

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas
Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico

ESTUDIO DE LA UBICACIÓN ÓPTIMA DE REGULADORES DE VOLTAJE EN LOS ALIMENTADORES DE LA SUBESTACIÓN CAYAMBE DE LA EMPRESA ELÉCTRICA REGIONAL NORTE.

Trabajo de grado presentado ante la ilustre Universidad Técnica del Norte previo a la obtención del título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico.

Autor:

Pillajo Montalvo Marcelo David

Director:

Ing. Pérez Cruz Segundo Hernán MSc.

Asesores:

Msc. Arellano Bastidas Olger Gilberto

MSc. Flores Haro Franklin Ramiro

Ibarra-Ecuador

2019 – 2021



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	100389658-4		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Pillajo Montalvo Marcelo David		
DIRECCION:	Imbabura-Ibarra, Calle Mejía 1-70 y Maldonado		
EMAIL:	mdpillajom@utn.edu.ec		
TELEFONO FIJO:		TELEFONO MÓVIL:	0996118840

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	ESTUDIO DE UBICACIÓN ÓPTIMA DE REGULADORES DE VOLTAJE PARA LOS ALIMENTADORES DE LA SUBESTACIÓN CAYAMBE DE LA EMPRESA ELÉCTRICA REGIONAL NORTE.
AUTOR:	Pillajo Montalvo Marcelo David
FECHA: DD/MM/AAAA	22/06/2021
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico
ASESOR/ DIRECTOR:	MSc. Hernán Pérez

2. CONSTANCIA

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrollo sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, declaro que la obra es original y que el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldré en defensa de la Universidad en casa de reclamo por parte de terceros.

Ibarra, a los 22 días del mes de junio del 2021

EL AUTOR:



Pillajo Montalvo Marcelo David

100389658-4



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR

MSc. Pérez Hernán

CERTIFICA

Que después de haber examinado el presente trabajo de investigación elaborado por el señor estudiante: Pillajo Montalvo Marcelo David, certifico que ha cumplido con las normas establecidas en la elaboración de investigación titulado: **“ESTUDIO DE UBICACIÓN ÓPTIMA DE REGULADORES DE VOLTAJE PARA LOS ALIMENTADORES DE LA SUBESTACIÓN CAYAMBE DE LA EMPRESA ELÉCTRICA REGIONAL NORTE”**. Para la obtención de título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico; aprobado la defensa, impresión y empastado

.....

MSc. Hernán Pérez
DIRECTOR DE TESIS

DEDICATORIA

Dedico mi trabajo de grado primordialmente a Dios y a mis padres Marcelo Patricio Pillajo Herrería y María Lucitania Montalvo Vásquez por todo el apoyo brindado, por su amor, agradecerles por el sacrificio día a día que hacen para que siga adelante en mi formación tanto a nivel estudiantil y profesional.

A mi hermano Esteban Patricio Pillajo Montalvo a pesar de las diferencias que hemos tenido siempre ha estado apoyándome en los buenos y malos momentos, dándome siempre fuerzas para seguir adelante.

A mis tíos, tías y primos que siempre estuvieron dispuestos a ayudarme de una forma u otra brindando su apoyo y fuerzas para lograr una meta más en el transcurso de mi vida.

Al Ingeniero Mauricio Vásquez, por su colaboración durante el transcurso de toda la carrera universitaria, por su apoyo incondicional y los conocimientos brindados tanto de forma profesional y como ser humano.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por guiarme a lo largo de esta etapa de estudios, por ser el apoyo y fortaleza en los momentos de mayor dificultad y debilidad.

Gracias a mis padres: Marcelo y Lucitania por ser los promotores, por su confianza y creer en mis expectativas, por los consejos, por el apoyo incondicional y especialmente por darme su ejemplo de trabajo y honradez.

De igual forma mis agradecimientos a todos los ingenieros de la Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico quienes con la enseñanza de sus conocimientos me hicieron crecer cada día como profesional, les agradezco mucho por su paciencia, dedicación y amistad.

Finalmente quiero expresar mi sincero agradecimiento al Ms.C Hernán Pérez, principal colaborador durante todo el desarrollo de este trabajo, igualmente a los ingenieros del Departamento de Estudios Eléctricos y Calidad de Energía Eléctrica por las guías brindadas y sus conocimientos.

Tabla de contenido

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN	I
1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA	I
2. CONSTANCIA.....	II
ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTO	V
RESUMEN.....	X
ABSTRACT	XI
CONTEXTUALIZACIÓN	XII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XIII
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	XIV
OBJETIVOS	XIV
JUSTIFICACIÓN.....	XV
ALCANCE.....	XV
VIABILIDAD.....	XV
1 Introducción.....	1
1.1Tipos de cargas	1
1.2Regulación de la ARCONEL 005/18	3
1.3Alimentadores.....	4
1.4Cargas en los alimentadores	5
1.4.1 Carga uniformemente distribuida a lo largo de un alimentador	5
1.4.2 Carga distribuida uniformemente a lo largo del alimentador y carga concentrada al final de este	6
1.4.3 Carga con distribución triangular y carga concentrada al final del alimentador.....	7
1.5 Factores para la variación de voltaje de los alimentadores	8
2 Introducción.....	19
2.1Descripción de la Subestación Cayambe.....	19
2.2Alimentadores primarios	20
2.3Metodología.....	20

2.3.1	Módulo de distribución de carga CymDist.....	22
2.3.2	Flujo de carga.....	27
2.3.3	Módulo de ubicación óptima de reguladores de voltaje.....	28
2.4	Método de caída de tensión – desequilibrada.....	31
2.5	Comportamiento del sistema eléctrico CymDist.....	32
2.6	Reguladores de voltaje en CymDist.....	34
2.7	Comportamiento de alimentadores de la Subestación Cayambe.....	35
2.8	Criterio técnico.....	40
3	Introducción.....	41
3.1	Ubicación óptima de reguladores de voltaje.....	41
3.2	Perfiles de voltaje de los alimentadores.....	41
3.2.1	Alimentador 1 (ALIM – CAYAMBE 1).....	42
3.2.2	Alimentador 2 (ALIM – CAYAMBE 2).....	42
3.2.3	Alimentador 3 (ALIM – CAYAMBE 3).....	43
3.2.4	Alimentador 4 (ALIM – CAYAMBE 4).....	44
3.2.5	Alimentador 5 (ALIM – CAYAMBE 5).....	44
3.2.6	Alimentador 6 (ALIM – CAYAMBE 6).....	45
3.3	Perfil de voltaje de los alimentadores con reguladores de voltaje	46
3.3.1	Alimentador 1 con regulador de voltaje.....	46
3.3.2	Alimentador 2 con Regulador de Voltaje.....	47
3.3.3	Cabecera del alimentador 3 con regulador de voltaje	47
3.3.4	Regulador de voltaje en el Alimentador 4	48
3.3.5	Ubicación de regulador de voltaje en el Alimentador 6	49
3.4	Criterio Técnico	50

Índice de Figuras

Fig. 1 Distribución de carga uniforme.....	5
Fig. 2 Distribución de carga uniforme y concentrada.....	6
Fig. 3 Distribución de carga triangular y concentrada.....	7
Fig. 4 Diagrama unifilar de la subestación Cayambe	19
Fig. 5 Demanda máxima mensual del alimentador	21
Fig. 6 Modelo de alimentador primario de Alimentador de la subestación Cayambe..	22
Fig. 7 Red de distribución eléctrica del alimentador 1	23
Fig. 8 Carga concentrada en la red eléctrica de CymDist	23
Fig. 9 Inventario de las redes.....	24
Fig. 10 Datos de la demanda del alimentador por el usuario.....	25
Fig. 11 Demanda de los alimentadores de una subestación	25
Fig. 12 Datos de la demanda máxima del alimentador.....	26
Fig. 13 Reportes de flujos de carga para diferentes análisis.	27
Fig. 14 Análisis de flujo de carga	28
Fig. 15 Módulo de ubicación óptima de reguladores de voltaje	30
Fig. 16 Restricciones de la ubicación de reguladores de voltaje	31
Fig. 17 Alimentadores de la subestación Cayambe	35
Fig. 18 Parámetros en distribución de carga.....	36
Fig. 19 Comportamiento del alimentador 1	36
Fig. 20 Comportamiento del alimentador 2	37
Fig. 21 Comportamiento del alimentador 3	37
Fig. 22 Comportamiento del alimentador 4	38
Fig. 23 Comportamiento del alimentador 5	39
Fig. 24 Comportamiento del alimentador 6	39
Fig. 25 Perfil de voltaje del alimentador 1	42
Fig. 26 Perfil de voltaje del alimentador 2	43
Fig. 27 Perfil de voltaje del alimentador 3	43
Fig. 28 Perfil de voltaje del alimentador 4	44
Fig. 29 Perfil de voltaje del alimentador 5	45
Fig. 30 Perfil de voltaje del alimentador 6	45
Fig. 31 Perfil de voltaje con ubicación de reguladores de voltaje en el alimentador 1	46
Fig. 32 Perfil de voltaje con ubicación de reguladores de voltaje en el alimentador 2	47
Fig. 33 Perfil de voltaje con ubicación de reguladores de voltaje en el alimentador 3	48
Fig. 34 Perfil de voltaje con ubicación de reguladores de voltaje en el alimentador 4	49
Fig. 35 Perfil de voltaje con ubicación de reguladores de voltaje en el alimentador 6	50

Índice de Tablas

Tabla 1 Clasificación de las Cargas	2
Tabla 2 Clase socioeconómica de consumo de energía eléctrica	2
Tabla 3 Límites para nivel de voltaje	4
Tabla 4 Caída de Voltaje para elementos de la red	8
Tabla 5 Impactos por intentos de reincorporación del sistema	14
Tabla 6 Factores para un colapso de voltaje.....	16
Tabla 7 Zonas de Voltaje	17
<i>Tabla 8 Identificación de alimentadores primarios de la Subestación Cayambe</i>	<i>20</i>
Tabla 9 Cálculos para la ubicación de reguladores de voltaje.....	29
Tabla 10 Características de instalación de reguladores de voltaje	29
Tabla 11 Secuencia para modelación en CymDist.....	34
Tabla 12 Ubicación de los reguladores de voltaje alimentador 1.....	46
Tabla 13 Ubicación de los reguladores de voltaje alimentador 2.....	47
Tabla 14 Ubicación de los reguladores de voltaje alimentador 3.....	48
Tabla 15 Ubicación de los reguladores de voltaje alimentador 1.....	48
Tabla 16 Ubicación de los reguladores de voltaje alimentador 6.....	49

RESUMEN

El presente trabajo de grado tiene el propósito de realizar un estudio de la ubicación óptima de reguladores de voltaje para los alimentadores de la subestación Cayambe, mediante el software CymDist con el fin de mejorar los niveles de voltaje y cumplir con la normativa de la ARCONEL 005/18 en la distribución de energía eléctrica a los usuarios (calidad de producto). Para llevar a cabo este trabajo se realizó el análisis mediante simulaciones y distribución de carga en demanda máxima, media y mínima para tener conocimiento de los factores que influyen en la mayor parte para las caídas de voltaje.

CymDist es una herramienta informática que realiza simulaciones con los datos ingresados para el estudio donde se proporciona los valores de subtensión (subvoltaje), sobretensión (sobrevoltaje), sobrecarga que son los valores proporcionados para el posterior análisis con la ubicación de los reguladores de voltaje, donde uno de los factores principales es la distancia de la línea de subtransmisión a la subestación Cayambe de la Empresa Eléctrica Regional Norte y el calibre de cada uno de los conductores en los distintos alimentadores, que ya presentan caídas de voltaje desde la cabecera del alimentador que están por debajo de los establecidos por la regulación de la ARCONEL.

Con los valores de la simulación se realiza la ubicación de los reguladores de voltaje monofásicos mediante una búsqueda para la mejor zona sabiendo que el voltaje en las líneas de distribución es desequilibrado y con la ubicación óptima de los reguladores de voltaje en la troncal principal se verifica la reducción de subvoltaje y el cumplimiento de los niveles de voltaje que se encuentran establecidos por la regulación.

Palabras clave: Distancia, sobrevoltaje, subvoltaje, subestación, regulador, ARCONEL, alimentador.

ABSTRACT

The present degree work has the purpose of carrying out a study of the optimal location of voltage regulators for the feeders of the Cayambe substation, using the CymDist software in order to improve voltage levels and comply with the ARCONEL 005/18 regulations in the distribution of electrical energy to users (product quality). To carry out this work, the analysis was carried out through simulations and load distribution in maximum, average and minimum demand to have knowledge of the factors that influence most of the voltage drops.

CymDist is a computer tool that performs simulations with the data entered for the study where the values of undervoltage (undervoltage), overvoltage (overvoltage), overload are provided, which are the values provided for subsequent analysis with the location of the voltage regulators, where one of the main factors is the distance from the subtransmission line to the Cayambe substation of the North Regional Electric Company and the gauge of each of the conductors in the different feeders, which already present voltage drops from the feeder head that are below those established by the ARCONEL regulation.

With the simulation values, the location of the single-phase voltage regulators is carried out through a search for the best area, knowing that the voltage in the distribution lines is unbalanced and with the optimal location of the voltage regulators in the main trunk it is verified the reduction of undervoltage and compliance with the voltage levels that are established by regulation.

Keywords: Distance, overvoltage, undervoltage, substation, regulator, ARCONEL, feeder.

CONTEXTUALIZACIÓN

Desde hace 10 años la Empresa Eléctrica Regional Norte (Emelnorte S.A.) ha insistido sobre un punto de conexión nuevo con el Sistema Nacional Interconectado, con el objetivo del mejoramiento de nivel de voltaje en los cantones Cayambe y Pedro Moncayo, donde se encuentran importantes industrias como son florícolas, lácteos, etc., (Planificación, 2019).

En operaciones de distribución de la energía eléctrica desde la generación hidroeléctrica hacia la subestación de distribución, Las pérdidas de energía eléctrica siempre han sido un problema que todas las empresas eléctricas han poseído. Por lo cual ciertas pérdidas eléctricas como son en los calentamientos de conductores y en los núcleos ferromagnéticos no pueden ser eliminadas, pero si disminuirse (Apaza, 2017)

Una de las principales preocupaciones de la distribución de energía eléctrica es el mejoramiento de manera continua, la confiabilidad y la calidad del servicio, esto se va a realizar a través de la implementación de los programas para cumplir con las expectativas del cliente. En los momentos actuales es relevante por los nuevos tipos de cargas que se presentan, como son las cocinas de inducción y los vehículos eléctricos (Landázuri, 2016).

Los sistemas de distribución eléctrica están en constante crecimiento y cambios en su topología, esto conlleva a minimizar las fallas y maximizar el rendimiento de los sistemas haciendo mayor énfasis en los diferentes parámetros que se pueden emplear para el mejoramiento y aumento de la confiabilidad del sistema de distribución eléctrico (Tapia, 2019).

Por lo general, la distribución de energía eléctrica en el Ecuador cambio con las nuevas hidroeléctricas y además de la implementación de las cocinas de inducción, las perdidas en el país no son tratadas de una forma adecuada debido a las ineficiencias a lo largo de un periodo (González F. , 2019)

Se planteó una opción para EMELNORTE por parte de CELEC E.P. Transelectric, donde se aceptó a la Subestación Malchinguí como un nuevo punto de interconexión de EMELNORTE a una subestación en Tabacundo, para lo que se solicita una comisión que determine un lugar adecuado para la construcción. Luego de no encontrar un lugar idóneo, CELEC E.P. Transelectric, informa que la nueva subestación

Cajas se construirá en el sector de Tabacundo derivando una de las líneas de 230 kV de doble circuito que pasa por la zona. (Planificación, 2019)

En la actualidad, la calidad de la energía resulta de una atención continua; en años recientes esta atención ha sido de mayor importancia debido al incremento del número de cargas sensibles en los sistemas de distribución (Rodríguez, Vázquez, Vélez, & Saltos, 2018).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La regulación de la ARCONEL - 005/18 busca un servicio de distribución de la calidad de energía eléctrica, es decir, el control de los niveles de voltajes entre $\pm 6\%$. En la distribución de la energía eléctrica, han existido problemas con las caídas y variaciones de voltaje, por el desbalance de cargas, las impedancias que existen en la red eléctrica. Por la existencia de 16.4 km desde la Subestación Cayambe (alimentador de salida) hasta el cantón Cayambe. De las mediciones que solicita la ARCONEL, el número de mediciones de cada semana del mes de mayo, tres (3) de las cuatro (4) semanas, no cumplen con los límites de la regulación 005/18, en la cual el porcentaje en la primera semana fue de 13.89%, segunda semana 4.86%, tercera semana 9.42% y la cuarta semana 17.36%. (Planificación, 2019)

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo mejorar el nivel de voltaje en redes primarias, mediante la instalación de reguladores de voltaje?

OBJETIVOS

Objetivo General. –

Realizar el estudio de ubicación óptima de reguladores de voltaje en los alimentadores de la subestación Cayambe de la Empresa Eléctrica Regional Norte, mediante la utilización del módulo de ubicación óptima de reguladores de voltaje del software CymDist, esto con el fin del mejoramiento de los niveles de voltaje.

Objetivos Específicos. –

- Realizar el análisis sobre los factores que causan los problemas del bajo nivel de voltaje en alimentadores primarios.
- Analizar el estado de los alimentadores primarios para la determinación de los perfiles de voltaje de la subestación Cayambe en el sistema eléctrico de EMELNORTE S.A.
- Determinar la ubicación óptima de los reguladores de voltaje, mediante la utilización del módulo de CYME en los alimentadores de la Subestación Cayambe.

JUSTIFICACIÓN

De la ARCONEL, es el ente regulador del Sector Eléctrico quien dicta las regulaciones a las cuales deben ajustarse las empresas eléctricas, el Operador Nacional de Electricidad (CENACE) y los consumidores o usuarios regulados (públicos o privados), ha estado desarrollando regulaciones en cuanto al sector eléctrico con el objetivo de tener un sistema confiable y seguro.

Por la regulación de la ARCONEL 005/18, los límites para variaciones de voltaje son de $\pm 6\%$, por lo cual la S/E Cayambe no cumple con los límites que establece la regulación al momento de ofrecer sus servicios.

Donde uno de los factores más importantes es la calidad del servicio eléctrico de distribución y comercialización de energía eléctrica, para evitar sanciones por parte de la ARCONEL.

ALCANCE

En lo referente a los niveles de voltaje, se va a realizar un análisis sobre los diferentes factores que inciden en la variación de voltaje mediante las mediciones que se realizara, con el objetivo de ubicar óptimamente los reguladores de voltaje mediante los métodos analizados y las simulaciones en CYMDIST de los 6 alimentadores, esto con el fin de mejorar su nivel de voltaje.

VIABILIDAD

En el estudio de la ubicación de los reguladores de voltaje en la Subestación Cayambe, por el convenio realizado con la Universidad Técnica del Norte y la Empresa Regional Norte, se manejará el software CYMDIST que está limitada al uso con la red de EMELNORTE S.A., y ciertas herramientas que serán esenciales para realizar las simulaciones y la obtención de datos para conocer la ubicación de los reguladores de voltaje, además del asesoramiento por parte de los ingenieros de la Jefatura de Planificación y Estudios Eléctricos.

