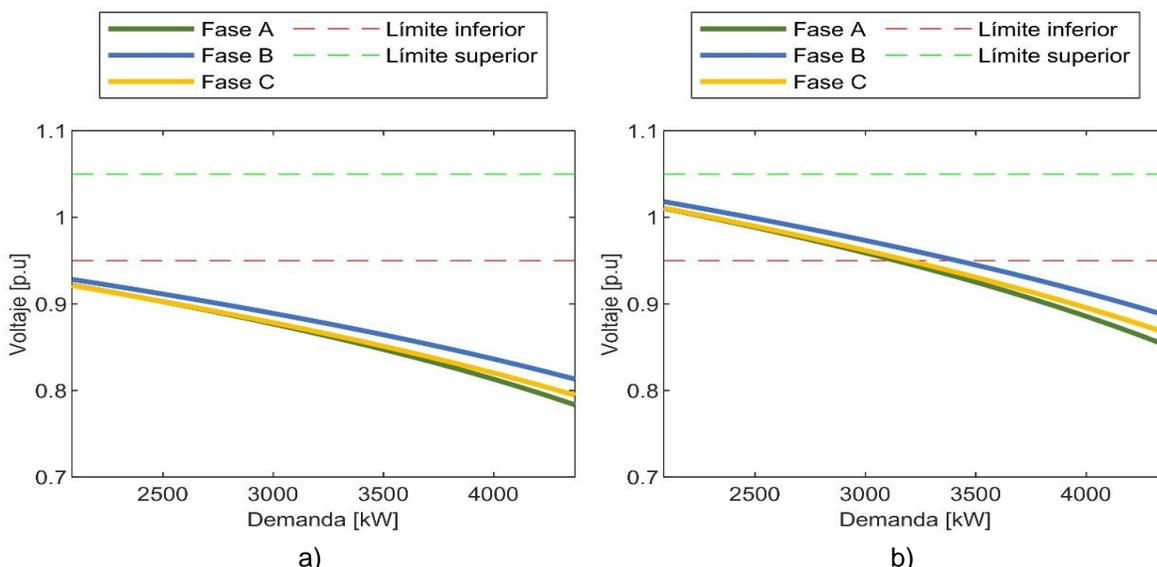
### ***Curvas PV en el Actual Alimentador Vía al Auca***

A continuación, se presenta las curvas PV correspondientes a las condiciones operativas actuales del alimentador vía al Auca en diferentes puntos del alimentador, en las que se observa el comportamiento de voltaje frente al crecimiento total de la carga desde condiciones de demanda mínima hasta condiciones de demanda máxima proyectada, considerando el rango de variación de voltaje establecido por la Regulación ARCERNR 002/20 de  $\pm 6\%$ . Además, se analiza el impacto de la participación de la central Dayuma en el mejoramiento de los perfiles de voltaje.

En la Figura 18, se muestra las curvas PV del nodo donde se encuentran ubicados los reguladores de voltaje, para este caso no se considera la participación de la central Dayuma. Como se puede observar en el lado primario de los reguladores de voltaje (ver Figura 18.a), los perfiles de voltaje de las tres fases están por debajo del límite permitido de 0,94 p.u. desde condiciones de demanda mínima a condiciones de demanda máxima proyectada. Por otra parte, en el lado secundario de los reguladores de voltaje (ver Figura 18.b), se observa que los perfiles de voltaje en condiciones de demanda mínima mejoran en un 10%, sin embargo, a medida que la demanda aumenta a 3250 kW, los perfiles de voltaje en las tres fases decaen por debajo de 0,94 p.u.

**Figura 18**

*Curva PV en la ubicación de los reguladores de voltaje sin la generación de la central Dayuma*



*Nota.* En la figura se muestra los perfiles de voltaje de las fases "A", "B" y "C" del alimentador vía al Auca en el nodo donde se encuentran ubicados los reguladores de voltaje en a) lado primario y b) lado secundario, sin la participación de la central Dayuma

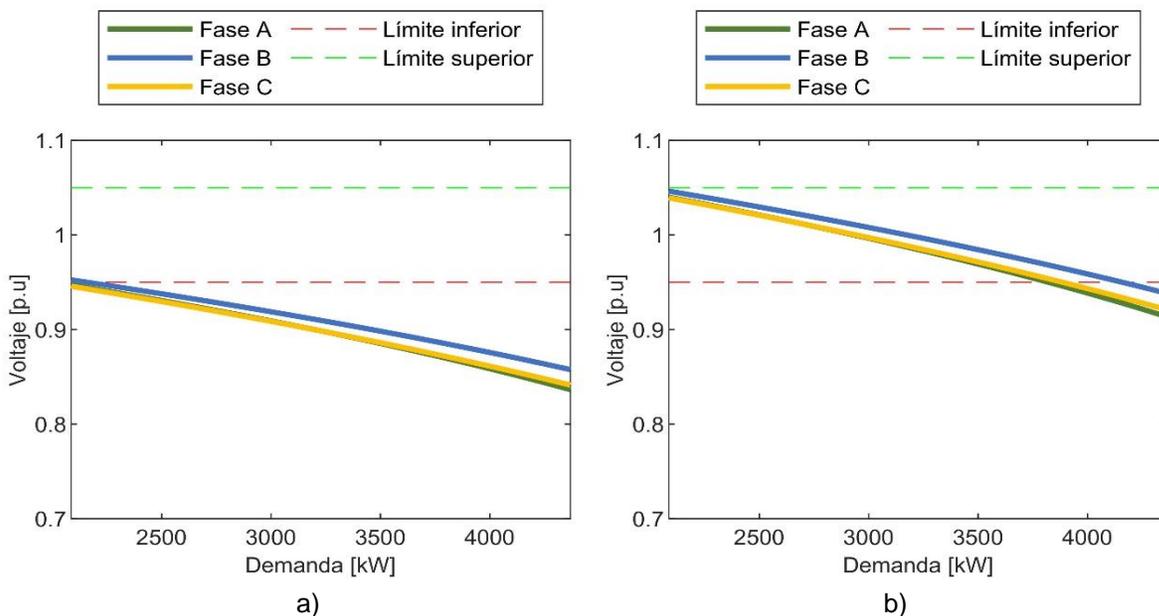
En la Figura 19, se muestra las curvas PV del nodo donde se encuentran ubicados los reguladores de voltaje considerando la generación de la central Dayuma. Como se puede observar en el lado primario de los reguladores de voltaje (ver Figura 19.a), los perfiles de voltaje de las tres fases están por debajo del límite establecido de 0,94 p.u., desde condiciones de demanda mínima a condiciones de demanda máxima proyectada.

Por otra parte, al lado secundario de los reguladores de voltaje (ver Figura 19.b) se observa perfiles de voltaje en condiciones de demanda mínima por encima de 0,94 p.u. dada la regulación de voltaje de un 10% de los reguladores de voltaje, sin embargo, a medida que la demanda aumenta a 4000 kW, los perfiles de voltaje en las tres fases decaen por debajo de 0,94 p.u. Nótese, que la participación de la central Dayuma en la red conduce a obtener perfiles de voltaje superiores al límite de 0,94 p.u. con una mayor demanda en comparación

con los resultados obtenidos del alimentador sin la consideración de la generación de la central Dayuma.

### Figura 19

*Curva PV en los reguladores de voltaje con la generación de la central Dayuma*

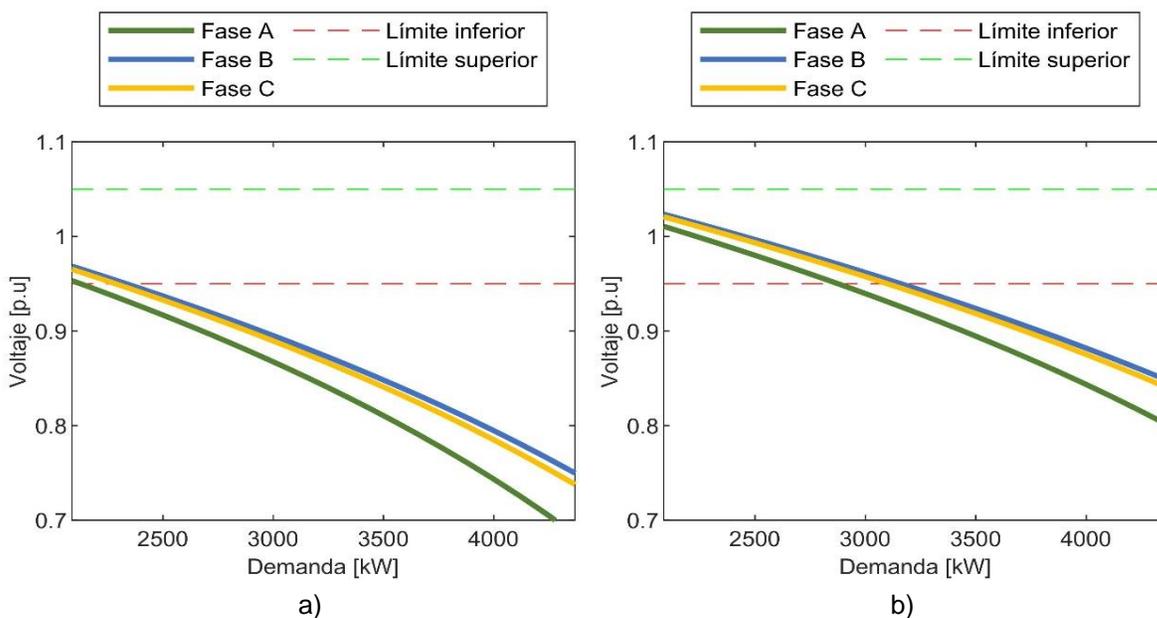


*Nota.* En la figura se muestra los perfiles de voltaje de las fases "A", "B" y "C" del alimentador vía al Auca en el nodo donde se encuentran ubicados los reguladores de voltaje en a) lado primario y b) lado secundario, con la generación de la central Dayuma

En la Figura 20, se muestra las curvas PV en un nodo de la parroquia Dayuma, como se puede observar, al no considerar la generación de la central Dayuma (ver figura 20.a), los perfiles de voltaje de las tres fases están por debajo del límite permitido por la regulación actual de 0,94 p.u. Por otra parte, al considerar la generación de la central Dayuma (ver figura 20.b) se presenta un mejoramiento significativo de los perfiles de voltaje en condiciones de demanda mínima. Sin embargo, a medida que la demanda aumenta a 3000 kW, los perfiles de voltaje en las tres fases decaen por debajo de 0,94 p.u., siendo la fase "A" la que presenta mayor caída de voltaje.

