PROPUESTA DE ALTERNATIVAS PARA MEJORAR LOS NIVELES DE TENSIÓN EN 23 KV Y REDUCIR LAS PÉRDIDAS TÉCNICAS CON EL FIN DE MEJORAR EL DESEMPEÑO DE OPERACIÓN DEL ALIMENTADOR VAQUERIA 2

Alberto Matias Torres Rios

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAAGUAZU
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD
Coronel Oviedo - Paraguay
Año 2023

Propuesta de alternativas para mejorar los niveles de tensión en 23 kV y reducir las pérdidas técnicas con el fin de mejorar el desempeño de operación del Alimentador Vaquería 2

Elaborado por:

Alberto Matias Torres Rios

Tutor:
Ing. Elisa Rojas

Cotutor:
Ing. Moises Britez

Trabajo presentado a la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Nacional de Caaguazú, como requisito para la obtención del titulo de Ingeniero en Electricidad

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAAGUAZU
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD
Coronel Oviedo - Paraguay
Año 2023

Página de aprobación

Trabajo de fin de grado para la obtención del Título de Ingeniero en Electricidad aprobado en representación de la Facultad Ciencias y Tecnologías de la Universidad Nacional de Caaguazú, por el Tribunal Examinador constituido por los siguientes profesores.

Prof. Ing.

Prof. Ing.

Prof. Ing.

Dedicado a:

Queridos seres queridos, hoy después de muchos años y sacrificios, finalmente llegué al final de la recta. Y aunque este logro es mío, sé que no podría haber llegado hasta aquí sin el apoyo de cada uno de ustedes.

A mi madre Aquilina, mi roca y mi inspiración, no hay suficientes palabras para expresar mi gratitud hacia ti. Desde el momento en que nací, has sido mi protectora, mi guía y mi luz en la oscuridad. Tus sacrificios y esfuerzos han hecho posible que hoy alcance este gran logro. Gracias por creer en mí en todo momento, por ser mi confidente y mi amiga más cercana. Este éxito no sería posible sin ti. Siempre estaré agradecido por todo lo que has hecho por mí.

A mi padre Luis, eres el modelo de hombre que quiero forjar. Tu dedicación, honestidad y sabiduría me han guiado en cada paso del camino. Tu apoyo incondicional y tu amor inagotable han hecho que este logro sea una realidad. Gracias por tus sabias palabras y consejos que los llevo conmigo en cada instante. A mi hermana Liz, tu amor y tu apoyo han sido una bendición en mi vida y no puedo imaginar haber recorrido este camino sin ti.

A mis familiares, amigos y compañeros de carrera, gracias por formar parte de mi vida y por ser un apoyo incondicional. Sus palabras de aliento han sido la motivación que necesitaba para continuar. La presencia de cada uno en mi vida es un regalo y estoy agradecido de tenerlos.

A mi novia Luz, por ser parte importante de mi vida. Gracias por acompañarme en este proceso, por apoyarme en los momentos más difíciles, por darme fuerzas para seguir luchando, tus palabras de aliento me ayudaron a fortalecerme y no rendirme.

Este logro no solo es mío, sino también de cada uno de ustedes. Les dedico este triunfo a cada uno de ustedes, con todo mi corazón. A partir de hoy, no solo celebro este logro, sino también la familia y amigos que han estado a mi lado durante todo el camino. Espero que este éxito sea una inspiración para todos ustedes y que nos sigamos apoyando mutuamente en los próximos desafíos de la vida.

Agradecimientos

A Dios y a la Virgen de Caacupé, por todas las bendiciones que me brindan en la vida, a mis abuelos que me acompañan desde el cielo, por cuidarme en todo momento.

A la Ing. Elisa Rojas Girett, por su predisposición y ayuda para la finalización de este proyecto.

Al Ing. Moises Britez, por ser parte importante desde la idea de realizar este proyecto hasta la finalización, por su predisposición y ayuda constante.

Al Ing. Cesar Ferreira, por sus correcciones y guiarme a la correcta finalización del proyecto.

A todos los docentes que durante la carrera compartieron sus conocimientos académicos y experiencias para forjar excelentes profesionales

Resumen

La lineas de distribución en media tensión cumplen una función primordial en el abastecimiento de energía eléctrica a los usuarios de la empresa, por ende, la operación en regímenes adecuados, mitigación de pérdidas eléctricas y tensión en umbrales permisibles son importante en el análisis de operación de estas redes, este trabajo tiene como objetivo la propuesta de alternativas para mejorar estos niveles e indices en el alimentador VAQ-2, el cual arranca de la estación Vaquería de la ANDE. Para estas propuestas se recabaron datos de demanda de alimentadores y estaciones que sirven a la zona de influencia, ademas de datos característicos de la red VAQ-2 y CDO-3, a partir de ello se proponen tres alternativas, donde en todos los casos se ejecutan simulaciones computacionales para observar las mejoras obtenidas, una de estas alternativas consiste en la construcción de una linea sumergida en el lago Yguazú de 2,1 km de extensión, sin embargo, a pesar de ser la alternativa que mayor pérdida reduce, se selecciona la alternativa que reduce pérdidas a un menor coste, la reducción de pérdidas técnicas es del 47,66 % en la alternativa seleccionada. En un marco financiero se evaluá la selección encontrando una recuperación de inversión de la misma en 4 años.

Palabras claves: Media tensión, Distribución, Pérdidas técnicas, Niveles de tensión.

Abstract

The medium voltage distribution lines play a fundamental role in the supply of electricity to the users of the company. Therefore, operating under appropriate regimes, mitigating electrical losses, and maintaining voltage within permissible thresholds are important aspects in the operation analysis of these networks. This work aims to propose alternatives to improve these levels and indices in the VAQ-2 feeder, which starts from the Vaquería station of ANDE. For these proposals, demand data from feeders and stations serving the area of influence, as well as characteristic data of the VAQ-2 and CDO-3 networks, were collected. Based on this, three alternatives are proposed, where computer simulations are performed in all cases to observe the improvements obtained. One of these alternatives involves the construction of a 2.1 km submerged line in the Yguazú Lake, which reduces the most loss. However, the alternative that reduces losses at a lower cost is selected, with a technical loss reduction of 47,66 %. In a financial framework, the selection is evaluated, and the investment is expected to be recovered in 4 years.

Key words: Medium tension, Distribution, Technical losses, Voltage levels.

Índice general

1. Introducción **1**

I Revisión Bibliográfica **3**

2. Teorías básicas **4**

2.1. Generalidades de los Sistema De Distribución de Energía Eléctrica 4

2.2. Tipos de Líneas de Distribución 5

2.2.1. Líneas Aéreas 6

2.2.2. Estructuras de Alimentadores 10

2.2.3. Red Mallada 12

2.2.4. Clasificación de Alimentadores 13

2.2.5. Transformadores de Distribución 15

2.2.6. Pérdidas de Energía Eléctrica 16

2.2.7. Factor de potencia 18

2.3. Métodos para reducir las Pérdidas Técnicas 23

2.3.1. Repotenciación de Alimentadores Primarios 23

2.3.2. Ubicación Optima de Reguladores de Voltaje de Media Tensión . . 23

2.3.3. Ubicación Optima de Bancos de Capacitores 25

2.3.4. Balanceo de Cargas en Alimentadores Primarios 25

2.3.5. Reconfiguración de Alimentadores Primarios 26

2.4. Softwares de Análisis de Redes Eléctricas 27

2.4.1. CYMDIST – Análisis del Sistema de Distribución 28

II Resumen Ejecutivo 30

3. 31

3.1. Descripción del trabajo 31

3.1.1. Métodos y Técnicas utilizadas 31

3.2. Justificación 32

3.3. Finalidad del proyecto 32

3.4. Metas 33

3.5. Objetivos 33

3.5.1. Objetivo general 33

3.5.2. Objetivos específicos 33

3.6. Beneficiarios 33

3.7. Producto 34

3.8. Localización física y cobertura espacial 34

3.9. Especificaciones de actividades y tareas realizadas 34

3.10. Recursos necesarios 35
3.10.1. Recursos humanos 35
3.10.2. Recursos materiales 35
3.11. Costos 35
3.12. Beneficios 36
3.13. TIR y VAN 36

III Ingeniería de Diseño 38

4. Análisis de cargas y demandas 39

4.1. Demanda de estaciones 39
4.2. Demanda del alimentador VAQ-2 40
4.3. Demanda del alimentador CDO-3 41
4.4. Demanda de equipos sobre las lineas 42

5. Alternativas de mejoras en el alimentador VAQ-2 43

5.1. Escenario inicial 45
5.2. Alternativa de descarga del alimentador y regulación de tensión 47
5.2.1. Balance de carga 47
5.2.2. Ubicación de reguladores de tensión y banco de capacitores 48
5.3. Obras de mejoras 50
5.4. Nuevo alimentador CDO-1 52
5.4.1. Características del conductor sumergible 55

5.4.2. Reubicación de reguladores de tensión del VAQ2 al CDO1 60

5.4.3. Resultados obtenidos de la configuración propuesta de construcción del CDO-1 60

5.5. Selección de alternativa 63

IV **65**

6. Resultados y Discusión **66**

7. Conclusiones **68**

8. Recomendaciones **69**

Apéndice **69**

A. Apéndices **70**

A.1. Demandas 70

A.2. Reportes de cargas 74

A.3. Regulación de tensión 79

A.4. Regulación de tensión y mejoras 85

A.5. Alimentador CDO-1 87

A.6. Evaluación económica 90

Referencias **91**

Lista de abreviaturas

ANDE: Administración Nacional de Electricidad.

PD: Puesto de distribución.

MT: Media tensión.

KV: Kilo voltios.

KW: Kilo watts.

KVA: Kilo volt-amper.

KVAr: kilo Volt-amper reactivo.

RT: Regulador de tensión.

BC: Banco de capacitores.

Glosario de términos

Alimentador: Los alimentadores en media tensión son circuitos eléctricos que se utilizan para suministrar energía eléctrica desde una subestación eléctrica hasta los transformadores de distribución.

Pérdidas eléctricas: Las pérdidas eléctricas son la cantidad de energía eléctrica que se disipa en forma de calor durante el transporte y distribución de la electricidad a través de los circuitos eléctricos.

Conductores: Un conductor eléctrico es un material que ofrece poca resistencia al paso de la electricidad. Alambre o cordón compuesto por varios alambres, destinado a transmitir la electricidad.

Carga: Cantidad de potencia dada o recibida en un punto sobre un intervalo de tiempo.

Calidad del producto: Es el conjunto de parámetros eléctricos que permite que la red eléctrica funcione de la manera prevista sin pérdida significativa de rendimiento o de vida útil, con ausencia de interrupciones, sobretensiones y deformaciones producidas por armónicos en la red y variaciones de voltaje suministrado al usuario.

Índice de tablas

3.1. Costos del desarrollo de la alternativa seleccionada 36

3.2. Flujo de caja de la alternativa propuesta 37

4.1. Demanda de equipos en fecha de demanda máxima 42

5.1. Características de conductores de la red VAQ-2 44

5.2. Pérdidas eléctricas y monetarias en escenario base de mayor demanda . . . 46

5.3. Resumen de pérdidas VAQ-5, CDO-3, VAQ-2 51

5.4. Detalles de la construcción del CDO-1 53

5.5. Características constructivas del conductor X-VOLT RH5Z1-OL 18/30 kV 55

5.6. Valores de k debido al número de alambres 59

5.7. Reactancia homopolar obtenida 60

5.8. Resumen de reducción de perdidas técnicas del alimentador VAQ-2 con la propuesta del CDO-1 61

A.1. Casos críticos de sobrecarga, escenario base 76

A.2. Resumen de pérdidas en la red VAQ-2, escenario base 77

A.3. Resumen de pérdidas en el alimentador CDO-3, escenario inicial 78

A.4. Balance de carga aplicada a nodos de la red VAQ-5 80

A.5. Ganancia de tensión y reducción de pérdidas por tramos, VAQ-5 81

A.6. Pérdidas CDO-3, posterior a la regulación de tensión 82

A.7. Pérdidas VAQ-2, posterior a la regulación de tensión 83

A.8. Pérdidas VAQ-5, posterior a la regulación de tensión 84

A.9. Pérdidas del CDO-3, posterior a regulación y mejoras 85

A.10.Pérdidas del VAQ-2, posterior a regulación y mejoras 86

A.11.Pérdidas del VAQ-5, posterior a regulación y mejoras 86

A.12.Producción del arreglo propuesto 90

A.13.Ahorro por mejoras en pérdidas técnicas 90

A.14.Costo de adquisición de la energía 90

Índice de figuras

2.1. Conductor desnudo de aluminio 7

2.2. Linea protegida compacta de media tensión 8

2.3. Redes radiales 11

2.4. Redes anilladas 12

2.5. Redes primarias trifásicas de tres hilos 14

2.6. Redes primarias trifásicas de cuatro hilos 15

2.7. Triángulo de potencia 19

2.8. Compensación del factor de potencia, triángulo de potencia 21

2.9. Tipos de compensación de reactivos 22

2.10. Interfaz de usuario CYME 29

4.1. Máxima demanda del alimentador VAQ-2 40

4.2. Demanda máxima del alimentador CDO-3 42

5.1. Vista general del alimentador VAQ-2 44

5.2. Perfil de tensión en el alimentador VAQ-2, escenario base 46

5.3. Configuración de reguladores de tensión y banco de capacitores sobre el VAQ-5 48

5.4. Perfil de tensión del VAQ-5, posterior a la regulación 49

5.5. Configuración propuesta con construcción de línea en Tres Palmas 50

5.6. Perfil de tensión de los alimentadores VAQ-2 y VAQ-5, con regulación y mejoras 52

5.7. Configuración propuesta para los alimentadores VAQ-2 y CDO-1 53

5.8. Tramos propuestos del CDO-1 a construir y adecuar 54

5.9. Configuración geométrica para tendido de conductor subterráneo- acuático 58

5.10. Reguladores de 200A a trasladar del VAQ-2 al CDO-1 61

5.11. Perfil de tensión VAQ-2 y CDO-1 62

5.12. Relación moneda por cada kW mejorado en demanda máxima 64

A.1. Demanda de estaciones zona centro, ultimo trimestre 2022 72

A.2. Demanda verano del alimentador VAQ-2 72

A.3. Factor de potencia en demanda máxima del alimentador 73

A.4. Demanda verano CDO-3 73

A.5. Factor de potencia del CDO-3 73

A.6. Densidad de carga del alimentador VAQ-2 74

A.7. Desequilibrio de tensión VAQ-2, escenario base 75

A.8. Sobrecarga del primer banco de reguladores de 200 A 75

A.9. Niveles de sobrecarga de conductores y niveles de tensión VAQ-2 76

A.10.Perfil de tensión del alimentador CDO-3 en escenario base 79

A.11.Configuración propuesta del VAQ-5 79

A.12.Arreglo de conductores del alimentador VAQ-5 80

A.13.Niveles de tensión y carga posterior a la regulación de tensión 85

A.14.Niveles de carga y tensión, alternativa construcción de linea 86

A.15.Valores de DMG 87

A.16.Cálculo de reactancia homopolar 87

A.17.Niveles de tensión y carga VAQ-2 88

A.18.Niveles de tensión y carga CDO-1 88

A.19.Cable sub-acuático seleccionado 89

Capítulo 1

Introducción

En este proyecto de fin de grado se analiza diversas alternativas para mejorar el desempeño de operación del alimentador en media tensión VAQ-2 perteneciente a la Estación Vaquería (ES-VAQ) ubicado en la localidad de Vaquería. Este alimentador sirve a varias localidades del departamento de Caaguazú. Estas alternativas son propuestas para regular la tensión de servicio a los clientes mencionados, mejorar los niveles de pérdidas eléctricas y la operación de equipos y elementos de la red.

En estudios ya realizados por la empresa de concesión eléctrica ANDE, se pudo determinar que el alimentador VAQ-2 presenta una considerable pérdida técnica en operación, ademas la tensión se encuentra por debajo de los rangos admisibles en demanda máxima, existen equipos de medición ubicados a lo largo de la red VAQ-2, registrando tensión congruente con estas simulaciones. Por estas razones en este trabajo final de grado se tiene como objetivo principal la propuesta de alternativas para mejorar los niveles de tensión en 23 kV y reducir las pérdidas técnicas sobre el alimentador VAQ-2.

Para el desarrollo de este trabajo se realizan relevamiento de datos, específicamente demanda de estaciones y alimentadores de la zona para su posterior procesamiento, también se realiza documentalmente el relevamiento topológico de las lineas de media tensión, siguientemente se simulan las diferentes alternativas planteadas en busca de contrastarlas entre sí, buscando seleccionar la mejor opción entre ellas. Esto conlleva a un beneficio di-

recto de la empresa y los clientes de la misma, consiguiendo la operación de alimentadores a niveles admisibles y recomendados.

En el capítulo 2 de este trabajo se realiza definiciones dentro de un marco teórico, se definen los principales conceptos necesarios, como se describen también los materiales de las redes de distribución. Se abordan los temas de regulación de tensión y mejoras de niveles de pérdidas.

En el capítulo 3 Se realiza el resumen ejecutivo del proyecto, presentando la descripción general del trabajo y las diferentes metodologías empleadas para el cumplimiento de los objetivos, finalmente se realiza en este capítulo el análisis financiero de la alternativa seleccionada.

En el capítulo 4 se realiza el análisis de las cargas y las demandas de las estaciones y alimentadores involucrados en el proyecto, se realiza búsqueda de valores máximos, medios y de dispersión de los datos recabados al respecto.

Por ultimo en el capítulo 5 se desarrollan en un entorno de simulaciones las diferentes alternativas planteadas, también se realizan los cálculos de impedancia de conductores sumergibles, para posteriormente simular con estos valores.

Parte I

Revisión Bibliográfica

Capítulo 2

Teorías básicas

2.1. Generalidades de los Sistema De Distribución de Energía Eléctrica

Las redes de distribución forman una parte muy importante de los sistemas de potencia porque toda la potencia que se genera se tiene que distribuir entre los usuarios y éstos se encuentran dispersos en grandes territorios. Así pues, la generación se realiza en grandes bloques concentrados en plantas de gran capacidad y la distribución en grandes territorios con cargas de diversas magnitudes. Por esta razón el sistema de distribución resulta todavía más complejo que el sistema de potencia [8].

El sistema eléctrico de potencia (SEP) es el conjunto de centrales generadoras, líneas de transmisión y sistemas de distribución que operan como un todo. En operación normal todas las máquinas del sistema operan en paralelo y la frecuencia en todo el SEP es constante.

La definición clásica de un sistema de distribución, desde el punto de vista de la ingeniería, incluye lo siguiente:

- Subestación principal de potencia: Esta recibe la potencia del sistema de transmisión y la transforma al voltaje de sub-transmisión.

- Sistema de sub-transmisión: Son las líneas que salen de la subestación (SE) principal para alimentar a las SE de distribución.
- Subestación de distribución: Se encarga de recibir la potencia de los circuitos de sub-transmisión y de transformarla al voltaje de los alimentadores primarios.
- Alimentador primario: Son los circuitos que salen de las SE de distribución, llevan el flujo de potencia hasta los transformadores de distribución.
- Transformador de distribución: Reduce el voltaje del alimentador primario al voltaje de utilización del usuario.

En los sistemas de distribución existen diferentes tipos de cargas, los cuales son:

- Residencial: La carga residencial tiene la menor densidad respecto a la carga comercial e industrial y decrece de la urbana a la rural, de tal forma que resulta poco económica la electrificación rural, aunque se justifica desde el punto de vista social. Actualmente en las zonas rurales se utilizan sistemas de distribución monofásicos, así como plantas de energía solar e híbridas.
- Carga comercial: áreas céntricas, centros comerciales y edificios comerciales. Las densidades de carga en estos casos son mayores.
- Carga industrial: pequeñas industrias y grandes industrias. Algunas veces la carga industrial se incluye en las cargas comerciales. La carga industrial en general puede tener grandes potencias y contratar el servicio en altas tensiones

2.2. Tipos de Líneas de Distribución

De acuerdo a como se entrega la energía eléctrica a los consumidores las líneas de distribución se pueden clasificar en: líneas aéreas, dentro de las cuales están las líneas de distribución aéreas desnudas y las protegidas; líneas subterráneas; líneas mixtas las cuales están compuestas tanto por líneas aéreas como subterráneas [7].

2.2.1. Líneas Aéreas

Se consideran líneas aéreas todas las redes montadas a cierta altura, al aire libre y a vista directa para el transporte de energía eléctrica. Para mantener los conductores a la distancia mínima se utilizan apoyos, pudiendo ser estos de madera, metálicos o de hormigón y con conductores desnudos de aluminio y/o acero, o conductores aislados, donde se tienen las líneas aéreas compactas protegías con separadores o las líneas aéreas pre-ensambladas.

La elección de los tipos de conductores se realiza en función del lugar por donde vayan a recorrer y el tipo de instalación. Sobre los postes mencionados con anterioridad se disponen otros soportes en posición horizontal, llamadas crucetas, sobre las cuales se montan los diferentes elementos o herrajes, aisladores que son los encargados de sostener a dichos conductores.

Al conjunto de poste, cruceta y soportes de los cables recibe el nombre de apoyo, por lo que se puede afirmar que los elementos fundamentales de toda línea eléctrica aérea son los apoyos y los conductores. Las líneas aéreas presentan varias ventajas sobre las líneas subterráneas, ya que tanto la inversión inicial del montaje como los gastos de mantenimiento son inferiores.

Dentro de las líneas aéreas se encuentran las líneas aéreas convencionales y las líneas aéreas protegidas.

Líneas Aéreas Convencionales

Las líneas aéreas convencionales son las más utilizadas, se emplean conductores desnudos con aleación de aluminio y de cobre, aunque en la mayoría se utiliza principalmente el aluminio. El aluminio al tener una resistencia mecánica muy pequeña es necesario que dichos conductores posean alma de acero, con el fin de aumentar la resistencia mecánica de estos conductores, figura 2.1.

Las partes principales de una línea aérea convencional son:

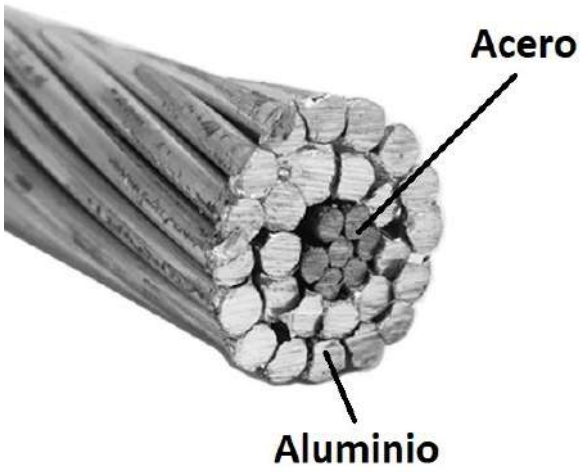


Figura 2.1: Conductor desnudo de aluminio

- Conductores.
- Aisladores.
- Postes de apoyo.
- Soportes transversales y las cimentaciones.