CAPITULO I

1 Introducción

Dentro de las regulaciones de la ARCONEL para la consideración del nivel de voltaje de una subestación se toma en cuenta los siguientes factores: caída de voltaje, proyección de la carga, pérdidas de la potencia, costo de la disponibilidad del equipo, voltaje de subtransmisión, longitud de los alimentadores, políticas de la empresa, subestaciones adyacentes y voltajes en los alimentadores (Peña & Ramírez, 2012).

La caída de voltaje es un fenómeno que se presenta en los conductores eléctricos cuando alimentan una carga a cierta distancia del punto de alimentación. Esto quiere decir que cuando se suministra energía eléctrica a una distancia considerable, la tensión en el punto de conexión de alimentación y la tensión en el punto de conexión en la carga son diferentes (Hernández, 2011).

Los mayores porcentajes de caída de voltaje se dan en las secciones más alejadas de los alimentadores, a pesar de esto, de acuerdo a la regulación de la ARCONEL No. 005/18 (Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica) existen límites admisibles con respecto al valor del voltaje nominal (Rosero, 2019).

1.1 Tipos de cargas

Carga lineal: Se presenta por tener un valor fijo en la resistencia, capacitancia e inductancia, por lo que la forma de onda es sinusoidal, desfasada y ni tiene distorsión por el comportamiento del voltaje y corriente. (Quispe, 2018)

Carga no Lineal: Necesita de una corriente no sinusoidal, lo cual cuando pasa por la impedancia, provoca una caída de voltaje cuya forma de onda no es sinusoidal, además, como consecuencia en los terminales de la carga existirá una distorsión del voltaje. (Quispe, 2018) (Holguin & Gomezcoello, 2010)

Además, las redes de distribución por las cargas se clasifican de la siguiente forma:

Tabla 1 Clasificación de las Cargas

Carga	Descripción
Carga Residencial	Son los edificios de apartamentos, condominio, etc., donde su carga es resistiva (alumbrado y calefactores), pequeños electrodomésticos.
Carga Comercial	Su ubicación es en el centro de una ciudad, donde su actividad es mayor. Su carga es resistiva y también por comprender un componente inductivo que no repercute al factor de potencia (fp).
Carga Industrial	Tiene una alta cantidad de motores, como consecuencia una mayor energía reactiva; se realiza un control de consumo de reactivos y fp, igualmente se realiza una doble tarifa (alta y baja) para evitar que el pico máximo coincida con el de carga residencial.
Carga de Alumbrado Público	Son las instalaciones de la red para la alimentación de lámparas cuyo aporte es para la seguridad ciudadana en horas nocturnas.
Carga Mixta	Redes con diversos tipos de cargas en la misma red de distribución, dificulta el control de pérdidas.

Fuente: (Orellana & Ramón, 2017)

Dentro de las redes de distribución en las cargas residenciales, existen las clases socioeconómicas donde el consumo de energía eléctrica para cada una se representa por rangos.

Tabla 2 Clase socioeconómica de consumo de energía eléctrica

Clase socioeconómica	Consumo de energía eléctrica
Clase Alta	Alta (>500kWh)
Clase Media	Moderado (100 kWh – 500 kWh)
Clase Baja	Bajo (0 kWh – 100 kWh)

Fuente: (Orellana & Ramón, 2017)

En las tablas 1 y 2 señaladas anteriormente, se describe el tipo de cargas y la clase socioeconómica, esto indica el consumo de energía que puede presentarse cuando se requiere conocer los diferentes tipos de pérdidas en las redes eléctricas de distribución.

1.2 Regulación de la ARCONEL 005/18

Dentro de la regulación de la ARCONEL 005/18, en la Calidad del Producto, se considera los niveles de voltaje para subestaciones eléctricas que se encuentran en el grupo de Medio Voltaje que comprende el rango de mayor a 0.6 kV y menor igual a 40 kV.

Además, dentro de la Calidad del Producto se encuentran los siguientes parámetros:

- a) Nivel de voltaje.
- b) Perturbaciones rápidas de voltaje (Flicker).
- c) Distorsión armónica de voltaje.
- d) Desequilibrio de voltaje

Con respecto a la calidad de nivel de voltaje en cualquier punto del sistema eléctrico de distribución se lo determina con la siguiente ecuación (EC 1) (ARCONEL, 2018a):

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

Fuente: (ARCONEL, Regulación No. ARCONEL 005/18, 2018a)

Donde:

ΔV_k = Variación de voltaje de suministro respecto al voltaje nominal en un punto k.

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

V_N = Voltaje nominal en un punto k.

Dentro de las variaciones de voltaje, las limitaciones en la Regulación 005/18 son las siguientes:

Tabla 3 Limites para nivel de voltaje

Nivel de Voltaje	Rango admisible	Rango de Voltaje
Alto Voltaje (Grupo 1 y Grupo 2)	$\pm 5.0\%$	Grupo 1: >138 kV Grupo 2: >40 kV - ≤ 138 kV
Medio Voltaje	$\pm 6.0\%$	0.6k – 40 kV
Bajo Voltaje	$\pm 8.0\%$	<0.6 kV

Fuente: (ARCONEL, 2018a) (ARCONEL, Pliego Tarifario para las Empresas Eléctricas de Distribución, 2018b)

Para las empresas distribuidoras, el cumplimiento del índice de desequilibrio de voltaje en un punto de las mediciones cuando el 95% o más de los valores en el registro cumple la evaluación durante un periodo de al menos siete (7) días continuos, y es menor al límite máximo establecido. Para la evaluación de la calidad del producto en lo referente al Medio Voltaje en donde el 0,5% del total de consumidores servidos en medio voltaje (no más de 5). Para este grupo se evalúa el cumplimiento del nivel de voltaje, además, del desequilibrio de voltaje que se lo realiza mensualmente (ARCONEL, 2018a).

También cuando se habla sobre la estabilidad de voltaje que hace referencia a la capacidad del sistema eléctrico donde se quiere mantener el valor del voltaje dentro del rango aceptable en todas las barras del sistema después de ser sometido a una perturbación debido a una condición de operación dada (CENACE, 2018).

La calidad de energía eléctrica es la interacción de la energía eléctrica con los distintos equipos eléctricos con la ausencia de interrupciones, altos voltajes y deformaciones producidas por los armónicos en la red y variaciones de voltaje RMS, como objetivo de tener una continuidad y confiabilidad del servicio de energía eléctrica. (Quispe, 2018)

1.3 Alimentadores

Un alimentador es el encargado de llevar la energía eléctrica a los consumidores finales, los cuales deben de disponer de características eléctricas confiables para

brindar un servicio energético de calidad, sin caídas de voltaje o pérdidas de energía eléctrica; teniendo un sistema sólido y con una operación en óptimas condiciones (Mejía & Faz, 2016).

Según Pocasangre (2017) indica que los alimentadores son elementos metálicos utilizados para conducir la corriente eléctrica desde la fuente de alimentación hacia las cargas a suplir. En la fase de un proyecto se debe escoger correctamente cada alimentador de acuerdo a dos factores: capacidad térmica y caída de voltaje, para evitar daños o fallas en el momento que se lleve a cabo el proyecto, estos pueden ser cortes de suministro, riesgos de incendios o pérdidas de energía.

1.4 Cargas en los alimentadores

Dentro de las cargas de los alimentadores existen diversas formas de realizarlo, lo cual es de consideración en el formato de distribución de la carga.

1.4.1 Carga uniformemente distribuida a lo largo de un alimentador

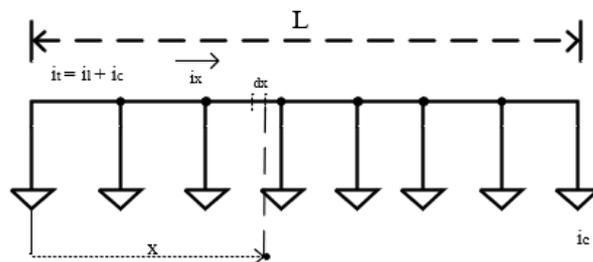


Fig. 1 Distribución de carga uniforme

Sea i_r la corriente debida a la carga total servida por el alimentador, si la carga es uniformemente distribuida, a una distancia x donde el lado de la fuente se tendría una corriente i_x dada por la siguiente ecuación:

$$i_x = \frac{L - x}{L} * i_r \quad (\text{EC. 2})$$

Fuente: (Pérez, 10 feb. 2020)

La caída de voltaje es:

$$\Delta V = \int_0^L i_x * z * dx \cong |i_r| (r_s \text{Cos}\phi + x_s \text{Sen}\phi) \int_0^L \frac{L-x}{L} dx \quad (\text{EC. 3})$$

Fuente: (Pérez, 10 feb. 2020)

En donde z es la impedancia de la línea en por unidad (p.u.) de longitud y el factor de potencia ($\text{Cos}\phi$) de la carga (el mismo para todas las cargas puntuales).

$$\Delta V = |i_r| (r_s \text{Cos}\phi + x_s \text{Sen}\phi) * \frac{L}{2} \quad (\text{EC. 4})$$

Fuente: (Pérez, 10 feb. 2020)

Se debe considerar que un módulo válido para el cálculo de regulación no necesariamente es válido para el cálculo de pérdidas, por la condición no lineal (cuadrática) de las pérdidas.

1.4.2 Carga distribuida uniformemente a lo largo del alimentador y carga concentrada al final de este.

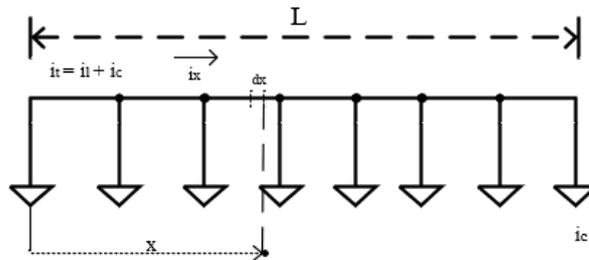


Fig. 2 Distribución de carga uniforme y concentrada

i_d = Corriente al inicio del alimentador debido a la carga distribuida.

i_c = Carga concentrada (Cargas en el mismo factor de potencia).

$$i_x = i_c + \frac{L-x}{L} i_d \quad (\text{EC. 5})$$

Fuente: (Pérez, 10 feb. 2020)

En la caída de voltaje se emplea la siguiente ecuación:

$$\Delta V = \int_0^L i_x * z * dx \cong \left| i_c + \frac{i_d}{2} \right| (r_s \cos \phi + x_s \sin \phi) L \quad (EC. 6)$$

Fuente: (Pérez, 10 feb. 2020)

1.4.3 Carga con distribución triangular y carga concentrada al final del alimentador

En áreas urbanas homogéneas, es factible plantearse modelos geométricos teóricos para la evaluación alternativa del conjunto en la planificación de las subestaciones de distribución. Un modelo es la consideración del área de cobertura de las subestaciones de distribución, que se relacionan con figuras geométricas conocidas como polígonos regulares.

En este esquema, cada uno de los alimentadores tendrá una carga, esta depende del área triangular servida, donde podría tener una carga concentrada al final de este (posibilidad de transferencia de carga con el alimentador vecino). El modelo para el cálculo de regulación y pérdidas se puede plantear de la siguiente forma:

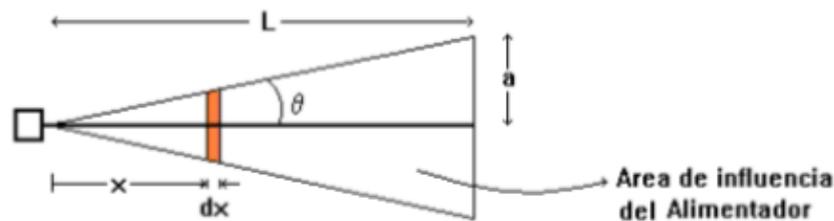


Fig. 3 Distribución de carga triangular y concentrada

$$i_x = i_c + \frac{L^2 \tan \phi - x^2 \tan \phi}{L^2 \tan \phi} i_d \quad (EC. 7)$$

Para conocer la caída de voltaje

$$\Delta V = \left(i_c + \frac{z * i_d}{3} \right) * (r_s \cos \phi + x_s \sin \phi) L \quad (EC. 8)$$

Fuente: (Pérez, 10 feb. 2020)

$$\text{Si, } i_c = mi_r; i_d = ((1 - m)i_r$$

$$\Delta V = i_r(r_s \cos\phi + x_s \sin\phi) * L * \left(\frac{m + z}{3}\right) \quad (\text{EC. 9})$$

Fuente: (Pérez, 10 feb. 2020)

1.5 Factores para la variación de voltaje de los alimentadores

El alimentador primario es un circuito de distribución el cual tiene la energía suministrada desde una sola parte de la subestación; este opera con el voltaje primario de distribución y cumple con la función de distribuir la energía por sus diversas derivaciones. Los voltajes de operación de los alimentadores primarios se encuentran entre 6.3 kV y 22.8 kV, en la actualidad se recomienda para zonas comerciales y residenciales se emplee un voltaje de 13.8 kV (Rosero, 2019).

En lo referente a caídas de voltaje según Coello (2016) comenta que en un alimentador con alta demanda presenta un perfil de voltaje con caídas de voltaje excesivas, para Lobato (2016) el perfil de voltaje es un parámetro de gran importancia, el cual está establecido para cada sección del sistema eléctrico, por lo que es un parámetro que se ajusta a valores establecidos por normas o regulaciones.

Para la asignación de caídas de voltaje en los elementos que conforman la red según Coello (2016) en donde se presentan una asignación de caídas de voltaje debido a que los equipos de medición no admiten la variación de voltaje de $\pm 8\%$.

Tabla 4 Caída de Voltaje para elementos de la red

Elemento de red	Caída de voltaje
Alimentador Primario	8.0%
Transformador de distribución	1.0%
Secundario	3.0%
Acometida	1.0%

Fuente: (Coello, 2016)

Uno de los índices principales de la calidad de energía eléctrica es el voltaje, esté se debe ofrecer al usuario dentro del rango que esta normalizado. En líneas de distribución y otros elementos, se presentan caídas de tensión que se las deben evaluar

con cuidado, para que en las variaciones normales de carga el voltaje se mantenga dentro del rango normal (Amache, 2019).

Entre las principales causas para que un transformador sufra de daños se encuentran: cortocircuitos en el equipo, sobrecargas, sobrevoltajes o daños propios (Internos) en el equipo (Castillo, 2013)

Un transformador debe ser capaz de:

1. Operación continua: A pesar de que este por encima del voltaje nominal o debajo de la frecuencia nominal, potencia máxima nominal kVA, en cualquier tap, además de tener en cuenta que no se sobrepase los límites de temperatura, con las siguientes condiciones:
 - a) El voltaje en la parte secundaria y los voltios por Hertz no sean superiores al 105% del valor nominal.
 - b) El factor de potencia sea del 80% o mayor.
 - c) El valor de la frecuencia es al menos del 95% del valor nominal.
2. La operación del transformador debe ser de manera continua, encima del voltaje nominal o debajo de la frecuencia nominal, en cualquier tap en vacío, sin sobrepasar los límites al aumentar la temperatura, cuando la tensión y los voltios por Hertz no exceden al 110% del valor nominal.

a) Causas de las variaciones de tensión de larga duración

- **Sobrevoltaje:** Es el incremento del voltaje eficaz, en la forma de onda y donde su tiempo de duración es mayor a unos segundos, en términos generales al sobrevoltaje se lo considera cuando se tiene valores de al menos el 10% arriba del valor nominal, esto es ocasionado por descargas de rayos o interrupciones de cargas grandes (Preciado, 2019).

Los sobrevoltajes son el resultado del sistema en el cual este es débil para la regulación deseada por el efecto Ferranti, la incorrecta posición de taps o porque el sistema es débil en un momento para la regulación del voltaje (Sulca, 2016) (Preciado, 2019).

- **Subvoltaje:** En el decremento del voltaje menor al 95% de la frecuencia fundamental para una duración mayor a 15 minutos, Sulca (2016) señala que este efecto es por circuitos sobrecargados que son los principales en la creación de caídas de voltaje, los incorrectos empalmes entre conductores de baja impedancia con uno de alta.

El subvoltaje es la disminución de la tensión nominal a menos de 0.9 por unidad (p.u.) para una larga duración de un minuto. Las causas incluyen encendido de gran carga, sobrecarga de circuito y falla en la línea (Mayta, 2019)

- **Bajo voltaje:** Se considera al decremento del voltaje RMS en la forma de onda, donde el tiempo de duración es mayor a unos cuantos segundos. Por lo general se habla acerca del bajo voltaje sobre valores menores al 10% del nominal.

Este problema se presenta por varios factores como una instalación eléctrica domestica sobrecargada, mala instalación o conexión, caída de voltaje en el sistema de distribución.

También, se habla de un sub – sobrevoltaje la cual se presenta en forma paralela, lo que causa efectos en ambas transgresiones, los sobrevoltajes se presentan en horas mínimas de la demanda y el subvoltaje en hora de máxima demanda.

b) Sobrecarga:

Sobrecarga en el transformador de distribución: El transformador de distribución debe operar bajo ciertos ciclos de carga, esto se debe a que la demanda eléctrica no es la misma a cada hora del día.

Dentro de las causas para una sobrecarga en el transformador, se consideran cuando la operación del transformador está por encima del límite de carga nominal, por lo cual una consecuencia también es la temperatura a la que trabaja es superior a la que se especifica en los datos de placa, cuando en un punto lejano del circuito secundario se tiene un cortocircuito, se tiene en la impedancia un valor superior lo que induce a que la corriente de

cortocircuito no alcance la magnitud máxima que se necesita para activar las protecciones, esto sucede por la variación del circuito secundario que es más grande de lo establecido.

De igual forma en el tema de variación de voltaje se encuentran ciertos factores por lo cual existen las alteraciones en la amplitud de la forma de onda de voltaje y de la misma forma en el valor RMS de dicha señal. Para este los transitorios, una de las formas de producción es por los usuarios en la conexión y desconexión de sus cargas o por la operación de conmutación de la empresa suministradora (Saucedo & Taxis, 2008) (Preciado, 2019).

c) Problemas de voltaje en alimentadores radiales

Según Chimbo y Molina (2018) mencionan que el problema de la caída de voltaje es en el alimentador primario donde se considera lo siguiente:

- **Desbalance excesivo:** El balanceo de las corrientes, ayuda a la reducción de la caída de voltaje.
- **Capacitores:** Ajustes incorrectos de tiempo, de control o mal funcionamiento del interruptor, fusibles quemados.
- **Reguladores:** Verificar si los ajustes pueden mejorar el perfil de voltaje como: mayor compensación de línea o un ancho de banda más ajustado.

Una de las formas para disminuir las caídas de voltaje y cumplir con los límites que se establecen en la regulación es mediante un cambio de conductor por uno de mayor sección, y cambiar el tap de los transformadores que lo permitan (Rosero, 2019).

Otras de las opciones a considerar es mover una o más secciones del circuito a otro alimentador para reducir la carga en el circuito, se cambia las tomas de los transformadores a uno más elevado para aumentar su capacidad. Una alternativa costosa es construir nuevos circuitos o cambiar los ramales monofásicos por ramales trifásicos, realizar cambios de conductor en la red para que el ramal troncal se mantenga con la misma

sección del conductor o en casos extremos elevar el nivel de voltaje de los alimentadores primarios (Chimbo & Molina, 2018).

d) Distancia de líneas de Media Voltaje (MV):

Cuando una línea de medio voltaje tiene una extensa longitud entre el alimentador y las cargas, presenta problemas acerca de la regulación de voltaje a pesar de que en la subestación tenga regulación automática. Por lo cual se debe considerar una solución para erradicar este problema en las líneas de distribución (Amache, 2019).