**Figura 20**

*Curva PV en un nodo de la parroquia Dayuma.*

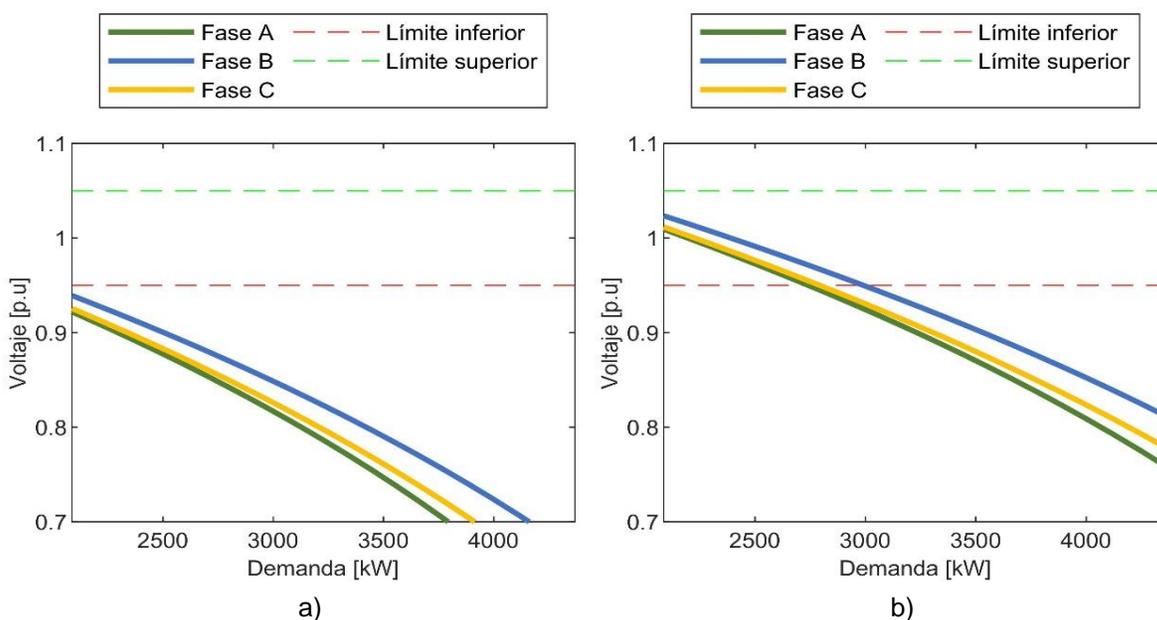


*Nota.* En la figura se muestra los perfiles de voltaje de las fases "A", "B" y "C" del alimentador vía al Auca en un nodo de la parroquia Dayuma (Longitud: -76,88649907; Latitud: 0,647036168): a) sin la generación de la central Dayuma y b) con la generación de la central Dayuma.

En la Figura 21, se muestra las curvas PV en un nodo de la parroquia Inés Arango, como se puede observar, al no considerar la generación de la central Dayuma (ver Figura 21.a), los perfiles de voltaje de las tres fases están por debajo del límite permitido de 0,94 p.u. desde condiciones de demanda mínima a condiciones de demanda máxima proyectada. Por otra parte, al considerar la generación de la central Dayuma (ver Figura 21.b) se presenta un mejoramiento significativo de los perfiles de voltaje en condiciones de demanda mínima. Sin embargo, a medida que la demanda aumenta a 3000 kW, los perfiles de voltaje en las tres fases decaen por debajo de 0,94 p.u., siendo la fase "A" la que presenta mayor caída de voltaje.

### Figura 21

*Curva PV en un nodo de la parroquia Inés Arango.*

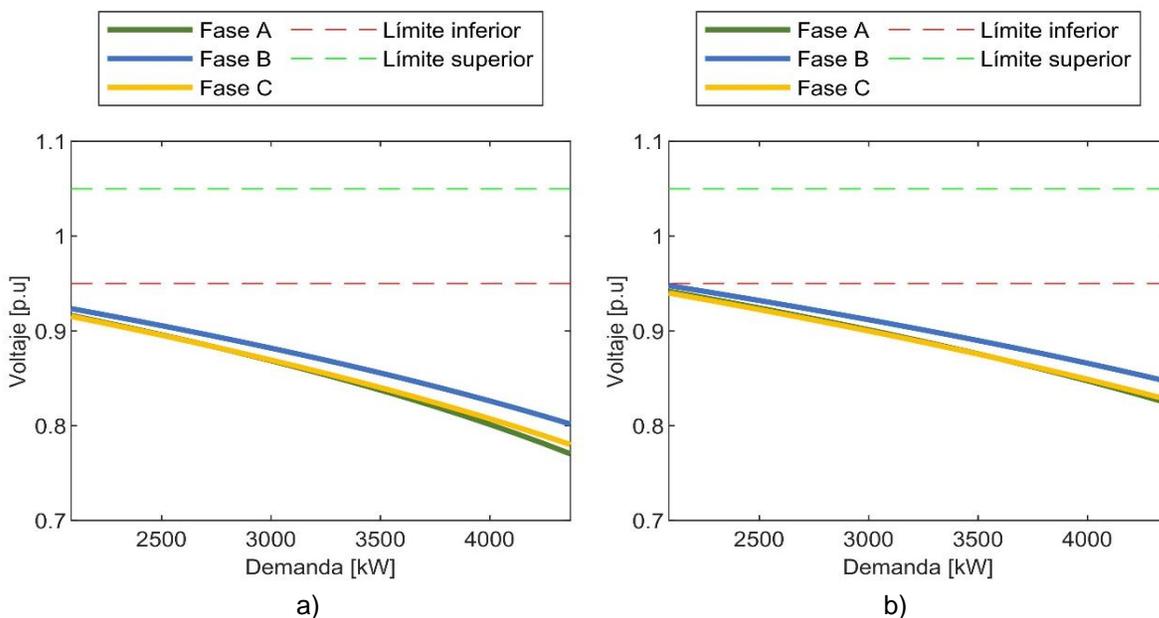


*Nota.* En la figura se muestra los perfiles de voltaje de las fases "A", "B" y "C" del alimentador vía al Auca en un nodo de la parroquia Inés Arango (Longitud: -76,9347159; Latitud: -1,169377976): a) sin la generación de la central Dayuma y b) con la generación de la central Dayuma.

En la Figura 22 se muestra las curvas PV en un nodo de la parroquia Taracoa. Al no considerar la generación de la central Dayuma (ver Figura 22.a), los perfiles de voltaje de las tres fases están por debajo del límite permitido de 0,94 p.u. desde condiciones de demanda mínima a condiciones de demanda máxima proyectada. De igual manera, se puede evidenciar que al considerar la generación de la central Dayuma (ver Figura 22.b) los perfiles de voltaje se mantienen por debajo de 0,94 p.u. Por lo que es evidente, que el suministro de potencia desde la central Dayuma no mejora significativamente los perfiles de voltaje de la parroquia Taracoa.

### Figura 22

*Curva PV en un nodo de la parroquia Taracoa.*



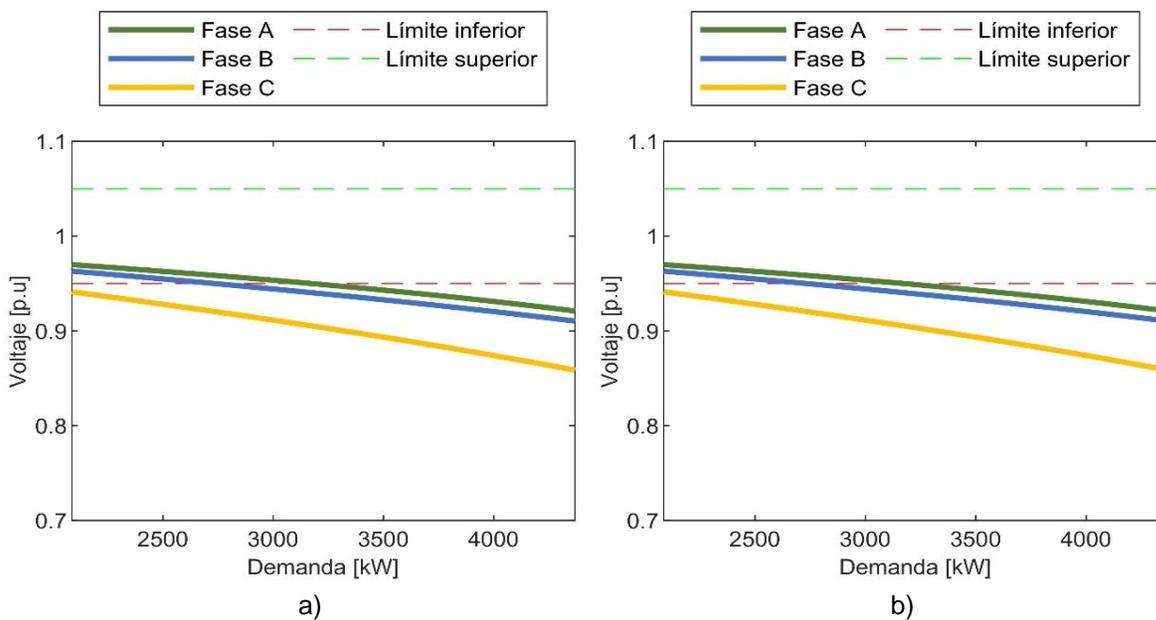
*Nota.* En la figura se muestra los perfiles de voltaje de las fases "A", "B" y "C" del alimentador vía al Auca en un nodo de la parroquia Taracoa (Longitud: -76,82985186; Latitud: -0,494905203): a) sin la generación de la central Dayuma y b) con la generación de la central Dayuma.

En la Figura 23 se muestra las curvas PV en un nodo de la parroquia La Belleza. Al no considerar la generación de la central Dayuma (ver Figura 23.a), los perfiles de voltaje de la

fase "C" están por debajo del límite permitido de 0,94 p.u. desde condiciones de demanda mínima a condiciones de demanda máxima proyectada, por otra parte, para las fases "A" y "B" se obtienen valores de voltaje por debajo de 0,94 p.u. a partir de una mayor demanda. De igual manera, se puede evidenciar que al considerar la generación de la central Dayuma (ver Figura 23.b) el comportamiento de los perfiles de voltaje se mantiene iguales, por lo que es evidente que la participación de la central Dayuma en el suministro de demanda en la red no tiene influencia en los perfiles de voltaje de la parroquia La Belleza.

**Figura 23**

*Curva PV en un nodo de la parroquia La Belleza.*



*Nota.* En la figura se muestra los perfiles de voltaje de las fases "A", "B" y "C" del alimentador vía al Auca en un nodo de la parroquia La Belleza (Longitud: -77,05516837; Latitud: -0.661707722): a) sin la generación de la central Dayuma y b) con la generación de la central Dayuma.