Líneas aéreas protegidas

Este tipo de líneas aparte de estar a la intemperie como las líneas convencionales, están compuesta de conductores que contienen una capa de aislación, donde la separación entre fases ésta hecha mediante espaciadores triangulares y verticales aislantes que permite una proximidad de los conductores energizados. Los cuales están sustentados por un cable de acero portante galvanizado de alta resistencia

Las líneas aéreas de distribución protegida son utilizadas en reemplazo de las líneas aéreas de conductores desnudos y su uso está recomendado para aquellas zonas donde son constantes las salidas de servicio causadas por el contacto de objetos extraños a la red, en lugares donde se requieran mejorar los índices de confiabilidad y seguridad [10].

Figura 2.2: Linea protegida compacta de media tensión

Líneas Subterráneas

El costo de la distribución subterráneo es mucho mayor que las líneas aéreas, al aumentar las densidades de carga, la construcción aérea se vuelve difícil de manejar en virtud de los transformadores y conductores de mayor tamaño que se requiere. Por esta razón en las zonas comerciales del centro, en la mayor parte de las ciudades se empieza a utilizar la distribución subterránea.

Debido a una imagen urbana muy deteriorada causada por el entrecruzamiento de las redes eléctricas aérea, telefónica y cercanía extrema de las redes a las edificaciones, la imposibilidad de construcción de nuevas redes aéreas por las características geométricas, con calles estrechas, discontinuas, sin aceras, grandes pendientes podemos decir que las redes subterráneas se han convertido en una alternativa favorable [4].

Naturalmente este aumento en la confiabilidad y en la estética forma parte del incremento en el costo de las instalaciones porque se debe realizar el calado de la vía pública para alojar las canalizaciones, conductores y señalización de los mismos; además de contar con la especialización del personal encargado de construir y operar este tipo de redes.

Las ventajas de un suministro de energía eléctrica basado en redes de distribución subterráneas con respecto a las redes aéreas, pueden resumirse de la siguiente manera:

- Mayor confiabilidad.
- Mayor seguridad
- Mejor imagen urbana (resalto de la belleza arquitectónica)
- Menor impacto medio ambiental
- Mayor continuidad de servicio

2.2.2. Estructuras de Alimentadores

Las líneas primarias de distribución son los conductores encargados de llevar la energía eléctrica desde las estaciones y subestaciones hasta los transformadores de distribución. La estructura principal de las líneas de alimentación se forma con: troncales y ramales. Las troncales de la red primaria son los conductores con mayor capacidad de transmisión de la energía eléctrica, están conformados por gruesos calibres. Los ramales son los cables que se derivan de los troncales y a ellos se le conectan normalmente los transformadores de distribución en media tensión, normalmente la sección utilizada en los ramales son de menor sección que las utilizadas en los troncales [8].

A grandes rasgos, se puede afirmar que existen dos tipos fundamentales de alimentadores en los sistemas de distribución: radiales y mallados.

Un sistema radial es aquel que presenta un solo camino simultáneo al paso de la potencia hacia la carga. Un sistema mallado, por el contrario, tiene más de un camino simultáneo para el flujo de potencia [4]. Todas las estructuras de los sistemas de distribución se pueden clasificar en radiales y mallados.

Red Radial

Utiliza una sola línea de suministro, de manera que los consumidores solo tienen una sola posible vía de alimentación. Este tipo de red se utiliza principalmente en áreas rurales ya que es menor el coste de suministro al tratarse de grandes áreas geográficas con cargas dispersas y baja densidad. Supongamos que se tiene un centro de cargas, y varias cargas que deben ser alimentadas desde este centro. Desde cada carga hasta el centro se debe encontrar un camino a través de un cable. El cable puede ser exclusivo para cada carga o bien puede pasar por varias cargas sucesivamente.

El sistema de alimentación en el cual cada carga está unida con el centro de alimentación a través de un cable exclusivo (figura 2.3.(a)), es característico de las instalaciones industriales en el nivel de alimentación de las cargas. Una ventaja de este sistema es que permite el control centralizado desde el centro de alimentación. (Los círculos negros representan

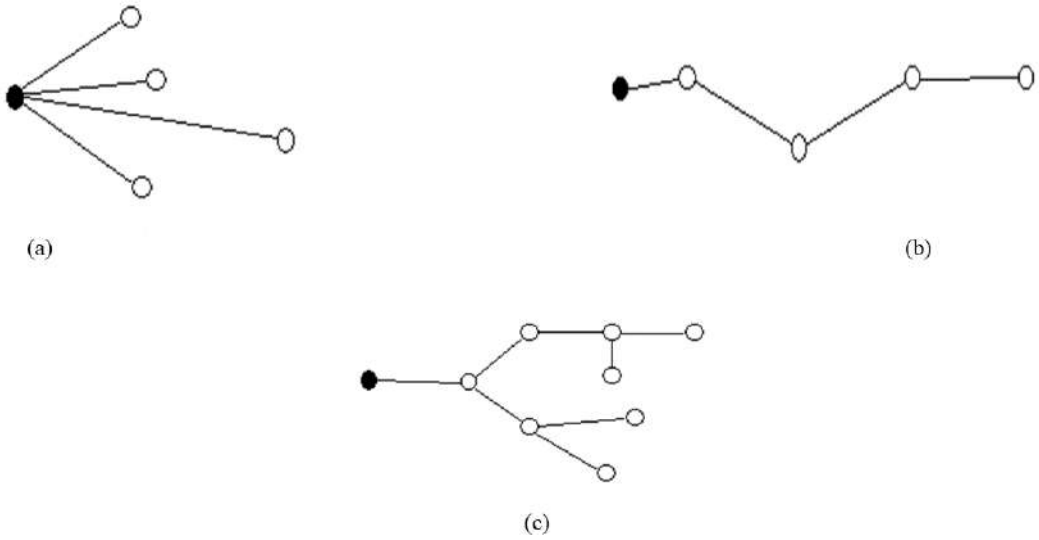


Figura 2.3: Redes radiales

los centros de alimentación, y los blancos las cargas)

El sistema de alimentación en el cual un solo cable va pasando por todas las cargas sucesivamente (figura 2.3.(b)), es característico de la distribución domiciliaria, de los circuitos de iluminación de calles. Este sistema obliga a tener los dispositivos de control de las cargas distribuidos, uno en correspondencia de cada derivación de carga, salvo que simplemente se conecten y desconecten todas las cargas juntas desde el centro de alimentación.

Ambos sistemas son de diseño intuitivo, característica muy valiosa ya que reduce la cantidad de documentación descriptiva necesaria. Una mezcla entre los dos sistemas podemos llamarla arborescente (figura 2.3.(c)), el cable nace troncal en el centro de alimentación, y se subdivide en ramas y más ramas, llegando hasta las cargas.

El cálculo de la red es simple, el flujo de carga se puede desarrollar suponiendo perdidas nulas, la carga que pasa por una rama cualquiera es suma de todas las cargas comprendidas entre esa rama y las hojas. Así puede determinarse la corriente en la rama y verificar que el cable seleccionado para la rama soporta esta corriente (desde el punto de vista térmico), otra verificación de interés es determinar la caída de tensión en la rama (para lo cual se deben conocer sus parámetros resistencia y reactancia y la longitud). Determinadas

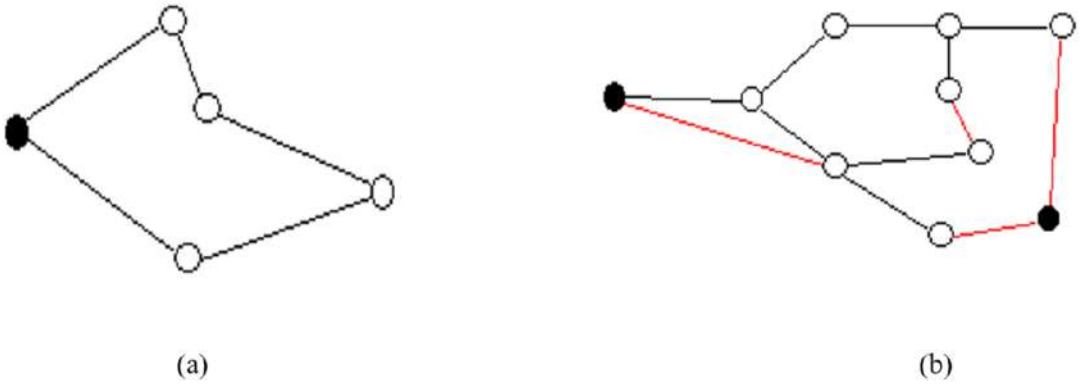


Figura 2.4: Redes anilladas

las caídas de tensión en todas las ramas, la caída de tensión total en cada camino se obtiene sumando las caídas de todas las ramas desde el punto de interés hasta el punto de alimentación.

En modo similar se pueden determinar las pérdidas en cada cable, y perfeccionar el flujo de carga teniendo en cuenta también las pérdidas. Todos los esquemas vistos presentan la particularidad de que cuando (se pierde) se produce falla de un cable (de un tramo) sucede la perdida de todas las cargas que incluyen el tramo como camino de alimentación [5].

2.2.3. Red Mallada

Buscando soluciones a esta debilidad (desde el punto de vista de seguridad de alimentación) se plantean redes de mayor complejidad. Los esquemas radiales se pueden duplicar, radial doble, y cada carga puede seleccionar si se alimenta desde un cable o el otro. O bien una línea que alimenta muchas cargas puede terminar en otro centro de alimentación, alimentarse desde ambas puntas, formando un anillo (figura 2.4.(a).

Si a un sistema arborescente se le agregan más ramas entre nodos ya existentes (figura 2.4.(b)), se forma un sistema mallado. El sistema mallado puede tener también más puntos de alimentación. (Los círculos negros representan los centros de alimentación, y los blancos

las cargas, los cables rojos permiten cerrar mallas o alimentar desde otro centro).

La documentación de estas redes es más compleja, ahora nada es intuitivo es necesario que se hagan muchas aclaraciones a fin de poder calcular el funcionamiento de la red en una condición cualquiera. Frecuentemente en el nivel de distribución el funcionamiento de las redes, aun teniendo estructura mallada es radial, es decir se abren cierta cantidad de ramas a fin de poder alimentar todas las cargas y la red queda radial. En caso de pérdida de un cable en servicio se conectan otros cables (que estaban desconectados) a fin de que nuevamente la red con un nuevo esquema radial preste servicio a todos los usuarios, se puede decir que la red mallada funciona como red radial dinámica (que cambia). Si se desea mantener las mallas cerradas, debe considerarse que los sistemas de protecciones deberán garantizar el buen funcionamiento separando exclusivamente el tramo que en cada condición se encuentre en falla. Esta es la principal dificultad que aun cuando se plantean sistemas mallados a nivel de distribución se los hace funcionar en modo radial, para facilitar la identificación de los puntos donde ocurren las fallas. Las redes de alta tensión (transmisión) son las que funcionan en modo mallado, a medida que se baja a tensiones menores el funcionamiento se plantea en modo radial [5].

2.2.4. Clasificación de Alimentadores

Los alimentadores se pueden clasificar, por el número de fases e hilos, de la siguiente manera:

1. Trifásicas de tres hilos.
2. Trifásicas de cuatro hilos.
3. Monofásicos de dos hilos.
4. Monofásicos de un hilo.

Las redes primarias trifásicas con tres hilos requieren una menor inversión inicial, en comparación con las redes trifásicas cuatro hilos, ya que no tienen el cuarto hilo que

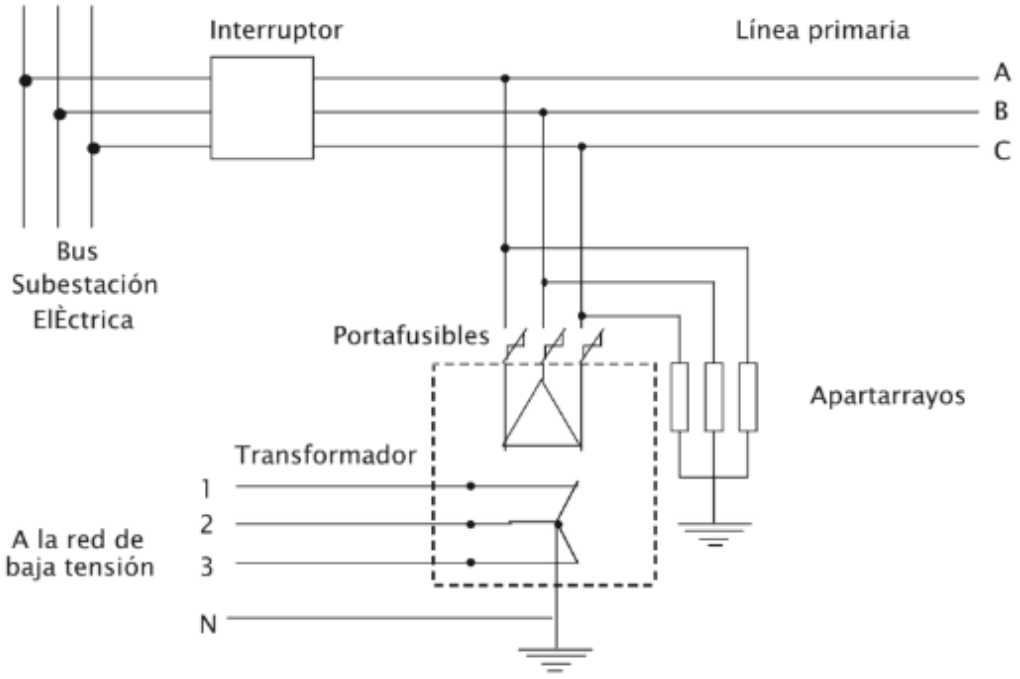


Figura 2.5: Redes primarias trifásicas de tres hilos

trabaja como neutro. Sin embargo, debido a que estos sistemas tienen un coeficiente de aterramiento mayor que un sistema trifásico de cuatro hilos, los equipos que se instalen en ellos deben tener niveles de aislamiento mayores. Una característica adicional de estos sistemas es que los transformadores de distribución conectados a estas líneas son de neutro flotante en el lado primario. Estas redes se utilizan en zonas urbanas [11]. Ver figura 2.5.

Las redes primarias trifásicas cuatro hilos requieren una mayor inversión inicial, ya que se agrega el costo del cuarto hilo (neutro) al de los tres hilos de fase; sin embargo, debido a que estos sistemas tienen un coeficiente de aterramiento menor de la unidad, los equipos que se conecten a estas líneas requieren de un menor nivel de aislamiento con menor costo de inversión. Estos sistemas se caracterizan porque a ellos se instalan transformadores con el neutro del primario conectado a tierra; así como transformadores monofásicos cuya tensión primaria es la de fase a neutro. Estas redes se utilizan en zonas urbanas primordialmente [11]. Ver figura 2.6.

Las redes primarias monofásicas de un hilo son derivaciones de redes trifásicas que permiten alimentar transformadores monofásicos. A estas redes primarias se les conoce como sistema SWER por sus siglas en inglés (Single Wire Earth Return) que significa

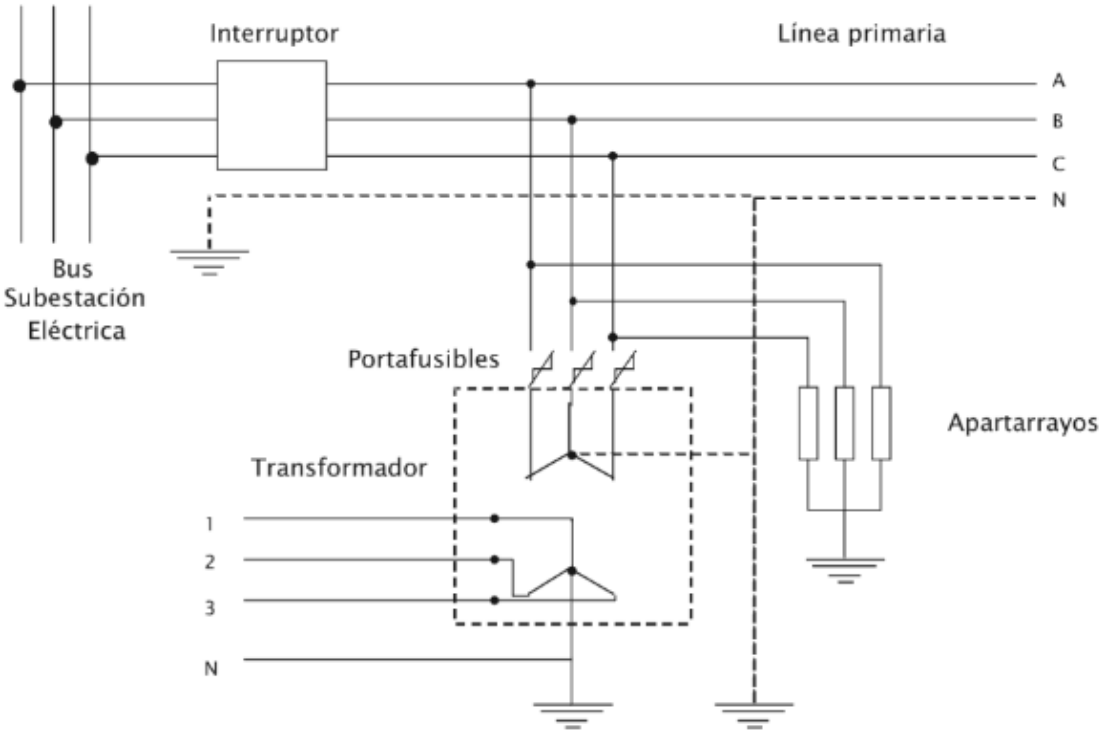


Figura 2.6: Redes primarias trifásicas de cuatro hilos

«Distribución con un hilo con retomo por tierra». En el sistema SWER el hecho de utilizar tierra como conductor de regreso obliga a tomar ciertas medidas, una de ellas es introducir un transformador de aislamiento para contrarrestar posibles efectos sobre seres humanos y animales y una eventual repercusión en los medios comunicación. Este tipo de redes se utilizan principalmente en zonas rurales.

2.2.5. Transformadores de Distribución

Los transformadores de distribución son los equipos encargados de cambiar la tensión primaria de media tensión a baja tensión de tal manera que el usuario puede utilizarla. En si el transformador de distribución es la liga entre la red primaria y la red secundaria. La capacidad del transformador se selecciona en función de la magnitud de la carga, debiendo tener especial cuidado en considerar los factores que influyen en ella; tales como, el factor de demanda y el factor de utilización.

La conexión del transformador trifásico es uno de los puntos de mayor interés cuando se

trata de seleccionar un transformador para una red de distribución de energía eléctrica. Las opciones que se le presentan al ingeniero son, de manera general, entre seleccionar transformadores con neutro flotante o con neutro conectado a tierra, en el devanado primario. El transformador con neutro flotante es una necesidad cuando el sistema primario es trifásico tres hilos; el transformador con neutro conectado a tierra cuando se trata de un sistema trifásico cuatro hilos. Al utilizar transformadores conectados en delta, en el lado primario, se disminuye el riesgo de introducir corrientes armónicas de orden impar (especialmente de tercer orden) a las líneas primarias, y se incrementa el riesgo de tener sobretensiones por fenómenos de ferro-resonancia en el transformador. Al seleccionar transformadores en estrella con neutro conectado a tierra, se introducen corrientes armónicas de orden impar en los circuitos primarios, y se disminuye grandemente la posibilidad de que se presenten sobretensiones por fenómenos de ferro-resonancia. Por lo que se refiere a la conexión en el lado secundario de los transformadores trifásicos, ésta normalmente es estrella con neutro conectado a tierra y cuatro hilos de salida. Esto permite tener dos niveles de tensión, para alimentar cargas de alumbrado y fuerza, a la vez. El conectar el neutro a tierra permite: detectar las corrientes de falla de fase a tierra, equilibrar las tensiones al neutro ante cargas desbalanceadas y, como una medida de seguridad al interconectarse con el tanque del transformador. La conexión con neutro aislado en los devanados de baja tensión, no es muy favorecida debido a las sobretensiones que se presentan al tener dos fallas en dos fases diferentes en el circuito de baja tensión [11].

2.2.6. Pérdidas de Energía Eléctrica

En los distintos puntos de la red eléctrica se producen, en condiciones normales de funcionamiento pérdidas que están ligados a diferentes factores. Las pérdidas de energía representan un problema serio para la empresa distribuidora de energía eléctrica. La disminución de las pérdidas de energía conlleva en una mayor disponibilidad de capacidad instalada y menores gastos de operación para un mismo beneficio social y económico, esto implica, a nivel del sector energético, una mayor utilización de energía y una eventual disminución de inversiones en el sector eléctrico Las pérdidas de energía se clasifican en pérdidas técnicas y perdidas no técnicas.

Pérdidas Técnicas

Las pérdidas técnicas representan un verdadero gasto de energía, desde el punto de vista físico; es energía que no puede ser utilizada de ninguna manera y cualquier medida que permita reducir ésta representa un beneficio para la empresa y para el usuario, en general. Estas pérdidas se deben a las condiciones propias de la conducción y transformación de la energía eléctrica, por tanto, dependen del grado de optimización de la estructura del sistema eléctrico, del equipamiento, y de las políticas de operación y mantenimiento. Las pérdidas técnicas representan la energía que se pierde durante la transmisión dentro de la red y la distribución como consecuencia de un calentamiento natural de los conductores que transportan la electricidad desde las plantas generadoras. Entre las principales causas que originan las pérdidas técnicas de energía están: efecto Joule, efecto Corona, armónicos, corrientes de fuga, pérdidas que son independientes de la carga o demanda.

Pérdidas por Efecto Joule Este efecto se define de la siguiente manera: «La cantidad de energía calorífica producida por una corriente eléctrica, depende directamente del cuadrado de la intensidad de la corriente, del tiempo que ésta circula por el conductor y de la resistencia que opone el mismo al paso de la corriente». Matemáticamente tenemos:

$$Q = I^2.R.t \tag{2.1}$$

dónde:

Q = energía calorífica producida por la corriente expresada en Julios.

I = intensidad de la corriente que circula.

R = resistencia eléctrica del conductor.

t = tiempo.

Las pérdidas por efecto Joule se manifiestan en: calentamiento de cables, calentamiento de bobinados de los transformadores de distribución, y disparo sin causa aparente de los

dispositivos de protección.

2.2.7. Factor de potencia

El Factor de Potencia se define como la relación entre la potencia activa (kW) usada en un sistema y la potencia aparente (KVA) que se obtiene de las líneas de alimentación. Todos los equipos electromecánicos que están constituidos por devanados o bobinas, tales como motores y transformadores necesitan la denominada corriente reactiva para establecer campos magnéticos necesarios para su operación.

La corriente reactiva produce un desfase entre la onda de tensión y la onda de corriente, si no existiera la corriente reactiva la tensión y la corriente estarían en fase y el factor de potencia seria la unidad. El desfase entre las ondas de tensión y corriente, producido por la corriente reactiva se anula con el uso de condensadores de potencia, lo que hace que el funcionamiento del sistema sea más eficaz y, por lo tanto, requiera menos corriente lo que técnicamente se denomina compensación.