Una subestación eléctrica tiene conectados algunos alimentadores en su bus de medio voltaje, por lo que, si se presenta una falla, todos los alimentadores tendrán que hacer un cambio en su fuente de alimentación, en donde su topología va a ser diferente y en ciertos casos con deficiencias de voltaje por el aumento de la longitud entre la nueva fuente y ciertos puntos de la red o también por el aumento de carga que la nueva fuente debe alimentar (Lobato, 2016).

La mayor parte de los porcentajes de caída de voltaje es por las secciones que se encuentran más alejadas de los alimentadores, esto se debe a que en todo conductor existe una caída de voltaje, debido a la resistencia o calentamiento de este. La caída de voltaje entre dos nodos de un circuito se define como la diferencia que existe entre el voltaje medido en la parte inicial del alimentador y en el terminal de recepción que se lo obtiene con la EC 1 (Rosero, 2019).

La caída de voltaje en el conductor se origina por la resistencia eléctrica al paso de la corriente. Esta resistencia depende de la longitud del circuito, material, calibre y la temperatura que soporta en operación. Para los circuitos con corriente alterna (AC) la caída de voltaje depende de la corriente de carga, del factor de potencia y la impedancia de los conductores, esta impedancia es la combinación de las resistencias, capacitancias e inductancias que se presentan (Baura, 2011).

Dentro de los conductores Changotasig y Estrella (2017) señalan que un conductor tiene pérdidas que son directamente proporcionales a la

resistencia, la resistencia es inversamente proporcional a la sección de este conductor; lo que significa que si se tiene un conductor con mayor sección se obtiene menor resistencia, sus pérdidas serán menores y se reduce la caída de voltaje.

De forma experimental se puede demostrar que la resistencia eléctrica de un conductor según Tuesta (2017), explica que la resistencia depende de:

- Material del que está compuesto.
- La temperatura a la que se encuentra, cuanto mayor es la temperatura mayor es su resistencia eléctrica.
- Su longitud, la resistencia aumenta proporcionalmente a la longitud del conductor.
- Su sección. La resistencia disminuye proporcionalmente a la sección transversal del conductor.

La caída de voltaje se debe a la impedancia (resistencia y reactancia) que tienen los conductores eléctricos, la reactancia está determinada por diversos factores como: sección, frecuencia, longitud, material, voltaje de operación, entre otras. Esta se determina por la siguiente fórmula dependiendo del sistema (monofásico o trifásico), se utilizará de la siguiente forma para el cálculo (Pocasangre, 2017).

Sistema monofásico o trifásico

$$s = \frac{k * L * I}{\sigma * e\% * E_f} \quad (10)$$

Fuente: (Pocasangre, 2017)

Donde:

k = Coeficiente variable dependiendo números de fases.

k = 2 para monofásico, $\sqrt{3}$ para trifásico.

I = Corriente en amperios.

σ = Conductividad del cobre (57) o aluminio (36) dependiendo del caso.

e % = Porcentaje de caída de voltaje.

e) Desbalance de carga

Según Suárez (2019), menciona que el desbalance de carga se origina entre las corrientes de fase, que induce al incremento de pérdida de potencia y energía en toda la longitud del circuito eléctrico, contribuyendo al desbalance de voltaje en los nodos del circuito.

En los sistemas de distribución al existir cargas monofásicas al largo de un alimentador trifásico, provocando el desbalance de carga entre fases debido a que las corrientes que circula por cada una de las fases son distintas, esto eleva la corriente del neutro (Changotasig & Estrella, 2017).

La causa principal de los desbalances según Muenala y Pruna (2017) son de naturaleza monofásica, lo cual provoca un estado de carga en el sistema trifásico que no es equilibrado en las fases, de allí es donde las caídas de voltaje del sistema tampoco son equilibradas dando como un resultado los niveles de voltaje desiguales.

f) Intentos de reincorporación y tiempos muertos

Según Pulla & Quiñonez (2018), consideran que tres intentos de reenganche son lo más común, más intentos dan a la falla más posibilidades de despejarse; la probabilidad de que al tercer o cuarto intento de reincorporarse sea exitoso suele ser pequeña. Estos intentos adicionales tienen los siguientes impactos:

Tabla 5 Impactos por intentos de reincorporación del sistema

Daño adicional en la ubicación de la falla	Caídas de voltaje	Daño por Falla en los transformadores
<ul style="list-style-type: none">• Daño por falla en los transformadores.• Las fallas se pueden propagar de una fase a otra.	<ul style="list-style-type: none">• Los circuitos adyacentes a la falla reciben golpe de voltaje.• Si se involucran fases	<ul style="list-style-type: none">• Transformadores sometidos a esfuerzos mecánicos y térmicos.

	adicionales en la falla, la caída de tensión es más severa.	
--	---	--

Fuente: (Pulla & Quiñonez, 2018)

g) Cortocircuito

Un cortocircuito es la unión de dos conductores de diferentes voltajes, este puede ser realizado por contacto directo (los conductores se tocan), también, pueden ser por la ruptura del aislante como es en el caso de arcos o fugas que se transforman en cortocircuitos. Los cortocircuitos trifásicos se presentan cuando las tres fases entran en contacto, con caídas de voltaje y un aumento de corriente similar para todas las fases, este tipo de falla no ocurre frecuentemente en los sistemas eléctricos (González J. , 2019).

Las fallas por cortocircuitos como lo indica Rosero (2019) se originan cuando se unen dos o más puntos que son alimentados de la misma fuente, pero con un distinto nivel de voltaje, lo que ocasiona una alta corriente de falla y una caída de voltaje, Para Baura (2011) este tipo de falla da lugar a avalanchas grandes de corrientes y caídas de voltaje en diferentes puntos de la red.

h) Factores que influyen el colapso de voltaje

Los principales factores que se consideran según Bedoya (2016) para tener un colapso de tensión son los que se muestran a continuación:

Tabla 6 Factores para un colapso de voltaje

Factor	Descripción
Carga excesiva en el sistema.	Situaciones en las que la demanda de energía eléctrica es demasiado alta.
Balace de Potencia reactiva.	Demanda excesiva, caída de reactivos excesivos en líneas de transporte, generación insuficiente.
Variación de la carga con el voltaje.	La ley de la variación de la carga con la tensión puede cambiar con el tiempo
Acción de cambiadores de tomas bajo carga.	Si se restituye la tensión del lado de la carga, puede existir la contribución a aumentar la carga, esto es por la ley de la variación Potencia – Voltaje y otros controles lentos (termostatos, etc.) en periodo de baja tensión.
Desempeño de equipos de compensación reactiva.	Es el desempeño de los condensadores, compensadores síncronos, etc., cuando el voltaje es bajo en el sistema.

Fuente: (Bedoya, 2016)

i) Bajo factor de potencia

Un bajo factor de potencia causa sobrecargas en los generadores, transformadores y líneas de distribución dentro de la planta industrial, así como las caídas de voltaje y pérdidas de potencia se tornan mayores, esto sucede cuando se toma corriente reactiva de las líneas de alimentación. Al tener una reducción del factor de potencia, la corriente total de la línea aumenta por la mayor circulación de corriente reactiva que se encuentra circulando (Rosero, 2019).

Cuando el factor de potencia se reduce, la corriente de la línea aumenta por la mayor corriente reactiva que circula, lo que provoca una mayor caída de voltaje a través de la resistencia de la línea, aumentando con la temperatura (Álvarez, 2019).

1.6 Zonas de Voltaje

Para los niveles de voltaje, se dividió en tres zonas de diferentes importancias, estas se clasifican como zona favorable, tolerable y extrema.

Tabla 7 Zonas de Voltaje

Zonas de Voltaje	Descripción
Zona Favorable	Contiene la mayoría de los voltajes de operación. Los sistemas son diseñados para que la mayor parte de los voltajes de operación se encuentren dentro de esa zona,
Zona Tolerable	Incluye voltajes ligeramente por encima y por debajo de la zona favorable. El equipo debe dar operación bastante satisfactoria en toda la zona, las características de operación del equipo pueden no ser buena como las de la zona favorable.
Zona Extrema	No tiene ningún límite de frontera, pero se extiende 2% o 3% por encima o debajo de la zona tolerable, deben ser temporales. Es decir, deben ocurrir durante periodos de emergencia como en condiciones de falla en los que se vuelve necesario transferir cargar.

Fuente: (Robalino, 2016)

Por lo cual, si el voltaje nominal es de 120 voltios, la zona favorable debe ser desde 113 hasta 125 voltios, para la zona tolerable es de 110 hasta 127 voltios (Robalino, 2016).

Las normas técnicas establecen que la máxima caída de voltaje no debe ser superior al 5% de los cuales el 3% se permite para los circuitos derivados y el otro 2% restante se permite al alimentador. El cálculo de las caídas de voltaje se realiza con la siguiente ecuación (Muenala & Pruna, 2017).

Para circuitos monofásicos:

$$AV_{FASE-NEUTRO} = Z_{EF} * 2 * L * I \quad (11)$$

Para circuitos trifásicos:

$$AV_{FASE-FASE} = \sqrt{3} * AV_{FASE-NEUTRO} \quad (12)$$

$$AV_{FASE-NEUTRO} = Z_{EF} * L * I \quad (13)$$

Fuente: (Muenala & Pruna, 2017)

Donde:

AV = Es la caída de voltaje en voltios.

L = Es la longitud del circuito en km.

I = Es la corriente del circuito en A.

Z_{EF} = Es la impedancia eficaz en ohm/km.

CAPITULO II

2 Introducción

En el desarrollo de este capítulo se realiza un análisis sobre el estado en el que se encuentran los alimentadores de la subestación Cayambe mediante el empleo del software CymDist, que se lo aplica para el desarrollo de este capítulo. Además, del programa desarrollado y la forma de manejo para la distribución de carga, flujo de carga y ubicación óptima de reguladores de voltaje para el cumplimiento del Plan Maestro de Electricidad del Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables en lo referente a la calidad del producto que es entregado a los usuarios en lo referente a los niveles de voltaje.

2.1 Descripción de la Subestación Cayambe

Según Andrade (2018) menciona que la subestación Cayambe se extiende en 6 alimentadores primarios que sirven principalmente a las parroquias de Cayambe, Tupigachi y Olmedo (Pesillo), entre otras parroquias; se encuentra conectada en la red más extensa de Emelnorte S.A. en el nivel de subtransmisión; la subestación Cayambe parte desde la bahía 2 de la Subestación Bellavista y esta termina en la subestación de distribución La Esperanza.

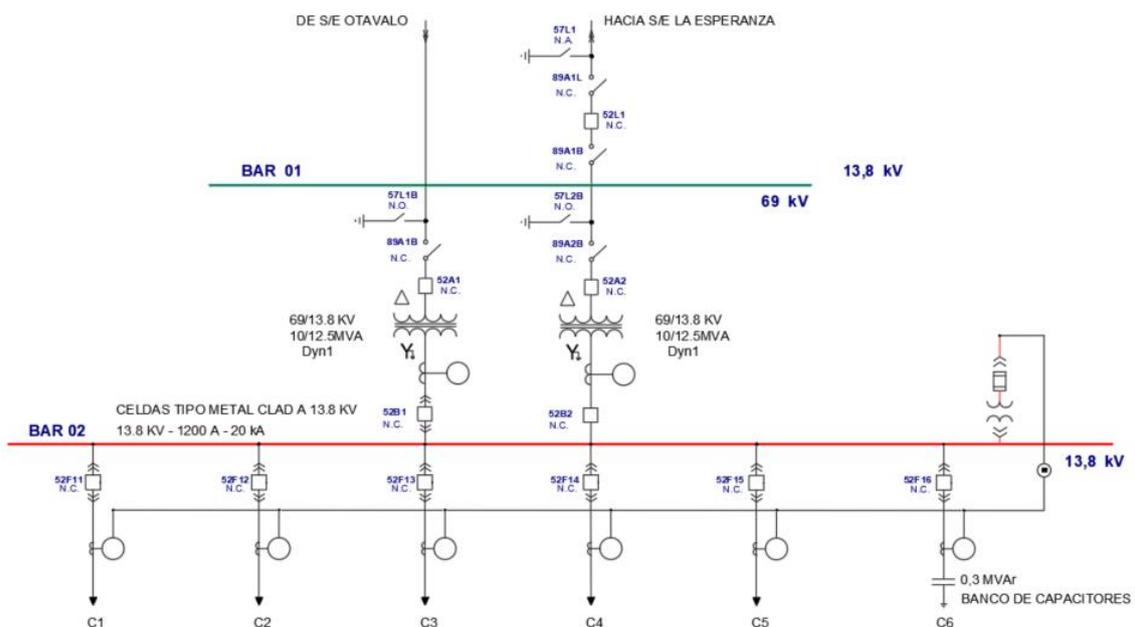


Fig. 4 Diagrama unifilar de la subestación Cayambe

Fuente: Empresa Eléctrica Regional Norte S.A. EMELNORTE

La subestación Cayambe está compuesta por 2 transformadores conectados en paralelo de potencia de 10/12,5 MVA (ONAN/ONAF), de donde se derivan los 6 alimentadores, teniendo una capacidad total de 20/25 MVA, en donde para el año 2018 la demanda de la subestación estuvo alrededor de los 16 MVA, además de la presencia de los transformadores de potencia, equipos de maniobra, control y protección, la subestación cuenta con un banco de capacitores de 3 MVAr conectados a la barra de 13,8 kV para elevar el voltaje en ese punto por la conexión en serie de diversas subestaciones; la distancia entre la subestación Cayambe y la subestación Ibarra es de 51,2 km por la panamericana norte (Andrade Suárez, 2018) (Solano, 2013).

2.2 Alimentadores primarios

Desde la subestación Cayambe que se encuentra ubicada entre la calle Mariano de Jesús y la Troncal Sierra (E35), se derivan 6 alimentadores, cada uno de estos alimentadores se encuentra identificados por una codificación y nomenclatura que maneja la empresa Emelnorte S.A.

Tabla 8 Identificación de alimentadores primarios de la Subestación Cayambe

Alimentadores	Nomenclatura	Codificación
Alimentador 1	ALIM-CAYAMBE 1	1300020T01
Alimentador 2	ALIM-CAYAMBE 2	1300020T02
Alimentador 3	ALIM-CAYAMBE 3	1300020T03
Alimentador 4	ALIM-CAYAMBE 4	1300020T21
Alimentador 5	ALIM-CAYAMBE 5	1300020T22
Alimentador 6	ALIM-CAYAMBE 6	1300020T23

Fuente: Empresa Eléctrica Regional Norte S.A.

2.3 Metodología

Para la realización de un análisis del estado en el que se encuentran los alimentadores, se considera el historial de un (1) año de cada uno de los seis alimentadores que se encuentran en la subestación Cayambe, en donde con el software CymDist se realizara la simulación de flujos de carga partiendo de un conocimiento sobre la codificación de cada uno de estos como se encuentra explicado en la tabla anterior.

Con el historial que se dispone para realizar la distribución de carga y percatarse de cuál es el factor de mayor incidencia en las caídas de voltaje, por lo que en el historial se procede a seleccionar la demanda máxima, media y mínima que existió en dicho mes como se muestra en la siguiente figura donde se observa las mediciones del mes de enero del alimentador 1.

	A	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1				Energía	Dmax	Dprom	FC						
2				1064472.40	2300.96	1438.55	0.625194						
3				1064.4724	2.300961		0.625194						
4													
5													
6	Local Time	kVARh d	kVARh r	kWh del	kWh del	kWh rec	I avg	kVAR tot	kW tot	PF sign t	Vln a	Vln b	Vln c
2466	2019-ene-09 12:55:00.000	41.3742	0	9930053	140.7161	0	79.16342	513.4183	1711.947	-95.7852	7581.541	7629.174	7575.9
2467	2019-ene-09 13:00:00.000	42.14417	0	9930197	143.1119	0	78.60044	492.8557	1703.649	-96.061	7579.824	7628.237	7573.787
2468	2019-ene-09 13:05:00.000	41.80254	0	9930339	142.5786	0	77.23128	499.5227	1672.722	-95.8187	7594.983	7635.521	7582.032
2469	2019-ene-09 13:10:00.000	40.55095	0	9930478	138.8708	0	75.83969	463.6703	1650.497	-96.2732	7596.829	7649.247	7592
2470	2019-ene-09 13:15:00.000	40.0094	0	9930617	139.2041	0	77.97642	464.5317	1696.754	-96.4506	7576.605	7627.452	7567.786
2471	2019-ene-09 13:20:00.000	44.29635	0	9939656	180.7035	0	90.30308	504.8278	2065.41	-97.1404	7959.09	7995.392	7956.271
2472	2019-ene-09 13:25:00.000	42.5789	0	9939831	174.5294	0	93.61662	517.4392	2134.084	-97.1841	7931.015	7970.164	7908.851
2473	2019-ene-09 13:30:00.000	42.68027	0	9940011	180.1234	0	96.93411	512.8704	2204.949	-97.3999	7887.312	7934.081	7878.386
2474	2019-ene-09 13:35:00.000	40.9791	0	9940196	184.6035	0	99.00031	479.1421	2242.441	-97.7926	7818.346	7871.83	7802.237
2475	2019-ene-09 13:40:00.000	38.12423	0	9940383	187.2103	0	100.6695	467.1256	2275.935	-97.958	7789.882	7839.993	7774.82
2476	2019-ene-09 13:45:00.000	37.01466	0	9940573	189.9556	0	101.403	444.6591	2300.961	-98.1835	7793.322	7859.222	7783.246
2477	2019-ene-09 13:50:00.000	38.12115	0	9940765	191.711	0	98.72436	430.6228	2244.392	-98.2087	7813.818	7876.163	7808.679
2478	2019-ene-09 13:55:00.000	38.34014	0	9931718	135.0201	0	74.37695	449.941	1617.34	-96.3413	7599.214	7639.389	7584.261
2479	2019-ene-09 14:00:00.000	39.68279	0	9931855	136.9865	0	75.63506	494.5435	1639.558	-95.7395	7615.138	7662.109	7603.009
2480	2019-ene-09 14:05:00.000	41.01265	0	9931992	137.084	0	79.51614	506.9045	1721.187	-95.9264	7580.824	7629.526	7576.273
2481	2019-ene-09 14:10:00.000	41.311	0	9932134	142.7026	0	78.2077	503.2187	1689.313	-95.8383	7574.574	7619.063	7569.137
2482	2019-ene-09 14:15:00.000	42.61264	0	9932278	143.2371	0	78.84353	507.5817	1701.185	-95.8255	7572.711	7614.904	7554.465
2483	2019-ene-09 14:20:00.000	36.14539	0	9941886	188.6069	0	99.29394	451.7392	2251.342	-98.0457	7794.435	7852.593	7792.865
2484	2019-ene-09 14:25:00.000	36.93545	0	9942071	184.459	0	96.23943	443.3977	2180.06	-97.9937	7791.874	7847.894	7791.532

Fig. 5 Demanda máxima mensual del alimentador

Fuente: Empresa Eléctrica Regional Norte S.A. – Departamento de Calidad de Energía y Estudios Eléctricos

De la misma manera para realizar la simulación se considera los parámetros principales en condiciones de demanda máxima, media y mínima de cada alimentador, los datos de las tres líneas que se emplearán en el software son los siguientes:

- Demanda máxima (kW)
- Voltaje
- Corriente
- Factor de potencia

Con las condiciones establecidas en el simulador se realizará un flujo de carga para entender en qué estado se encuentra cada uno de los alimentadores:

- Factor de Carga p.u.
- Factor de pérdidas p.u.
- Perdidas en redes de MT (conductor, cable, hierro y cobre)

2.3.1 Módulo de distribución de carga CymDist

En el programa CymDist se permite la modelación de la red eléctrica a nivel nacional que se encuentra comprendida por: la carga, la red eléctrica y una fuente como se muestra a continuación.