Como se puede evidenciar en las curvas PV los reguladores de voltaje y la central Dayuma mejoran los perfiles de voltaje en las parroquias Dayuma e Inés Arango, sin embargo,

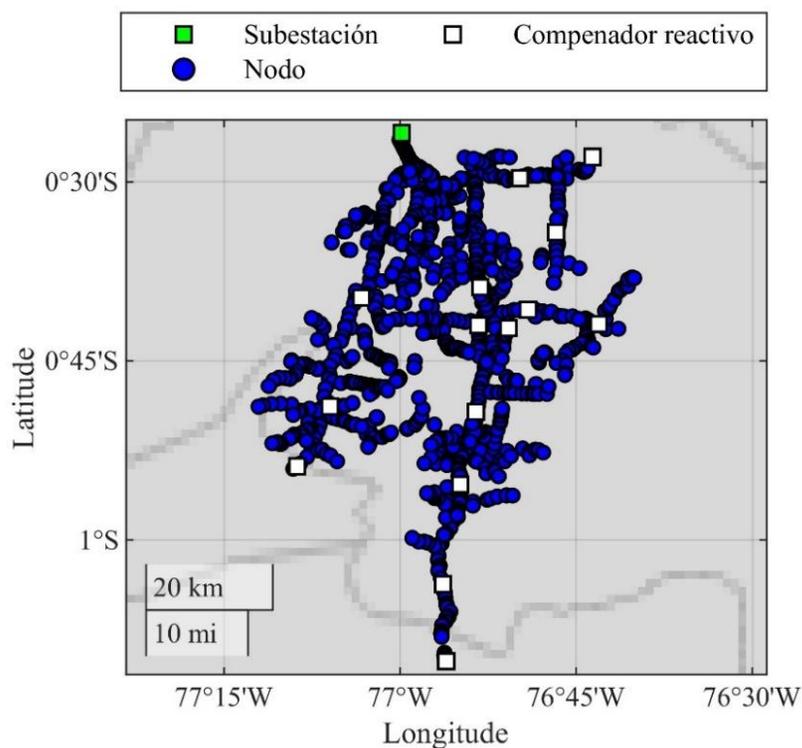
estos no tienen incidencia en los perfiles de voltaje en las parroquias Taracoa y La Belleza. Además, se puede observar que a medida que crece la demanda, los perfiles de voltaje en la mayoría de los nodos del alimentador decaen por debajo del límite de 0,94 p.u. establecido por la Regulación ARCERNR 002/20.

### **Nodos Candidatos para la Localización de Compensadores Reactivos**

A continuación, se muestran los nodos candidatos introducidos en el algoritmo de optimización como dato de entrada para la localización y dimensionamiento de compensadores reactivos. Los nodos candidatos se muestran en la Figura 24, estos nodos fueron seleccionados partiendo del análisis de estabilidad de voltaje a través de curvas PV, tomando en cuenta los nodos finales e intermedios del alimentador trifásico y de los ramales monofásicos con mayores caídas de voltaje. En la Tabla 5 se muestran las coordenadas (Longitud y Latitud) de los nodos candidatos. Vale la pena mencionar que el rango de potencia de los compensadores reactivos a instalar en cada uno de los nodos candidatos puede ser de 50, 100 y 150 kVAr, con un costo inversión de 15,54 kVAr/USD (Mullo Tarco y Herrera Moreno, 2018). Adicionalmente, se considera la restricción de la potencia máxima a instalar en compensación reactiva para cada una de las fases, la cual no debe ser mayor a la demanda mínima en potencia reactiva de 306, 256 y 420 kVAr correspondientes a la fase "A", "B" y "C", respectivamente. Esto con el fin de evitar que la solución encontrada por el optimizador aumente las pérdidas en el sistema.

**Figura 24**

*Nodos candidatos del alimentador vía al Auca para la localización de compensadores reactivos.*

**Tabla 5**

*Longitud y Latitud de los nodos candidatos del alimentador vía al Auca para la localización de compensadores reactivos*

Nodo	Longitud	Latitud	Nodo	Longitud	Latitud
156	-76,8864991	-0,64703617	523	-76,8462251	-0,7042273
197	-76,8890256	-0,7002133	631	-76,8298519	-0,4949052
206	-76,8184585	-0,67855692	675	-76,7270547	-0,46531394
252	-76,717972	-0,6984347	700	-76,7785201	-0,57065372
304	-76,8926713	-0,82097208	846	-77,0551684	-0,66170772
388	-76,9148289	-0,92247834	909	-77,0998054	-0,81378875
437	-76,939095	-1,06186542	929	-77,1461788	-0,89713006
460	-76,9347159	-1,16937798			

## Análisis de Resultados

### **Resultados de la Localización y Dimensionamiento Óptimo de Compensadores**

#### **Reactivos en el Alimentador Vía el Auca**

Los resultados de la localización y dimensionamiento de compensadores reactivos en el alimentador vía al Auca para mejorar los perfiles de voltaje se muestran en la Tabla 6, con un costo de inversión de \$14478 y una potencia instalada total en la fase "A" de 300 kVAr, en la fase "B" de 250 kVAr y en la fase "C" de 400 kVAr.

**Tabla 6**

*Resultados de la localización y dimensionamiento óptimo de compensadores reactivos en el alimentador vía el Auca*

Fase "A"		Fase "B"		Fase "C"	
Nodo	Potencia [kVAr]	Nodo	Potencia [kVAr]	Nodo	Potencia [kVAr]
156	100	156	50	156	100
304	100	252	50	197	150
631	100	388	50	846	150
		700	100		
<b>Total</b>	300		250		400

#### **Curvas PV en el Alimentador Vía al Auca sin la Generación de la Central Dayuma**

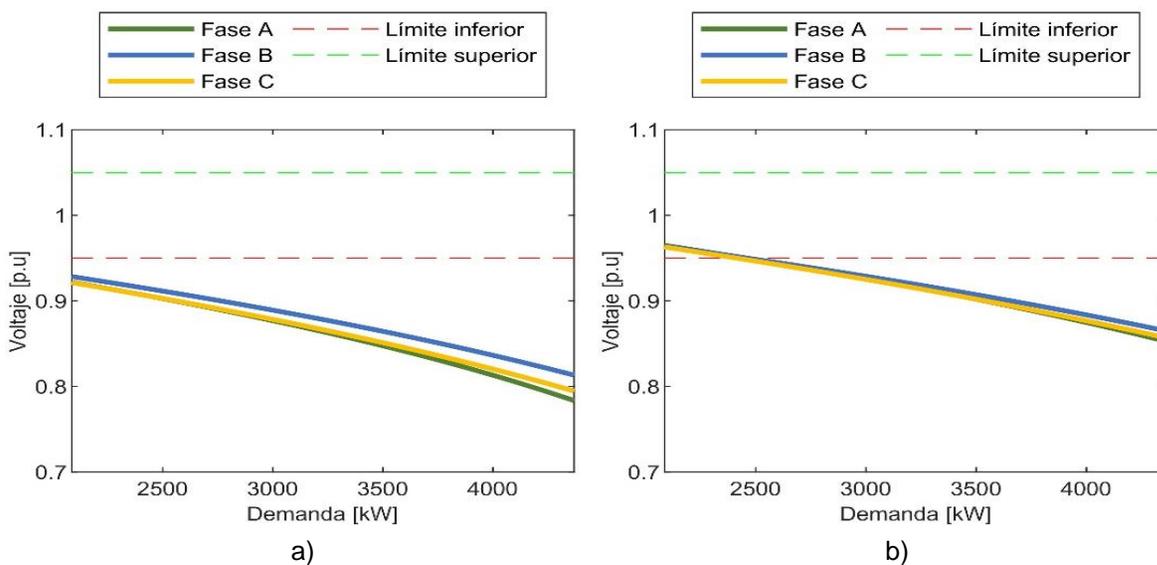
##### **Considerando la Instalación de Compensadores Reactivos.**

A continuación, se muestran curvas PV en distintos puntos del alimentador con el objetivo de visualizar el mejoramiento de los perfiles de voltaje debido a la instalación de compensadores reactivos en el alimentador vía el Auca sin considerar la generación de la central Dayuma.

En la Figura 25, se muestran las curvas PV obtenidas en el nodo de la ubicación de los reguladores de voltaje en el lado primario. Como se puede observar la instalación de compensadores reactivos en el alimentador (ver Figura 25.b), mejoran los perfiles de voltaje en aproximadamente un 5% comparado con los resultados obtenidos en el alimentador sin compensadores reactivos (ver Figura 25.a), logrando de esta manera obtener perfiles de voltaje en condiciones de demanda mínima por encima del límite permitido de 0,94 p.u., Sin embargo, a medida que la demanda aumenta a 2500 kW los perfiles decaen por debajo de 0,94 p.u., alcanzando perfiles de voltaje de 0,87 p.u. en demanda máxima proyectada, los cuales son mejores niveles de voltaje en comparación a los obtenidos con el alimentador sin compensadores reactivos que son de aproximadamente de 0,80 p.u.

### Figura 25

*Curva PV en el nodo de la ubicación de los reguladores de voltaje en el lado primario, considerando la instalación de compensadores y sin la generación de la central Dayuma*



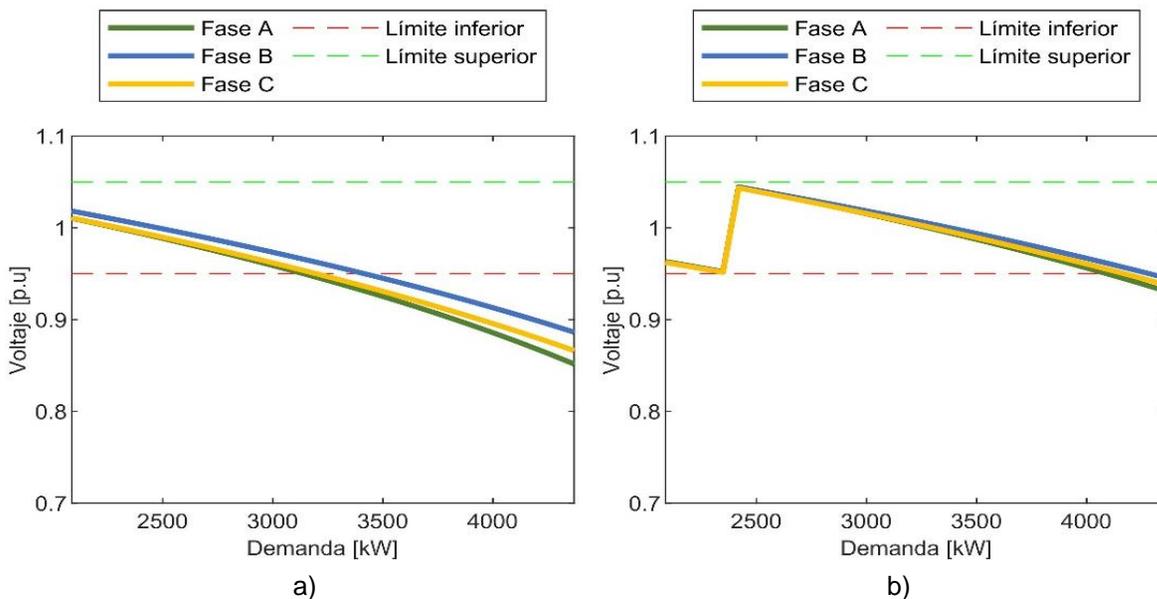
*Nota.* En la figura se muestra los perfiles de voltaje de las fases "A", "B" y "C" del alimentador vía al Auca sin la generación de la central Dayuma, en el nodo de la ubicación de los

reguladores de voltaje en el lado primario: a) sin compensadores reactivos b) con compensadores reactivos.