Potencia Aparente, Efectiva y Reactiva

La potencia eléctrica es el producto de la tensión por la corriente correspondiente. Podemos diferenciar los tres tipos:

- Potencia aparente (KVA): S = V*I
- Potencia efectiva (kW): P = V*I* Cos ϕ
- Potencia reactiva (KVAR): Q = V*I* Sen ϕ

La potencia efectiva P se obtiene de multiplicar la potencia aparente S por el cos ϕ, el cual se le denomina como factor de potencia. El ángulo formado en el triángulo de potencias por P y S equivale al desfase entre la corriente y la tensión y es el mismo lo de la impedancia; por lo tanto, el cos ϕ depende directamente del desfase.

En la figura 2.7 se muestra un triángulo de potencias:

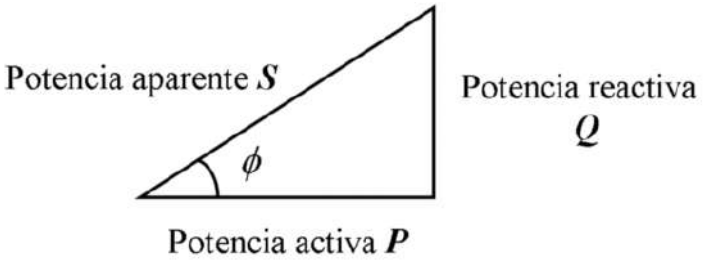


Figura 2.7: Triángulo de potencia

Efectos de un bajo factor de potencia

Un bajo factor de potencia implica un aumento de la corriente aparente y por lo tanto un aumento de las perdidas eléctricas en el sistema, es decir indica una eficiencia eléctrica baja, lo cual siempre es costoso, ya que el consumo de potencia activa es menor que el producto V*l (Potencia Aparente) Veamos algunos efectos de un bajo factor de potencia: Un bajo factor de potencia aumenta el costo de suministrar la potencia activa a la compañía de energía eléctrica, porque tiene que ser transmitida más corriente, y este costo más alto se le cobra directamente al consumidor industrial por medio de cláusulas del factor de potencia incluidas en las tarifas. Un bajo factor de potencia también causa sobrecarga en los generadores, transformadores y líneas de distribución, así como también las caídas de voltaje y pérdidas de potencia se tornan mayores de las que deberían ser. Todo esto representa pérdidas y desgaste en equipos.

-Generadores: La capacidad nominal de generadores se expresa normalmente en KVA. Entonces, si un generador tiene que proporcionar la corriente reactiva requerida por aparatos de inducción, su capacidad productiva se ve grandemente reducida, Una reducción en el factor de potencia de 100 % a 80 % causa una reducción en los kW de salida de hasta un 27 %.

Transformadores: La capacidad nominal de transformadores también se expresa en KVA, en forma similar a la empleada con generadores. Así, a un factor de potencia de 60 %, los kW de potencia disponible son de un 60 % de la capacidad de placa del transformador. Además, el porcentaje de regulación aumenta en más del doble entre un factor de potencia

de 90 % y uno de 60 %. Por ejemplo: Un transformador que tiene una regulación del 2 % a un factor de potencia de 90 % puede aumentarla al 5 % a un factor de potencia del 60 %.

Líneas de Transmisión y Alimentadores: En una línea de transmisión, o alimentador, a un factor de potencia de 60 %, únicamente un 60 % de la corriente total produce potencia productiva. Las pérdidas son evidentes, ya que un factor de potencia de 90 %, un 90 % de la corriente es aprovechable, y a un factor de potencia de 100 % toda es aprovechable.

Ventajas de la corrección del Factor de Potencia

De manera invertida, lo que no produce un efecto adverso produce una ventaja; por lo tanto, el corregir el factor de potencia a niveles más altos, nos da como consecuencia:

- Un menor costo de energía eléctrica. Al mejorar el factor de potencia no se tiene que pagar penalizaciones por mantener un bajo factor de potencia.
- Aumento en la capacidad del sistema. Al mejorar el factor de potencia se reduce la cantidad de corriente reactiva que inicialmente pasaba a través de transformadores, alimentadores, tableros y cables.
- Mejora en la calidad del voltaje. Un bajo factor de potencia puede reducir el voltaje de la planta, cuando se toma corriente reactiva de las líneas de alimentación. Cuando el factor de potencia se reduce, la corriente total de la línea aumenta, debido a la mayor corriente reactiva que circula, causando mayor caída de voltaje a través de la resistencia de la línea, la cual, a su vez, aumenta con la temperatura. Esto se debe a que la caída de voltaje en una línea es igual a la corriente que pasa por la misma multiplicada por la resistencia en la línea.
- Aumento de la disponibilidad de potencia de transformadores, líneas y generadores.
- Aumento de la vida útil de las instalaciones.

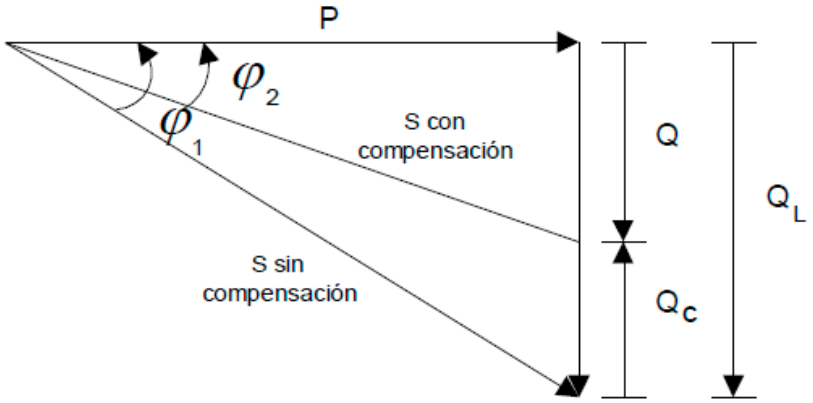


Figura 2.8: Compensación del factor de potencia, triángulo de potencia

Compensación del Factor de Potencia

Los transformadores, motores, etc. son consumidores inductivos. Para la formación de su campo magnético estos toman potencia inductiva o reactiva de la red de alimentación, Esto significa para las plantas generadores de energía eléctrica una carga especial, que aumenta cuanto más grande es y cuanto mayor es el desfase. Esta es la causa por la cual se pide a los consumidores o usuarios mantener un factor de potencia cercano a 1.

La demanda de potencia reactiva se puede reducir sencillamente colocando condensadores en paralelo a los consumidores de potencia inductiva QL. Dependiendo de la potencia reactiva capacitiva Qc de los condensadores se anula total o parcialmente la potencia reactiva inductiva tomada de la red. A este proceso se le denomina compensación. Después de una compensación la red suministra solamente (casi) potencia real. La corriente en los conductores se reduce, por lo que se reducen las pérdidas en éstos, así se ahorran los costos por consumo de potencia reactiva facturada por las centrales eléctricas, con la compensación se reducen la potencia reactiva y la intensidad de la corriente, quedando la potencia real constante, es decir, se mejora el factor de potencia.

En la figura 2.8 se muestra un triángulo de potencia con compensación.

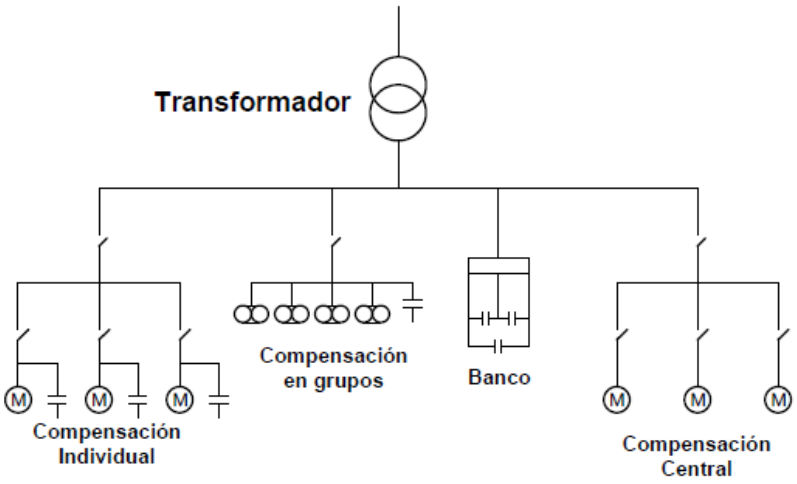


Figura 2.9: Tipos de compensación de reactivos

Tipos de compensación

Las inductividades se compensan con la conexión en paralelo de capacitancias, conocida como compensación en paralelo. Esta forma de compensación es la más usual, especialmente en sistemas trifásicos. Los tres tipos de compensación en paralelo más usados son:

a. Compensación Individual: A cada consumidor inductivo se le asigna el condensador necesario. Este tipo es empleado ante todo para compensar consumidores grandes de trabajo continuo.

b. Compensación en Grupos: Los grupos se conforman de varios consumidores de igual potencia e igual tiempo de trabajo y se compensan por medio un condensador común. Este tipo de compensación es empleado, por ejemplo, para compensar un grupo de lámparas fluorescentes.

c. Compensación Central: La potencia reactiva inductiva de varios consumidores de diferentes potencias y diferentes tiempos de trabajo es compensada por medio de un banco de compensadores. Una regulación automática compensa según las exigencias del momento.

En la figura 2.9 se muestra las conexiones para los tipos de compensación

2.3. Métodos para reducir las Pérdidas Técnicas

Las redes eléctricas de distribución representan el principal foco de pérdidas en el sistema eléctrico y los circuitos de distribución secundarios, por tener los menores niveles de tensión y en algunos casos, extensas longitudes, poseen los niveles de pérdidas más altos en todo el Sistema. Por esto, es necesario tomar iniciativas para estudiar y optimizar las redes eléctricas de distribución y poder garantizar la disminución de las pérdidas técnicas de energía, así como también mejorar la calidad del servicio eléctrico a los usuarios

2.3.1. Repotenciación de Alimentadores Primarios

Una manera efectiva de reducir las pérdidas de energía es a través de la repotenciación del conductor de los alimentadores primarios, que consiste en el aumento del calibre del conductor de la línea. El costo del conductor que se va a instalar, sumado con el costo de la mano de obra requerida para la instalación, debe ser compensado por el beneficio producido con la disminución del costo asociado a las pérdidas de energía [3].

La repotenciación de alimentadores es una alternativa aplicable para la reducción de las pérdidas de energía en un sistema de distribución, consiguiendo un ahorro en los costos de operación del sistema. En los casos en que el sistema se encuentra sobrecargado, la repotenciación de alimentadores se hace aún más necesaria y resulta conveniente evaluar la propuesta de cambio de conductores [3].

2.3.2. Ubicación Optima de Reguladores de Voltaje de Media Tensión

Un alto porcentaje de las pérdidas en el sistema de energía eléctrica se presentan en la parte de distribución, además de lo anterior, generalmente las empresas no disponen de un sistema de control remoto que les permita realizar un seguimiento y control de las variables en tiempo real, principalmente por los altos costos de inversión que estos sistemas automáticos requieren [2].

En consecuencia, los sistemas de distribución son los menos automatizados y los que mayores dificultades presentan en la operación. Una posible alternativa para mejorar los problemas de bajo o alto voltaje en la red y con ello procurar por una reducción de pérdidas en el sistema, es considerar la ubicación estratégica de reguladores de tensión a lo largo de los alimentadores de la red de distribución.

Un regulador de tensión es básicamente un autotransformador con taps en uno de sus devanados, que permite variar el voltaje entregado, y que puede ser operado bajo carga. El dispositivo común es un regulador monofásico, el cual se puede aplicar a sistemas monofásicos o puede ser conectado junto con otras unidades para formar un banco trifásico. La metodología desarrollada considera para la instalación de reguladores de tensión, tanto unidades monofásicas como bancos trifásicos con conexión en estrella. El problema de la ubicación de reguladores de tensión, corresponde principalmente, a la determinación del lugar (localización), del número mínimo de reguladores de tensión en el alimentador y de la posición óptima del tap (para cada una de las fases sobre las que esté operando el equipo), de forma que el perfil de tensión esté dentro de unos límites preestablecidos y se reduzcan las pérdidas del sistema de distribución para ciertas condiciones de carga. Obviamente, la solución será interesante si se obtiene una adecuada relación costo/beneficio.

Un análisis computacional de los flujos de potencia en una red de distribución radial de media tensión, proporciona un cálculo robusto de determinación de los parámetros de: Potencia, Corriente y Voltaje, asociado a cada punto de la red de distribución eléctrica, que define de forma clara, de acuerdo al perfil de voltaje que muestra las violaciones de voltaje en los nodos asociados, permite la optimización en la ubicación del banco de reguladores de voltaje [2].

Una buena ubicación óptima de reguladores de voltaje, trae consigo los siguientes beneficios:

- Se reducen al mínimo las condiciones anormales asociadas a la red eléctrica de distribución, que afectan negativamente a los usuarios finales.
- Se logra reducir al mínimo las pérdidas de potencia activa.

2.3.3. Ubicación Optima de Bancos de Capacitores

En los sistemas de distribución, la aplicación de capacitores es planteada principalmente para el control de voltaje y reducción de pérdidas eléctricas, cuando se plantea m esquema de localización de capacitores persiguiendo alguno de estos fines se define como el objetivo primario de la compensación; sin embrago, siempre que el esquema de compensación sea óptimo puede conseguir los beneficios secundarios de mejora del factor de potencia a nivel sistema de distribución, la liberación de capacidad de los transformadores de la subestación el incremento de la capacidad de transferencia de los alimentadores y la reducción de cargos por alta demanda de reactivos [1].

Entre los beneficios que se pueden obtener a partir de la instalación de bancos de capacitores en Media Tensión y que benefician tanto a la empresa distribuidora como a los usuarios; se puede citar los siguientes:

- Capacidad liberada de las subestaciones; se requiere inyectar menos potencia reactiva al alimentador, así los transformadores de potencia ubicados en la subestación se ven liberados en un cierto margen.
- Capacidad liberada en el alimentador; existen menos exigencias térmicas sobre las líneas como consecuencia de la reducción de las corrientes, y por lo tanto se dispone de una mayor capacidad de transmisión de potencia.
- Mejor perfil de tensiones, lo que se refleja en un servicio al cliente.
- Mejora el factor de potencia.

2.3.4. Balanceo de Cargas en Alimentadores Primarios

El desbalanceamiento trifásico, en sistemas de distribución, produce un incremento en las pérdidas de flujo de potencia activa y grandes desvíos de voltaje, que limitan la capacidad de distribución de la energía eléctrica hasta los consumidores, pudiendo incluso provocar sobrecalentamiento en las líneas de distribución o transformadores. Una manera de resolver este problema es a través de procedimientos de reconfiguración, mediante maniobras

de abertura y/o cierre de interruptores, alterando la topología para una configuración más conveniente del sistema de distribución [3].

Entre los beneficios que se pueden obtener a partir del balanceo de carga en las Redes de Media Tensión y que benefician tanto a la empresa distribuidora como a los usuarios, se puede citar los siguientes:

- Mejora el voltaje igualando las caídas de tensión en cada fase a lo largo del alimentador.
- Mejora la capacidad de conducción en las líneas.
- El beneficio de este análisis, puede ser realizado sin invertir capital económico.

2.3.5. Reconfiguración de Alimentadores Primarios

La reconfiguración de circuitos de distribución consiste básicamente en la transferencia de cargas desde alimentadores muy cargados hacia alimentadores con cargas relativamente menores, con lo cual no sólo se busca controlar el nivel de carga en los alimentadores involucrados en la operación, sino también mejorar los perfiles de voltaje a lo largo de ellos y reducir las pérdidas de potencia totales. El objeto de la reconfiguración es obtener las mínimas pérdidas posibles en las redes de distribución, ya que puede suceder que una carga o grupo de cargas, estén alimentadas por una trayectoria muy larga o de peores condiciones (conductores de menor calibre) y por tanto den origen a pérdidas superiores a las que se provocarían de lograrse su alimentación por otras trayectorias de mejores condiciones de transmisión [2].

La reconfiguración de alimentadores consiste en la modificación topológica de los diferentes alimentadores que componen un sistema de distribución y se realiza para mejorar el desempeño del sistema y la calidad del servicio que se presta. Normalmente parte del sistema existente, pero se puede modificar los puntos o nodos de conexión de modo tal que se puedan ajustar esencialmente los niveles de cargabilidad de los circuitos. Un análisis de reconfiguración de alimentadores puede conllevar a la modificación misma de los

recorridos de los circuitos y de sus puntos de alimentación, lo cual no es muy deseable en la mayoría de los casos por los altos costos que esto implica [2].

La transferencia de carga se determina debido a que las redes de distribución no presentan un comportamiento homogéneo en cuanto a la demanda de potencia, usualmente se presentan algunos circuitos que están suministrando la máxima potencia exigida por su capacidad, y otros que están a su mínima capacidad. Entre los beneficios técnicos como económicos de la reconfiguración, podemos nombrar los siguientes:

- Reducción de pérdidas, tanto de energía como de potencia.
- Ahorro de los KW-h comprados de la empresa generadoras.
- Ahorro los KW pico de potencia, necesarios en demanda alta.
- Disminución en el nivel de utilización de los equipos permitiendo que su vida útil se extienda y se incremente el tiempo de reposición de los mismos.

2.4. Softwares de Análisis de Redes Eléctricas

En la actualidad, las compañías eléctricas han aumentado de tamaño y se han incrementado el número de interconexiones, por lo que las planeaciones para las futuras expansiones del sistema se vuelven cada día más complejas. El costo de las adiciones y modificaciones ha hecho que las compañías eléctricas consideren una gran variedad de posibilidades para el diseño y realicen estudios cada vez más detallados de las consecuencias que pueden ocasionar sobre el sistema la elección de cada alternativa. También es necesario reunir y manejar un gran número de datos con la mayor exactitud posible para todas las redes para así lograr un análisis detallado de los diferentes casos que sufre la red.

La evolución de los sistemas de distribución ahora exige que los ingenieros realicen desde análisis de planificación hasta simulaciones especializadas que respalden las operaciones, lo cual incluye estudios de protección y evaluaciones de interconexión de RED. Entre las herramientas de análisis de redes eléctricas se encuentran:

2.4.1. CYMDIST – Análisis del Sistema de Distribución

CYMDIST es el paquete base para el análisis del sistema de distribución del software CYME. Agrupa todas las herramientas de modelado y análisis necesarias para realizar los diversos tipos de simulaciones involucradas en la planificación del sistema de distribución eléctrica. Los motores de cálculo admiten modelos de distribución balanceados o desbalanceados que se construyen con cualquier combinación de fases y funcionan en configuraciones de tipo radial, anillado o mallado [9].

El paquete CYMDIST comprende los siguientes análisis:

- Flujo de carga desbalanceado
- Distribución y estimación de carga
- Análisis de fallas:
- Flujo de falla/cortocircuito
- Localizador de fallas
- Falla serie y falla simultánea
- Caídas de tensión
- Balance de carga
- Dimensionamiento y ubicación óptima del condensador
- Arranque de motor
- Análisis por lotes

Se pueden agregar módulos opcionales a CYMDIST a fin de extender la funcionalidad para realizar más análisis detallados y especializados. Regularmente se desarrollan nuevos módulos para satisfacer las necesidades cambiantes de los ingenieros de distribución. Las capacidades de modelado del editor de red del software CYME contienen la representación

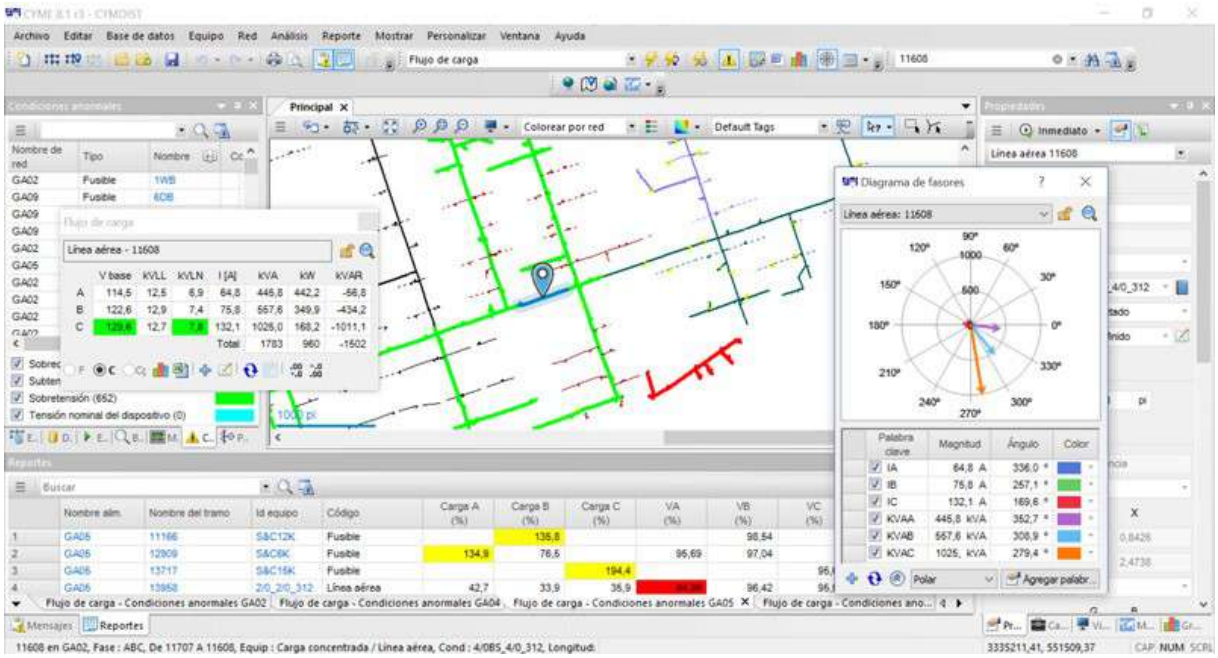


Figura 2.10: Interfaz de usuario CYME

detallada de todas las partes de una red de distribución, que incluye el sistema primario MT, el sistema secundario BT (radial o mallado) así como el sistema de subtransmisión [9].

Parte II

Resumen Ejecutivo

Capítulo 3

3.1. Descripción del trabajo

En este trabajo se exploran, evalúan y desarrollan técnicamente alternativas para mejorar los niveles de perdidas, tensión y carga del alimentador VAQ-2 (Vaquería 2), el cual arranca de la Estación Vaquería de la ANDE, para esta propuesta se realizan análisis de datos de demanda tanto de este alimentador como los de acople que posee, en este caso el CDO-3.

El desarrollo de las alternativas se realiza teniendo en cuenta criterios económicos y técnicos, como así también de tecnologías aun no desarrolladas en el país, buscando la innovación en este campo.

3.1.1. Métodos y Técnicas utilizadas

Esta investigación es de carácter númerica al principio ya que se utilizan herramienta de analisis de datos para la obtención de parametros electricos preponderantes y a la vez estadísticos de las redes de distribución. Descriptiva pues se relevan datos referentes a la topología de estas redes, y las zonas de influencia. Finalmente se evaluan alternativas por medio de simulaciones computacionales, volviendo a la investigación de tipo cuantitativa y descriptiva.

3.2. Justificación

La energía eléctrica es el insumo principal que mueve al mundo industrial como así también al sector comercial y residencial, ante el constante crecimiento y necesidad del servicio las empresas distribuidoras de energía eléctrica extienden su área de cobertura por medio de alimentadores y redes de distribución que a cada instante sufren cambios en toda su extensión lo que implica que las características del servicio en los puntos de entrega y consumo no se mantienen constantes, principalmente por el crecimiento de las troncales no planificadas generando un mal balanceo de las cargas, esto permite la circulación de grandes magnitudes de corriente por el neutro que inciden directamente en el aumento de las pérdidas en los alimentadores [5].