- **Equivalente de la fuente:** Se ingresan los datos del alimentador primario, los cuales se obtienen de las mediciones que realiza la empresa distribuidora de energía eléctrica en donde el ingreso de datos depende de los estudios que se vayan a realizar en dicho caso se entiende que el programa no necesita ingresar todos los datos para la obtención de los resultados que se solicitan (Andrade Suárez, 2018).

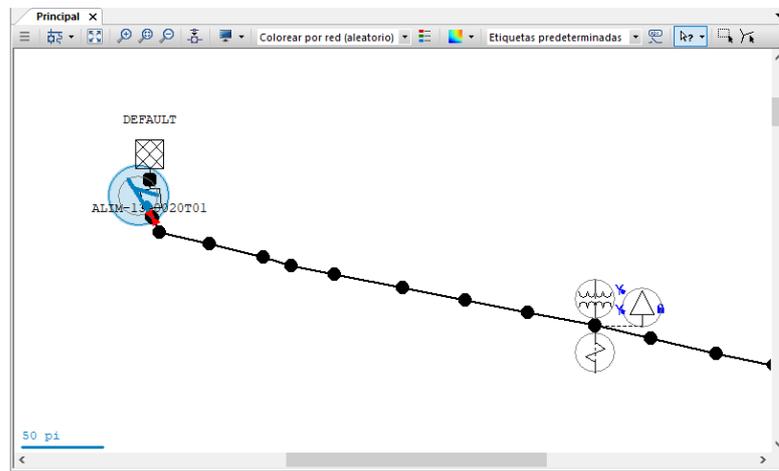


Fig. 6 Modelo de alimentador primario de Alimentador de la subestación Cayambe

- **Red eléctrica:** Es el elemento principal del programa para la realización de las diversas simulaciones que permite este programa, aquí se encuentra detallado el calibre, tipo de conductor en cada uno de los tramos que se encuentran alimentados por los alimentadores primarios, además se puede observar los equipos que se han instalado

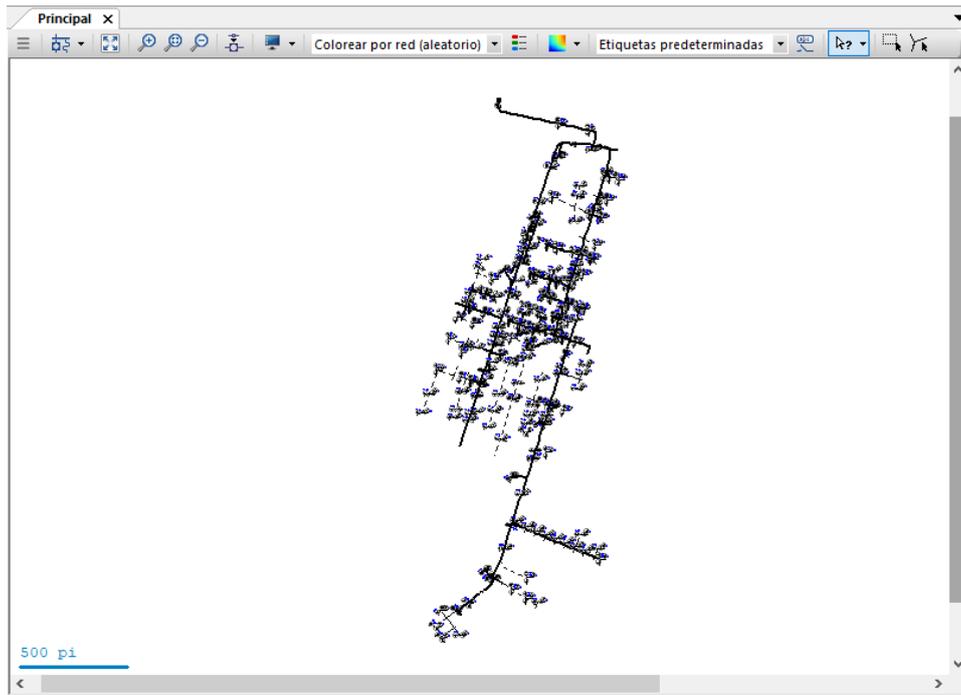


Fig. 7 Red de distribución eléctrica del alimentador 1

Como se ve en la figura anterior, la red de distribución eléctrica del alimentador comprende una amplia distribución en donde el Equivalente de la Fuente está conectado a todas las cargas a lo largo del circuito.

- **Carga:** En CymDist la modelación de redes de bajo voltaje, de carga cliente por cliente es representada por medio de un transformador de distribución y una carga concentrada.

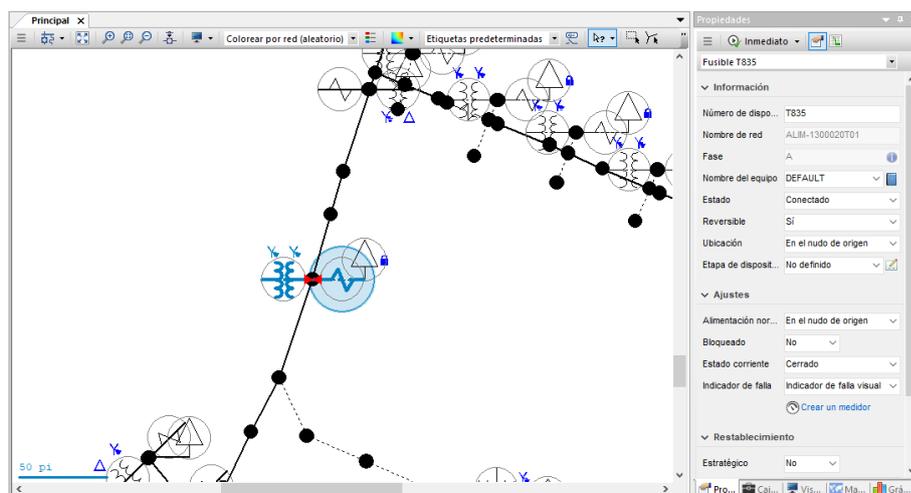


Fig. 8 Carga concentrada en la red eléctrica de CymDist

Para revisar los datos de la red del alimentador de la subestación, en la parte inferior izquierda se escoge la opción de explorador para tener mayor información sobre el alimentador del que se va a realizar las simulaciones.

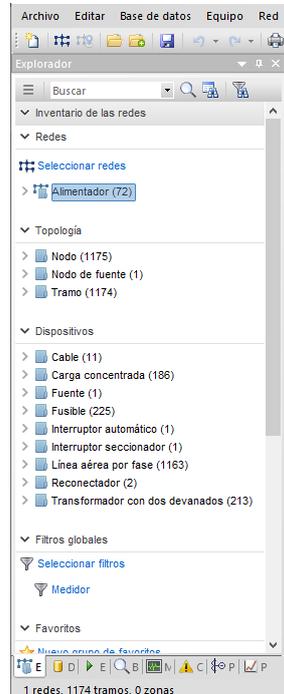


Fig. 9 Inventario de las redes

Datos del alimentador: Para introducir los datos que se tiene del historial entregado por parte de la empresa distribuidora de energía, se selecciona en la parte inicial donde dice “**Alimentador**”, con doble clic para poder conocer las propiedades de la red, en la parte de Fuente, se observa los datos de voltaje, las coordenadas en donde se encuentra; en Tipo de Fuente se puede seleccionar los datos que se emplearán en las simulaciones correspondientes, por lo cual, al ser de un historial los datos son ingresados por el usuario, para la procedencia de colocación de cada uno valores que se muestran en la demanda máxima, media y mínima de potencia.

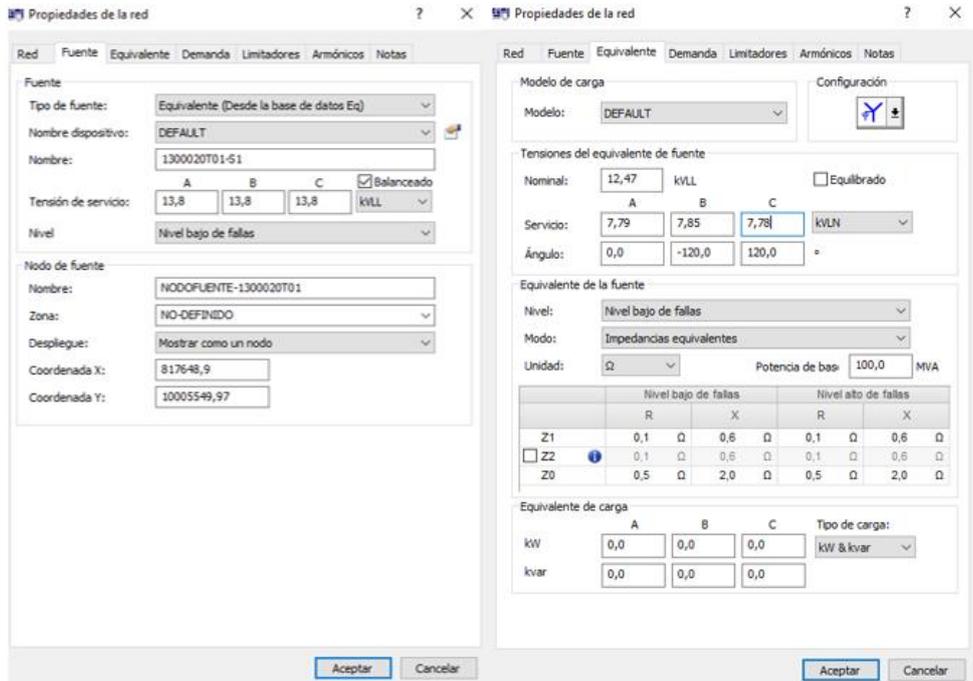


Fig. 10 Datos de la demanda del alimentador por el usuario

Para conocer la demanda se debe colocar en el tipo de parámetros que vamos a ver por las fases, la corriente y el factor de potencia, esto se puede obtener del historial de datos que se tiene de las subestaciones de cada alimentador.

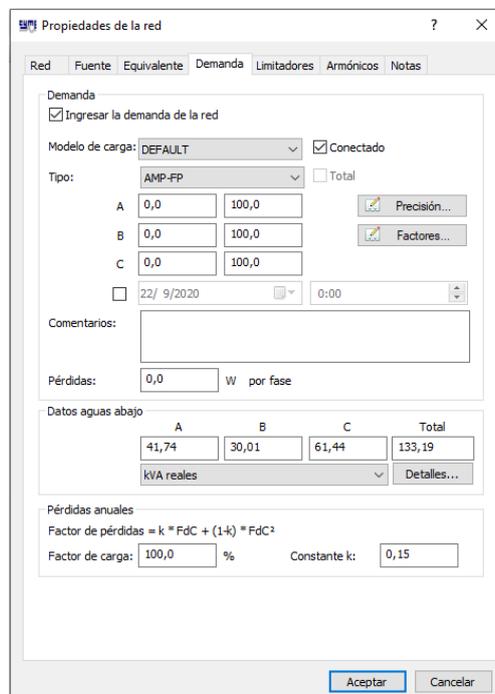


Fig. 11 Demanda de los alimentadores de una subestación

Una vez registrados los valores de voltaje, corriente, factor de potencia que son componentes necesarios para realizar el análisis y conocer el estado en el que se encuentran los alimentadores de la subestación Cayambe; todo corresponde a los valores en del día en que se obtuvo cada una de las demandas, que son los valores referentes para realizar el corrido de flujo de carga.

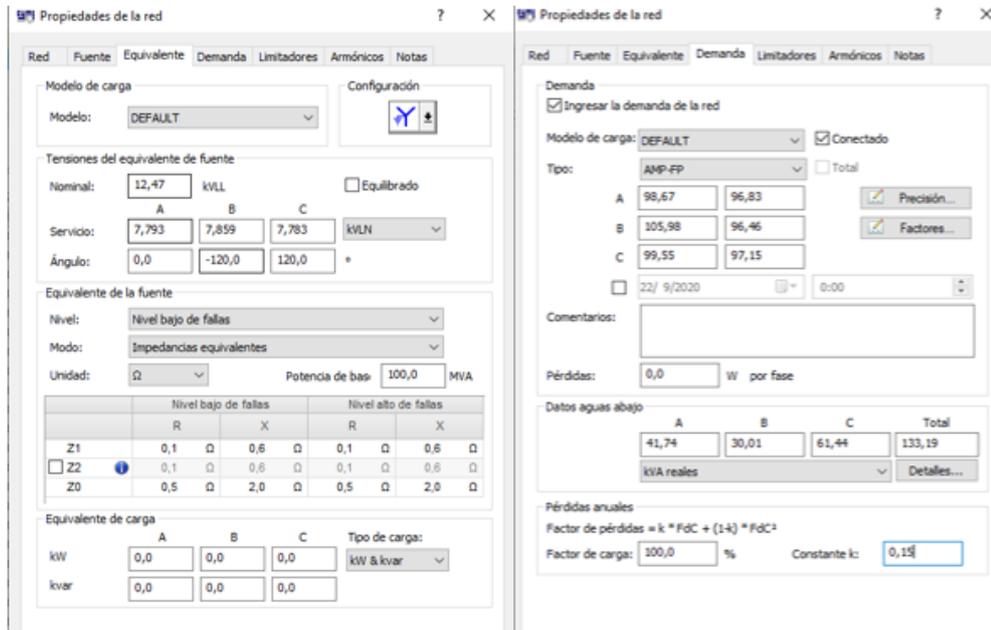


Fig. 12 Datos de la demanda máxima del alimentador

Con los datos establecidos en cada uno de los parámetros se acepta lo establecido para el alimentador y se procede a escoger el tipo de reporte que se va a realizar, para saber el estado en el que se encuentra el alimentador y cuál es el factor de mayor influencia en las caídas de voltaje que presenta la subestación se escoge la opción Flujo de carga – Reporte sumario.

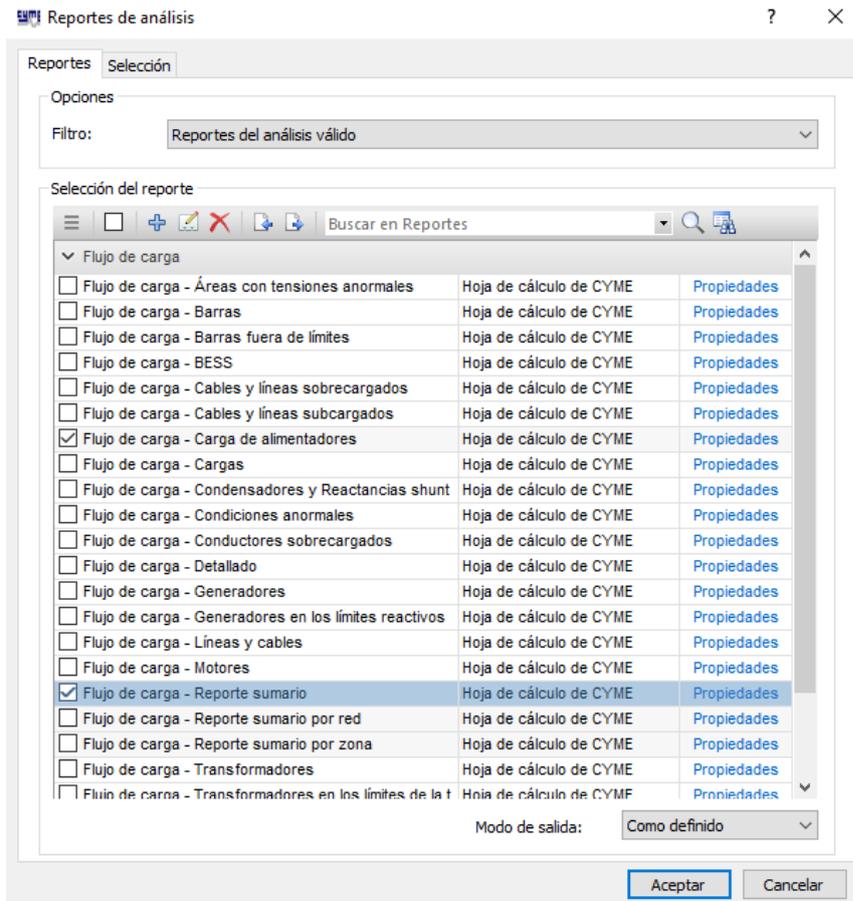


Fig. 13 Reportes de flujos de carga para diferentes análisis.

2.3.2 Flujo de carga

El flujo de carga permite analizar el comportamiento de la red de distribución en varias condiciones para el diseño, planeamiento, en donde se permite configurar las diferentes condiciones de operación como son: parámetros, las redes, comandos, límites de carga, límites de voltaje y la salida; dentro del método de cálculo se lo puede realizar por caída de voltaje equilibrada o desequilibrada, entre otras para realizar métodos iterativos (Newton Raphson).

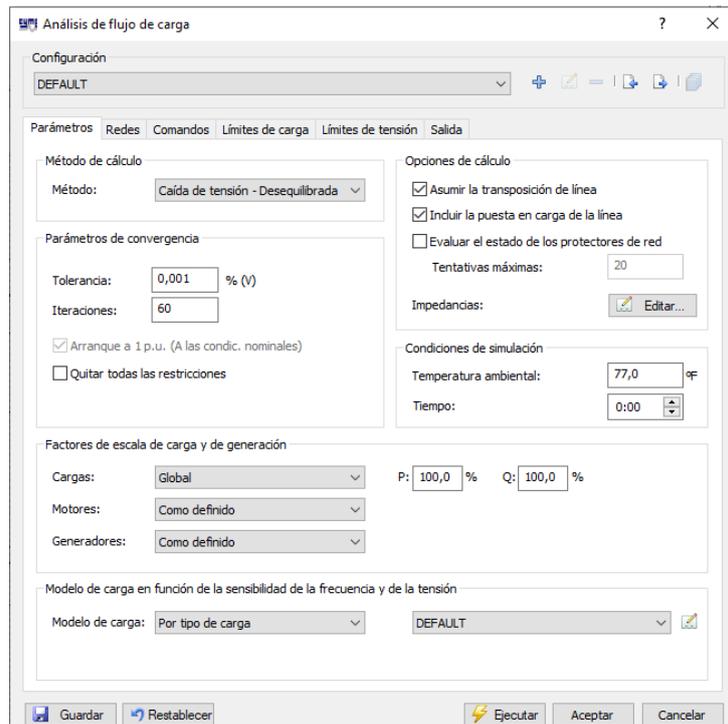


Fig. 14 Análisis de flujo de carga

Mediante el análisis de flujo de carga podemos conocer el estado verificando en el reporte sumario los resultados que se muestran en condiciones anormales (sobrecarga, sobrevoltaje, subvoltaje) en cada una de las fases del alimentador de las redes de distribución de energía eléctrica.