En la Figura 26, se muestran las curvas PV obtenidas en el lado secundario de los reguladores de voltaje, como se puede observar la instalación de compensadores reactivos en el alimentador (ver Figura 26.b), permiten obtener perfiles de voltaje por encima de 0,94 p.u. en demanda mínima, por lo que los reguladores de voltaje se mantienen en el TAP central ( $\Delta V=0\%$ ) a diferencia del alimentador sin compensadores reactivos en donde en las mismas condiciones de operación los reguladores de voltaje realizan un incremento de voltaje del 10% como se puede observar en la Figura 26.a. Cuando se consideran la instalación de compensadores reactivos en el alimentador, a medida que la demanda aumenta a 2500 kW los perfiles llegan al límite establecido de 0,94 p.u, punto en el cual los reguladores de voltaje realizan un incremento de los niveles de voltaje en un 10%, alcanzando de esta manera perfiles de voltaje de 0,94 p.u. en demanda máxima proyectada, los cuales son mejores niveles de voltaje en comparación a los obtenidos en el alimentador sin compensadores reactivos que son de aproximadamente de 0,87 p.u.

**Figura 26**

*Curva PV con la instalación de compensadores reactivos en la ubicación reguladores de voltaje (Lado secundario), sin la generación de la central Dayuma.*



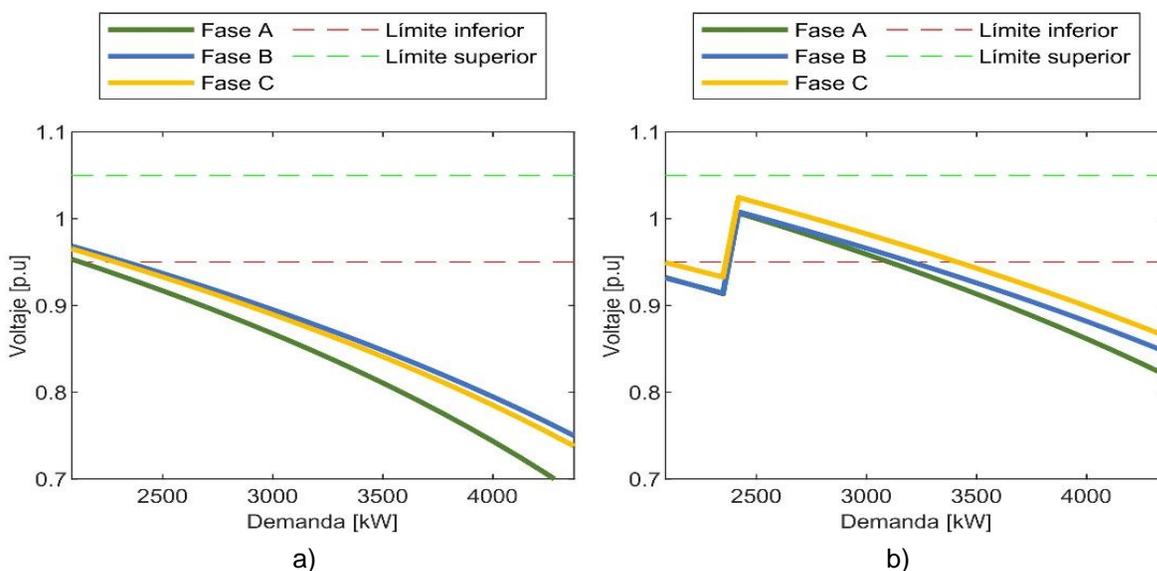
*Nota.* En la figura se muestra los perfiles de voltaje de las fases "A", "B" y "C" del alimentador vía al Auca sin la generación de la central Dayuma, en el lado secundario de los reguladores de voltaje: a) sin compensadores reactivos b) con compensadores reactivos.

En la Figura 27 se muestran las curvas PV obtenidas en un nodo de la parroquia Dayuma, como se puede observar en la Figura 27.b la instalación de compensadores reactivos conduce a obtener valores de voltaje en las tres fases por debajo de 0,94 p.u., esto es debido a que los reguladores de voltaje aguas arriba se mantienen en el TAP central, por otro lado, al no considerar compensadores reactivos en el sistema se obtienen perfiles de voltaje por encima del límite de 0,94 p.u. dado que los reguladores de voltaje en este punto de operación, realizan un incremento de los niveles de voltaje en un 10% como se muestra en la Figura 27.a. Sin embargo, las ventajas de la instalación de los compensadores reactivos en el alimentador vía al Auca se pueden visualizar a una mayor demanda debido a que los regulados de voltaje

realizan un incremento de los niveles de voltaje a partir de una demanda de 2500 kW, lo que permite obtener mejores perfiles de voltaje en niveles de demanda más elevados en comparación con el alimentador sin compensadores reactivos.

### Figura 27

*Curva PV en un nodo de la parroquia Dayuma considerando la instalación de compensadores reactivos, sin la generación de la central Dayuma.*



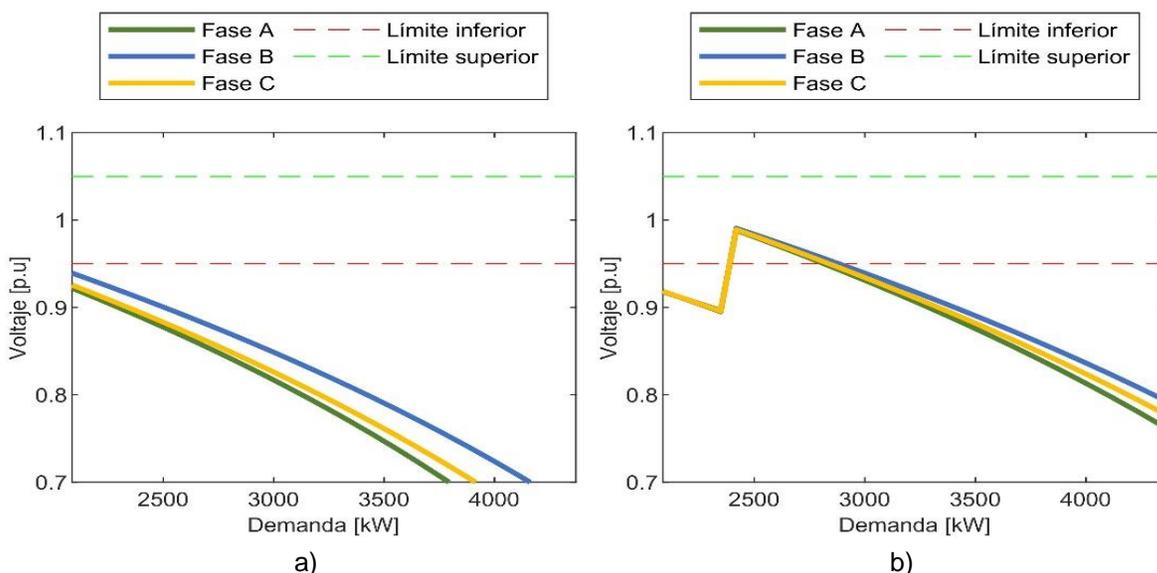
*Nota.* En la figura se muestra los perfiles de voltaje de las fases "A", "B" y "C" del alimentador vía al Auca sin la generación de la central Dayuma en un nodo de la parroquia Dayuma (Longitud: -76,88649907; Latitud: 0,647036168): a) compensadores reactivos y b) con compensadores reactivos.

En la Figura 28, se muestran las curvas PV obtenidas en un nodo de la parroquia Inés Arango. Como se puede observar en la Figura 28.b, con la instalación de compensadores reactivos en el sistema no se logra obtener valores de voltaje en las tres fases por encima de 0,94 p.u. Sin embargo, las ventajas de la instalación de los compensadores reactivos en el alimentador vía al Auca se pueden visualizar a una mayor demanda debido a que los regulados

de voltaje realizan un incremento de los niveles de voltaje a partir de una demanda de 2500 kW, lo que permite obtener mejores perfiles de voltaje en niveles de demanda más elevados en comparación con el alimentador sin compensadores reactivos como se puede ver en la Figura 28.a.

### Figura 28

*Curva PV en un nodo de la parroquia Inés Arango considerando la instalación de compensadores reactivos, sin la generación de la central Dayuma.*



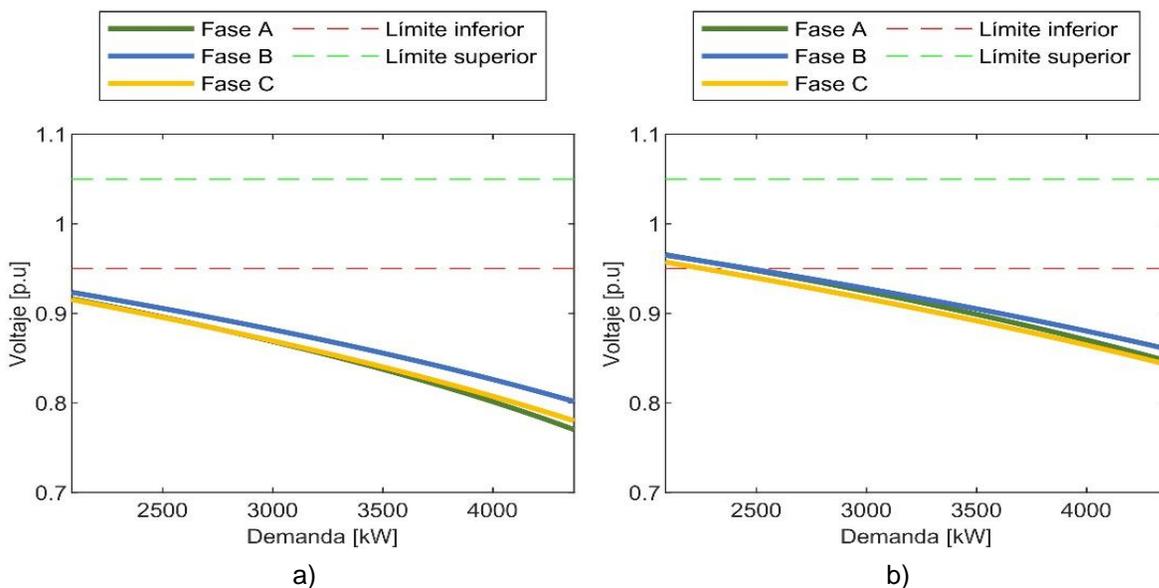
*Nota.* En la figura se muestra los perfiles de voltaje de las fases "A", "B" y "C" del alimentador vía al Auca sin la generación de la central Dayuma en un nodo de la parroquia Inés Arango (Longitud: -76,9347159; Latitud: -1,169377976): a) sin compensadores reactivos y b) con compensadores reactivos.