La realización del presente proyecto de fin de grado es relevante ya que se propondrán alternativas para mejorar los niveles de tensión en las zonas que presentan caídas de tensión por debajo del límite inferior reglamentado por ANDE, también se pretende mejorar el equilibrio de cargas para corregir los niveles de tensión y lo más importante la reducción de las pérdidas de energía del Alimentador VAQ 2 que puedan mejorar la calidad del producto de la energía eléctrica y mejorar el servicio eléctrico para las localidades que sirve este alimentador.

Con la realización del proyecto se beneficiarán la ANDE ya que logrará la disminución de las pérdidas eléctricas en el alimentador de media tensión y también mejorará la calidad del servicio del mismo. Serán beneficiados también los usuarios finales que obtendrán una mejor calidad en el suministro de energía eléctrica.

3.3. Finalidad del proyecto

Con este proyecto se busca mejorar los niveles de tensión, pérdidas, desequilibrio de carga y factor de utilización de la red VAQ-2.

3.4. Metas

Proponer al menos tres alternativas de mejoras

3.5. Objetivos

3.5.1. Objetivo general

Proponer alternativas para mejorar los niveles de tensión en 23 kV y reducir las pérdidas técnicas con el fin de mejorar el desempeño de operación del Alimentador VAQ-2.

3.5.2. Objetivos específicos

- Realizar relevamiento de parámetros técnicos, datos de cargas, configuración, esquema unifilar y el estado actual de operación del Alimentador VAQ-2.
- Establecer criterios técnicos y económicos para elaborar las diferentes alternativas para reducir las pérdidas técnicas, mejorar los niveles de tensión en 23 kV y mejorar el desempeño del Alimentador VAQ-2.
- Ejecutar simulaciones de las alternativas posibles y seleccionar la más adecuada.
- Realizar la evaluación económica de la alternativa seleccionada.

3.6. Beneficiarios

El beneficiario principal de este trabajo es la empresa ANDE. Por otra parte, los usuarios, al tener un mejor servicio.

3.7. Producto

La mejor alternativa en busca de mejorar técnicamente la operación del alimentador en 23 kV VAQ-2.

3.8. Localización física y cobertura espacial

La zona de influencia de este trabajo, es parte del departamento de Caaguazú, específicamente los distritos de Toledo, Tres Palmas, Tembiapora, etc (véase figura 5.1).

3.9. Especificaciones de actividades y tareas realizadas

En este Proyecto se realizaron las siguientes actividades:

- Relevamiento de datos, de demanda de los alimentadores VAQ-2, CDO-3 y las Estaciones Vaquería y Campo Dos.
- Revisión de bibliografía extensa de tecnologías en media tensión.
- Evaluación de datos técnicos de la red.
- Propuesta de alternativas para mejoras técnicas.
- Simulaciones de las diferentes alternativas en software CYME.
- Análisis financiero de la alternativa seleccionada.

3.10. Recursos necesarios

3.10.1. Recursos humanos

Los recursos humanos utilizados fueron los siguientes:

- Proyectista.
- Tutor.

3.10.2. Recursos materiales

Para la ejecución del presente proyecto final de grado fueron necesarios los siguientes materiales:

- Computadora de la empresa ANDE.
- Software de simulación.
- Software de análisis de datos.

3.11. Costos

En este trabajo finalmente se selecciona la alternativa de la puesta en servicio del VAQ-5 con regulación de tensión del mismo y la construcción de linea en la localidad de Tres Palmas, a fin de dividir la carga preponderante del VAQ-2. Los costos que representa esta alternativa se presentan en la tabla 3.1, la moneda utilizada es el guaraní. Para ello se tuvo en cuanta los costos utilizados en la elaboración del Plan Anual de Contrataciones de la ANDE del periodo 2022.

Concepto	Precio unitario	Unidad	Cantidad	Total
Construcción de Línea Subterránea de 3x240 mm2	724.312.297	km	0,1	72.431.230
Construcción Línea Trifásica Protegida de 3x185 mm2	474.448.681	km	1,5	711.673.021
Construcción de Línea Trifásica Aèrea desnuda de 3 x 150mm² de Aa.	138.599.743	km	42,7	5.918.209.024
Traslado de reguladores de tensión (costos operativos)	18.520.000	un.	2	37.040.000
Adquisición e instalación de RT 200 A	295.630.000	un.	1	295.630.000
Adquisición e instalación de BC 600 kVAr	26.000.000	un.	1	26.000.000
TOTAL				**7.060.983.275**

Tabla 3.1: Costos del desarrollo de la alternativa seleccionada

3.12. Beneficios

El beneficio principal de esta alternativa es la mejora en los niveles de pérdidas, en la tabla 5.3, se obtiene una ahorro en términos de pérdidas de 1784 kW, por otra parte se considera la cargabilidad de estos alimentadores pudiendo conceder al menos 400 kW de potencia a instalaciones industriales y de producción de la zona al año, fuera del crecimiento vegetativo, según [6] el crecimiento es de 7,8 %.

3.13. TIR y VAN

Para estos cálculos se considera primeramente lo siguiente:

- Precio de venta Gs.: 311
- Precio de compra Gs.: 230
- Factor de carga: 0,5152
- Factor promedio: 0,302896384

En la tabla A.12 se expone la venta esperada en un periodo de 5 años, teniendo en cuenta los beneficios planteados en la sección anterior.

En la tabla A.13 se muestran los ahorros debido a la mejora en las pérdidas técnicas en el desempeño operativo de las redes VAQ-2 y VAQ-5. Los costos de adquisición de la energía se plasman en la tabla A.14. Se estima un costo operativo de 20.000.000 Gs.

Beneficio	Costo	Año	Flujo neto	Van Acumulativo
		0	-7.060.983.275	
2.990.203.545	1.426.233.174	1	1.563.970.371	-5.497.012.904
4.434.762.035	2.494.556.172	2	1.940.205.862	-3.556.807.042
5.991.996.086	3.646.208.365	3	2.345.787.721	-1.211.019.320
7.670.694.394	4.887.689.428	4	2.783.004.965	1.571.985.645
9.480.331.170	6.226.006.015	5	3.254.325.155	4.826.310.800

Tabla 3.2: Flujo de caja de la alternativa propuesta

Finalmente en la tabla 3.2 se tiene el flujo de caja esperado, siendo el retorno de la inversión en el año 4. El VAN obtenido es de Gs. 1.167.065.899 y el TIR de 17,69 % por encima del 12 % estipulado por entidades financieras.

Parte III

Ingeniería de Diseño

Capítulo 4

Análisis de cargas y demandas

En este capítulo se recaban datos de demanda del alimentador VAQ-2 como así también del alimentador CDO-3 el cual posee acople con el mismo y es parte de este estudio, también se evalúan las demandas de las estaciones Vaquería y Campo Dos, los cuales son los mas cercanos a la zona de carga. Por otra parte se realizan las evaluaciones topológicas de las lineas, extensiones, dimensiones y densidades de cargas. En todos los casos se analizó un periodo de 4 meses desde noviembre del 2022 a febrero del 2023, correspondientes al verano donde los alimentadores y estaciones toman su demanda máxima.

4.1. Demanda de estaciones

Se recabaron datos de demanda del verano 2022 de las estaciones Vaquería y Campo Dos, los cuales son fundamentales en este estudio, esto a fin de observar la disponibilidad de los mismos y las características de los parámetros eléctricos que poseen.

En la figura A.1 se aprecia una parte del informe de demanda de estaciones de la unidad encargada de las estaciones Vaquería ES-VAQ y Campo Dos (ES-CDO).

La estación Vaquería (ES-VAQ), se alimenta en 220 kV desde Itakyry, posee un transformador 220/23 kV de 41,7 MVA. Se tiene un porcentaje de utilización del 51 % de la ES-VAQ, en fecha 9 de diciembre del 2022, potencia instantánea de 21,1 MW. La ES-CDO

sobre el TR-01 de 80 MVA tiene una demanda máxima de 56,9 MW representando el 71 % del factor de utilización del mismo, esto en la misma fecha.

Ambas estaciones poseen potencia disponible, sin embargo en este estudio no se consideraran entradas de suministros solo intercambios entre estos centros.

4.2. Demanda del alimentador VAQ-2

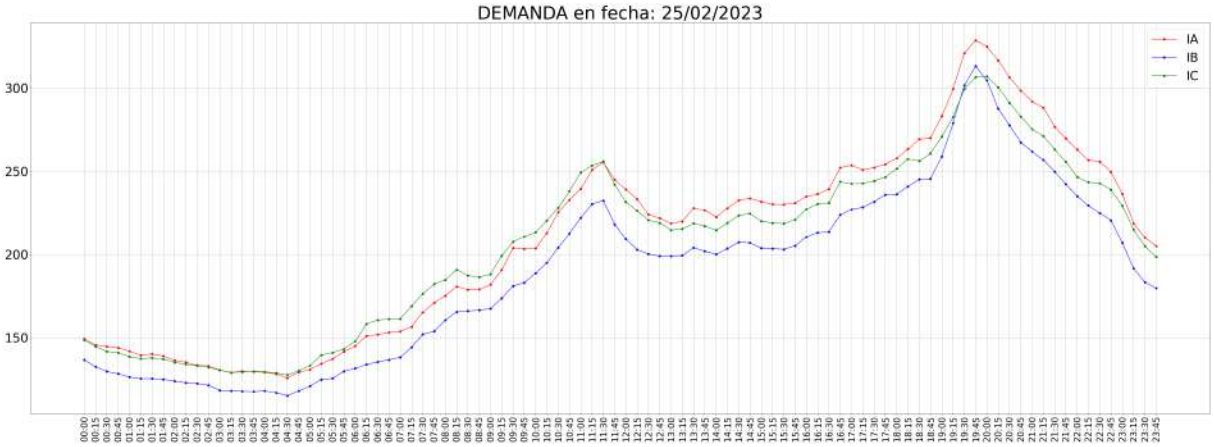


Figura 4.1: Máxima demanda del alimentador VAQ-2

En este apartado se estudian los parámetros del alimentador VAQ-2, el cual alimenta varias localidades y distritos del departamento de Caaguazú, entre ellas: Toledo, Tres Palmas, Casilla Dos, Tembiapora, Pindo'i, Banderita, Indigena, etc. En la figura 5.1 se precia el recorrido actual de este alimentador.

Se recabaron datos de demanda del alimentador, específicamente del sistema de control SCADA, se procesaron estos datos buscando los valores probabilísticos de los mismos. La fecha estudiada corresponde a la máxima producción del alimentador, en la figura A.2 se aprecia el gráfico de demanda de este periodo, mientras que en la figura 4.1 se grafica la demanda del alimentador en el día de demanda máxima correspondiente a la fecha 25 de febrero del 2023, a la vez se estudio el factor de potencia del mismo, para obtener una mejor caracterización del sistema, esto se observa en la figura A.3, el factor de potencia promedio obtenido es de 0,906 y la dispersión de valores es de 0,0102.

La demanda máxima se considera como sigue según campos de la base de datos:

- CORRIENTE_R = 328,68 A
- CORRIENTE_S = 313,15 A
- CORRIENTE_T = 307,09 A

La media y dispersión se plasman en el apéndice A.1. Según los registros mas actualizados del Departamento de Operación Centro, la carga conectada vinculada a la vez con los clientes en media tensión de este alimentador es de 22639 kVA.

El Factor de carga se calcula con el valor de corriente media sobre el valor de corriente máxima, en este caso es de 0,5152.

4.3. Demanda del alimentador CDO-3

Se estudia la demanda de este alimentador pues será parte de una alternativa a plantear, entonces se busca su demanda máxima y valores de factor de potencia esto se aprecia en las figuras A.4 y A.5.

El factor de potencia promedio es: 0,943 y la dispersión del factor de potencia es: 0,0098, los valores de corriente máxima son: CORRIENTE_R = 115,59 A, CORRIENTE_S = 107,56 A, CORRIENTE_T = 111.73 A.

Según los datos del Departamento de Operación Centro el registro de carga instalada sobre este alimentador es de 17626 kVA.

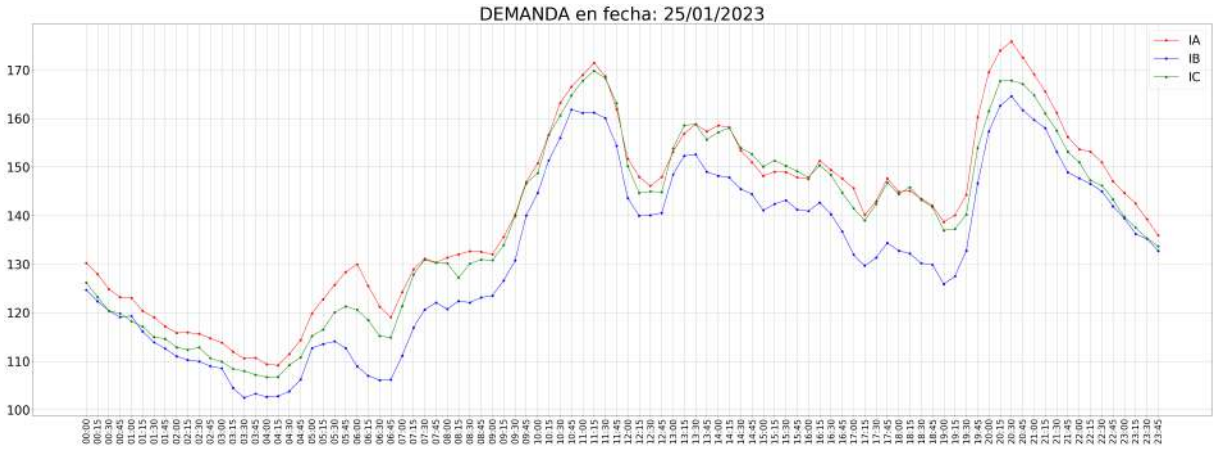


Figura 4.2: Demanda máxima del alimentador CDO-3

4.4. Demanda de equipos sobre las lineas

Se estudiaron las demandas de equipos tele-comandados que se encuentran instalados sobre las lineas de distribución mencionadas. Estos equipos guardan registros del sistema SCADA, cuyos valores son útiles en las simulaciones de flujo de carga. En la tabla 4.1 se aprecian estos valores en la fecha y hora exacta de mayor producción por alimentador.

Alimentador	ID Equipo	Fecha	IA (A)	IB (A)	IC (A)	FP
VAQ-2	48540	25/2/2023 19:45	220.8	216.93	228.25	0.89
CDO-3	17201	25/1/2023 20:30	133.8	116.8	118.33	-

Tabla 4.1: Demanda de equipos en fecha de demanda máxima

Teniendo estos valores de corriente en zonas del alimentador se podrá mejorar la caracterización eléctrica considerándolos como medidores de corriente.

Capítulo 5

Alternativas de mejoras en el alimentador VAQ-2

El alimentador VAQ-2 posee una extensión de mas de 100 km de linea trifásica en media tensión abastecida en 23 kV, como se observa en la figura 5.1. Sirve a la zona de Banderita y Tembiapora, estas localidades prácticamente están rodeadas por el espejo de agua del lago Yguazú. Según trabajadores de la empresa ANDE, la forma de llegar con mayor rapidez al distrito de Tembiapora es a través de balsas que cruzan el lago, llevando consigo el vehículo de la empresa. Por estas razones la extensión del alimentador CDO-3 (Campo Dos 3) que anteriormente alimentaba esta zona se trazaba de manera a rodear este lago. Posteriormente fue transferido la carga sobre el VAQ-2.

Sin embargo, la carga preponderante se densifica en la zona final del alimentador, por esa razón el mismo posee tres equipos reguladores de tensión conectados en delta cerrado, todos de corriente nominal igual a 200 A.

Posee dos bancos de capacitores de 300 kVAr y 600 kVAr de manera a mejorar el factor de potencia de la red.

El conductor troncal se extiende con las características mostradas en la tabla 5.1, los datos de ampacidad se obtienen de estudios realizados por la empresa los cuales se encuentran modeladas en las base de datos del software utilizado, cabe recalcar la ampacidad del

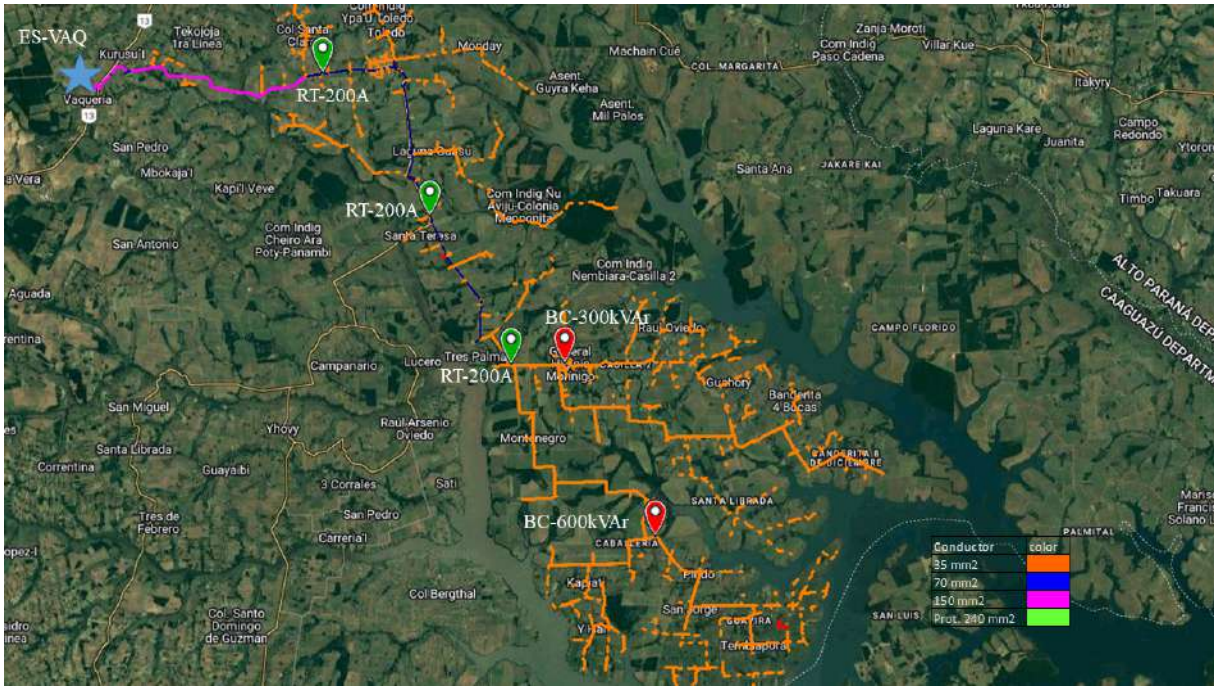


Figura 5.1: Vista general del alimentador VAQ-2

conductor de 3x150 mm2, el cual se acerca a los valores obtenidos de demanda en el capítulo anterior, el cual se calcula en 82 % del valor de ampacidad del conductor troncal principal, teniendo en cuenta el cable subterráneo de salida este se encuentra en un 88 % de su valor de ampacidad.

Conductor	ID Linea	Longitud (Km)	Ampacidad (A)
Aéreo 3x35 mm2	2035	92,1	155,47
Aéreo 3x70 mm2	2070	46,7	242,24
Aéreo 3x150 mm2	2150	21,4	395,45
Aéreo 1x16 mm2	4016	1,5	94,4
Aéreo 1x35 mm2	4035	322	155,47
Aéreo 1x70 mm2	4070	0,9	242,24
Subterráneo 240 mm2 Cu	5240	0,5	369
Protegido 185 mm2	EP185	1,6	386

Tabla 5.1: Características de conductores de la red VAQ-2

Para entender la situación actual se precedió a realizar simulaciones en este escenario.

5.1. Escenario inicial

Se utilizó el software CYME en su versión 9, con licencia propiedad de la empresa ANDE para la realización de simulaciones de flujo de carga.

Primeramente se procedió a simular el estado actual del alimentador VAQ-2, utilizando la demanda máxima obtenida en el apartado anterior, y el factor de potencia también estudiado anteriormente. Para mejorar la simulación se bloquearon las cargas de aquellos clientes que superan los 400 kVA de potencia instalada, para ello se recabaron datos de la GC/ADC[1], de esta manera se pudo mejorar la carga real del alimentador, en la figura A.6 se representa la carga instalada en forma de mapa de calor, se pueden ver los puntos cuales resaltan en las localidades de Toledo y Tres Palmas.

Se modela la fuente, siendo la tensión de salida igual a 23,5 kV, la demanda en corriente es utilizado de los valores obtenidos en día de mayor producción con su respectivo factor de potencia, también son utilizados los valores de demanda máxima del equipo 48540 sobre linea, el flujo de carga se realiza con 500 iteraciones con tolerancia del 1 % en resultados de tensión, los reguladores de tensión son declarados con el máximo tap permitido (+16). El perfil de tensión en este escenario se aprecia en la figura 5.2, existe tensión por debajo del rango permisible (±5 %) en gran parte de la extensión del alimentador, el desequilibrio de tensión es preponderante ya al final del tramo como se puede ver en la figura A.7 el cual sobrepasa el ±2 %.

En cuanto a los reguladores, existe sobrecarga de los mismos en los tres casos, por lo que la regulación de los mismos ya no es efectiva, y el desgaste es mayor en las horas de mayor demanda (ver figura A.8).

Los niveles de sobrecarga del conductor y niveles de tensión sobre la extensión se observan el la figura A.9, existe conductor sobrecargado por encima del 100 %. Los niveles de tensión en este escenario se encuentran en gran parte por debajo del 95 %, ademas la simulación converge con los valores de tensión en el equipo 48540. Los casos críticos de sobrecarga de conductores se explayan en la tabla A.1.

[1]Gerencia Comercial, Departamento de Estudios Comerciales de la ANDE

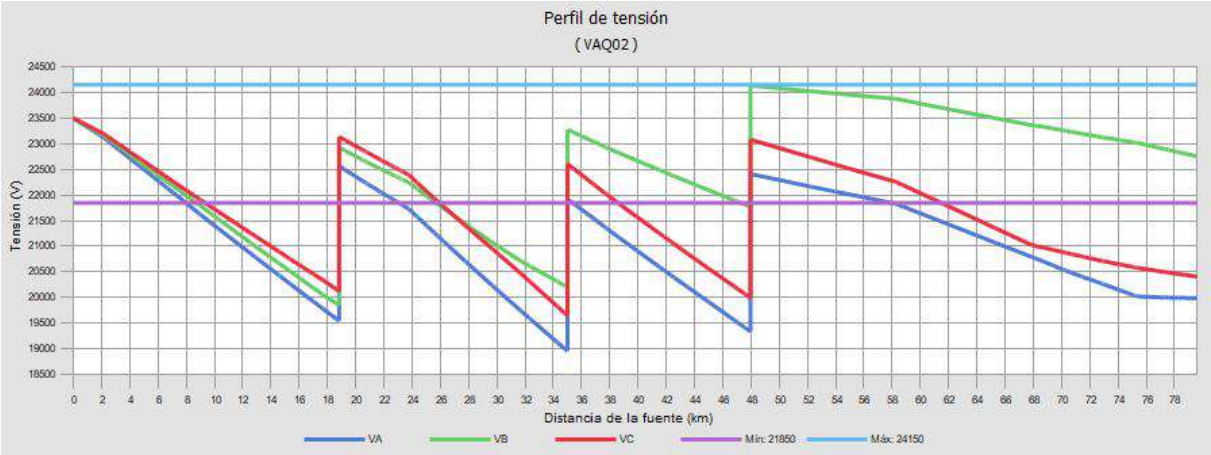


Figura 5.2: Perfil de tensión en el alimentador VAQ-2, escenario base

Sobre las pérdidas eléctricas en la red, estas se exponen en la tabla 5.2, en demanda máxima se tiene una pérdida total de 3189 kW, para los cálculos siguientes se utilizara el factor de carga obtenido en el capítulo anterior con respecto a esta pérdida a fin de mostrar la pérdida promedio del alimentador.