2.3.3 Módulo de ubicación óptima de reguladores de voltaje

Por parte de la empresa CYME se presenta de una forma compleja al hablar sobre el problema a las empresas distribuidoras, por lo cual es una herramienta indispensable para tener una regulación y control del voltaje en los alimentadores primarios de la subestación; este software sugiere las ubicaciones óptimas en el lugar que se deben instalar los reguladores en donde el objetivo principal es aplanar el perfil de voltaje en cada uno de los alimentadores, minimizando las caídas de voltaje para el cumplimiento de la regulación de la ARCONEL $\pm 6\%$ en las redes de MV.

Tabla 9 Cálculos para la ubicación de reguladores de voltaje

Ubicación Óptima de Reguladores de Voltaje	Descripción	
Cálculos Robustos	El módulo CYME proporciona una técnica de optimización para permitir:	Aplanar el perfil de voltaje y reducir lo menor posible las condiciones anormales. Reducir al mínimo las pérdidas de potencia activa.
	Se proporciona dos algoritmos:	Búsqueda secuencial – encontrar la ubicación una a la vez de cada regulador Búsqueda iterativa – análisis donde se evalúa cada tramo para su ubicación.

Fuente: (EATON Powering Business Worldwide, CYME Programas de análisis de redes eléctricas, 2018a).

Para la instalación de los reguladores de voltaje, se presentan varias opciones que son definibles por el usuario:

Tabla 10 Características de instalación de reguladores de voltaje

Características	
Disposiciones definibles por el usuario	Instalación de uno o más reguladores de voltaje a la vez.
	Instalar diferentes equipos al mismo tiempo.
	Especificación de una distancia de búsqueda para considerar la posibilidad de agregar el regulador.
	Incluir los reguladores existentes en la red o ignorarlos.
	Definición de los ajustes del control de los reguladores de voltaje.
	Restricciones definidas por el usuario como un margen de límites, donde se ignora los tramos.
	Evaluación aguas debajo del alimentador y los tramos o nodos específicos.

Fuente: (EATON Powering Business Worldwide, CYME Programas de análisis de redes eléctricas, 2018a).

En el módulo de la ubicación óptima de reguladores de voltaje se enfoca en los algoritmos robustos donde los criterios son definidos por el usuario, en donde se pueda visualizar que las caídas de voltaje se encuentran dentro de los límites establecidos.

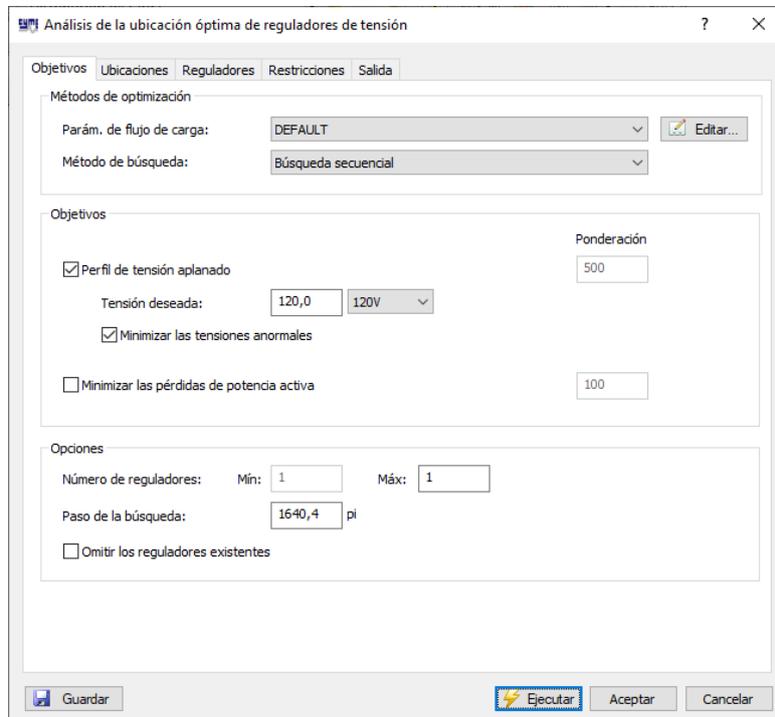


Fig. 15 Módulo de ubicación óptima de reguladores de voltaje

Dentro de los objetivos para el análisis se establece los métodos a emplear y el valor que considera el perfil de voltaje aplanado que se solicita, además, de minimizar los voltajes anormales.

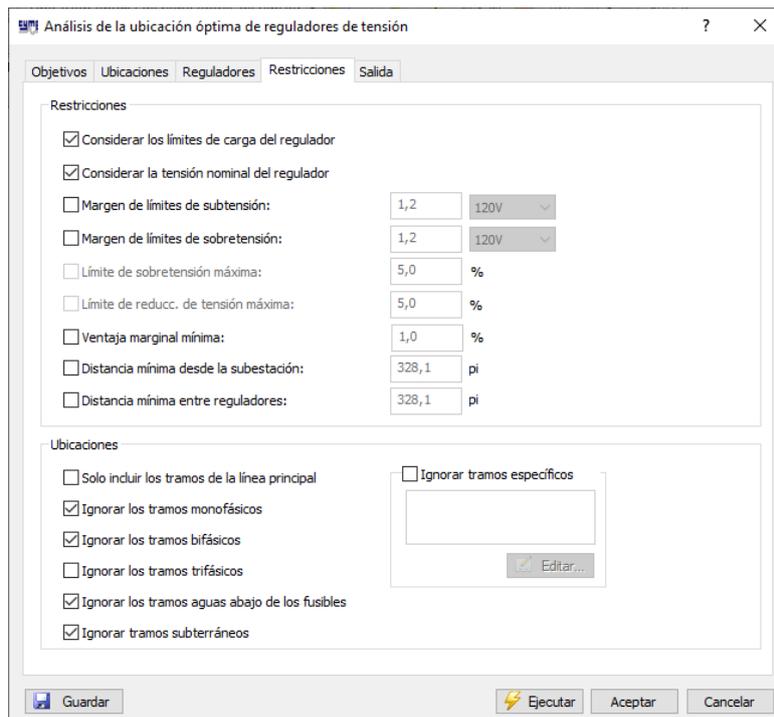


Fig. 16 Restricciones de la ubicación de reguladores de voltaje

Las restricciones en la ubicación óptima de reguladores permiten la limitación de las zonas de búsqueda, donde un punto importante es minimizar los valores de sobrevoltaje y subvoltaje cada una de las fases que se ven en el resultado de las condiciones anormales.

2.4 Método de caída de tensión – desequilibrada

En las simulaciones con CymDist dentro de los análisis para planificación, diseño y operación de cualquier sistema donde EATON Powering Business Worldwide (2018b) señala que se utiliza el siguiente método:

- **Caída de tensión balanceada y desbalanceada:** es una técnica iterativa que es diseñada, optimizada para sistemas radiales y ligeramente mallados, el cual incluye un algoritmo para las redes trifásicas desbalanceadas que calcula los voltajes de fase

Los resultados incluyen el voltaje, corriente, factor de potencia, pérdidas, anormales y factores desequilibrados, que pueden ser vistos en todo el sistema o en ubicaciones individuales.

2.5 Comportamiento del sistema eléctrico CymDist

El software CymDist permite el modelado detallado y la simulación de cualquier red de distribución, además de ser una serie robusta y completa de herramientas de simulación que se ha convertido en una herramienta precisa y poderosa de gran confiabilidad (Chumbi & Verdugo, 2013), además es un programa de análisis de redes de distribución, el cual tiene como objetivo realizar estudios de planeación y simulación del comportamiento de las redes de distribución bajo diversas condiciones en las que debían operar y de igual forma en diferentes escenarios (Gómez & Juca, 2017). También se utiliza para modelar sistemas de distribución y abordar las necesidades de la simulación para los análisis de capacidad, contingencia, calidad de energía y optimización (EATON Powering Business Worldwide, EATON Powering Business Worldwide, 2018b).

El sistema de estudio en el presente caso tiene un nivel de voltaje de 13,8 kV en el primario (Medio Voltaje), que se modela desde la fuente hasta los transformadores de distribución. Las subestaciones de potencia se modelan por medio de una fuente y las variables que son requeridas y que pueden ser editadas como son: el voltaje, capacidad nominal, uno de los puntos más importantes son las lecturas de los alimentadores: kV, kW, kVAR y factor de carga (Fcarga) (Coello, 2016).

El módulo cumple con las funciones de análisis de flujo de carga, cortocircuito, optimización de la configuración eléctrica. Donde su objetivo es el análisis del desempeño en el régimen permanente del sistema de potencia bajo diversas condiciones de funcionamiento. Los módulos y funciones complementarias del software CymDist permiten tener un análisis más especializado como los de confiabilidad, contingencia de armónicos, optimización de la configuración del sistema eléctrico en el que se sugiere la reducción de pérdidas que se presenten (Moreno, 2016).

Según Coello (2016), Zhungur y Calva (2014), señalan que los elementos a tomar en cuenta en la red de Medio Voltaje son:

- Subestación de Potencia (Fuente)
- Lecturas de cada circuito en la subestación
- Tramos aéreos y subterráneos
- Espaciamiento de conductores, en cada circuito

- Transformadores de distribución
- Carga

Para los parámetros y variables del sistema de estudio se verifica con los datos que se ingresan en la modelación digital del sistema, como son la frecuencia de operación, voltaje base, potencia base, etc.

Creación de la base de datos: En esta parte se crea la base de datos conocida como Red y equipos, aquí consta las subestaciones que opera la empresa distribuidora con sus respectivos alimentadores primarios. Una vez concluido con la creación de la base, se realiza el modelo digital del sistema primario en donde se requiere ingresar en el CymDist (Coello, 2016):

- Subestaciones
- Conductores
- Espaciamento de conductores: Importante para la determinación de la reactancia inductiva de la línea.
- Propiedades del tramo
- Carga
- Simulación de la red de MT

Dentro de la simulación de las redes de medio voltaje se consideran una secuencia para la simulación de los circuitos primarios como se muestra en la tabla a continuación:

Tabla 11 Secuencia para modelación en CymDist

Secuencias	Descripción
Distribución de carga	Esta evaluación se considera en las lecturas de un año consecutivo, se toma los máximos valores que se recopilan mensualmente, en intervalos de demanda de 15 minutos en una hoja de Excel. Donde estos parámetros son los necesarios para poder editar en la fuente y tener la configuración del alimentador primario.
Flujo de Carga de los alimentadores Primarios	Flujo de redes trifásicas equilibradas: se usa el método de cálculo de Caída de tensión – Equilibrada. Se ejecuta con la carga de cada tramo donde se asume que es igual cada fase. Permite calcular los voltajes en los nodos, corrientes, flujos y pérdidas de potencia en secciones y el circuito.
	Flujo de redes por fase: Se trata de ramales monofásicos, usa el método de cálculo de Caída de tensión – Desequilibrado basado en iteraciones de corrientes. Calcula los voltajes en los nodos por fase, corrientes, flujos y perdidas de potencia.
Reportes de la modelación	Aquí se presenta el reporte de los cálculos donde en un cuadro se presentan los reportes específicos de cada aplicación, por ejemplo: Flujo de Carga – Reporte sumario por red, Carga - Alimentadores, etc.

Fuente: (Coello, 2016)

Para una modelación se considera principalmente la secuencia que se muestra en la tabla anterior para empezar las simulaciones y visualizar los datos que se van a obtener cuando se ingresaron los datos de los alimentadores o cualquier medición que se desee ver.

2.6 Reguladores de voltaje en CymDist

Según Moreno (2016), los reguladores de voltaje son autotransformadores que ajustan los TAP automáticamente, comúnmente proveen un rango de $\pm 10\%$ con 32 pasos, cada paso es $5/8\%$, el cual es 0.75 voltios a una escala de 120 voltios.

La ubicación de los reguladores de voltaje no es una tarea fácil, debido al momento de escoger el lugar de ubicación, donde fijar la posición de la toma y el número requerido hasta que la solución muestre ahorros en costos de energía o un perfil de voltaje que cumpla con los límites y tener un control del voltaje eficientemente (EATON Powering Business Worldwide, CYME Programas de análisis de redes eléctricas, 2018a).

2.7 Comportamiento de alimentadores de la Subestación Cayambe

En el comportamiento de un alimentador se realizó las simulaciones en demanda máxima media y mínima de cada alimentador.

2.7.1 Alimentadores subestación Cayambe

En la subestación Cayambe se derivan 6 alimentadores primarios de los cuales la Empresa Eléctrica Regional Norte tiene un historial de mediciones de cada uno de los años en donde se ve reflejada los datos en un periodo de 5 minutos para cada una de las mediciones mensuales. Los datos obtenidos de cada una de las simulaciones se ven reflejados en los problemas en el flujo de carga – reporte sumario en donde se puede observar el resumen total, las condiciones anormales entre otros.

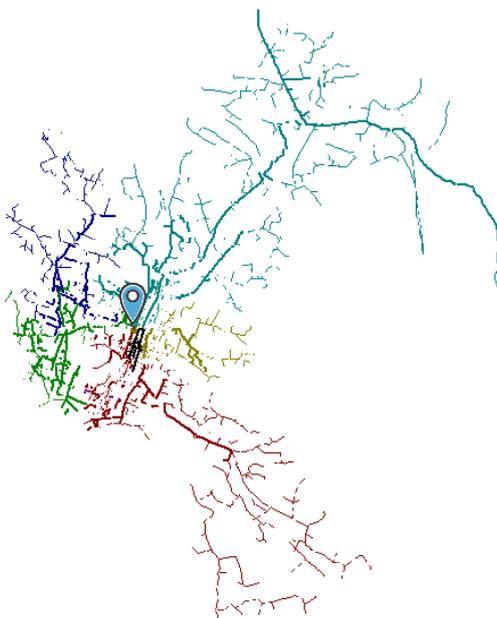


Fig. 17 Alimentadores de la subestación Cayambe

Para tomar en cuenta la ubicación óptima de reguladores de voltaje en cada uno de los alimentadores de la subestación Cayambe se procede a realizar un análisis en demanda máxima, media y mínima, sabiendo los valores de sobrecarga, sobrevoltaje y subvoltaje que se obtendrán de la distribución de carga de cada uno de los alimentadores.



Fig. 18 Parámetros en distribución de carga

2.7.2 Distribución de carga del Alimentador 1

El valor de subvoltaje en demanda media es elevado, por lo cual el alimentador 1 no tiene niveles de voltaje por debajo de los límites establecidos por la ARCONEL.

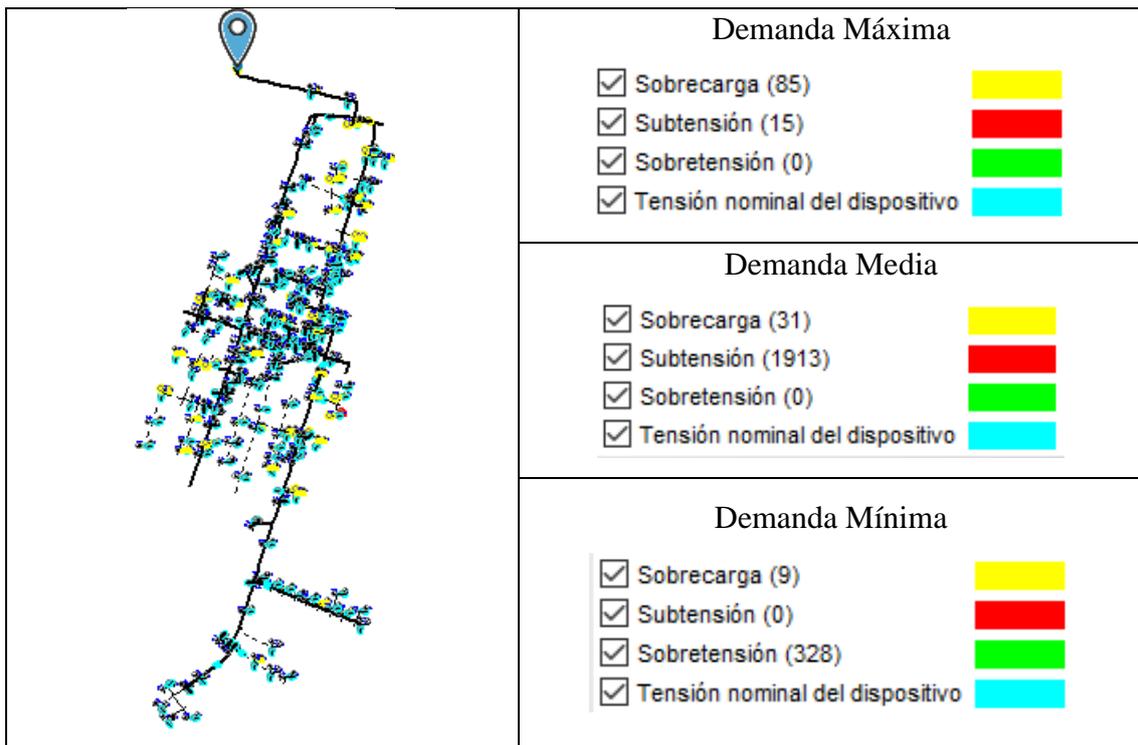


Fig. 19 Comportamiento del alimentador 1

2.7.3 Distribución de carga del Alimentador 2

El alimentador 2 al ser uno de los más extensos presenta valores elevados de subvoltaje en demanda máxima y media.

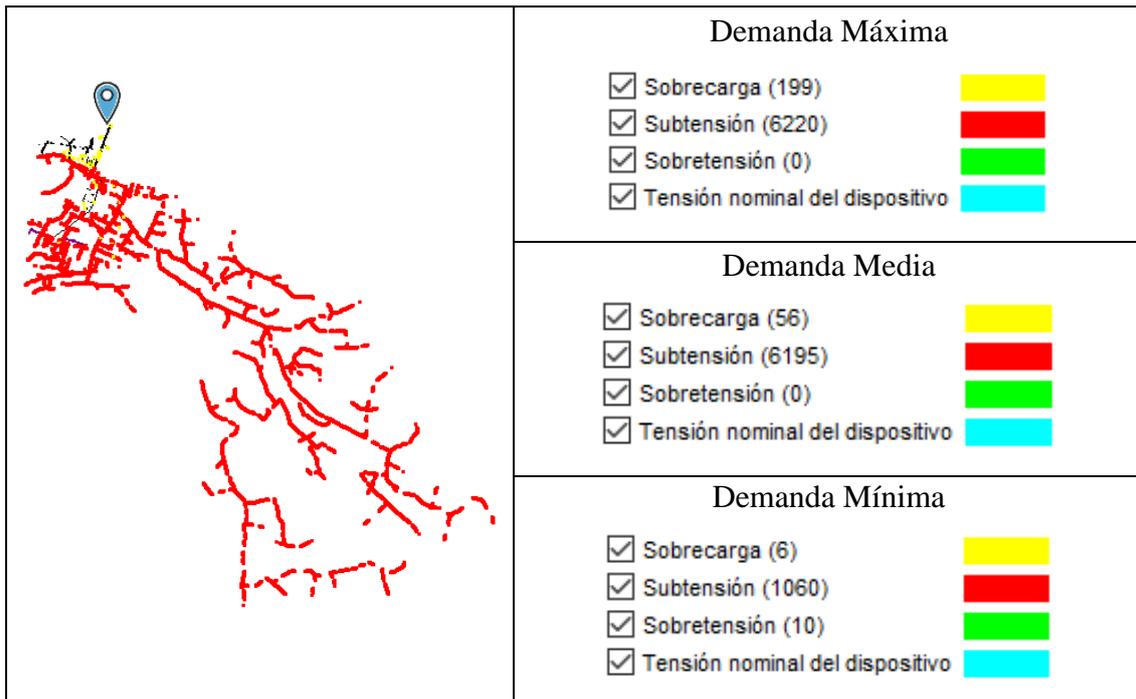


Fig. 20 Comportamiento del alimentador 2

2.7.4 Distribución de carga del Alimentador 3

El alimentador 3 presenta problemas de subvoltaje elevados considerando que tiene instalado reguladores de voltaje de bobina múltiple electrónico de 200 kVA/fase.