En la Figura 29, se muestran las curvas PV obtenidas en un nodo de la parroquia Taracoa. Como se observa en la Figura 29.b la instalación de compensadores reactivos en el alimentador vía al Auca permite mejorar los perfiles de voltaje en un 5% en comparación con el

alimentador sin compensadores reactivos (ver Figura 29.a). Sin embargo, en ambos casos los niveles de voltajes están por debajo del límite de 0,94 p.u.

### Figura 29

*Curva PV en un nodo de la parroquia Taracoa considerando la instalación de compensadores reactivos, sin la generación de la central Dayuma.*

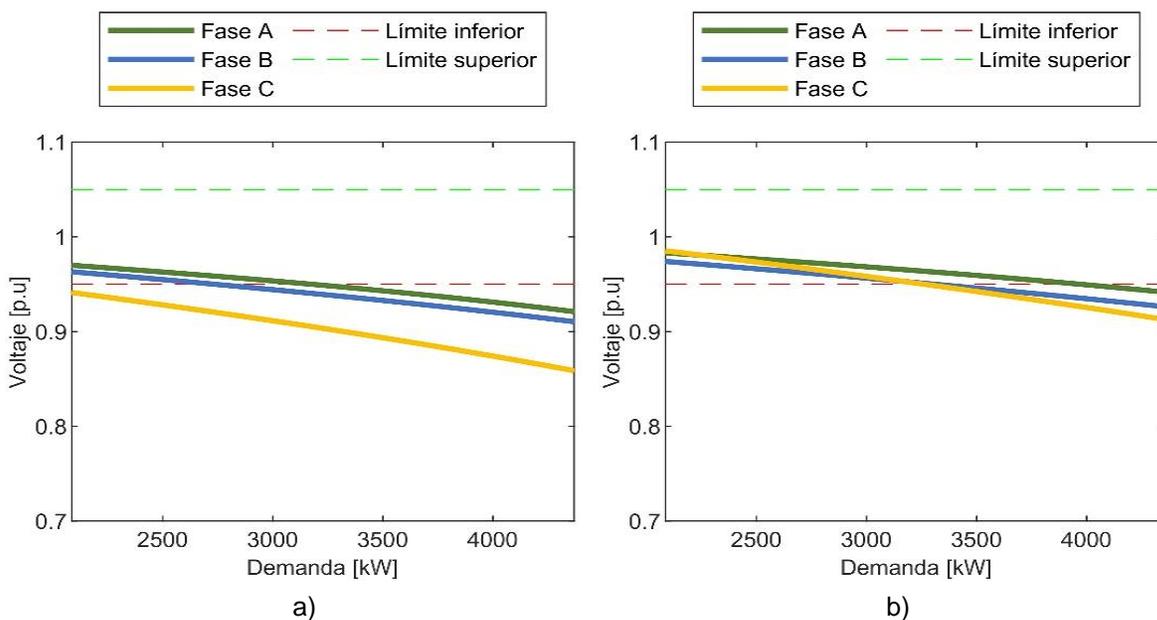


*Nota.* En la figura se muestra los perfiles de voltaje de las fases "A", "B" y "C" del alimentador vía al Auca sin la generación de la central Dayuma en un nodo de la parroquia Taracoa (Longitud: -76,82985186; Latitud: -0,494905203): a) compensadores reactivos y b) con compensadores reactivos.

En la Figura 30, se muestran las curvas PV obtenidas en un nodo de la parroquia La Belleza, como se puede observar al considerar compensadores reactivos en el alimentador vía al Auca (ver Figura 30.b), los perfiles de voltaje mejoran en comparación con el alimentador sin compensadores reactivos (ver Figura 30.a), principalmente en la fase "C", siendo esta una de las fases con mayores problemas de voltajes.

**Figura 30**

*Curva PV en un nodo de la parroquia La Belleza considerando la instalación de compensadores reactivos, sin la generación de la central Dayuma.*



*Nota.* En la figura se muestra los perfiles de voltaje de las fases "A", "B" y "C" del alimentador vía al Auca en un nodo de la parroquia La Belleza (Longitud: -77,05516837; Latitud: -0.661707722): a) sin la generación de la central Dayuma y b) con la generación de la central Dayuma.

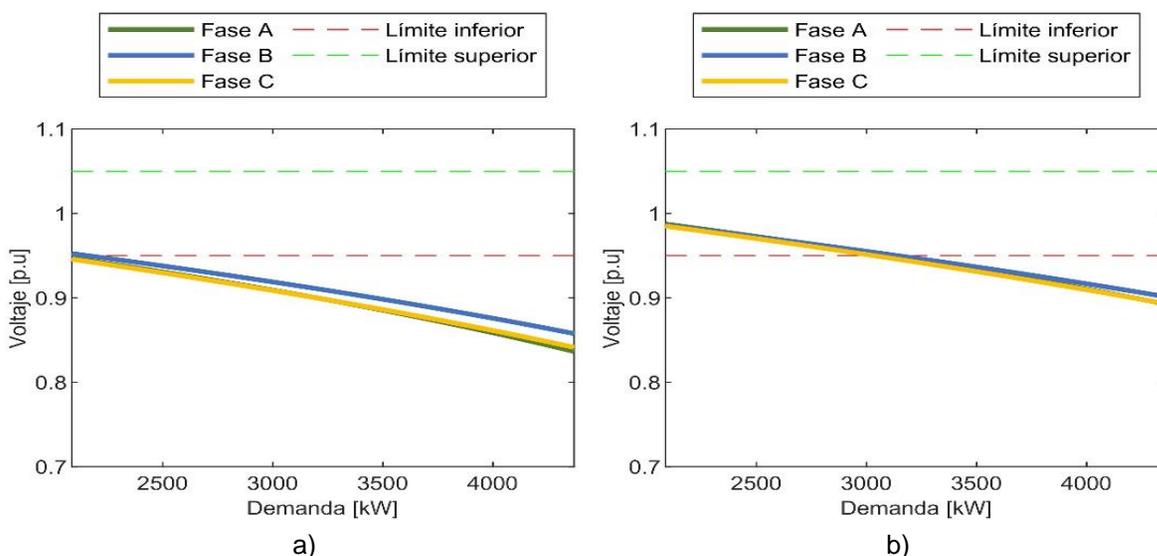
***Curvas PV en el Alimentador Vía al Auca con la Generación de la Central Dayuma Considerando la Instalación de Compensadores Reactivos.***

A continuación, se muestran curvas PV en distintos puntos del alimentador con el objetivo de visualizar el mejoramiento de los perfiles de voltaje debido a la instalación de compensadores reactivos en el alimentador vía el auca con la generación de la central Dayuma.

En la Figura 31, se muestran las curvas PV obtenidas en el lado primario de los reguladores de voltaje. Como se puede observar la instalación de compensadores reactivos en el alimentador (ver Figura 31.b), mejoran los perfiles de voltaje en aproximadamente un 5% comparado con los resultados obtenidos sin compensadores reactivos (ver figura 25.a), logrando de esta manera obtener perfiles de voltaje en condiciones de demanda mínima por encima del límite permitido de 0,94 p.u., Sin embargo, a medida que la demanda aumenta a 3250 kW los perfiles de voltaje decaen por debajo de 0,94 p.u. Alcanzando perfiles de voltaje de 0,9 p.u. en demanda máxima proyectada, los cuales son mejores niveles de voltaje en comparación a los obtenidos con el alimentador sin compensadores reactivos que son aproximadamente de 0,85 p.u.

### Figura 31

*Curva PV con la instalación de compensadores reactivos en la ubicación reguladores de voltaje (Lado primario) con la generación de la central Dayuma*

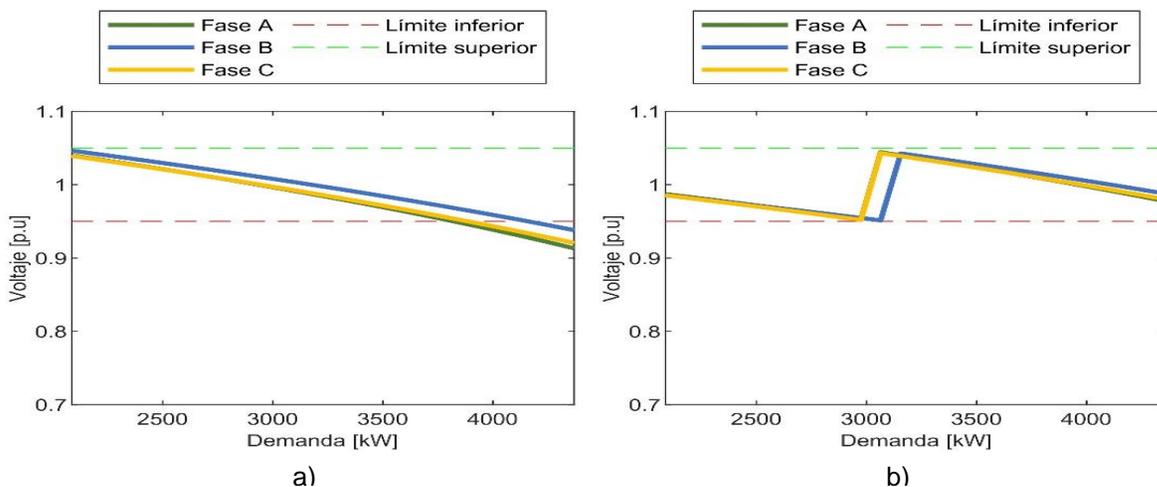


*Nota.* En la figura se muestra los perfiles de voltaje de las fases "A", "B" y "C" del alimentador vía al Auca con la generación de la central Dayuma, en el lado primario de los reguladores de voltaje: a) sin compensadores reactivos b) con compensadores reactivos.

En la Figura 32, se muestran las curvas PV obtenidas en el lado secundario de los reguladores de voltaje. Como se puede observar la instalación de compensadores reactivos en el alimentador (ver Figura 32.b), permiten obtener perfiles de voltaje por encima de 0,94 p.u. en demanda mínima, por lo que los reguladores de voltaje se mantienen en el TAP central ( $\Delta V=0\%$ ) a diferencia del alimentador sin compensadores reactivos en donde en las mismas condiciones de operación los reguladores de voltaje realizan un incremento de voltaje del 10% (ver Figura 32.a). Cuando se consideran la instalación de compensadores reactivos en el alimentador, a medida que la demanda aumenta a 3250 kW los perfiles de voltaje llegan al límite establecido de 0,94 p.u, punto en el cual los reguladores de voltaje realizan un incremento de los niveles de voltaje en un 10%, alcanzando de esta manera perfiles de voltaje por encima del límite de 0.94 p.u. en demanda máxima proyectada.