Costo anual de las pérdidas del sistema	kW	MW-h/año	k$/año
Pérdidas en las líneas	3042,65	26653,58	1332,68
Pérdidas en los cables	146,73	1285,36	64,27
Pérdidas de carga del transformador	0,00	0,00	0,00
Pérdidas en vacío del transformador	0,00	0,00	0,00
Pérdidas totales	3189,38	27938	1397

Tabla 5.2: Pérdidas eléctricas y monetarias en escenario base de mayor demanda

Por otra parte se estudio el escenario inicial del alimentador CDO-3, el cual posee acople con el VAQ-2 en la localidad de Tres Palmas, se corrió el modulo de distribución de carga con los datos de demanda obtenidos en el análisis de datos de cargas y demandas, en la tabla A.3 se presentan los valores de pérdidas del alimentador el cual ronda en producción máxima un valor de 554 kW, también se muestra en la figura A.10 los niveles de tensión los cuales están dentro de todos los rangos ofrecidos en pliegos, y el desequilibrio de tensión por debajo del 2 %.

5.2. Alternativa de descarga del alimentador y regulación de tensión

En esta alternativa se plantea la descarga del alimentador a través de uno nuevo a construir desde la ES-VAQ, actualmente se encuentra en proceso el alimentador VAQ-5 el cual tiene este objetivo, por lo que se utiliza el trazado del mismo como base para las simulaciones siguientes, buscando la regulación de tensión entre ellos.

El alimentador propuesto VAQ-5, arranca en la estación con salida en subterráneo, 100 metros de cable de 3x240 mm^2 cobre, 1,5 km de cable protegido EP-185 y 39,3 km de conductor desnudo 3x150 mm^2, este recorrido se extiende por las localidades de San Pedro, Mbokaja'i, Kapi'i Veve, Comunidad Indigena y Panambi, terminando en la localidad de Lucero en punta con el CDO-3.

Entonces este alimentador para descargar el VAQ-2, deberá tomar parte de la carga del CDO-3.

Realizando esta configuración por medio de maniobras de seccionamiento, el alimentador VAQ-5 descargaría el CDO-3 (19 % de la carga total) y el VAQ-2 (59 % de su carga total), esta configuración final se muestra en la figura A.11. El VAQ-5 finalmente queda con 16593 kVA instalado, La representación del arreglo de calibres de conductores se observa en la figura A.12.

5.2.1. Balance de carga

Posterior a la toma de carga por parte del VAQ-5 se procedió a la regulación de tensión de este alimentador, como primera medida se utiliza el modulo de balance de carga, el cual se configura a 0,1 % de tolerancia, el desequilibrio encontrado inicialmente es de 10,87 %, luego de la prueba por iteraciones en el software se llega 1,11 % de desequilibrio, esto directamente mejora los niveles de tensión y carga del alimentador, mejorando de esta manera las pérdidas.

Figura 5.3: Configuración de reguladores de tensión y banco de capacitores sobre el VAQ-5

Sin embargo corriendo flujo de carga, por la extensión de linea, aun posee en su mayor parte niveles de tensión por debajo del rango.

En la tabla A.4 se observa los resultados obtenidos en términos de desequilibrio de carga, se aplica este modulo sobre tres nodos importantes de la red. En términos de corriente neutral de 28 A se reduce a 6 A en demanda máxima.

5.2.2. Ubicación de reguladores de tensión y banco de capacitores

Se ubican los equipos reguladores, de acuerdo al perfil de tensión posterior al balance de carga realizado sobre el escenario base, figura 5.3.

Se sugiere la instalación de los equipos reguladores en los siguientes puntos con las referencias dadas a continuación:

- 15 km de la ES-VAQ en la localidad de Kapi'i Veve, sobre la troncal en delta cerrado.
- 32,8 km de la ES-VAQ en la localidad de Panambi, sobre la linea troncal conectado

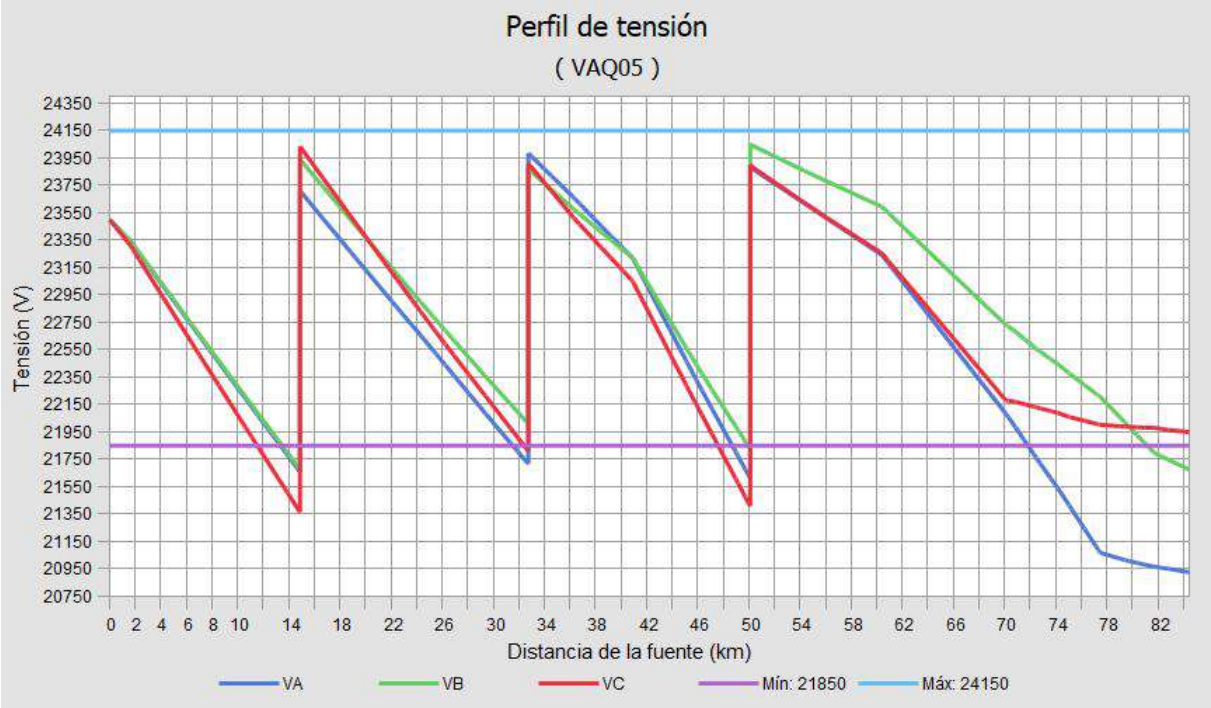


Figura 5.4: Perfil de tensión del VAQ-5, posterior a la regulación

en delta cerrado.

- 50 km de la ES-VAQ, mantener la posición actual del regulador de 200 A.

Posteriormente se corre el modulo de ubicación optima de condensadores, en la tabla A.5, se selecciona el banco de 600 kVAr, pues se tiene un factor de potencia bajo en general. Se instala el banco a 74,1 km de la ES-VAQ en la localidad de Pindo.

En demanda máxima se vuelve a correr el flujo de carga, implicando a las redes CDO-3, VAQ-2 y VAQ-5, para obtener un panorama de los cambios o mejoras en los parámetros medibles, se solicita el reporte de flujo de carga para obtener los niveles de pérdidas en estos alimentadores. En las tablas A.6, A.7 y A.8, se muestran las pérdidas posterior a la instalación de equipos de regulación propuestas, sumando estas y diferenciando del escenario inicial, se tiene una reducción de las pérdidas igual a 1256 kW en demanda máxima.

El perfil de tensión obtenido esta dentro de los rangos permisibles en la mayor parte de su extensión, véase figura 5.4.

Figura 5.5: Configuración propuesta con construcción de línea en Tres Palmas

La figura A.13, donde se muestra sobrecarga y niveles de tensión de las redes, los niveles de carga están por debajo del 80 % en todos los casos, siendo esto un beneficio directo de la alternativa, en cuanto a tensión en la mayoría de la extensión este se encuentra por encima del 95 % y por debajo del 105 %.

El primer regulador de 200 A sobre el VAQ-5 en demanda máxima se encuentra a 105 %, se propone a pesar de esta pequeña sobre-carga el regulador de 200 A, pues este viene preparado para resistir a este tipo de sobrecargas por un tiempo dado, lo cual se conoce como bonus de carga, pudiendo utilizarse inclusive al 120 %.

El segundo regulador de 200 A, se encuentra al 95 % de su utilización, y el ultimo al 79 %.

5.3. Obras de mejoras

Sobre lo expuesto en lo anterior, en este apartado se proponen sobre estas, mejoras en la linea buscando a su vez mejorar los indices de pérdidas técnicas de estos alimentadores en estudio.

En la figura 5.5, se observa la propuesta de mejora, construyendo una linea de media tensión 3x150 mm^2 de 3,4 km para dividir la carga de Tembiapora y Casilla Dos, quedando sobre el VAQ-5 Casilla Dos y Tembiapora sobre el VAQ-2, esto conlleva a una nueva configuración de regulación, en el cual también se requerirá de un regulador de tensión de 200 A. Por lo cual esta propuesta se considera como una alternativa diferente, se busca en este caso otro arreglo de disposición de equipos en la regulación de tensión.

En la figura 5.5, se observa esta disposición de equipos:

- 22,8 km, se propone colocar regulador de tensión de 200 A en la localidad de Panannbi sobre VAQ-5, retirado del VAQ-2.
- 49,6 km, se propone colocar regulador de tensión de 200 A en la localidad de Casilla Dos sobre VAQ-5, retirado del VAQ-2.
- 42,6 km, se propone instalar un nuevo regulador de tensión sobre el VAQ-2, en la localidad de Tres Palmas.

En cuanto a los bancos de capacitores estos quedan en la misma disposición que la alternativa planteada anteriormente.

Finalmente resumiendo las pérdidas eléctricas en esta alternativa se plantea el cuadro 5.3, (véase apéndices A.9, A.10, A.11).

Pérdidas Iniciales	**Regulación de tensión VAQ-5**	**Regulación de tensión VAQ-5 y construcción linea**
3743 kW	2487 kW	1960 kW
Diferencia	**1256 kW**	**1784 kW**

Tabla 5.3: Resumen de pérdidas VAQ-5, CDO-3, VAQ-2

En la figura 5.6, se aprecia los perfiles de tensión de esta alternativa, teniendo en cuenta que los reguladores propuestos son de 200 A, se asume que con la corriente dada ya no se tendrá ningún equipo sobrecargado, así como también las lineas de distribución en su mayor parte trabajaran por debajo del 70 % de su limite de carga.

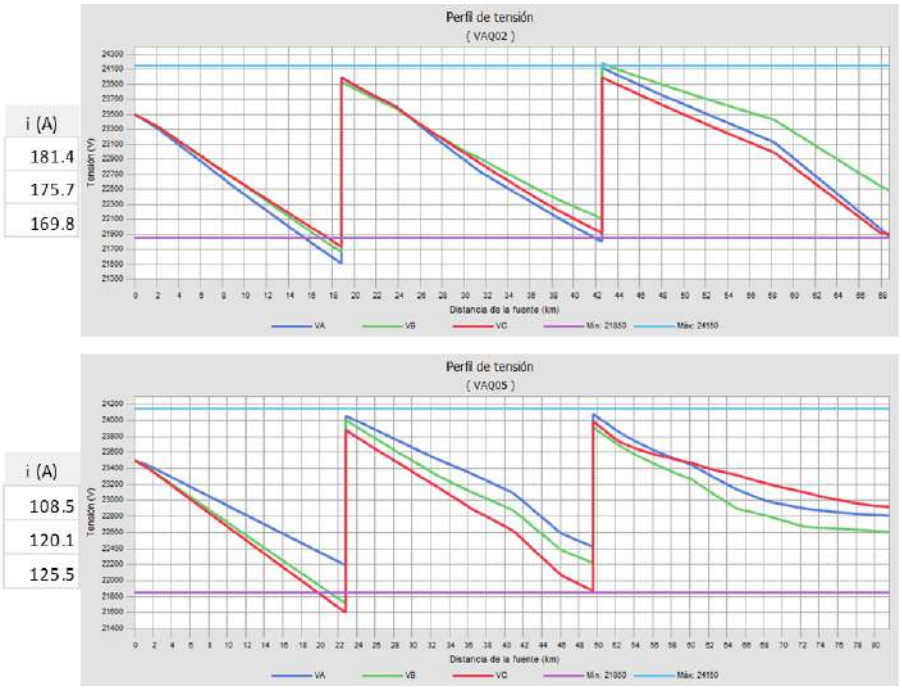


Figura 5.6: Perfil de tensión de los alimentadores VAQ-2 y VAQ-5, con regulación y mejoras

En el VAQ-2, el primer regulador de 200 A, trabajaría en demanda máxima a 84 % de su capacidad, mientras el segundo regulador también de 200 A, se estaría utilizando a 38,5 % de su capacidad.

En el VAQ-5, el primer regulador de 200 A se encuentra en demanda máxima a 62 % de su capacidad, mientras el segundo regulador a 43 %.

En la figura A.14 se observan los niveles de carga de conductores y niveles de tensión en el recorrido de los alimentadores estudiados. Se vuelve a utilizar el modulo de balance de carga en esta propuesta, ya que se tienen dos bloques de cargas diferentes.

5.4. Nuevo alimentador CDO-1

Esta alternativa consiste en utilizar una de las salidas disponibles de la estación Campo dos (ES-CDO) construyendo un nuevo alimentador denominado CDO1 el cual tendrá una característica especial ya que se proyecta construir un tramo del alimentador con línea sumergible en agua, en la zona del lago Yguazu cuyas características constructivas y

parámetros pasivos se encuentran en el apartado de anexos. Se detalla las obras necesarias para construir el alimentador por medio de la tabla 5.4.

Ítem	Detalle	Longitud (Km)
1	Construcción de línea protegida trifásica de 185 mm2	0,4
2	Construcción de línea aérea desnuda trifásica de 150 mm2	16,4
3	Construcción de línea especial acuática de 240 mm2	2,1
4	Trifasicación de línea área desnuda más cambio de conductor de 35 mm2 a 150 mm2	8,9
6	Cambio de conductor de línea aérea desnuda trifásica de 35 mm2 a 70 mm2	15 km

Tabla 5.4: Detalles de la construcción del CDO-1

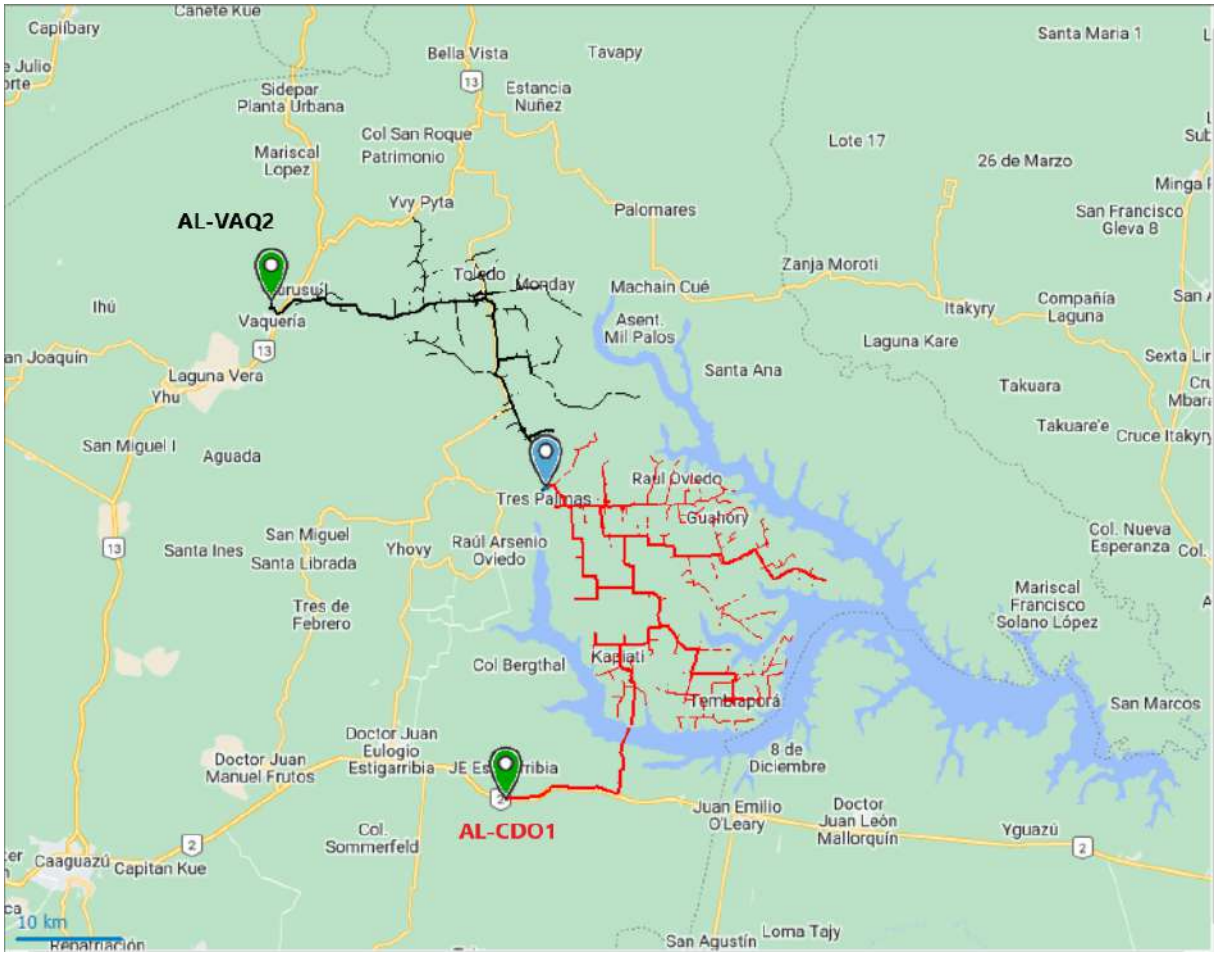


Figura 5.7: Configuración propuesta para los alimentadores VAQ-2 y CDO-1

Este nuevo alimentador el cual se presenta como alternativa, tendrá como troncal parte del tamo de la ruta 2 PY desde la estación campo 2 - 220/23 kV (ES-CDO), pasando

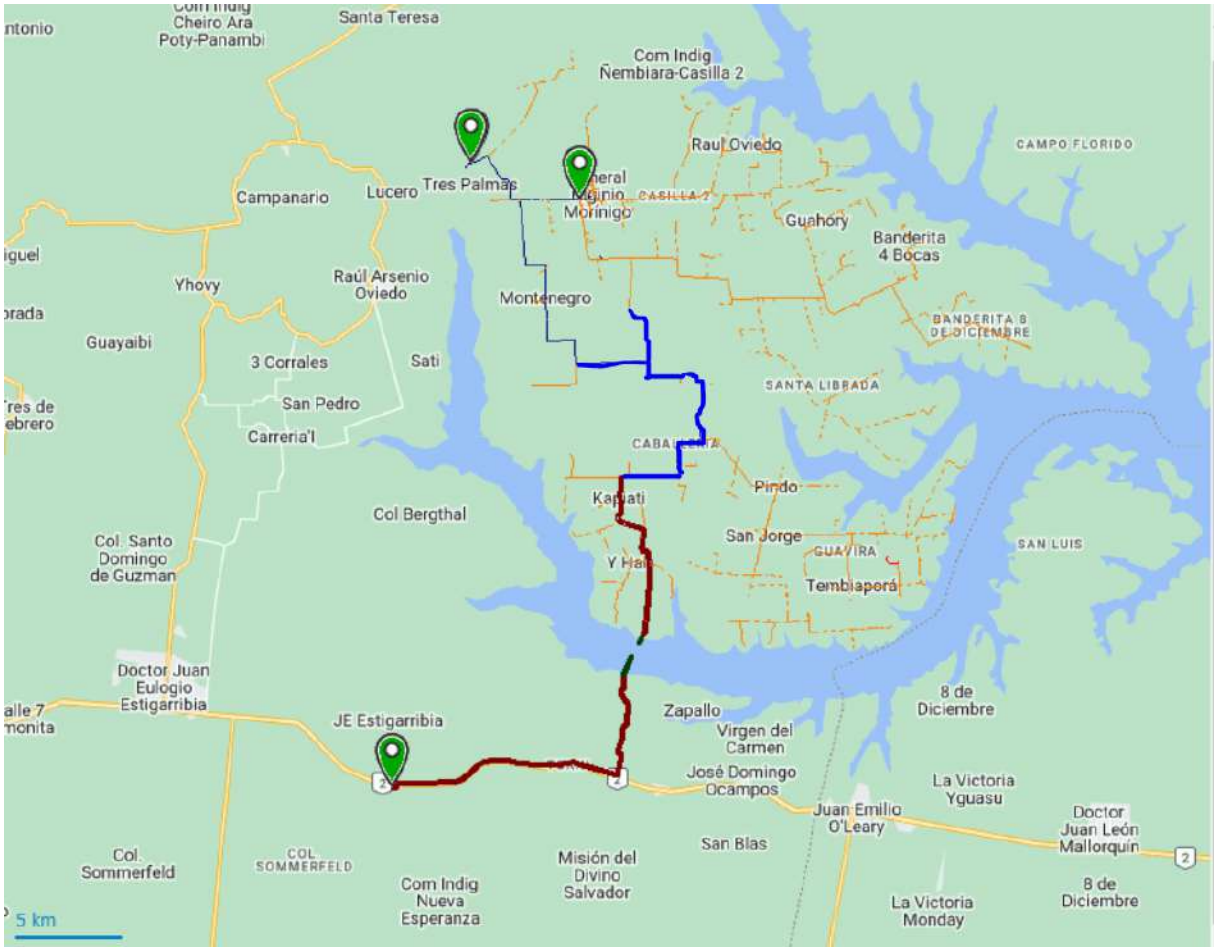


Figura 5.8: Tramos propuestos del CDO-1 a construir y adecuar

por las comunidades como Torín, llegando hasta Zapallo con conductor de 150 mm^2. Cruza con un tramo de línea sumergible bajo agua con conductor de 240 mm^2 aislado y preparado para el tipo de instalación mencionado. Se debe trifásicar la línea que parte desde la balsa Yhai hasta el cruce María Auxiliadora con conductor de 150 mm^2 y a partir del cruce Maria Auxiliadora aumentar la sección del conductor de 35 mm^2 a 70 mm^2 hasta la comunidad de Santa Catalina.