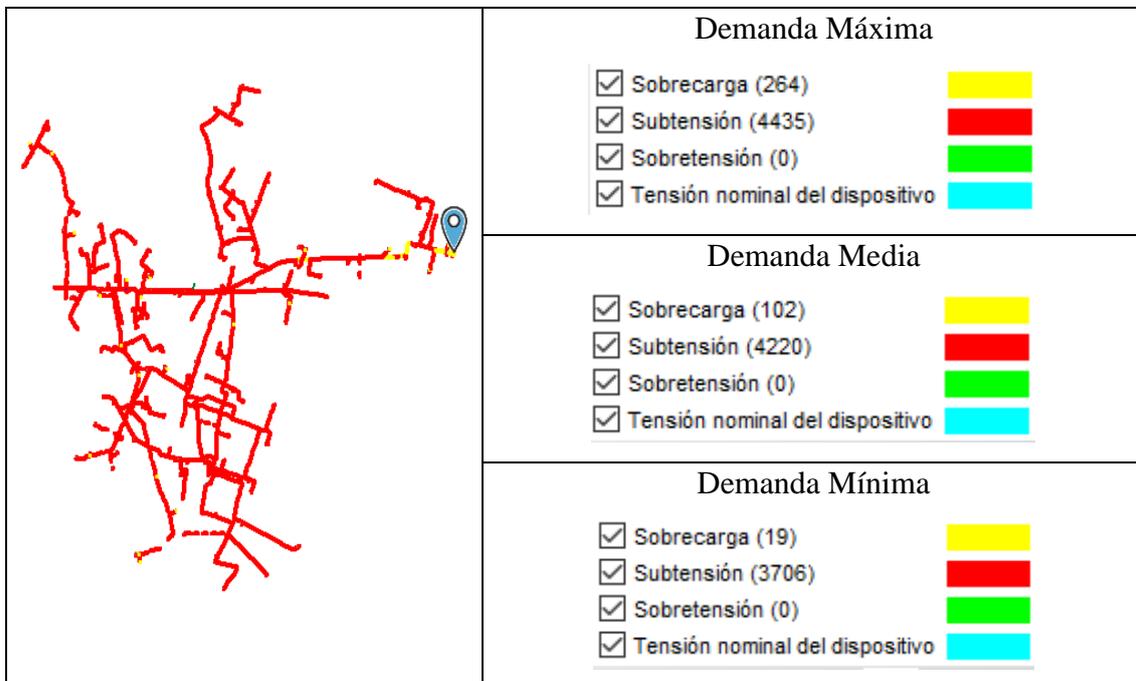


Fig. 21 Comportamiento del alimentador 3

2.7.5 Distribución de carga del Alimentador 4

El alimentador 4 tiene niveles de subvoltaje elevados, además, de tener instalados reguladores de voltaje incumple con los niveles de voltaje.

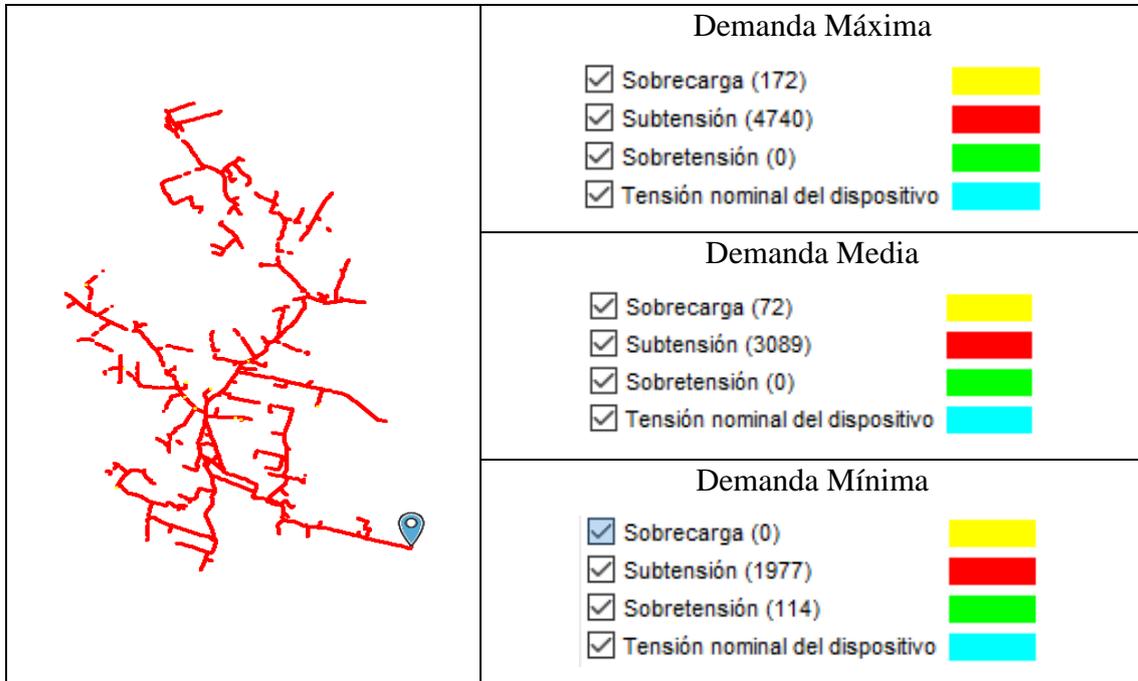


Fig. 22 Comportamiento del alimentador 4

2.7.6 Distribución de carga del Alimentador 5

El alimentador 5 en demanda máxima, media y mínima no presentan altos valores de subvoltaje, sobrevoltaje y sobrecarga, por lo cual el alimentador se encuentra en un buen estado y cumpliendo con lo mencionado en la regulación de la ARCONEL.

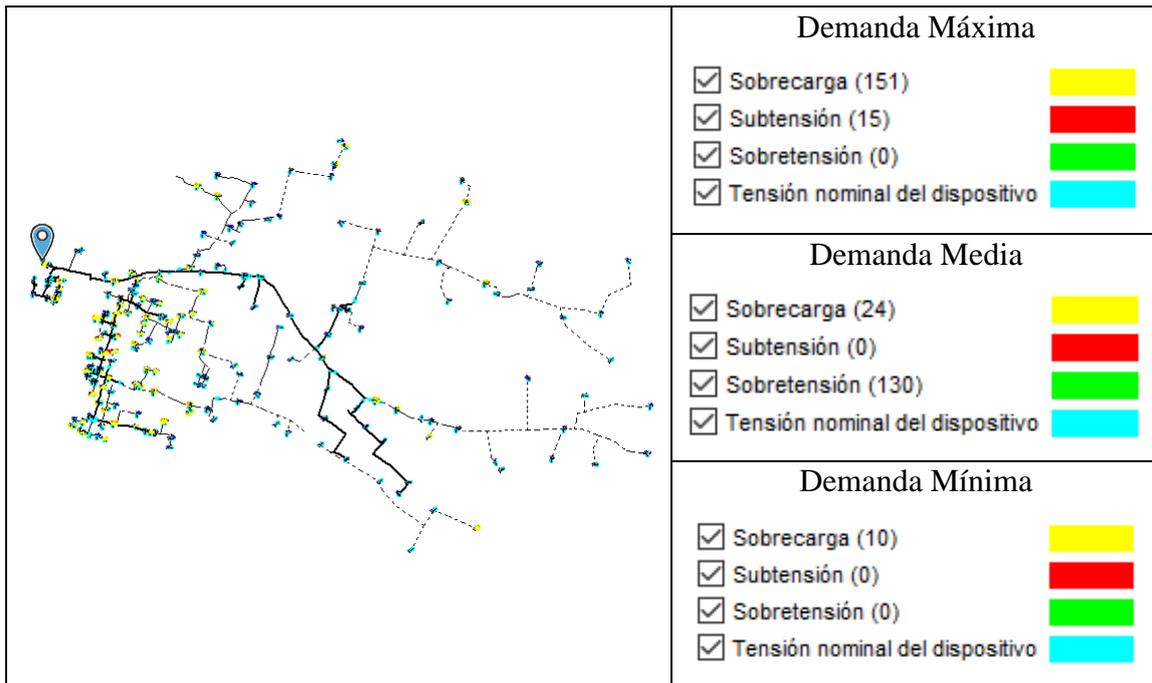


Fig. 23 Comportamiento del alimentador 5

2.7.7 Distribución de carga del Alimentador 6

El alimentador 6 es el último de la subestación Cayambe, es igualmente uno de los más grandes por lo cual el nivel de subvoltaje que presenta es elevado en la troncal principal.

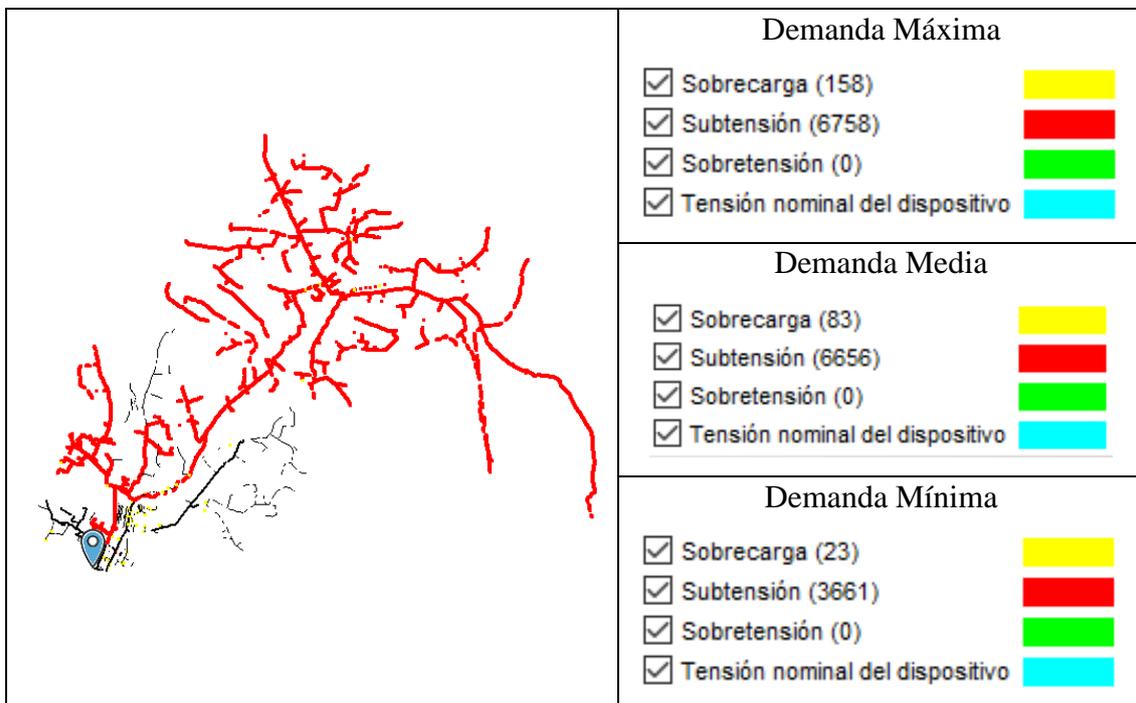


Fig. 24 Comportamiento del alimentador 6

2.8 Criterio técnico

Para el análisis de los alimentadores de la subestación Cayambe la distribución de carga en cada uno de los alimentadores a las diferentes demandas, se presenta caídas de voltaje desde la cabecera, esto se debe a la distancia que existe entre la subestación Ibarra (69kV / 13,8 kV) y la subestación Cayambe (13,8kV / 7,9 kV), por lo cual, la Empresa Eléctrica Regional Norte en las distribuciones de carga se analiza mediante el software CymDist, presentan niveles elevados de subvoltaje en su troncal principal del circuito incluyendo a las cargas que se encuentran conectadas, de igual forma otro factor de alta influencia es la distancia de cada uno de los distintos alimentadores; como se menciona en la regulación de la ARCONEL 005/18 donde se indica que el valor de caída de voltaje para MV es de $\pm 6\%$, de lo cual en la calidad del producto la empresa distribuidora con las señales de voltaje se encuentra incumpliendo, por ende el bajo voltaje afecta el rendimiento de las máquinas en varias industrias.

CAPÍTULO III

3 Introducción

La ubicación óptima de reguladores de voltaje para el cumplimiento de los límites establecidos por el ente regulador, son un elemento esencial en la parte de distribución, donde una de las soluciones es la instalación de reguladores de voltaje para el mejoramiento de la calidad de energía en la red de distribución.

De igual forma es una de las soluciones que comúnmente se aplican, por lo cual, para las Empresas Distribuidoras uno de los objetivos es entregar a sus clientes un nivel de voltaje que cumpla con los límites que se encuentran establecidos.

3.1 Ubicación óptima de reguladores de voltaje.

Los reguladores de voltaje se encuentran ubicados en la troncal principal de cada uno de los alimentadores, el tipo de búsqueda se escogió de manera iterativa (evalúa cada tramo de ubicación posible); el regulador de voltaje en el software CymDist está cargado como REG_MP_A1, donde su funcionamiento es de modo invertido bidireccional (comportamiento de flujo en dos direcciones), evitando que el regulador se bloquee por las variaciones del voltaje. Para verificar con el cumplimiento del regulador de voltaje en la troncal principal se debe reducir en gran parte los niveles de subvoltaje, si la ubicación no reduce en mayor parte el subvoltaje o sobrevoltaje, se analiza el nodo más crítico del tramo en el cual no se mejora el nivel de voltaje para proceder a la instalación y simulación mediante un flujo de carga.

3.2 Perfiles de voltaje de los alimentadores

El perfil de voltaje de cada uno de los alimentadores se encuentra transformados en valores en por unidad, donde el valor de uno (1) representa los 13,8 kV. Cada uno de los perfiles de voltaje con o sin reguladores de voltaje muestran de mejor forma los niveles de voltaje en por unidad, para comprobar si esta en el rango máximo y mínimo que establece la ARCONEL.

3.2.1 Alimentador 1 (ALIM – CAYAMBE 1)

Una vez realizado la distribución de carga en el alimentador mediante la opción de Gráficos se observar el perfil de voltaje en el que se encuentra los límites establecidos por la regulación de la ARCONEL 005/18, donde el estudio se realiza a demanda máxima.

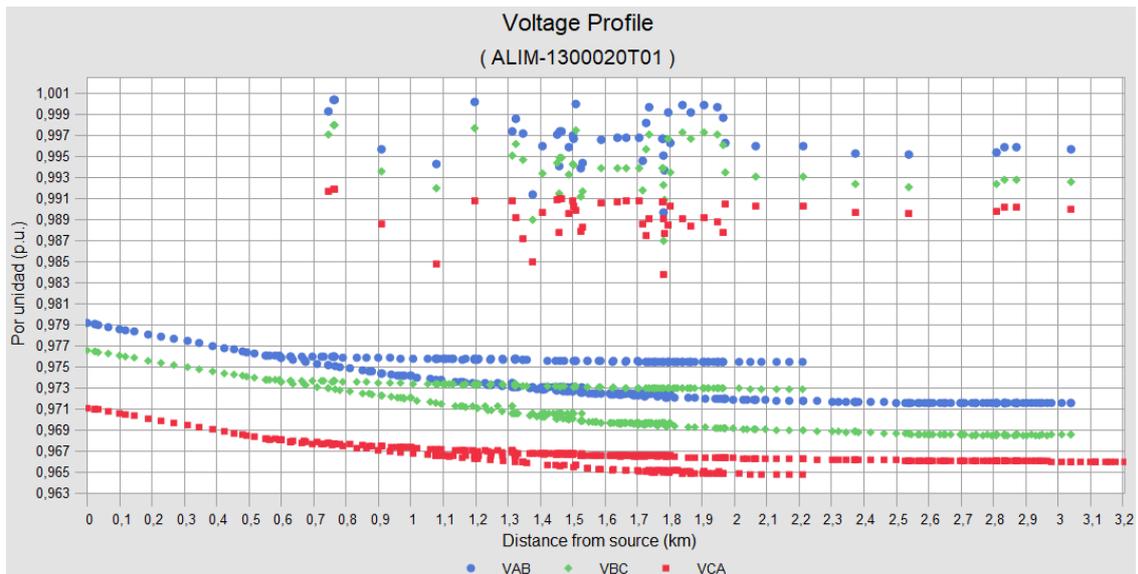


Fig. 25 Perfil de voltaje del alimentador 1

3.2.2 Alimentador 2 (ALIM – CAYAMBE 2)

Es uno de los alimentadores con mayor distancia en la distribución de energía eléctrica que incumple con los niveles de voltaje requeridos, en el cual los valores de subvoltaje resaltan en cada fase, por lo cual necesita reguladores de voltaje.

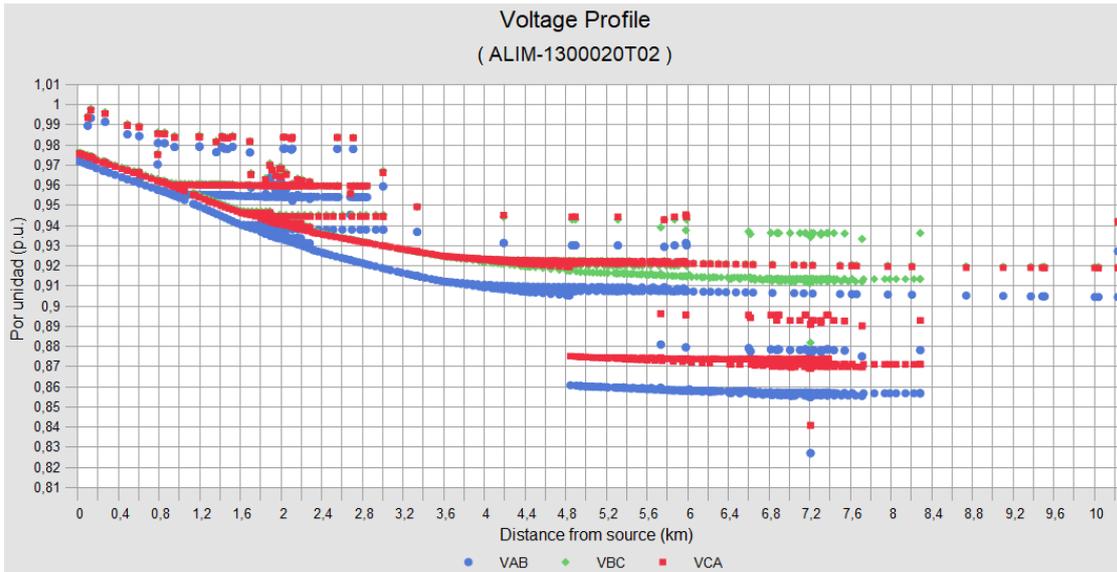


Fig. 26 Perfil de voltaje del alimentador 2

3.2.3 Alimentador 3 (ALIM – CAYAMBE 3)

Los voltajes de cada una de las fases del alimentador se encuentran por debajo del límite de 0.94 p.u., además, en la distribución de carga a demanda máxima, media y mínima, los niveles de subvoltaje son de mucha consideración esencialmente ya que distribuye energía eléctrica a diversas industrias.