### Figura 32

*Curva PV con la instalación de compensadores reactivos en la ubicación reguladores de voltaje (Lado secundario), con la generación de la central Dayuma.*

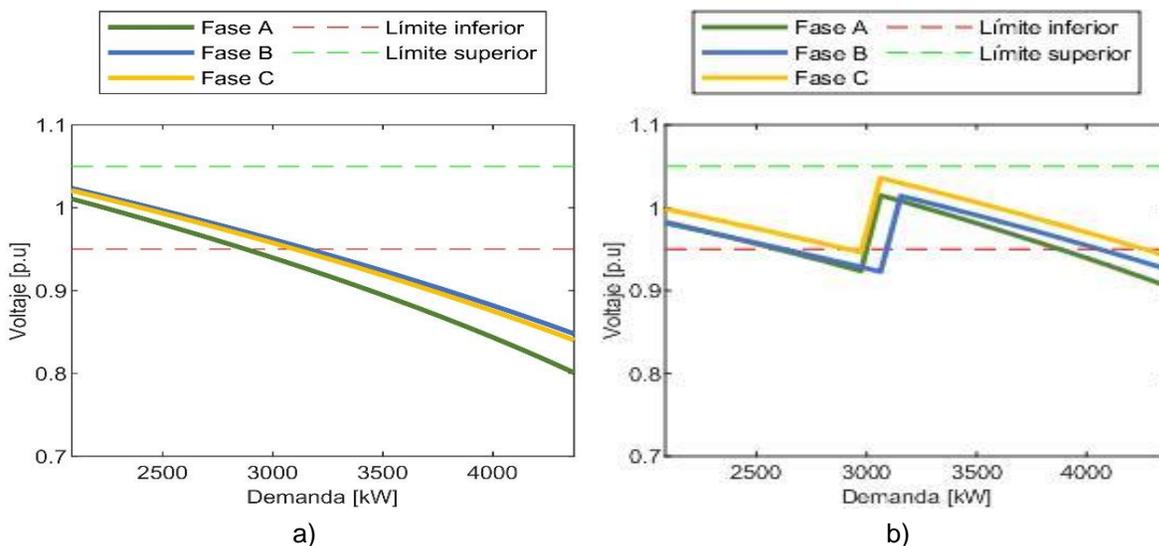


*Nota.* En la figura se muestra los perfiles de voltaje de las fases "A", "B" y "C" del alimentador vía al Auca con la generación de la central Dayuma, en el lado secundario de los reguladores de voltaje: a) sin compensadores reactivos b) con compensadores reactivos.

En la Figura 33, se muestran las curvas PV obtenidas en un nodo de la parroquia Dayuma. Como se puede observar en la Figura 33.b la instalación de compensadores reactivos conduce a obtener valores de voltaje en las tres fases por encima de 0,94 p.u. sin la necesidad de que los reguladores de voltaje realicen un incremento de voltaje, a diferencia del alimentador sin condensadores reactivos donde los reguladores de voltaje permiten obtener valores por encima del límite de 0,94 p.u. incrementando los niveles de voltaje en un 10% como se muestra en la Figura 33.a. Las ventajas de la instalación de los compensadores reactivos en el alimentador vía al Auca se pueden visualizar a una mayor demanda, debido a que los regulados de voltaje realizan un incremento de los niveles de voltaje a partir de una demanda de 3250 kW, lo que permite obtener mejores perfiles de voltaje en niveles de demanda más elevados en comparación con el alimentador sin compensadores reactivos.

### Figura 33

*Curva PV en un nodo de la parroquia Dayuma considerando la instalación de compensadores reactivos, con la generación de la central Dayuma.*



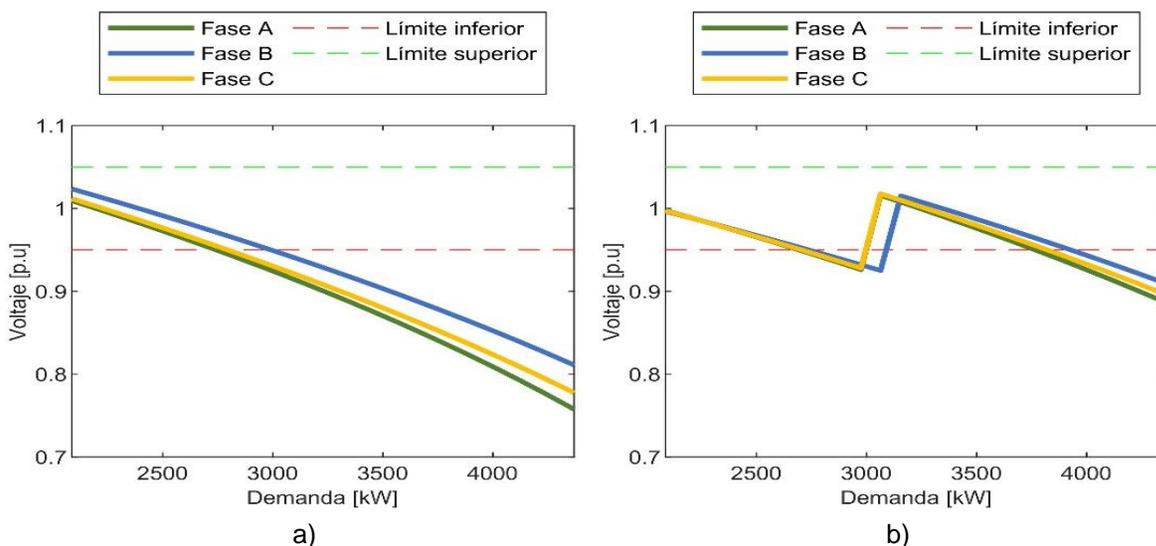
*Nota.* En la figura se muestra los perfiles de voltaje de las fases "A", "B" y "C" del alimentador vía al Auca con la generación de la central Dayuma en un nodo de la parroquia Dayuma

(Longitud: -76,88649907; Latitud: 0,647036168): a) compensadores reactivos y b) con compensadores reactivos.

En la Figura 34 se muestran las curvas PV obtenidas en un nodo de la parroquia Inés Arango. Como se puede observar en la Figura 34.b la instalación de compensadores reactivos en el alimentador conduce a obtener valores de voltaje en las tres fases por encima de 0,94 p.u. sin la necesidad de que los reguladores de voltaje realicen un incremento de voltaje, a diferencia del alimentador sin condensadores reactivos donde los reguladores de voltaje permiten obtener valores por encima del límite de 0,94 p.u. dado un incremento de los niveles de voltaje en un 10% como se muestra en la Figura 34.a. Las ventajas de la instalación de los compensadores reactivos en el alimentador vía al Auca se pueden visualizar a una mayor demanda, debido a que los regulados de voltaje realizan un incremento de los niveles de voltaje a partir de una demanda de 3250 kW, lo que permite obtener mejores perfiles de voltaje en niveles de demanda más elevados en comparación con el alimentador sin compensadores reactivos.

**Figura 34**

Curva PV en un nodo de la parroquia Inés Arango considerando la instalación de compensadores reactivos, con la generación de la central Dayuma.

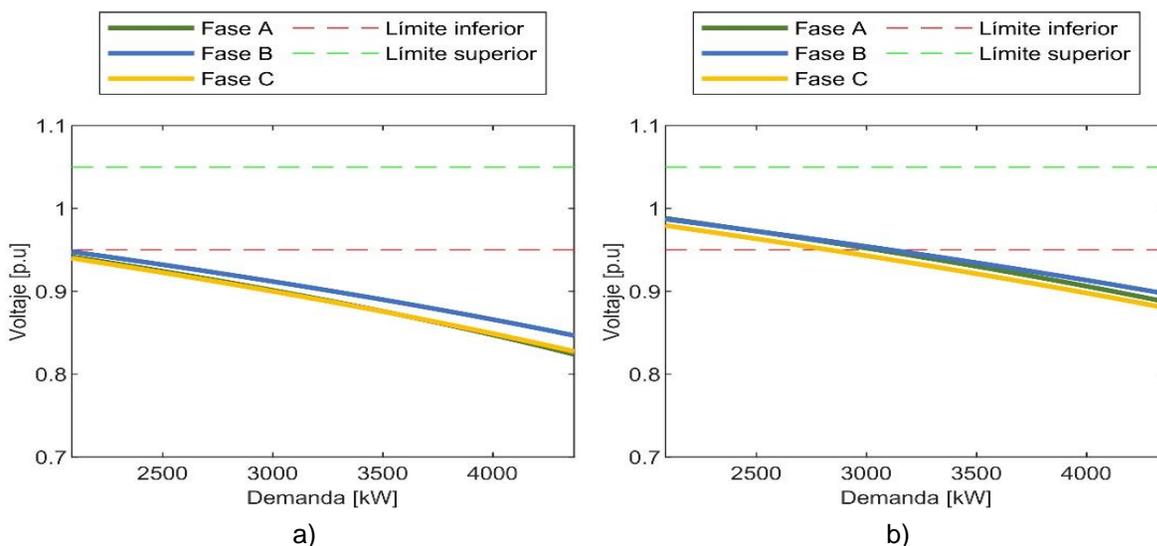


*Nota.* En la figura se muestra los perfiles de voltaje de las fases "A", "B" y "C" del alimentador vía al Auca con la generación de la central Dayuma en un nodo de la parroquia Inés Arango (Longitud: -76,9347159; Latitud: -1,169377976): a) sin compensadores reactivos y b) con compensadores reactivos.

En la Figura 35, se muestran las curvas PV obtenidas en un nodo de la parroquia Taracoa. Como se puede observar en la Figura 35.b la instalación de compensadores reactivos en el alimentador vía al Auca permiten mejorar los perfiles de voltaje en un 5% en comparación con el alimentador sin compensadores reactivos (ver Figura 35.a).

**Figura 35**

Curva PV en un nodo de la parroquia Taracoa considerando la instalación de compensadores reactivos, con la generación de la central Dayuma.