En la figura 5.7 el punto indicado en azul es el punto de acoplamiento entre los alimentadores mencionados ubicado en la ciudad de Tres palmas a 44,2 km de la estación Vaquería y a 56,9 km de la estación Campo Dos. Con la configuración presentada en la figura 5.7, el CDO-1 asumirá el 59 % de la carga conectada del VAQ-2.

La figura 5.8 describe, un tramo casi imperceptible es de línea protegida de 185 mm^2 cuya longitud es de 0,4 km el cual parte de la ES-CDO hasta fuera del previo de la misma, el

primer tramo de color bordo cercana a la fuente es la línea desnuda a construir de 150 mm^2, 16,4 km de longitud, el tramo que cruza el lago es el conductor preparado para instalaciones sumergibles en agua cuya sección es de 240 mm^2 de longitud 2,1 km. El tramo posterior al lago es la línea a trifásicar con conductores de 150 mm2 cuya longitud es de 8,9 km. Por ultimo el tramo de color azul Francia es cambiar el conductor a 70 mm^2 cuya longitud es de 15 km. Los puntos verdes correspondes a la salida de los alimentadores y un seccionador de línea propuesto para flexibilidad de operación.

5.4.1. Características del conductor sumergible

La topología de la red de algunos alimentadores de ANDE, en especial las líneas rurales, tienen la característica particular en su larga extensión, es necesario analizar alternativas como el conductor sumergible por cantidad de energía pérdida en transporte debida a las extensas longitudes de los alimentadores.

Para este caso de estudio se presenta en la tabla 5.5 las características del conductor seleccionado.

Sección (mm2)	Diámetro (mm)	Diámetro de Aislamiento (mm)	Diámetro Exterior (mm)	Ancho de cinta (mm)	Sección de pantalla (mm2)	Peso (kg/km)	R (Ω/km)	X (Ω/km)	C (uF/km)	Aire libre (A)	Enterrado	Entubado
1 x 240	18	32,4	39,5	120	36	1.625	0,125	0,109	0,244	502	367	351

Tabla 5.5: Características constructivas del conductor X-VOLT RH5Z1-OL 18/30 kV

También se presenta algunas consideraciones del mismo:

- Características eléctricas: media Tensión: 12/20 kV y 18/30 kV.
- Características térmicas: Temperatura máxima del conductor: 90°C. Temperatura mínima de servicio: -15°C. Temperatura mínima de instalación: 0 °C Temperatura máxima en cortocircuito: 250°C (máximo 5 s).
- Características ante el fuego: Libre de halógenos según UNE-EN 60754-1 / IEC 60754-1. Baja emisión de gases corrosivos según UNE-EN 60754-2 / IEC 60754-2.

- Características mecánicas: Radio de curvatura mínimo instalado permanentemente: 15x diámetro del cable. Radio de curvatura mínimo durante la instalación: 20x diámetro del cable. Resistencia a abrasión.
- Características medioambientales: Resistencia a los rayos ultravioleta según UNE 211605. Resistencia al agua: AD8 Sumersión.

Determinación de parámetros

Presión hidrostática estimada a la que será sometida el conductor:

$$P = \rho g h$$

donde

P: es la presión hidrostática a la cual estará sometida el conductor.

ρ: densidad del líquido.

g: constante de gravedad.

h: profundidad.

Considerando la cota media de 100 metros, se obtiene una presión hidrostática de 9,67 atm.

Parámetros eléctricos para modelado de red:

Resistencia en corriente continua:

$$R_{tc} = R_o \times (1 + \alpha \Delta t) \tag{5.1}$$

donde

R_{tc}: es la resistencia final del conductor a la temperatura de operación.

R_o: Resistencia eléctrica provista por el fabricante a un valor determinado de temperatura.

α: Coeficiente volumétrico de elevación de temperatura.

Δt: Variación de temperatura

Resistencia en corriente alterna:

$$R = R_{tc} \times (1 + f_s + f_p) \tag{5.2}$$

donde

R : Resistencia en ca y a la temperatura de ejercicio o final (Ohm / km)

R_{tc}: Resistencia en cc y a la temperatura de operación (Ohm / km)

f_s : factor que tiene en cuenta el efecto pelicular

f_p : factor que tiene en cuenta el efecto de proximidad

Entonces con los datos de la tabla de característica del conductor se obtiene la resistencia de secuencia positiva R_1.

$$R = R_1 = 0,21\Omega/km$$

Reactancia del conductor:

Este es un valor que depende de la configuración geométrica del conductor con sus pares de otras fases, a los efectos de simplificar el calculo se considera la geométrica presentada en la figura 5.9.

Este parámetro se calcula mediante las siguientes expresiones:

$$XL = 2\pi fL = 2\pi f(2 \times 10^{-4} \ln(DMG/RMG)) \tag{5.3}$$

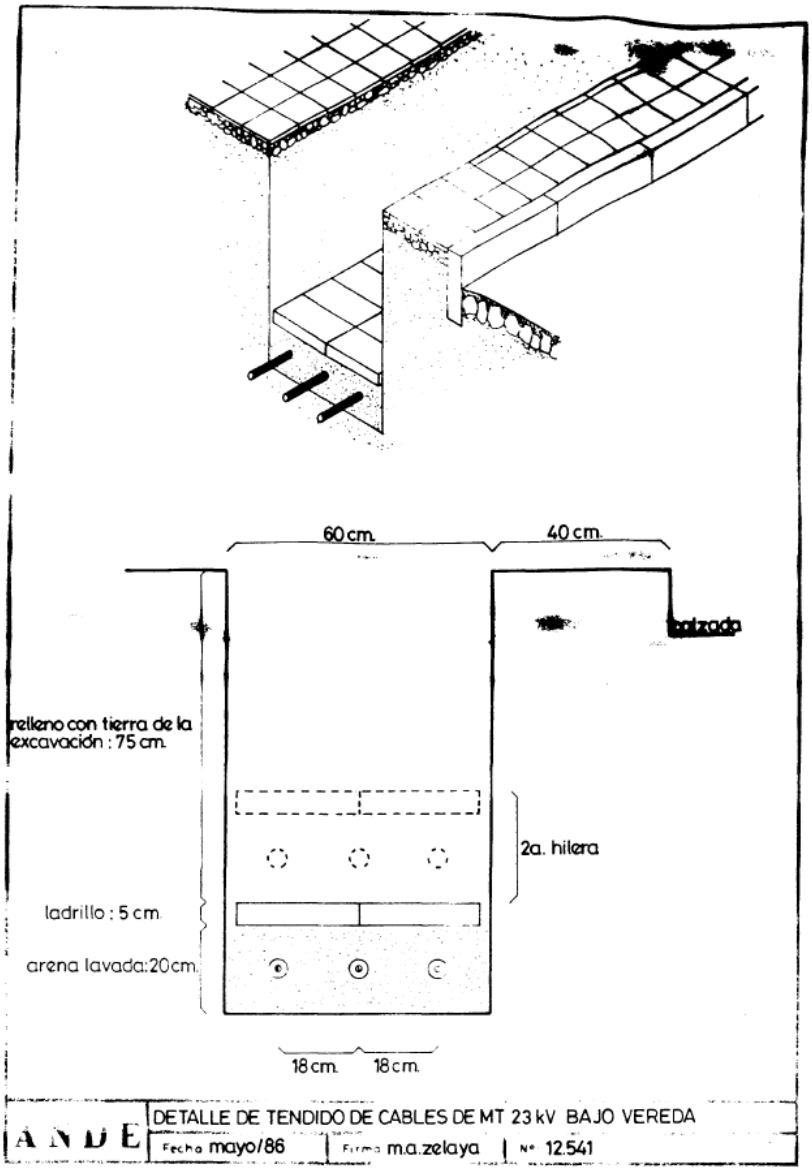


Figura 5.9: Configuración geométrica para tendido de conductor subterráneo- acuático

donde

XL : reactancia inductiva (ohm/Km).

f: frecuencia (Hz).

L: inductancia (H/Km).

DMG: Distancia media geométrica entre conductores activos (cm).

RMG: Radio medio geométrico entre alambres de un mismo conductor (cm).

Los valores de DMG y RMG se calculan por medio de la siguiente expresión:

$$RMG \cong k\sqrt{S}$$

S es sección del conductor en (cm2) y K es el coeficiente función del N^o de alambres del conductor.

Nro de alambres del conductor	Valor de K
19	0,47
20	0,4891
37	0,4984
61	0,5026

Tabla 5.6: Valores de k debido al número de alambres

Entonces a partir de las ecuaciones presentadas y teniendo en cuenta los valores de DMG presentados en la figura A.15, el valor de la reactancia es de:

$$X = X1 = 0,2076$$

Los valor de resistencia y reactancia homopolar se observan en la tabla 5.7. Estos valores son obtenidos en los cálculos presentados en la figura A.16.

Es también sumamente importante considerar la ejecución del tendido que deberá ser

Ro	Xo	R1	X1
0,3082	1,776	0,21	0,2076

Tabla 5.7: Reactancia homopolar obtenida

realizada con embarcaciones y busos. Los conductores deberán ir dentro de ductos para tener protección mecánica, aunque los mismos conductores son suficientemente resistentes a la abrasión. Deben contar con algún método de rápida identificación de las líneas bajo el agua para agilizar su localización por cualquier suceso que podría presentarse.

5.4.2. Reubicación de reguladores de tensión del VAQ2 al CDO1

Debido al cambio de configuración del alimentador VAQ2 se propone nuevas ubicaciones para la óptima operación de los reguladores de tensión de 200A existentes.

En la figura 5.10 los puntos en naranja corresponden a los regulares que se deben retirar del VAQ2, el primero ubicado a 35 km de la ES-VAQ en la comunidad de Santa Teresa, el segundo a 47,6 km. Los puntos en verde corresponden a la ubicación donde se deben colocar los reguladores en el CDO1, el primero a 19 km de la ES-CDO cercano a la balsa municipal de Yhai y el segundo a 33,1 km en el cruce María Auxiliadora.

5.4.3. Resultados obtenidos de la configuración propuesta de construcción del CDO-1

En este apartado se presentan los valores de reducción de perdidas y perfiles de tensión de los alimentadores analizados, aplicando flujo de carga en demanda máxima y comparando resultados sobre el escenario inicial.

Como se puede observar en la tabla 5.8 las pérdidas totales de ambos alimentadores arroja un resultado de 1079,58 kW,reduciendo la perdida inicial de 3189,38 kW.
Estos valores de reducción de pérdidas obtenidos se dan sin descuidar el perfil de tensión entregado en toda la red de los alimentadores VAQ-2 y CDO-1 considerando la máxima

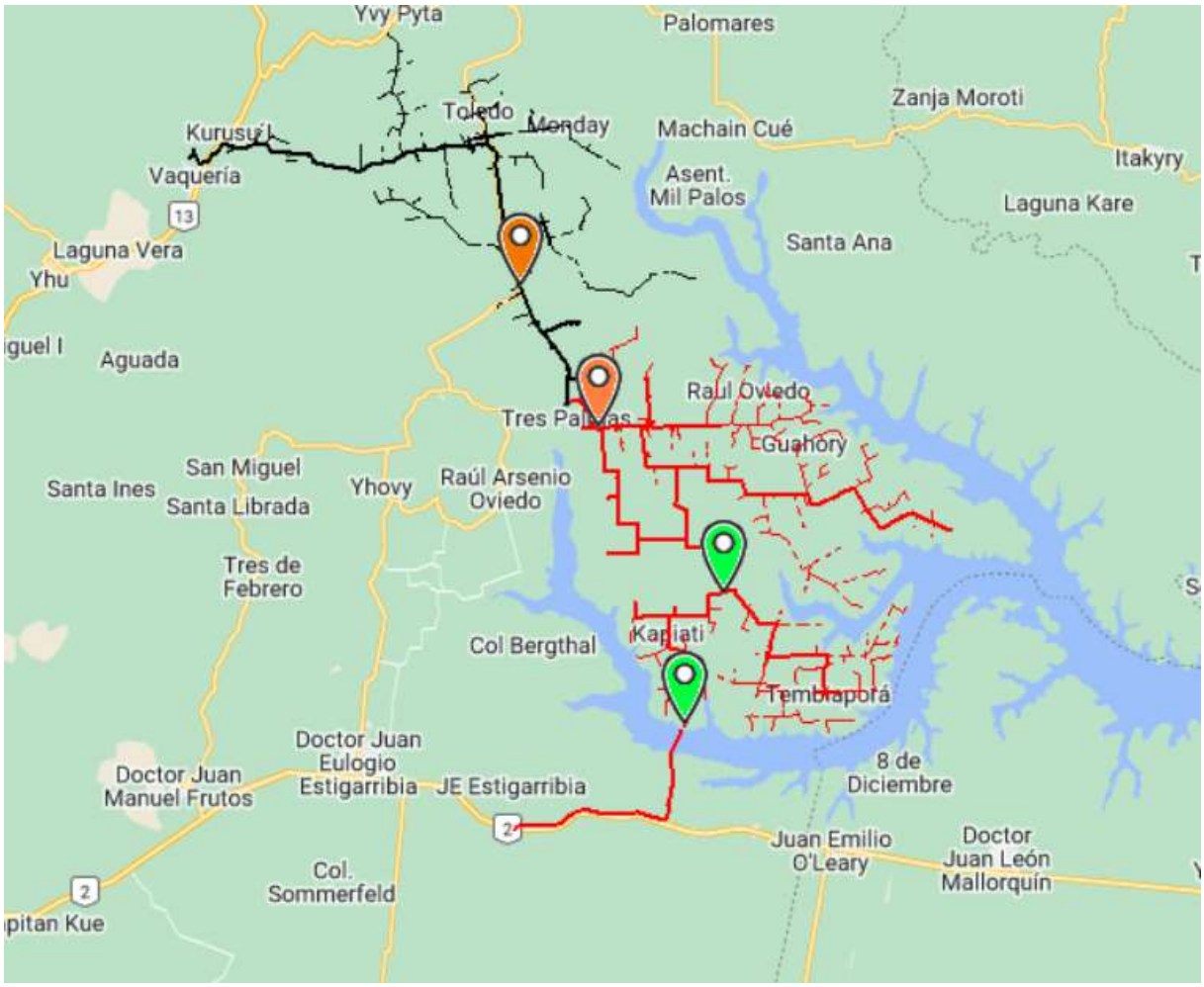


Figura 5.10: Reguladores de 200A a trasladar del VAQ-2 al CDO-1

Alimentador	**Pérdidas sin la propuesta (kW)**	**Perdidas con la propuesta (kW)**	**Reducción (kW)**
VAQ2	3189,38	147,8	3042,18
CDO1	0	931,78	-931,78
Totales	**3189,38**	**1079,58**	**2110,4**

Tabla 5.8: Resumen de reducción de perdidas técnicas del alimentador VAQ-2 con la propuesta del CDO-1

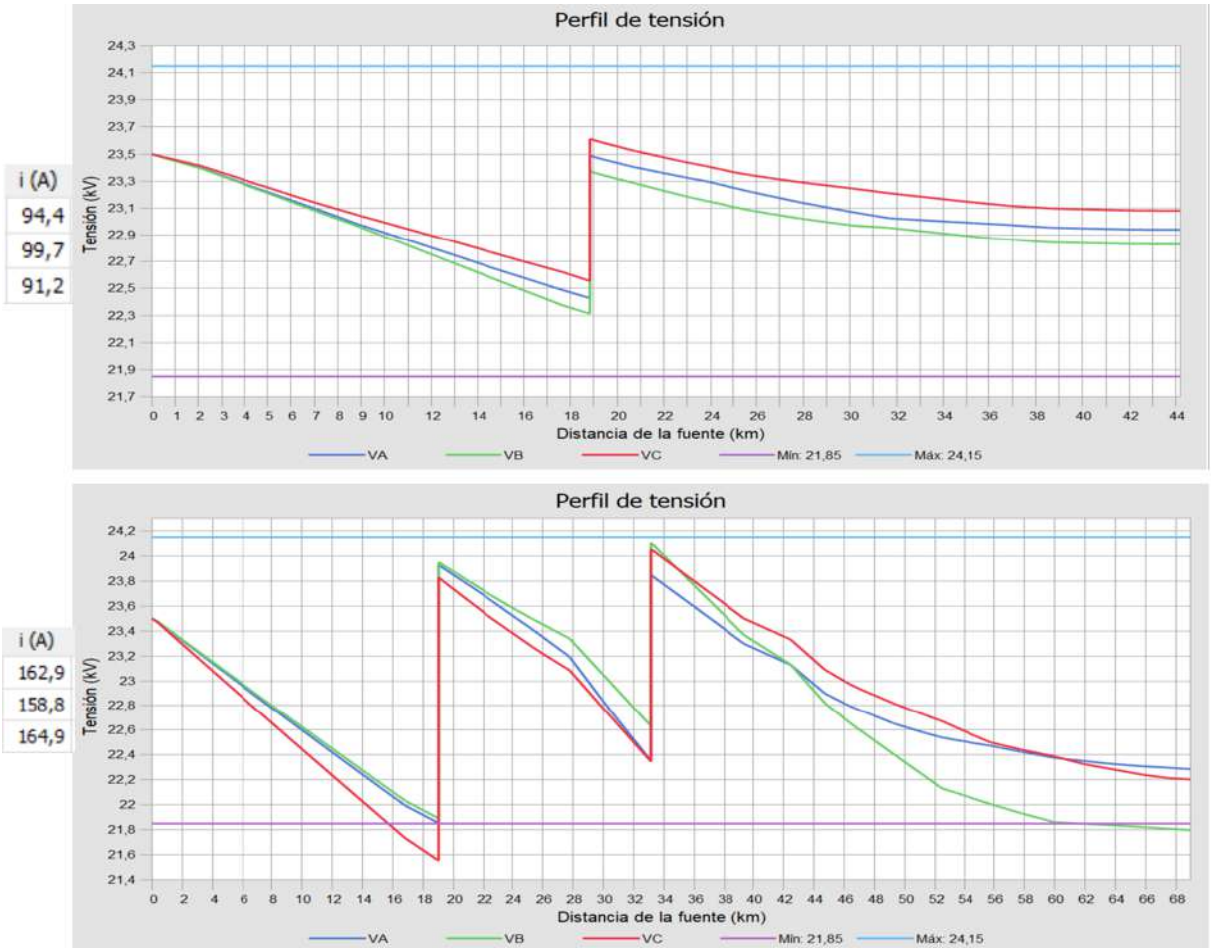


Figura 5.11: Perfiles de tensión del VAQ-2 (superior) y CDO-1 (inferior) para condición de demanda máxima

demanda. Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, con la entrada del CDO-1, esta asume el 59 % de la carga original del VAQ-2 dejando a la ultima con 41 % de su carga original.

En la figura 5.11 se puede apreciar los perfiles del VAQ-2 y CDO-1, para cada caso se tiene curvas particulares. En el caso del alimentador VAQ- solamente es necesario un regulador de tensión y la caída de tensión en el final de línea esta dentro de los parámetros admisibles. Para el caso del CDO-1 es necesario colocar dos reguladores de 200A el primero a 19 km y el segundo a 33,1 km, se puede observar que a los 66 km de la ES-CDO la tensión de la fase B esta ligeramente fuera de los límites, por tal motivo se sugiere trifásicar algunas de los tramos monofásicas para mejorar este valor casi imperceptible.

En las figuras A.18 y A.17 se puede visualizar los niveles de tensión y sobrecarga de la red,

cabe destacar que el VAQ-2 no presenta en ningún punto de su área de influencia sobre o subtensión como así también sobrecarga. Por otro lado, el alimentador propuesto CDO-1 presenta caída de tensión fuera de los límites a los 61,9 km de la ES-CDO, pero a niveles tolerables, la misma no presenta sobrecarga en ningún tramo en su área de influencia.

5.5. Selección de alternativa

En este trabajo se han planteado tres alternativas principales, como primera se tiene la construcción de una linea nueva, alimentador saliente de la ES-VAQ, este ítem esta dentro de las propuestas del PAC 2022[2], por ende, se estudia la regulación de tensión entre estos alimentadores incluyendo parte del CDO-3. En una segunda propuesta se amplia la construcción de lineas, desdoblando un bloque de carga importante entre estos alimentadores. Finalmente se se propone la construcción de una linea nueva desde la ES-CDO, el cual para mejorar el momento eléctrico de la toma de carga, se analiza de modo a cruzar su trazado por el espejo de agua del lago Yguazú.

Teniendo estas tres alternativas y la reducción de pérdidas obtenidas en las distintas simulaciones, se plantea una relación entre ellas para seleccionar la mejor alternativa, por lo que se realiza un cociente entre las mejoras de kilo-watts en pérdidas y los costos de cada alternativa.

Como se puede apreciar en la figura 5.12, la propuesta con mejor desempeño de operación es la segunda alternativa que consiste en la construcción del VAQ-5 y una linea para desdoblar carga.

Por lo que se selecciona esta alternativa para el desarrollo de los cálculos financieros.

[2]Plan Anual de Contrataciones

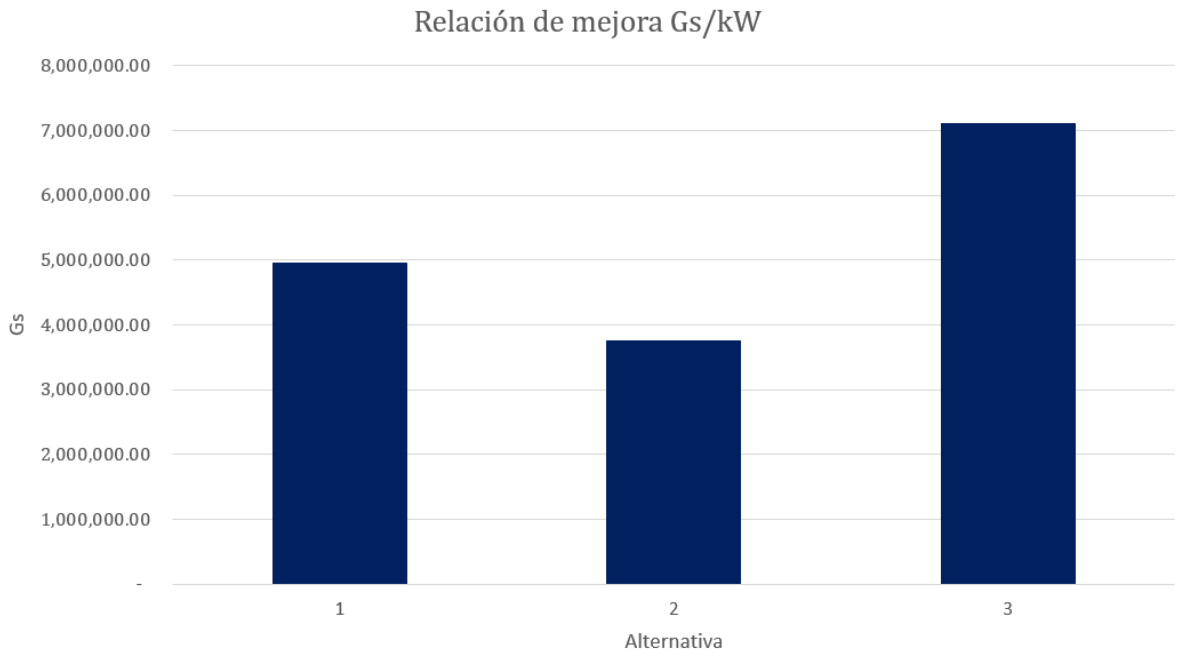


Figura 5.12: Relación moneda por cada kW mejorado en demanda máxima

Parte IV

Capítulo 6

Resultados y Discusión

En primera instancia en este proyecto se realiza una evaluación de la demanda de las Estaciones Campo Dos y Vaquería, siendo de 49 % y 29 % la disponibilidad de potencia respectivamente en estas Estaciones.