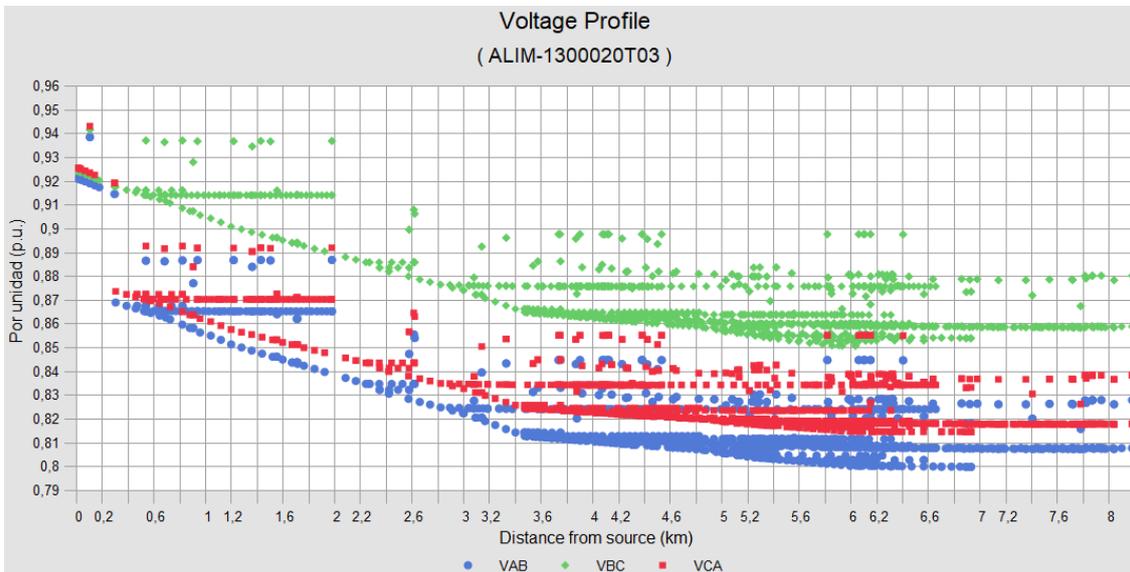


Fig. 27 Perfil de voltaje del alimentador 3

3.2.4 Alimentador 4 (ALIM – CAYAMBE 4)

En demanda máxima el alimentador 4 de la subestación Cayambe se encuentra por debajo del límite establecido por la ARCONEL, además de tomar en cuenta que el subvoltaje es desde el kilómetro cero (0), lo cual representa que el problema comienza desde la cabecera.

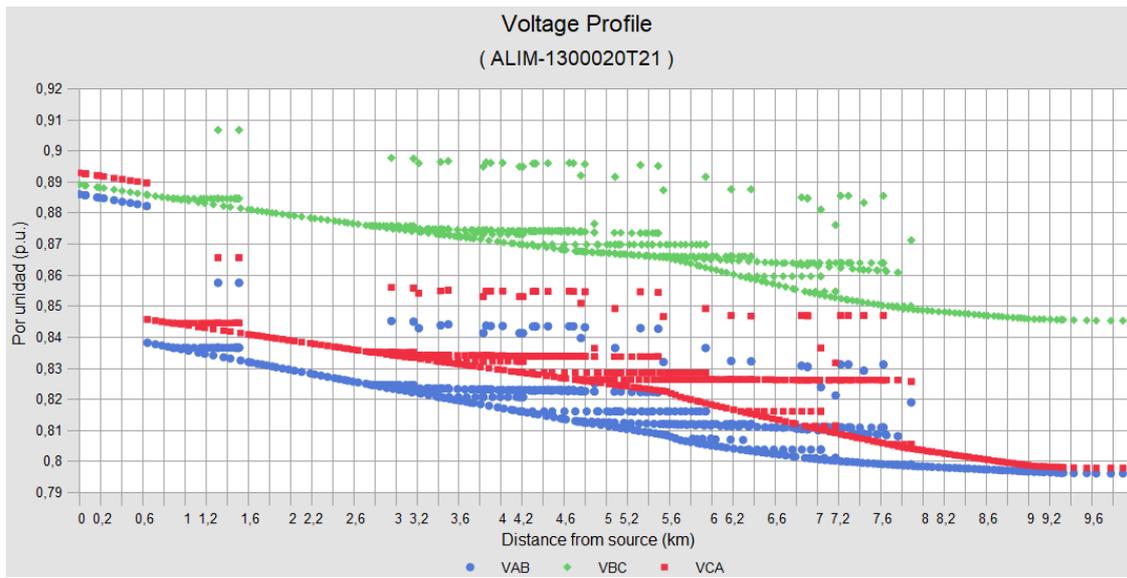


Fig. 28 Perfil de voltaje del alimentador 4

3.2.5 Alimentador 5 (ALIM – CAYAMBE 5)

El alimentador 5 no presenta altos niveles de subvoltaje y de sobrevoltaje en la troncal principal por ende no necesita reguladores de voltaje, de igual forma revisando la regulación de la ARCONEL se encuentra cumpliendo con los niveles de voltaje dentro del rango admisible.

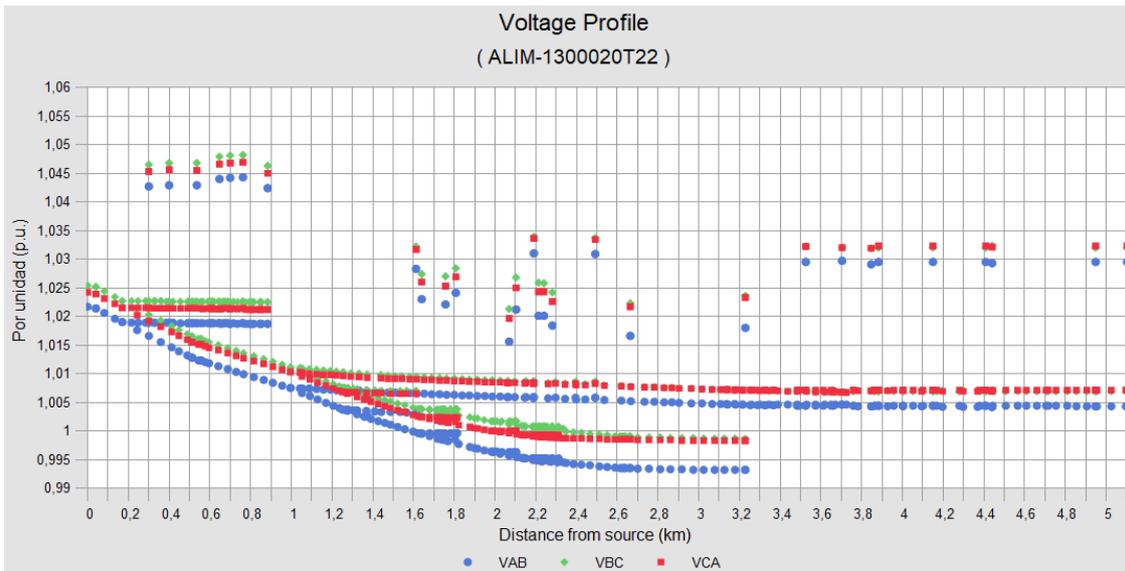


Fig. 29 Perfil de voltaje del alimentador 5

3.2.6 Alimentador 6 (ALIM – CAYAMBE 6)

El alimentador 6 ya tiene instalados reguladores de voltaje para el mejoramiento del nivel de voltaje, pero no se encuentran dentro del rango admisible por la regulación, además, este es otro de los alimentadores con mayor distancia en distribución de energía eléctrica.

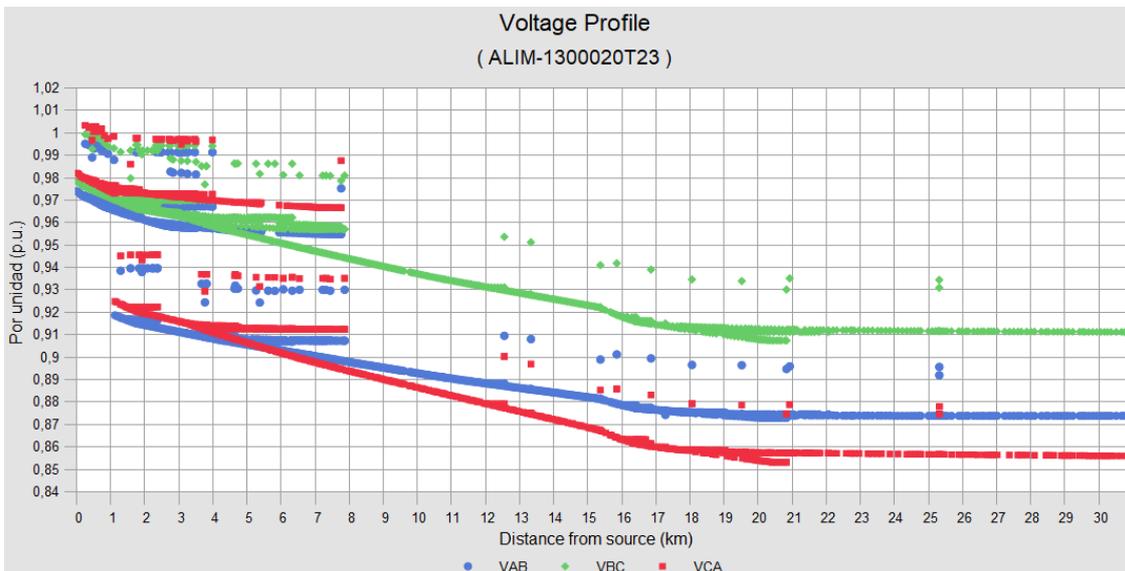


Fig. 30 Perfil de voltaje del alimentador 6

3.3 Perfil de voltaje de los alimentadores con reguladores de voltaje

Mediante la ubicación óptima de los reguladores de voltaje, en las siguientes figuras se muestra los aplanamientos de los perfiles de voltaje de cada uno de los alimentadores.

3.3.1 Alimentador 1 con regulador de voltaje

La ubicación de dos reguladores en el alimentador 1 permiten que el nivel de voltaje se encuentre dentro del rango establecido en la regulación.

Tabla 12 Ubicación de los reguladores de voltaje alimentador 1

ALIMENTADOR 1			
Tramo del RV	N° de Poste	Coordenadas X	Coordenadas Y
281662_MTA	C1C2P2	817.655,565	10.005.518,076
480348_MTA	C1.4P11	818.098,873	10.005.393,410

Con la ubicación de dos reguladores de voltaje, se tiene valores mínimos cercanos a los 100 metros, donde el punto mínimo de voltaje se encuentra por encima de 0.97 p.u. y el máximo se encuentra alrededor de 1.03 p.u., por lo cual se encuentra cumpliendo con la regulación, se los coloca en el poste con las coordenadas indicadas en la siguiente tabla.

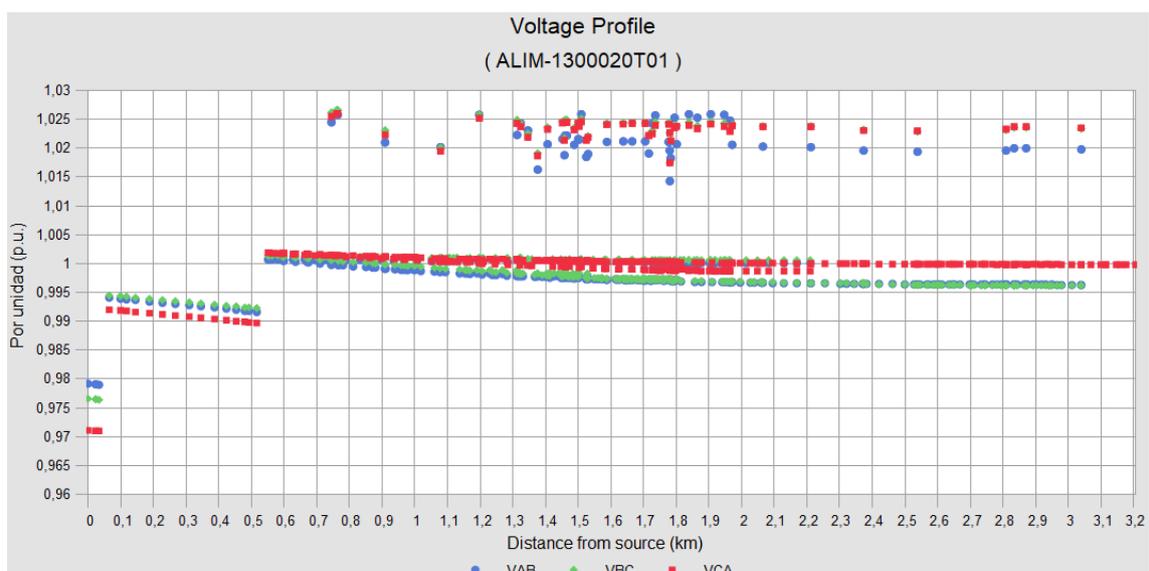


Fig. 31 Perfil de voltaje con ubicación de reguladores de voltaje en el alimentador 1

3.3.2 Alimentador 2 con Regulador de Voltaje

La siguiente tabla muestra las ubicaciones tanto en el CymDist como en el ARGIS para conocer el lugar en donde se encuentra su ubicación óptima.

Tabla 13 Ubicación de los reguladores de voltaje alimentador 2

ALIMENTADOR 2			
Tramo del RV	N° de Poste	Coordenadas X	Coordenadas Y
283328_MTA	C2P93	817.481,610	10.004.816,049
499846_MTA	C2P4	817.725,367	10.005.443,360

Para el alimentador 2 se ubica dos reguladores de voltaje para el mejoramiento de los niveles de voltaje en la troncal principal, reduciendo un gran margen de subvoltaje en el circuito a pesar de ser uno de los más grandes.

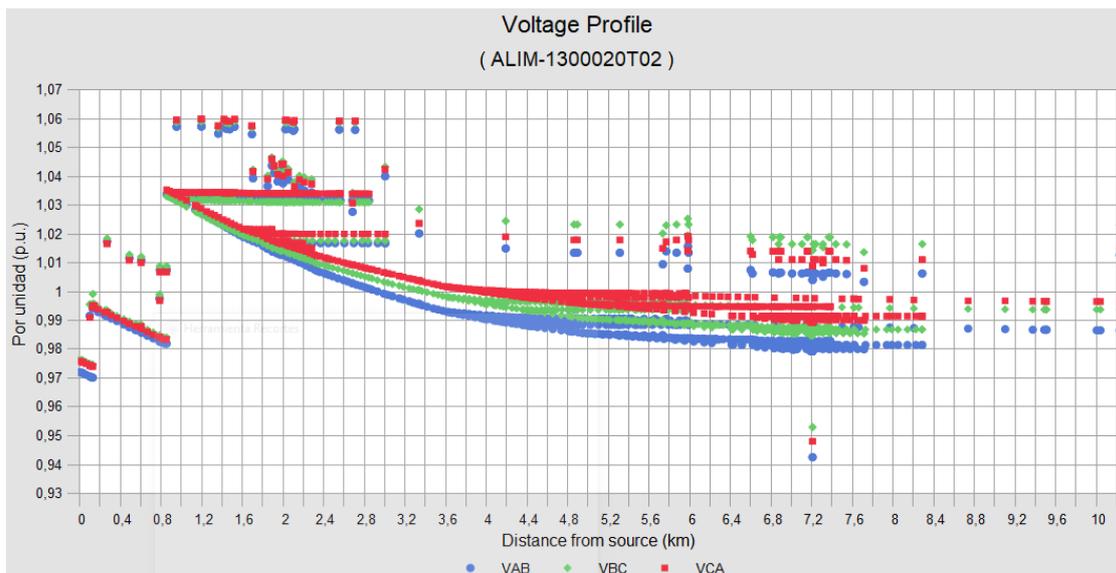


Fig. 32 Perfil de voltaje con ubicación de reguladores de voltaje en el alimentador 2

3.3.3 Cabecera del alimentador 3 con regulador de voltaje

Por la ubicación de 3 reguladores en una misma posición, no presentaron mejoras con los niveles de voltaje por lo cual se los cambio por el regulador de voltaje REG_MP_A1 en las posiciones de la siguiente tabla.

Tabla 14 Ubicación de los reguladores de voltaje alimentador 3

ALIMENTADOR 3			
Tramo del RV	N° de Poste	Coordenadas X	Coordenadas Y
291297_MTA	C3P303	812.381,806	10.005.084,502
500493_MTA	C3P3	817.628,550	10.005.525,485
284762_MTA	C3P84	815.651,959	10.005.461,076

El alimentador 3 presenta varios problemas en los niveles de voltaje, se tiene instalados 3 reguladores de voltaje, los cuales no se encuentran regulando el voltaje y fueron eliminados para mejorar los niveles de voltaje.

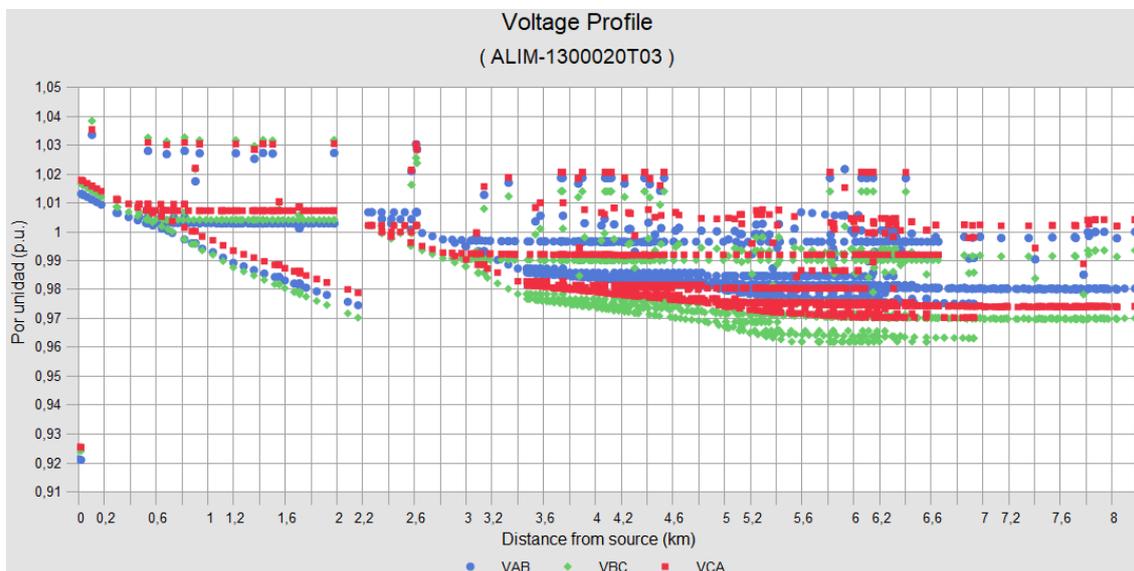


Fig. 33 Perfil de voltaje con ubicación de reguladores de voltaje en el alimentador 3

3.3.4 Regulador de voltaje en el Alimentador 4

Los tramos de cada regulador se encuentran referenciados con un poste para obtener la ubicación por mediante ARGIS y las coordenadas para su ubicación.