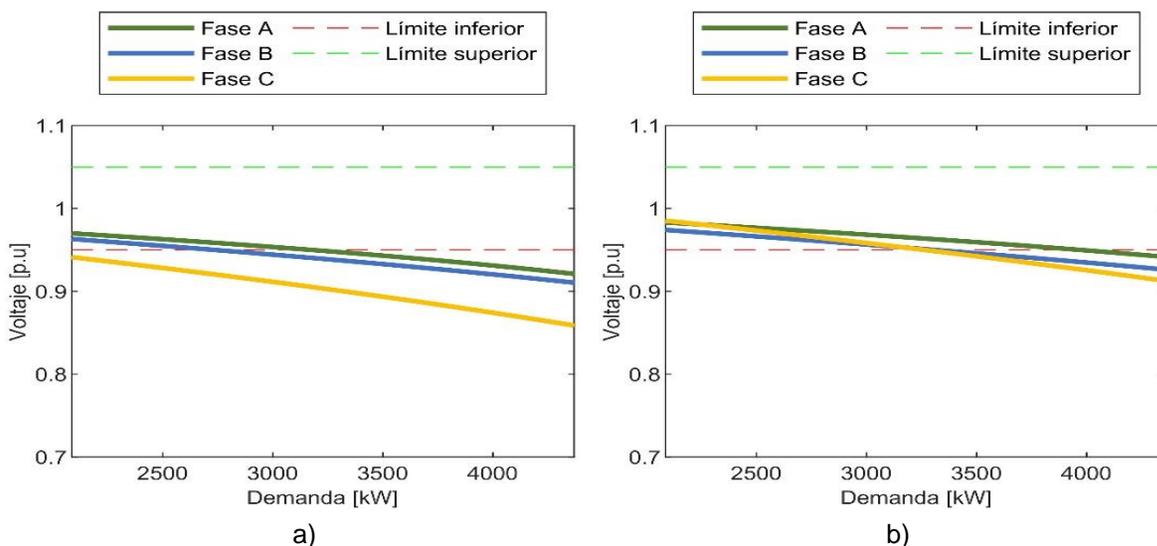


*Nota.* En la figura se muestra los perfiles de voltaje de las fases "A", "B" y "C" del alimentador vía al Auca con la generación de la central Dayuma en un nodo de la parroquia Taracoa (Longitud: -76,82985186; Latitud: -0,494905203): a) compensadores reactivos y b) con compensadores reactivos.

En la Figura 36, se muestran las curvas PV obtenidas en un nodo de la parroquia La Belleza. Como se puede observar al considerar compensadores reactivos en el alimentador vía al auca (ver Figura 36.b), los perfiles de voltaje mejoran en comparación con el alimentador sin compensadores reactivos (ver Figura 36.a), principalmente en la fase "C", siendo esta una de las fases con mayores problemas de voltajes.

**Figura 36**

Curva PV en un nodo de la parroquia La Belleza considerando la instalación de compensadores reactivos, con la generación de la central Dayuma.



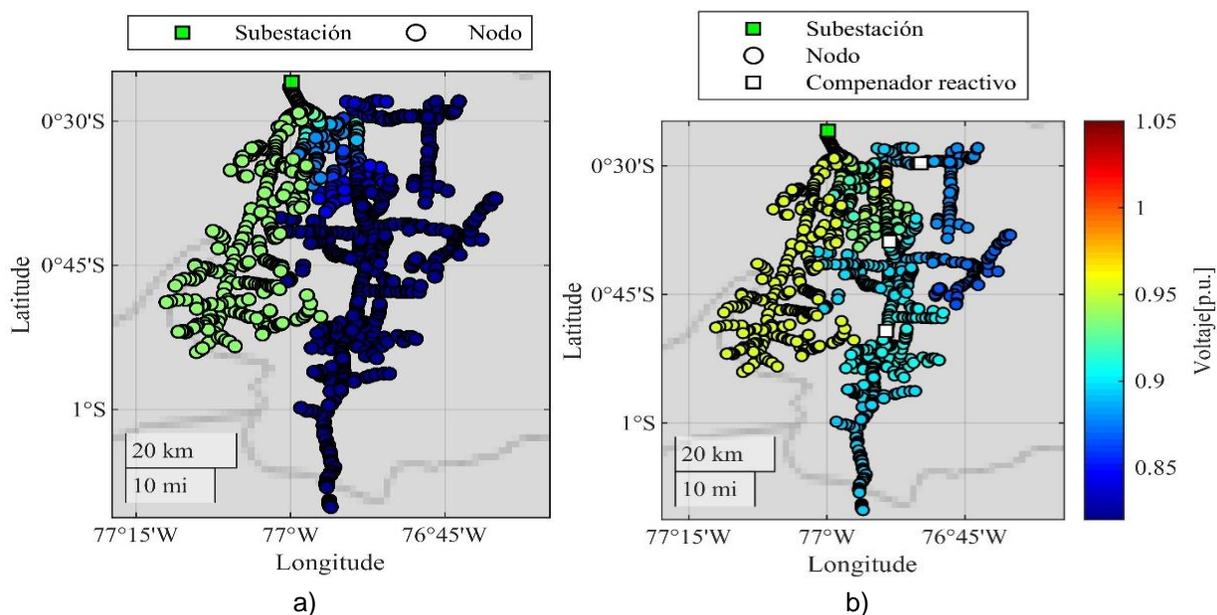
*Nota.* En la figura se muestra los perfiles de voltaje de las fases "A", "B" y "C" del alimentador vía al Auca con la generación de la central Dayuma en un nodo de la parroquia La Belleza (Longitud: -77,05516837; Latitud: -0.661707722): a) sin la generación de la central Dayuma y b) con la generación de la central Dayuma.

### **Perfiles de voltaje del alimentador vía al Auca con la instalación de compensadores reactivos.**

En la Figura 37, se puede observar los perfiles de voltaje en condiciones de demanda máxima proyectada para la fase "A". Como se puede observar, en la Figura 37.a en el sistema actual se tienen perfiles de voltaje de hasta 0,8 p.u. Estos valores incrementan hasta valores de un 10% debido a la instalación de compensadores reactivos como se puede observar en la Figura 37.b.

**Figura 37**

Perfiles de voltaje en el alimentador vía al Auca de la fase "A".

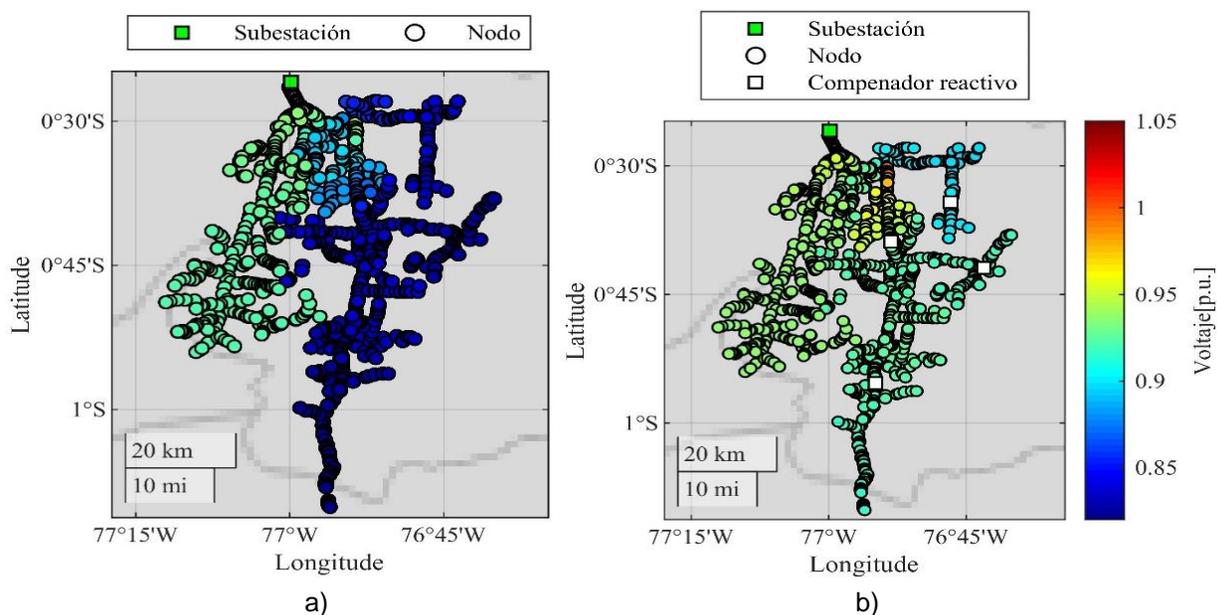


*Nota.* En la figura se muestra los perfiles de voltaje de las fases "A" del alimentador vía al Auca en a) Sin compensadores reactivos y b) Con compensadores reactivos.

En la Figura 38, se puede observar los perfiles de voltaje en condiciones de demanda máxima proyectada para la fase "B". Como se puede observar, en la Figura 38.a en el sistema actual se tienen perfiles de voltaje de hasta 0,8 p.u. Estos valores incrementan hasta valores de un 10% debido a la instalación de compensadores reactivos como se puede observar en la Figura 38.b.

**Figura 38**

*Perfiles de voltaje en el alimentador vía al Auca de la fase "B".*

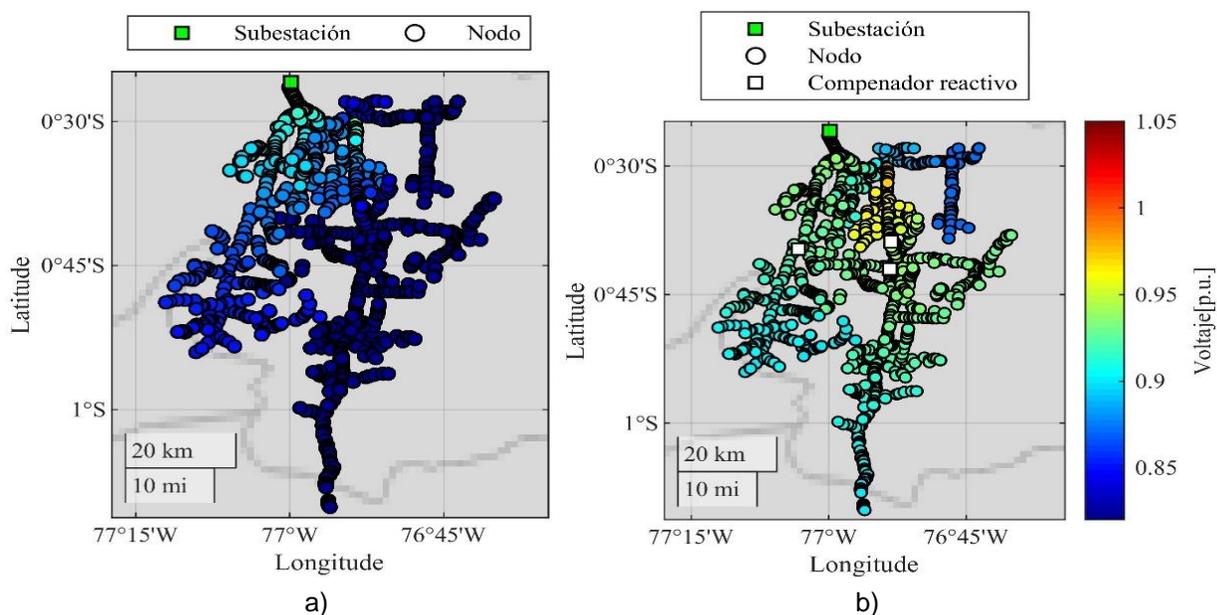


*Nota.* En la figura se muestra los perfiles de voltaje de las fases "B" del alimentador vía al Auca en a) Sin compensadores reactivos y b) Con compensadores reactivos.

En la Figura 39, se puede observar los perfiles de voltaje en condiciones de demanda máxima proyectada para la fase "C". Como se puede observar, en la Figura 39.a en el sistema actual se tienen perfiles de voltaje de hasta 0,8 p.u. Estos valores incrementan hasta valores de un 10% debido a la instalación de compensadores reactivos como se puede observar en la Figura 39.b.