La demanda de los alimentadores VAQ-2 y CDO-3 fue analizada, buscando los valores de máximas corrientes por fase, factor de potencia, dispersión y media, en este aspecto el VAQ-2 presentó una corriente media de 171 amperios y una máxima de 328 amperios, el factor de carga fue calculado por esta relación. Ambos alimentadores presentan un aumento de corriente en los meses de enero y febrero, lo cual podría tener relación con la característica de clientes en la zona. Para mejorar los modelados se utilizaron los valores de demanda de equipos tele-comandados de la red en la fecha y hora de cada demanda máxima.

Como primera alternativa se evaluá la regulación de tensión entre los alimentadores VAQ-2 y VAQ-5, este último se encuentra en proceso de entrega de obra, se realizaron las simulaciones utilizando los datos relevados, llevando a descargar el VAQ-2 en un 59 % de su carga instalada, quedando en 27 % el VAQ-2 y el VAQ-5 en 62 % de factor de carga del conductor troncal, la disminución de pérdidas es del 33,55 % para esta alternativa.

En una segunda alternativa se propone la construcción de una linea trifásica de 3x150 mm^2 paralela en la localidad de Tres Palmas y posteriormente regular tensión entre estos

alimentadores, dividiendo un centro de carga importante entre ellos, la utilización de los conductores troncales quedaron en 51 % en el caso del VAQ-2 y 34,7 % para el alimentador VAQ-5. La reducción de pérdidas en este escenario es del 47,66 %.

La alternativa propuesta del nuevo alimentador CDO-1 permite descargar el VAQ-2 sobre el CDO-1, reduciendo las perdidas totales en un 66,5 %, lo cual amortiza en forma significativa los costos por pérdidas técnicas para implementar las obras requeridas. En cuanto a niveles de tensión el VAQ-2 no presenta inconvenientes ya que en toda su área de concesión de energía presenta valores dentro del rango de 24,15 kV y 21,85 KV, retirándose de su línea dos reguladores de 200A. En cuanto al alimentador propuesto CDO-1 no presenta niveles por encima de 24,15 kV, pero si presenta niveles de tensión por debajo de 21,85 kV en un porcentaje 1,9 % menor a lo admisible, los reguladores retirados del VAQ-2 se proyecta instalar en el CDO-1, es necesaria también el montaje de un banco de capacitores de 100 kVAR por fase en la compañía San Jorge del distrito de Tembiapora el cual mejora el nivel de tensión de la zona mencionada, las compañías de Pindo'i y Banderita también del distrito de Tembiapora.

Por último se selecciona la segunda alternativa planteada en una evaluación tecnico economica de las propuestas. Siendo la alternativa seleccionada de menor coste por KiloWatt de pérdida.

Capítulo 7

Conclusiones

Se logró relevar y actualizar datos de potencia instalada del alimentador VAQ-2 y CDO-3, utilizando la base de datos de la empresa, también sobre otra base de datos se consiguió recabar y analizar los datos de demanda de alimentadores y estaciones involucradas en este proyecto.

Se establecieron criterios técnicos para la realización de las diferentes alternativas en este proyecto, siendo la disminución de pérdidas, la regulación de tensión encontrándose favorable la utilización de reguladores de tensión y banco de capacitores para este propósito dentro de un ambiente simulado a demanda máxima, también se tuvo en cuenta la cargabilidad de los elementos de la red como lo es la linea troncal.

Se simularon las tres alternativas planteadas a partir de los datos recabados y elementos nuevos propuestos en alternativas dentro de este trabajo.

Finalmente se seleccionó la mejor alternativa para mejorar los niveles de tensión, pérdidas y cargabilidad operativa del alimentador VAQ-2, utilizando el criterio de costos por energía ahorrada.

Capítulo 8

Recomendaciones

Se proponen las siguientes recomendaciones al finalizar este trabajo:

- Continuar con la linea de investigación evaluando otras alternativas no abordadas en este proyecto.
- Realizar los trabajos necesarios para la construcción de una linea paralela en la localidad de Tres Palmas.
- Realizar investigaciones y propuesta de proyectos ejecutivos sobre lineas acuáticas de media tensión como una forma de innovación de la empresa.
- Volver a repetir este estudio con la puesta en servicio de la Estación Tres Palmas, proyectada para el 2026 según Plan Maestro de Transmisión de la ANDE.

Apéndice A

Apéndices

A.1. Demandas

MEDIA VAQ-2

- CORRIENTE R 169.440705
- CORRIENTE S 154.711395
- CORRIENTE T 171.211915
- TENSION R 23.427839
- TENSION S 23.418312
- TENSION T 23.309833
- P ACTIVA 6.050008
- P REACTIVA 2.822191

MAXIMA VAQ-2

- CORRIENTE R 328.68

- CORRIENTE S 313.15
- CORRIENTE T 307.09
- TENSION R 23.97
- TENSION S 24.10
- TENSION T 23.74
- P ACTIVA 11.52
- P REACTIVA 5.56

DISPERSION VAQ-2

- CORRIENTE R 44.955307
- CORRIENTE S 40.037017
- CORRIENTE T 44.292861
- TENSION R 0.276010
- TENSION S 0.285085
- TENSION T 0.270549
- P ACTIVA 1.554696
- P REACTIVA 0.782603

ES-SE	LOCAL	Pot.Inst MVA	Max MW	Fecha	F.U	Min MW	Fecha
ES	COV	TR-01 3X20	55,2	21/11	92%	10,3	08/10
		TR-02 41,6	34,2	09/12	82%	6,2	19/10
		TR-03 41,6	33	09/12	79%	6	21/11
ES	CYO	TR-01 41,6	19,8	16/12	48%	3,8	26/10
ES	IRO	TR-01 41,6	18	20/12	43%	3	06/10
ES	SES	TR-01 41,6	16,7	07/12	40%	1,8	29/10
		TR-02 41,6	22,9	07/12	55%	1,9	29/10
ES	BSP	TR-01 41,6	28,6	09/12	69%	3,9	15/11
ES	SRO	TR-01 3X20	21,9	08/12	36%	2,4	05/10
		TR-02 41,6	22	07/12	53%	3,4	13/11
		TR-03 41,6	22	07/12	53%	2,4	10/11
ES	CZU	TR-01 80	57,1	07/12	103%	13,2	26/10
ES	ABA	TR-01 41,6	21	07/12	50%	3	06/10
ES	PPE	TR-01 3X20	63,1	04/12	105%	22,9	26/10
		TR-02 41,6	38,1	09/12	92%	4,7	26/10
		TR-03 41,6	19,8	19/12	48%	11	14/12
ES	VAQ	TR-01 41,6	21,1	09/12	51%	2,5	19/10
SE	CZA	TR-01 30	24	09/12	80%	4	06/10
SE	SPN	TR-01 30	21,4	08/12	71%		
SE	VIL	TR-01 20	12,9	23/10	65%	1,1	30/10
ES	CDO	TR-01 80	56,9	09/12	71%	21,9	12/10
SE	LCO	TR-01 30	10,2	09/12	34%	0,9	30/10

Figura A.1: Demanda de estaciones zona centro, ultimo trimestre 2022, Fuente: COR-C ANDE

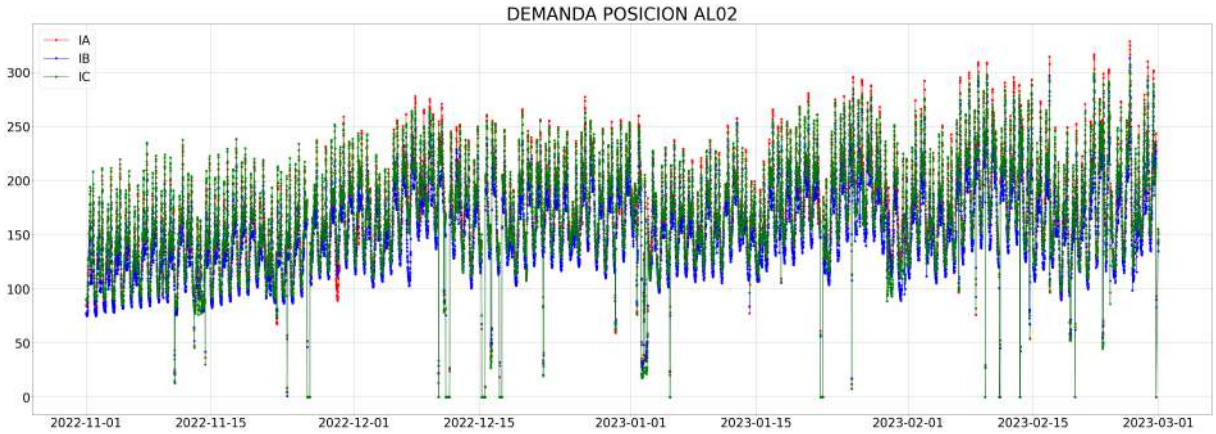


Figura A.2: Demanda verano del alimentador VAQ-2

Figura A.3: Factor de potencia en demanda máxima del alimentador

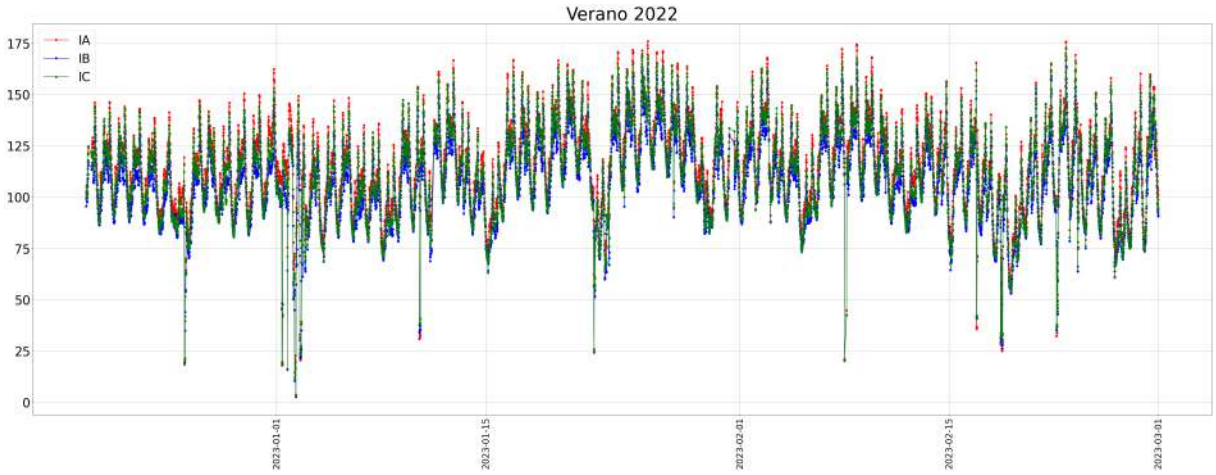


Figura A.4: Demanda verano CDO-3

Figura A.5: Factor de potencia del CDO-3

A.2. Reportes de cargas

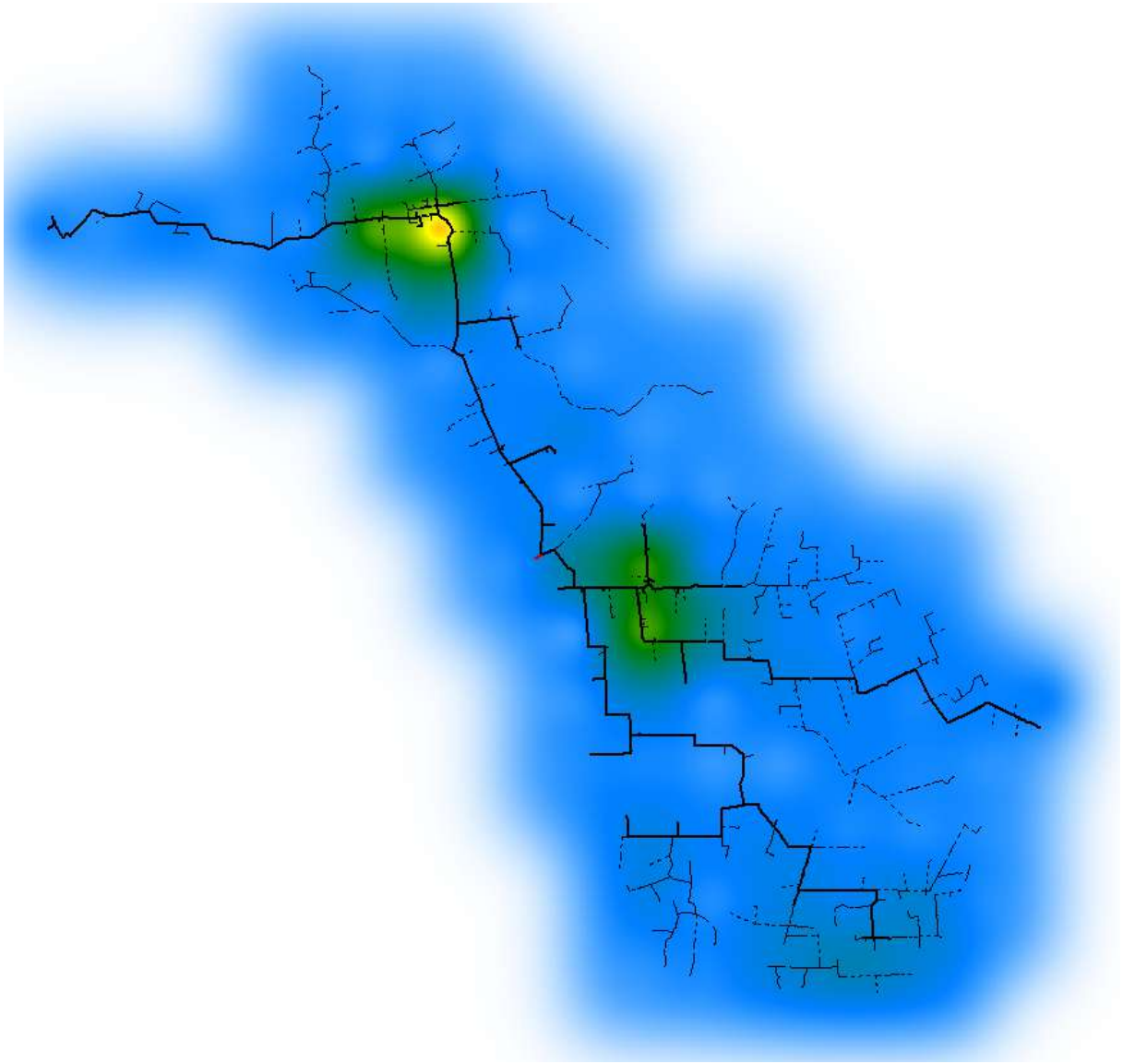


Figura A.6: Densidad de carga del alimentador VAQ-2

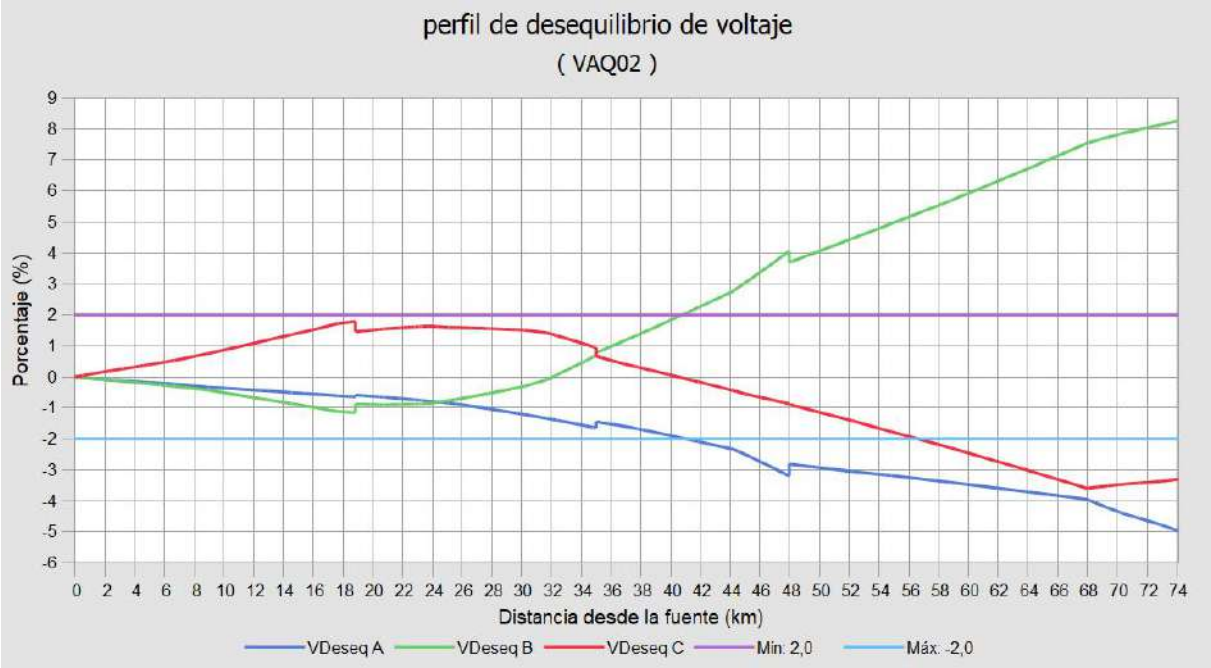


Figura A.7: Desequilibrio de tensión VAQ-2, escenario base

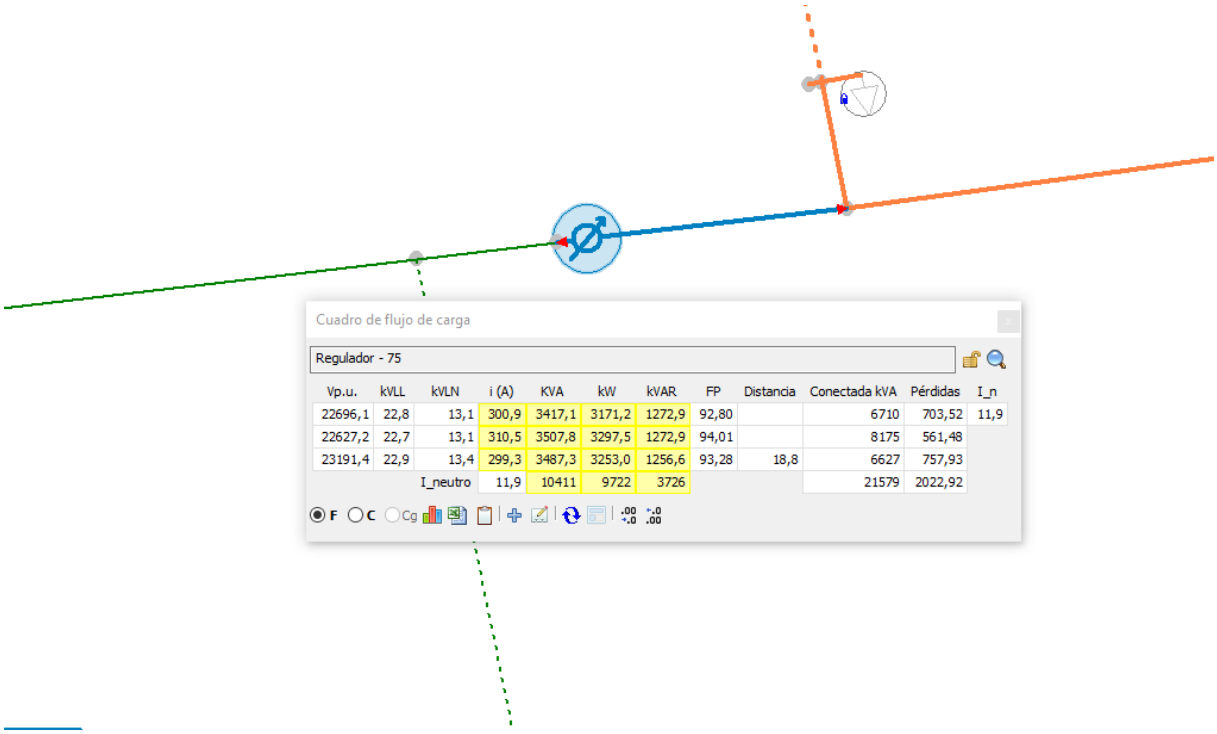


Figura A.8: Sobrecarga del primer banco de reguladores de 200 A

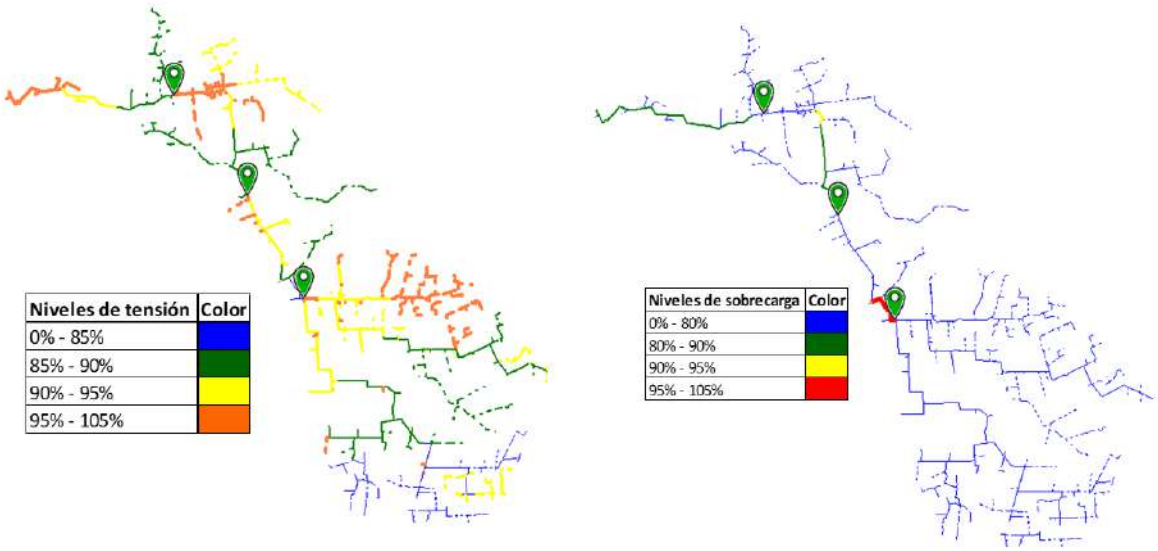


Figura A.9: Niveles de sobrecarga de conductores y niveles de tensión VAQ-2

Condiciones anormales	Fase	Conteo	Peor caso	Valor
Sobrecarga	A	15	TRAMO_VAQ02_306	313,22 %
	B	9	TRAMO_VAQ02_306	327,99 %
	C	8	TRAMO_VAQ02_306	307,87 %
Subtensión	A	973	NODOF_1198_CDO03	81,75 %
	B	578	75	85,16 %
	C	731	NODOF_1413_CDO03	84,11 %
Sobretensión	A	0	VAQ02	102,17 %
	B	0	NODOI_896_CDO03	102,63 %
	C	0	VAQ02	102,17 %