Tabla 15 Ubicación de los reguladores de voltaje alimentador 1

ALIMENTADOR 4			
Tramo del RV	N° de Poste	Coordenadas X	Coordenadas Y
284024_MTA	C6P1150	815.819,509	10.010.896,038
548193_MTA	C6P1	817.628,423	10.005.524,021
586425_MTA	C6P8	817.068,213	10.005.666,591

Este alimentador tiene instalado reguladores de voltaje que no mejoran el nivel de voltaje por lo cual se los retiró para el estudio con la ubicación de 3 reguladores de voltaje.

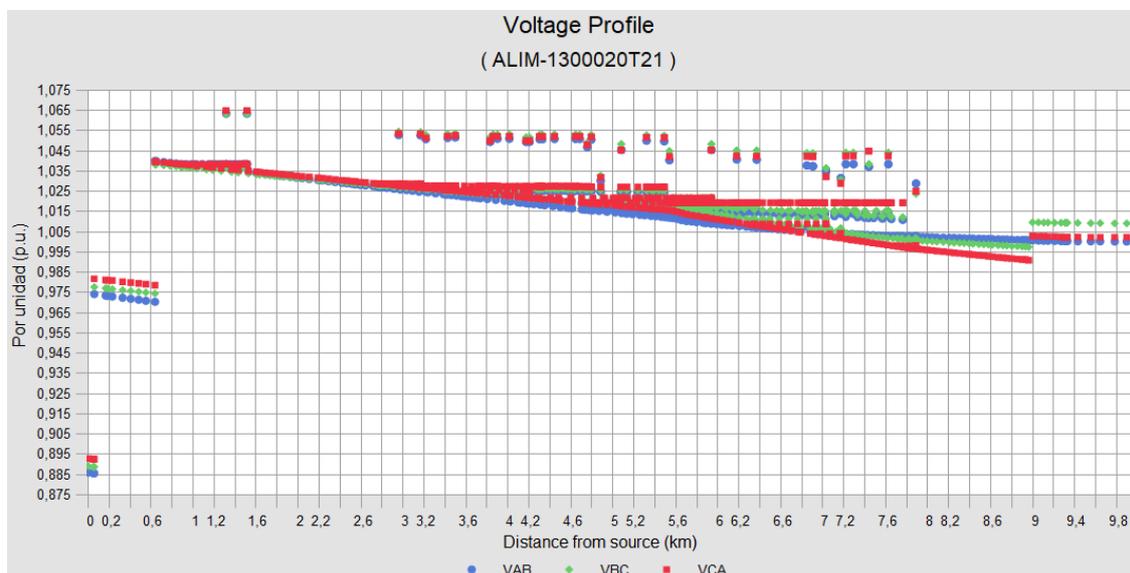


Fig. 34 Perfil de voltaje con ubicación de reguladores de voltaje en el alimentador 4

3.3.5 Ubicación de regulador de voltaje en el Alimentador 6

Debido a la cobertura del alimentador 6, se necesita la ubicación de 3 reguladores parte de ellos en zonas rurales para compensar el voltaje por la distancia en la que se encuentran.

Tabla 16 Ubicación de los reguladores de voltaje alimentador 6

ALIMENTADOR 6			
Tramo del RV	N° de Poste	Coordenadas X	Coordenadas Y
286133_MTA	C8P2673	823.856,062	10.012.846,485
286171_MTA	C8P2462	818.138,555	10.006.468,489
527367_MTA	C7C8P4	817.750,068	10.005.505,050

Mediante la ubicación de tres (3) reguladores de voltaje en la troncal, en el punto más crítico para el estudio se encuentran cumpliendo con los límites establecidos.



Fig. 35 Perfil de voltaje con ubicación de reguladores de voltaje en el alimentador 6

3.4 Criterio Técnico

Con la ubicación de los reguladores de voltaje en los alimentadores de la subestación Cayambe, a excepción del alimentador 5 que no presenta niveles de subvoltaje o sobrevoltaje, no requiere de la ubicación de reguladores de voltaje; para este estudio los bancos de reguladores elegidos por los desbalances de cada una de las fases del alimentador son monofásicos por la facilidad que tienen al regular cada una de las fases de los circuitos que son netamente desequilibrados y la corrección se realiza según la demanda lo requiera para cada fase, a diferencia de los trifásicos que realiza el muestreo sobre una fase y la regulación del voltaje es la misma para las tres, por lo que la mejor opción es el banco de reguladores de voltaje monofásicos para los alimentadores de la subestación Cayambe.

CONCLUSIONES

- Los factores con mayor relevancia en los estudios de ubicación óptima de reguladores de voltaje de una subestación son referentes a la distancia que existe entre la subestación de 138 / 69 kV con la de 13.8 / 7.9 kV, que generan subvoltaje en la cabecera del alimentador, originando que los valores en el perfil de voltaje y en el circuito de distribución de energía eléctrica en CymDist se pinten de color rojo lo cual hace mención a que industrias tengan voltajes menores afectando el rendimiento de sus máquinas, de la misma forma tener valores bajos en el alimentador, con el valor de referencia que se presenta en la regulación del $\pm 6\%$ y transformando los valores de voltaje en p.u., se realiza un análisis de cómo se encuentra los niveles de voltaje tanto a demanda máxima, media y mínima correspondiente en las simulaciones.
- Las curvas con los perfiles de carga que se obtuvieron a partir del registro anual de la subestación Cayambe mediante la determinación de la demanda máxima, media y mínima correspondiente a los 6 alimentadores, son una base para conocer el estado en el que se encuentra cada uno de los alimentadores, además, de conocer las condiciones anormales en las que se encuentra operando con los requerimientos que establece la regulación de la ARCONEL 005/18, como son la sobrecarga, sobrevoltaje y subvoltaje en los circuitos que demuestran si circuito del alimentador cumple con la regulación en el marco referente a los límites tanto superior como inferior del voltaje.
- La ubicación óptima de reguladores de voltaje por medio del software CymDist, a través de la búsqueda iterativa que es una de las ventajas que ofrece este programa al entregar los tramos en donde se puede colocar los reguladores de voltaje cerca del alimentador y en los nodos más críticos para verificar que los niveles de voltaje sean aplanados al máximo, por lo cual el análisis con una corrida de flujo de carga al tener instalados los reguladores permite hacer la comparación de las condiciones anormales, los perfiles de voltaje del antes y después de su implementación para comprobar que al aplanar las curvas de voltaje estén en el cumplimiento de las regulaciones para la empresa distribuidora.

RECOMENDACIONES

- En la subestación Cayambe, en la troncal principal varias secciones de los alimentadores tienen conductores ACSR 2, 1/0, 2/0, que provocan caídas de voltaje, sobrecargas e incluso sobrevoltaje y subvoltaje; se debe considerar un cambio de los conductores de cada uno de los alimentadores al ACSR 3/0, que se emplea generalmente en la distribución de energía eléctrica para que ayude a disminuir los valores de subvoltaje especialmente en los tramos que son los más lejanos al alimentador.
- Para evitar tener problemas de caídas de voltaje desde la cabecera del alimentador se debe tomar en cuenta la distancia que se encuentra la subestación de subtransmisión, también se recomienda reducir el número de alimentadores que tiene la subestación Cayambe a una de subtransmisión más cercana o una repotenciación en las líneas de subtransmisión por parte del CENACE y ARCONEL.
- Para los estudios de ubicación óptima de reguladores de voltaje se debe tener en consideración que los sistemas de distribución de los alimentadores primarios de una subestación al cubrir grandes distancias las caídas de voltaje tienden a ser mayores en cada una de las fases por lo cual los voltajes en cada tramo y nodo son desequilibrados para escoger el tipo de regulador de voltaje.

Referencias

- Álvarez, J. (2019). Diseño de alimentador en media tensión 10 - 22.9 kV y subestación compacta de 160 kVA para la empresa Servicio de Administración Tributaria de Trujillo - SATT. (*Tesis de Ingeniería*). Universidad César Vallejo, Trujillo, Perú.
- Amache, W. (2019). Influencia de los Reguladores de Tensión bajo Carga en la Calidad de Energía del Sistema de Distribución de Media Tensión y Baja Tensión de Arequipa - Seal. (*Tesis de Ingeniería*). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa.
- Andrade Suárez, M. A. (2018). Planificación a Corto Plazo del Sistema de Distribución de la Subestación Cayambe Incorporando el Programa de Cocinas de Inducción. (*Tesis de obtención de título de Ingeniero Eléctrica*). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Pichincha, Ecuador.
- Apaza, M. (2017). Estudio de Control y Disminución de Pérdidas Dentro del Servicio Eléctrico Puno Alimentador 101 - Concesión Eléctrica de ElectroPuno S.A. (*Tesis de Ingeniería*). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- ARCONEL. (2018a). Regulación No. ARCONEL 005/18. *Regulación*. Directorio de la Agencia de Regulación y Control de Electricidad, Quito.
- ARCONEL. (2018b). Pliego Tarifario para las Empresas Eléctricas de Distribución. *Servicio Público de Energía Eléctrica*. Agencia de Regulación y Control de Electricidad, Quito.
- Baura, R. (2011). Variantes de solución a problemas de voltaje en la subestación. (*Trabajo de Ingeniería*). Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Santa Clara, Cuba.
- Bedoya, J. (2016). Identificación de colapsos de tensión mediante el uso de unidades de medida fasorial. (*Tesis de Ingeniería*). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.
- Calleja, F. (2015). Sistema de Control de Calidad del Suministro Eléctrico. (*Tesis de Ingeniería*). Universidad de Cantabria, Santander.
- Castillo, R. (2013). Estudio de Causas de Fallas en Transformadores de Distribución de la Empresa Eléctrica Quito. (*Tesis de Ingeniería*). Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- CENACE. (2018). *Revisión de las Bandas de Variación de Voltaje en Barras y Factores de Potencia en Puntos de Entrega del Sistema Nacional de Transmisión (SNT)-2018*. Quito: Gerencia Nacional de Planeamiento Objetivo.
- Changotasig, J., & Estrella, J. (2017). Análisis de flujos de potencia en el alimentador 1 de la Subestación San Cristóbal en el área de concesión ELECGALAPAGOS S.A. para determinar pérdidas técnicas en las conexiones actuales. (*Proyecto de investigación de Ingeniería*). Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador.
- Chimbo, M., & Molina, H. (2018). Ubicación Óptima de reguladores de Voltaje en el Sistema de Medio Voltaje Correspondiente a la Subestación Portovelo, Aplicando Segregación de Flujo de Carga al más Crítico. (*Tesis de Ingeniería*). Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Cuenca.

- Chumbi, R., & Verdugo, T. (2013). Integración con CYMDIST de las redes de media tensión y subtransmisión del sistema de la CENTROSUR. (*Tesis de Ingeniería*). Universidad de Cuenca, Cuenca.
- Coello, V. (2016). Estudio técnico para mejorar las condiciones operativas de los alimentadores de la subestación Calpi - San Juan, de la EERSA. (*Tesis de Ingeniería*). Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- EATON Powering Business Worldwide. (23 de Noviembre de 2018a). *CYME Programas de análisis de redes eléctricas*. Obtenido de Ubicación óptima de reguladores de tensión: <http://www.cyme.com/es/software/cymeoptreg/>
- EATON Powering Business Worldwide. (23 de Noviembre de 2018b). *EATON Powering Business Worldwide*. Obtenido de Análisis de sistemas de distribución CYMDIST: <http://www.cyme.com/es/software/cymdist/>
- EATON Powering Business Worldwide. (23 de Noviembre de 2018b). *EATON Powering Business Worldwide*. Obtenido de Análisis de sistemas de distribución CYMDIST: <http://www.cyme.com/es/software/cymdist/>
- García, M. (2016). Estudio de Complementación al Sistema de Protección, de la Empresa Atunera "Fishcorp" de Manta, aplicando dispositivos protectores contra sobretensiones transitorias y temporales en baja tensión. (*Tesis de Ingeniería*). Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, Manta.
- Gómez, R., & Juca, R. (2017). Proceso para el modelamiento y simulación de flujos de carga de las redes de media y baja tensión de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A. (*Tesis de Ingeniería*). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- González, F. (2019). Estudio de Causas Incidentes en las Pérdidas no Técnicas en Baja Tensión de una Empresa Distribuidora de Electricidad con Alta Demanda. (*Tesis para Ingeniería*). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil.
- González, J. (2019). Estudio de Coordinación de Protecciones para los Alimentadores de la Subestación Tulcán, Utilizando la Metodología Aplicada en la Empresa Eléctrica Regional Norte S.A. (EMELNORTE). (*Tesis de Ingeniería*). Universidad Técnica del Norte, Ibarra.
- Hernández, H. (2011). La Caída de Tensión. *Electrica, La Guía del Electricista, 2*.
- Holguin, M., & Gomezcoello, D. (2010). Análisis de Calidad de Energía Eléctrica en el "Nuevo Campus" de la Universidad Politécnica Salesiana. (*Tesis de Ingeniería*). Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil.
- Landázuri, C. (2016). Diseño e Implementación de un Sistema Piloto para la Automatización de Alimentadores de la Red de Distribución de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A. (*Tesis para título de Magister*). Universidad de Cuenca, Cuenca.
- Lobato, J. (2016). Instalación de bancos de capacitores para corregir la caída de voltaje en redes de distribución aplicando la técnica de barrido progresivo - regresivo. (*Tesis de Maestría*). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.

- Mayta, C. (2019). Protección del sistema eléctrico de distribución y su efecto en la calidad de producto del servicio de energía en el alimentador A4502 de la unidad del valle del Mataro. *(Tesis de Ingeniería)*. Universidad Continental, Huancayo, Perú.
- Mejía, C., & Faz, E. (2016). Análisis de la demanda debido a la proyección de las cocinas de inducción en usuarios residenciales, para determinar una propuesta que contribuya a mantener la calidad de servicio de energía eléctrica del alimentador 10PJ13B1S2 Pujilí Centro-Alpamalag de. *(Tesis de Ingeniería)*. Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador.
- Moreno, J. (2016). Análisis del alimentador "Viche" de la subestación propia de la CNEL EP ESMERALDAS utilizando el programa CYMDIST mediante estudios de flujos de cargas a nivel de 13.8 kV. *(Tesis de Ingeniería)*. Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Cotopaxi, Ecuador.
- Muenala, M., & Pruna, O. (2017). Estudio energético del sistema de suministro eléctrico en la facultad de CAREN perteneciente a la Universidad Técnica de Cotopaxi. *(Proyecto de Investigación)*. Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador.
- Orellana, I., & Ramón, P. (2017). Determinación de los Factores de Carga y Pérdidas en Transformadores de Distribución por Estratos de Consumo en el Área de Concesión de la Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A. *(Tesis de Ingeniería)*. Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Cuenca.
- Peña, G., & Ramírez, J. (2012). Reconfiguración y Optimización de los Alimentadores Primarios de la Subestación Obrapia y San Cayetano Pertenecientes a la EERSSA. *(Tesis para Ingeniería)*. Universidad de Cuenca, Cuenca.
- Pérez, H. (2020). "Modelos simplificados para el cálculo de regulación y pérdidas en planificación de redes de distribución". *(Apuntes de clase)*. Empresa Eléctrica Regional Norte, Ibarra, Ecuador .
- Planificación, D. (2019). Informe de Perfiles de Voltaje del Sistema de Subtransmisión de EMELNORTE S.A. *(Informe departamento de planificación)*. Empresa Eléctrica Regional Norte, Ibarra.
- Pocasangre, C. (2017). Diseño y calculo de costos y presupuesto del sistema de suministro de energía eléctrica eficiente del proyecto Santuario Nuestra Señora de Lourdes, en el Progreso, Jutiapa. *(Tesis de Ingeniería)*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, Guatemala.
- Preciado, N. (2019). Análisis de la Regulación de Tensión mediante Banco de Capacitores en Serie, en Alimentador de Distribución de Larga Distancia de la Subestación de 69 kV Fortín de la Ciudad de Guayaquil. *(Tesis de Ingeniería)*. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil.
- Pulla, C., & Quiñonez, H. (2018). Estudio Eléctrico para Transferencias Automáticas en Alimentadores Primarios de Medio Voltaje de CNEL EP Unidad de Negocio El Oro, Estudio de Caso al Alimentador más Crítico ante Falla. *(Tesis de Ingeniería)*. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.

- Quispe, A. (2018). Analisis de la Calidad de Energía Eléctrica en Sistemas de Distribución de Baja Tensión - Salida I S.E. Bellavista. *(Tesis de Ingeniería)*. Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Robalino, R. (2016). Propuesta de Metodología para Mejorar la Confiabilidad de los Alimentadores Primarios Aéreos de la Zona Urbana de Ambato. *(Tesis de Ingeniería)*. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Rodríguez, M., Vázquez, A., Vélez, A., & Saltos, W. (2018). Mejora de la Calidad de la Energía con Sistemas Fotovoltaicos en las Zonas Rurales. *Revista Científica* , 1-10.
- Rosero, D. (2019). Análisis de la distribución de carga y estudios eléctricos de los alimentadores de la nueva subestación El Rosal de Emelnorte S.A. *(Tesis de Ingeniería)*. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Saucedo, D., & Taxis, J. (2008). Factores que Afectan la Calidad de la Energía y su Solución. *(Tesis de Ingeniería)*. Instituto Politécnico Nacional, México D.F.
- SectorEléctrico. (23 de Septiembre de 2018). *Regulación de tensión en instalaciones eléctricas: Sector Eléctrico*. Obtenido de Sector Eléctrico: <http://www.sectorelectricidad.com/20762/retie-regulacion-de-tension-en-instalaciones-electricas/>
- Solano, C. (2013). Estudio de Factibilidad para la Implementación del Sistema de Automatización de Subestaciones en la Emelnorte Mediante Tecnología Inteligente. *(Tesis para la obtención de título de Ingeniería Eléctrica)*. Universidad Politécnica Salesiana Sede - Quito, Quito, Pichincha, Ecuador.
- Suárez, J. (2019). Estudio para el balanceo de la carga del alimentador Anconcito de 13.8 kV ubicado en el cantón Salinas de la provincia de Santa Elena. *(Tesis de ingeniería)*. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil.
- Sulca, A. (2016). Optimización del Perfil de Tensión en la Barra 10kV de la Subestación Eléctrica de Transmisión Ñaña para el Cumplimiento de la NTCSE - Producto. *(Tesis de Ingeniería)*. Universidad Nacional del Callao, Callao.
- Tapia, C. (2019). Estudio de Confiabilidad en los Alimentadores de la Subestación Cayambe. *(Tesis de Ingeniería)*. Universidad Técnica del Norte, Ibarra.
- Tuesta, R. (2017). Diseño del sub-sistema de distribución de redes secundarias de 220 V para la electrificación de la urbanización "El oasis de la Planicie" Cieneguilla departamento de Lima. *(Trabajo de titulación de Ingeniería)*. Universidad Tecnológica de Lima Sur, Villa El Salvador, Perú.
- Zhungur, A., & Calva, E. (2014). Diseño de esquemas de control integrado de tensión y potencia reactiva del sistema de distribución de la Empresa Eléctrica Centro Sur C.A. *(Tesis de Ingeniería)*. Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.