**Figura 39**

*Perfiles de voltaje en el alimentador vía al Auca de la fase "C".*



*Nota.* En la figura se muestra los perfiles de voltaje de las fases "C" del alimentador vía al Auca en a) Sin compensadores reactivos y b) Con compensadores reactivos.

Como se puede observar en las curvas PV y los perfiles de voltaje, la instalación de compensares reactivos mejoran los perfiles de voltaje en el alimentador vía al Auca, además de reducir las pérdidas del alimentador en demanda máxima proyectada de 366,31 kW a 281,44 kW. Nótese que, si bien la instalación de compensadores reactivos en el alimentador mejora los perfiles de voltaje considerablemente, estos se mantienen por debajo de los niveles de voltaje admisibles por la regulación ARCERNNR 002/20. Esto es debido a que el alimentador vía al Auca en su mayoría posee conductores ACSR #1/0, lo que conduce a caídas de voltajes severas llegando a niveles por debajo de 0,94 p.u.

## Conclusiones

- El Alimentador vía Auca de la Subestación “Payamino” de la Empresa Eléctrica CNEL EP-UN Sucumbíos cuenta con 806 km de longitud, con extensas ramificaciones monofásicas, por lo que se aplicó el método de reducción de nodos por distancia eléctrica y se ejecutaron simulaciones de flujos de potencia trifásicos desbalanceados utilizando el método Backward/Fordward Sweep, con el fin de obtener una buena representación del sistema bajo estudio, además de reducir el requerimiento computacional para resolver problemas de optimización.
- Se realizaron análisis de estabilidad de voltaje en zonas estratégicas del alimentador, debido al gran número de nodos y por la presencia de valores de voltaje similares a lo largo del alimentador. Con este fin, se seleccionaron cuatro puntos estratégicos que representan el comportamiento de los perfiles de voltaje en el sistema, siendo estos el nodo donde se ubican los reguladores de voltaje, y nodos de las parroquias Dayuma, Inés Arango, Taracoa y La Belleza. Los resultados mostraron que la participación de la central Dayuma y el regulador de voltaje, aportan significativamente al mejoramiento de los perfiles de voltaje en las parroquias Dayuma e Inés Arango, haciendo una regulación de voltaje del 10% en condiciones de demanda mínima. Sin embargo, a partir de una demanda de 3000 kW, los niveles de voltaje en la parroquia Dayuma e Inés Arango decaen por debajo de los rangos admisibles. Con respecto a la parroquia Taracoa los perfiles de voltaje se mantienen por debajo de 0,94 p.u. desde condiciones de demanda mínima. Finalmente, en la parroquia La Belleza los resultados mostraron que existe una caída de voltaje considerable en la fase C con niveles por debajo de 0,94 p.u. en condiciones de demanda mínima. Para las fases A y B de los alimentadores en la parroquia la Belleza decaen por debajo de 0,94 p.u. a partir de una demanda de 3000 kW. Por lo que es evidente que las condiciones actuales del

alimentador conducen una baja calidad del servicio eléctrico, sin cumplir con los rangos admisibles de voltaje establecido por la regulación ARCERNNR 002/20.

- Para el desarrollo de la planificación óptima de compensadores reactivos se utilizó el método enfocado en la optimización vía simulación (OvS), en el cual intervienen dos etapas importantes siendo la primera la etapa de optimización y la segunda etapa de simulación. En la etapa de simulación se ejecuta flujos de potencia trifásicos desbalanceados por el método BFS y en la etapa de optimización se ejecuta un algoritmo genético que es capaz de encontrar una solución óptima aproximada que depende de los nodos candidatos que se seleccionen para la optimización.
- Aplicando el algoritmo de optimización para la planificación de compensadores reactivos en el alimentador vía al Auca de la Subestación Payamino, se obtuvieron como resultados la instalación de compensadores reactivos con capacidades totales de 300 kVAr para la fase A, 250 kVAr para la fase B y 400 kVAr para la fase C a lo largo del alimentador. Los resultados muestran una reducción en las pérdidas del alimentador en condiciones de demanda máxima proyecta de 84,87 kW, además, los resultados muestran una mejora significativa en los perfiles de voltaje. En la parroquia Dayuma e Inés Arango junto con la central Dayuma y el regulador de voltaje permiten aumentar la demanda de 3000 kW a 4000kW con niveles de voltaje dentro de los rangos admisibles. Con respecto a la parroquia Taracoa permite mejorar los perfiles de voltaje hasta una demanda de 3000 kW. Finalmente, en la parroquia La Belleza los resultados mostraron que existe una mejora considerable en los niveles de voltaje en la fase C, con niveles por encima de 0,94 p.u. hasta una demanda de 3000 kW. Por lo que lo que es evidente que la instalación de compensadores reactivos en el alimentador mejora significativamente la calidad de energía ofrecida, sin embargo, debido a la topología del alimentador en condiciones de demanda máxima los niveles de voltaje en algunas zonas del alimentador no cumplen con los rangos admisibles de voltaje establecido por la regulación ARCERNNR 002/20.

## Recomendaciones

- Con el fin de obtener proyecciones de demanda confiables se recomienda utilizar la mayor cantidad de datos históricos posibles de la red a estudiar.
- Para las redes de distribución que posean longitudes considerables se recomienda utilizar un proceso de reducción que permita mantener la topología de red con el propósito de facilitar el modelamiento de la red en una herramienta computacional de análisis de sistemas eléctricos.
- Debido a los perfiles de voltaje obtenidos, es indispensable que se mantenga la generación de la central térmica Dayuma propiedad de termo pichincha en el alimentador Vía al Auca.
- Debido a los resultados obtenidos de la planificación de compensadores reactivos, se recomienda realizar un estudio de cambio de conductores en el alimentador vía al Auca debido a que en su mayoría dispone de conductores ACSR #1/0.

## Bibliografía

- Aguirre Morillo, G. J., & Toapanta Barreiro, E. G. (2021). Aplicación de Algoritmos Genéticos para la ubicación óptima de condensadores en el alimentador primario de distribución tipo radial.
- ARCERNNR-002/20. (2020). *Regulación: Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica*. Quito.
- Borges Vasconcellos, D. E., y Concepción Céspedes, Y. (2017). Compensación de potencia reactiva en sistemas de distribución primaria de energía, aplicando algoritmos genéticos. *Revista de Ingeniería Energética*, XXXVIII(1), 25-34.
- Castro García, J. F. (2007). Algoritmos genéticos como solución al problema de flujo de potencia.
- Chimborazo, L., & Arcos, H. (2011). Análisis de Estabilidad de Voltaje del Sistema Nacional Interconectado – SNI para el Período 2010 – 2013, usando el Programa DigSilent PowerFactory. *Revista Energía*.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v7.n1.2011.201>
- Domínguez Becerril, S. (2008). Métodos de análisis de sensibilidad para la evaluación de la estabilidad de voltaje de sistemas eléctricos de potencia.
- Grigsby, L. (2007). *Electric Power Generation, Transmission, and Distribution* (Segunda ed.). CRC Press.
- Hernández Galicia, J. A. (2000). Planificación de la compensación reactiva mediante programación evolutiva.
- Hernández Romero, N., Medina Marín, J., & Seck Tuoh Mora, J. (2012). Introducción a Matlab para Resolver Problemas de Ingeniería Aplicando Algoritmos Genéticos.

- Herrera Torrealban, R. A. (2015). Análisis de estabilidad de voltaje de sistemas eléctricos de potencia usando curvas Q-V.
- Kawambwa, S., Mwifunyi, R., Mnyanghwalo, D., Hamisi, N., Kalinga, E., y Mvungi , N. (2021). An improved backward/forward sweep power flow method based on network tree depth for radial distribution systems. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*.
- Kundur, P. (1993). *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill .
- Lasluisa Robalino, S. (2019). Análisis de estabilidad de voltaje en estado estable en el sistema eléctrico de subtransmisión a nivel de 69 kV de la Empresa Eléctrica Ambato Regional Centro Norte S.A.
- MATLAB. (15 de Enero de 2023). *Find minimum of function using genetic algorithm - MATLAB ga*. Mathworks: <https://www.mathworks.com/help/gads/ga.html>
- Meena, N., Yang, J., y Singh, P. (2018). Backward/Forward Method for Three-phase Power Flow Calculation in Low Voltage Distribution Networks with EV Charging Points. *IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE)*(8th).  
<https://doi.org/10.1109/IICPE.2018.8709560>
- Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables. (15 de 12 de 2022). *Plan Maestro de Electricidad*. <https://www.rekursosyenergia.gob.ec/plan-maestro-de-electricidad/>
- Mullo Tarco, K. M., y Herrera Moreno, K. W. (2018). Ubicación de Capacitores para Mejorar los Perfiles de Voltaje en el Alimentador 10PJ13B1S2 Pujilí Centro-Alpamalag del Sistema de Distribución de la Empresa Eléctrica Cotopaxi S.A.
- Oleas Granizo, A. E. (2019). Control de voltajes en sistemas eléctricos de potencia usando transformadores con taps.

- Patiño Castrillón, G. F., y Limas Getial, G. A. (2008). Metodologías para el Análisis de Estabilidad de Tensión en estado estacionario.
- Ramirez Castaño, S. (1995). *Redes de Distribución de energía* (Tercera ed.). Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.
- Ramos Guardarrama, J., Hernández Areu, O., y Silverio Freire, R. C. (2019). Sistema de supervisión para el monitoreo de redes eléctricas inteligentes. *Energética*, 40(3).
- Riofrío Jirón, J. A., & Haro Pico, M. E. (2013). *Análisis de calidad de la energía eléctrica en los puntos de recepción de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil*.
- Rodelo Torres, H. (2013). Estrategias de optimización con algoritmos genéticos complejos en la resolución de problemas de asignación de canales en redes celulares.
- Rodrigo Moreno, T. L., Navarro Espinosa, A., Panteli, M., Sacaan, R., Ordoñez, F., Rudnick, H., y Mancarella, P. (2020). Identifying Optimal Portfolios of Resilient Network Investments Against Natural Hazards, With Applications to Earthquakes. *IEEE Transactions on Power Systems*.
- Rojas Calderon, B. A. (2022). Control de voltaje en redes de distribución mediante uso de cambiadores de toma bajo carga empenado el software OPEN DSS.
- Velásquez Lozano, A., Aguirre Velasco, M., Saltos Rodríguez, M., Ortiz Villalba, D., y Villamarín Jacome, A. (2021). Optimal Planning of VAR Compensator for Voltage Regulation Enhancement on Power Distribution Systems Against Volcanic Eruptions Events. *IEEE Green Technologies Conference*.
- <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/GreenTech48523.2021.00055>

Zhungur Procel, A. O., y Calva Riofrío, E. R. (2014). Diseño de esquemas de control integrado de tensión y potencia reactiva del sistema de distribución de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A.

## Anexos