Tabla A.1: Casos críticos de sobrecarga, escenario base

Resumen total	**kW**	**kvar**	**kVA**	**FP(%)**
Fuentes (Potencia de equilibrio)	11591,35	5608,50	12876,90	90,02
Generadores	0,00	0,00	0,00	0,00
Producción total	**11591,35**	**5608,50**	**12876,90**	**90,02**
Carga leída (no regulada)	8838,05	3926,06	9670,84	91,39
Carga utilizada (regulada)	8125,64	3611,07	8891,90	91,38
Condensadores shunt (regulados)	0,00	-781,54	781,54	0,00
Reactancias shunt(reguladas)	0,00	0,00	0,00	0,00
Motores	0,00	0,00	0,00	0,00
Cargas totales	**8125,64**	**2829,53**	**8604,20**	**94,44**
Capacitancia del cable	0,00	0,00	0,00	0,00
Capacitancia de la línea	0,00	-319,18	319,18	0,00
Capacitancia shunt total	**0,00**	**-319,18**	**319,18**	**0,00**
Pérdidas en las líneas	3314,33	2931,03	4424,45	74,91
Pérdidas en los cables	151,25	167,12	225,40	67,10
Pérdidas de carga del transformador	0,00	0,00	0,00	0,00
Pérdidas en vacío del transformador	0,00	0,00	0,00	0,00
Pérdidas totales	**3465,58**	**3098,15**	**4648,52**	**74,55**

Tabla A.2: Resumen de pérdidas en la red VAQ-2, escenario base

Resumen total	**kW**	**kvar**	**kVA**	**FP(%)**
Fuentes (Potencia de equilibrio)	6,474	2,561	6,963	093
Generadores	000	000	000	000
Producción total	**6,474**	**2,561**	**6,963**	**093**
Carga leída (no regulada)	5,920	2,604	6,468	092
Carga utilizada (regulada)	5,920	2,604	6,468	092
Condensadores shunt (regulados)	000	-302	302	000
Reactancias shunt(reguladas)	000	000	000	000
Motores	000	000	000	000
Cargas totales	**5,920**	**2,303**	**6,352**	**093**
Capacitancia del cable	000	000	000	000
Capacitancia de la línea	000	-306	306	000
Capacitancia shunt total	**000**	**-306**	**306**	**000**
Pérdidas en las líneas	554	564	791	070
Pérdidas en los cables	000	000	000	000
Pérdidas de carga del transformador	000	000	000	000
Pérdidas en vacío del transformador	000	000	000	000
Pérdidas totales	**554**	**564**	**791**	**070**

Tabla A.3: Resumen de pérdidas en el alimentador CDO-3, escenario inicial

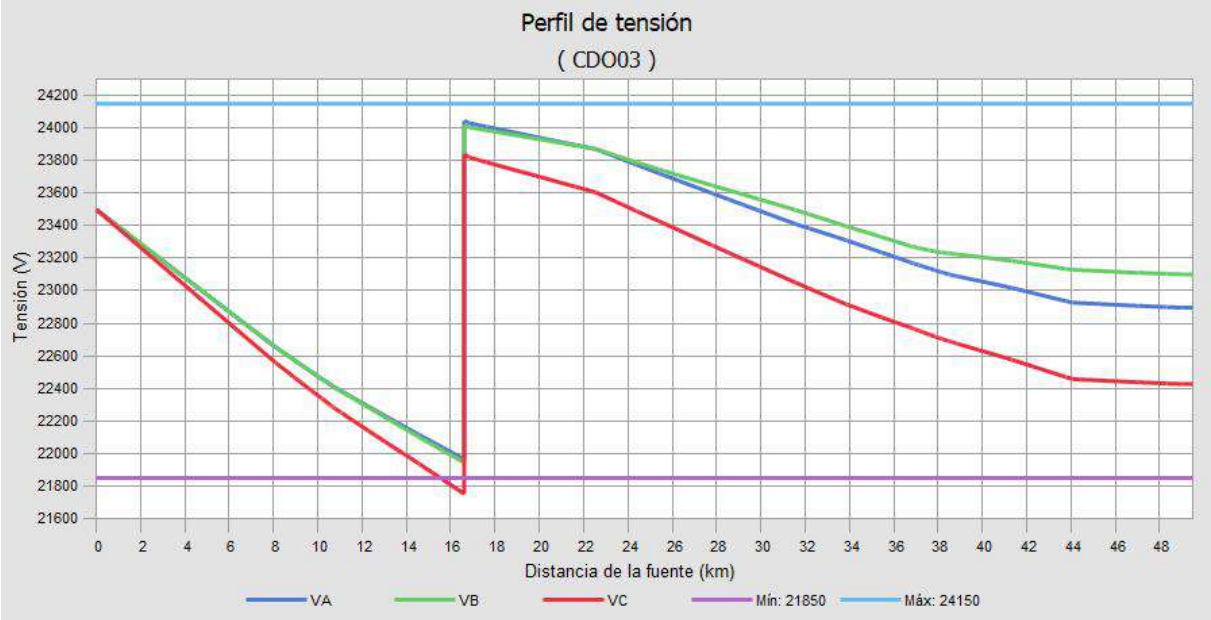


Figura A.10: Perfil de tensión del alimentador CDO-3 en escenario base

A.3. Regulación de tensión

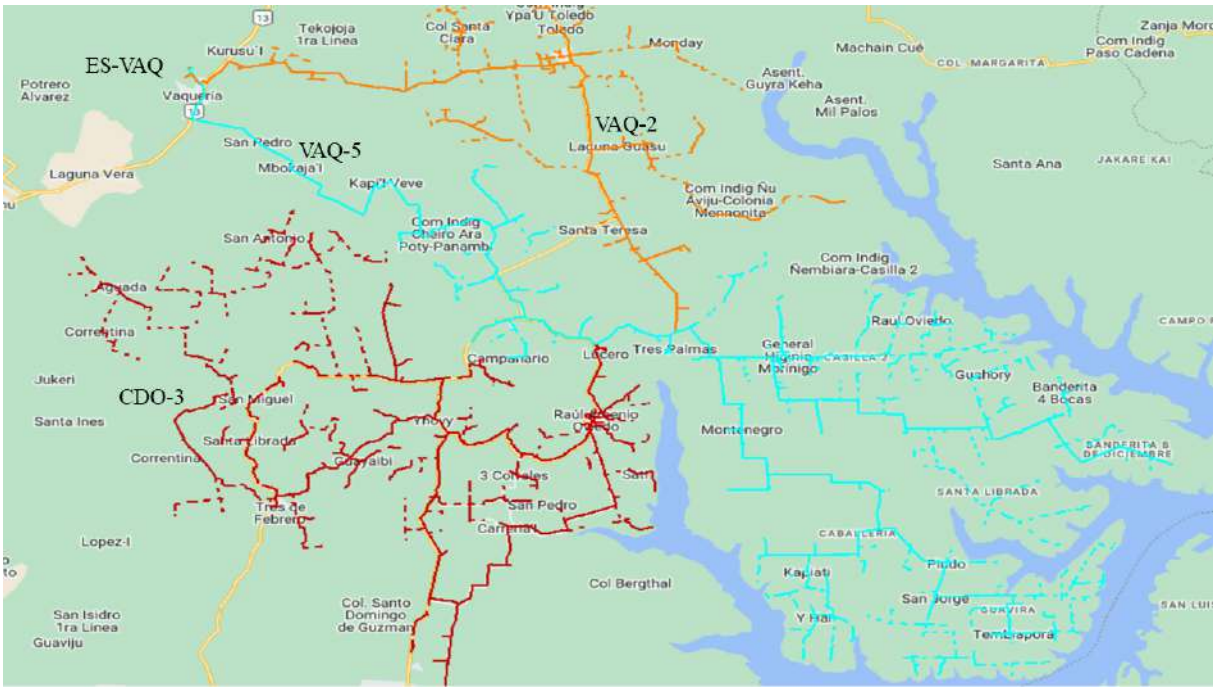


Figura A.11: Configuración propuesta del VAQ-5

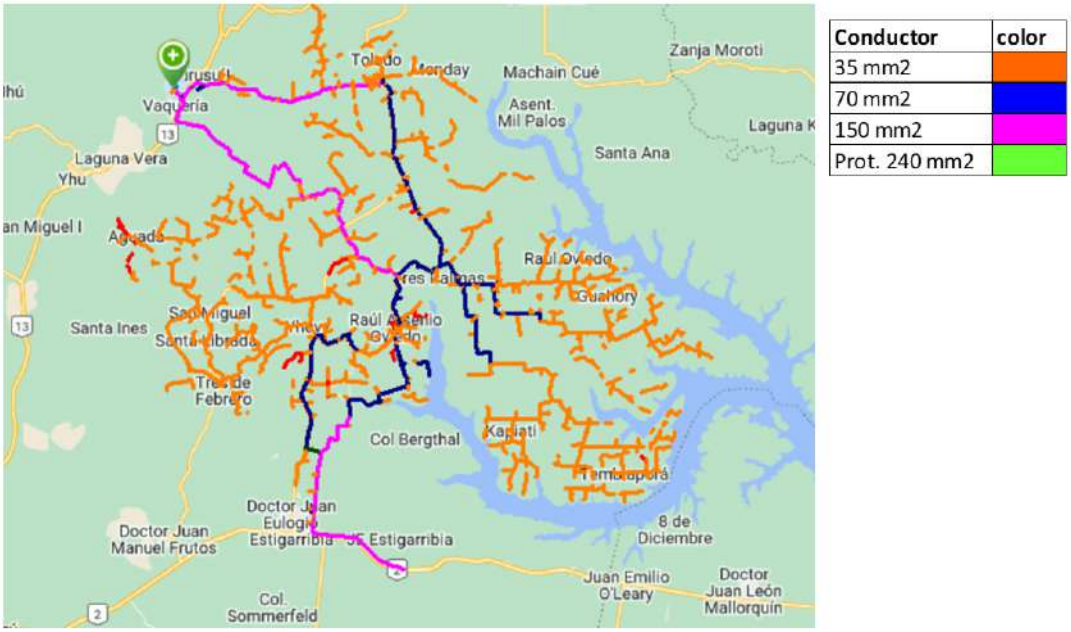


Figura A.12: Arreglo de conductores del alimentador VAQ-5

Resultados					
Nodo 2178					
Refasamiento aplicado	Corriente (A)			Corriente neutral (A)	Factor de desbalance
	A	B	C		Corriente
Ninguno	178	145	166	028	10.87
Todos	170	168	166	006	001.11 %
Nodo NODOI_502_CDO03					
Refasamiento aplicado	Corriente (A)			Corriente neutral (A)	Factor de desbalance
	A	B	C		Corriente
Ninguno	158	134	143	025	009.21 %
Todos	149	149	150	003	000.23 %
Nodo NODOI_896_CDO03					
Refasamiento aplicado	Corriente (A)			Corriente neutral (A)	Factor de desbalance
	A	B	C		Corriente
Ninguno	134	112	115	025	011.29 %
Todos	124	123	123	004	000.28 %

Tabla A.4: Balance de carga aplicada a nodos de la red VAQ-5

Red	Zona	Ubicación cond #1	Reducción de pérdidas (kW)	Reducción de pérdidas (%)	Ubicación peor tensión	Fase Peor tensión	Tensión (V)	Aumento de tensión (V)	Aumento de tensión (%)		
VAQ05	No definido	2176	-046	-003	NODOF_1413_CDO03	C	19,607	-470	-002.34034	Círculo	Aplicar
VAQ05	No definido	2175	-044	-002	NODOF_1413_CDO03	C	19,650	-427	-002.12605	Círculo	Aplicar
VAQ05	No definido	2174	-040	-002	NODOF_1413_CDO03	C	19,685	-392	-001.95021	Círculo	Aplicar
VAQ05	No definido	2172	-008	000	NODOF_1413_CDO03	C	19,807	-270	-001.34574	Círculo	Aplicar
VAQ05	No definido	TRAMO_CDO03_3962	038	002	NODOF_1413_CDO03	C	20,839	762	003.79567	Círculo	Aplicar
VAQ05	No definido	TRAMO_CDO03_3731	035	002	NODOF_1413_CDO03	C	20,848	771	003.84213	Círculo	Aplicar
VAQ05	No definido	TRAMO_CDO03_4027	035	002	NODOF_1413_CDO03	C	20,848	771	003.84228	Círculo	Aplicar
VAQ05	No definido	TRAMO_CDO03_4021	036	002	NODOF_1413_CDO03	C	20,848	771	003.84257	Círculo	Aplicar
VAQ05	No definido	TRAMO_CDO03_4024	042	002	NODOF_1413_CDO03	C	20,849	772	003.84289	Círculo	Aplicar
VAQ05	No definido	TRAMO_CDO03_4001	038	002	NODOF_1413_CDO03	C	20,849	772	003.84313	Círculo	Aplicar
VAQ05	No definido	TRAMO_CDO03_4020	036	002	NODOF_1413_CDO03	C	20,849	772	003.84331	Círculo	Aplicar
VAQ05	No definido	TRAMO_CDO03_4023	042	002	NODOF_1413_CDO03	C	20,849	772	003.84389	Círculo	Aplicar
VAQ05	No definido	TRAMO_CDO03_3809	042	002	NODOF_1413_CDO03	C	20,849	772	003.84498	Círculo	Aplicar
VAQ05	No definido	TRAMO_CDO03_4002	038	002	NODOF_1413_CDO03	C	20,850	773	003.84852	Círculo	Aplicar
VAQ05	No definido	TRAMO_CDO03_3965	069	004	NODOF_1413_CDO03	C	20,850	773	003.84867	Círculo	Aplicar
VAQ05	No definido	TRAMO_CDO03_3489	037	002	NODOF_1413_CDO03	C	20,850	773	003.85216	Círculo	Aplicar
VAQ05	No definido	TRAMO_CDO03_3515	037	002	NODOF_1413_CDO03	C	20,851	774	003.85488	Círculo	Aplicar
VAQ05	No definido	TRAMO_CDO03_3744	038	002	NODOF_1413_CDO03	C	20,852	775	003.85770	Círculo	Aplicar
VAQ05	No definido	TRAMO_CDO03_3966	078	004	NODOF_1413_CDO03	C	20,853	776	003.86623	Círculo	Aplicar
VAQ05	No definido	TRAMO_CDO03_3949	119	007	NODOF_1413_CDO03	C	20,853	776	003.86652	Círculo	Aplicar
VAQ05	No definido	TRAMO_CDO03_3950	119	007	NODOF_1413_CDO03	C	20,855	777	003.87254	Círculo	Aplicar
VAQ05	No definido	TRAMO_CDO03_3948	119	007	NODOF_1413_CDO03	C	20,855	778	003.87354	Círculo	Aplicar
VAQ05	No definido	TRAMO_CDO03_3953	119	007	NODOF_1413_CDO03	C	20,857	780	003.88375	Círculo	Aplicar
VAQ05	No definido	TRAMO_CDO03_3954	119	007	NODOF_1413_CDO03	C	20,861	784	003.90664	Círculo	Aplicar
VAQ05	No definido	TRAMO_CDO03_3955	119	007	NODOF_1413_CDO03	C	20,862	785	003.91022	Círculo	Aplicar
VAQ05	No definido	TRAMO_CDO03_3956	119	007	NODOF_1413_CDO03	C	20,865	788	003.92575	Círculo	Aplicar

Tabla A.5: Ganancia de tensión y reducción de pérdidas por tramos, VAQ-5

Resumen total	**kW**	**kvar**	**kVA**	**FP(%)**
Fuentes (Potencia de equilibrio)	5,429	2,063	5,807	093
Generadores	000	000	000	000
Producción total	**5,429**	**2,063**	**5,807**	**093**
Carga leída (no regulada)	5,044	2,225	5,513	091
Carga utilizada (regulada)	5,044	2,225	5,513	091
Condensadores shunt (regulados)	000	-301	301	000
Reactancias shunt(reguladas)	000	000	000	000
Motores	000	000	000	000
Cargas totales	**5,044**	**1,924**	**5,399**	**093**
Capacitancia del cable	000	000	000	000
Capacitancia de la línea	000	-244	244	000
Capacitancia shunt total	**000**	**-244**	**244**	**000**
Pérdidas en las líneas	384	383	542	071
Pérdidas en los cables	000	000	000	000
Pérdidas de carga del transformador	000	000	000	000
Pérdidas en vacío del transformador	000	000	000	000
Pérdidas totales	**384**	**383**	**542**	**071**

Tabla A.6: Pérdidas CDO-3, posterior a la regulación de tensión

Resumen total	**kW**	**kvar**	**kVA**	**FP(%)**
Fuentes (Potencia de equilibrio)	3,540	1,566	3,870	091
Generadores	000	000	000	000
Producción total	**3,540**	**1,566**	**3,870**	**091**
Carga leída (no regulada)	3,406	1,519	3,729	091
Carga utilizada (regulada)	3,393	1,529	3,722	091
Condensadores shunt (regulados)	000	000	000	000
Reactancias shunt(reguladas)	000	000	000	000
Motores	000	000	000	000
Cargas totales	**3,393**	**1,529**	**3,722**	**091**
Capacitancia del cable	000	000	000	000
Capacitancia de la línea	000	-141	141	000
Capacitancia shunt total	**000**	**-141**	**141**	**000**
Pérdidas en las líneas	133	163	211	063
Pérdidas en los cables	013	015	020	066
Pérdidas de carga del transformador	000	000	000	000
Pérdidas en vacío del transformador	000	000	000	000
Pérdidas totales	**147**	**178**	**231**	**064**

Tabla A.7: Pérdidas VAQ-2, posterior a la regulación de tensión

Resumen total	**kW**	**kvar**	**kVA**	**FP(%)**
Fuentes (Potencia de equilibrio)	8,263	3,010	8,794	094
Generadores	000	000	000	000
Producción total	**8,263**	**3,010**	**8,794**	**094**
Carga leída (no regulada)	6,308	2,787	6,896	091
Carga utilizada (regulada)	6,306	2,785	6,894	091
Condensadores shunt (regulados)	000	-1,449	1,449	000
Reactancias shunt(reguladas)	000	000	000	000
Motores	000	000	000	000
Cargas totales	**6,306**	**1,336**	**6,446**	**098**
Capacitancia del cable	000	000	000	000
Capacitancia de la línea	000	-340	340	000
Capacitancia shunt total	**000**	**-340**	**340**	**000**
Pérdidas en las líneas	1,909	1,960	2,736	070
Pérdidas en los cables	047	054	072	066
Pérdidas de carga del transformador	000	000	000	000
Pérdidas en vacío del transformador	000	000	000	000
Pérdidas totales	**1,956**	**2,014**	**2,808**	**070**

Tabla A.8: Pérdidas VAQ-5, posterior a la regulación de tensión

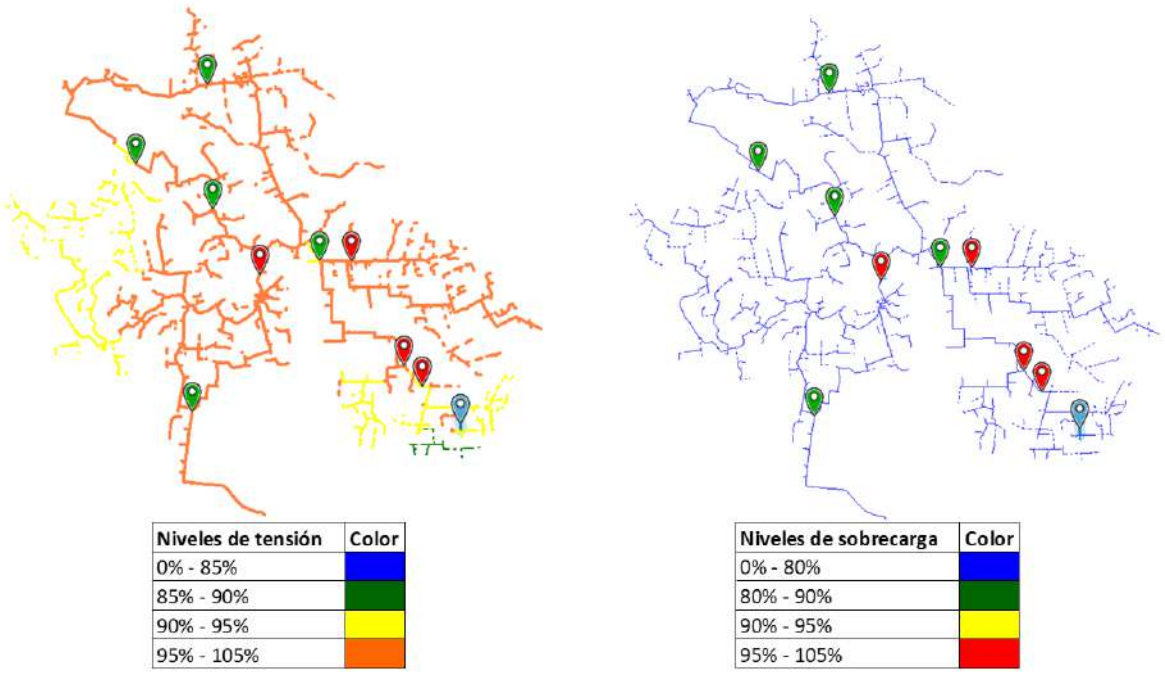


Figura A.13: Niveles de tensión y carga posterior a la regulación de tensión

A.4. Regulación de tensión y mejoras

A continuación se exponen los indices de pérdidas considerando la regulación de tensión y la construcción de 3,4 km de linea 3x150 mm^2.

Costo anual de las pérdidas del sistema	kW	MW-h/año	k$/año
Pérdidas en las líneas	384	3,365	168
Pérdidas en los cables	000	000	000
Pérdidas de carga del transformador	000	000	000
Pérdidas en vacío del transformador	000	000	000
Pérdidas totales	384	3,365	168

Tabla A.9: Pérdidas del CDO-3, posterior a regulación y mejoras

Costo anual de las pérdidas del sistema	kW	MW-h/año	k$/año
Pérdidas en las líneas	970	8,498	425
Pérdidas en los cables	046	400	020
Pérdidas de carga del transformador	000	000	000
Pérdidas en vacío del transformador	000	000	000
Pérdidas totales	1,016	8,898	445

Tabla A.10: Pérdidas del VAQ-2, posterior a regulación y mejoras

Costo anual de las pérdidas del sistema	kW	MW-h/año	k$/año
Pérdidas en las líneas	546	4,779	239
Pérdidas en los cables	014	124	006
Pérdidas de carga del transformador	000	000	000
Pérdidas en vacío del transformador	000	000	000
Pérdidas totales	560	4,904	245

Tabla A.11: Pérdidas del VAQ-5, posterior a regulación y mejoras

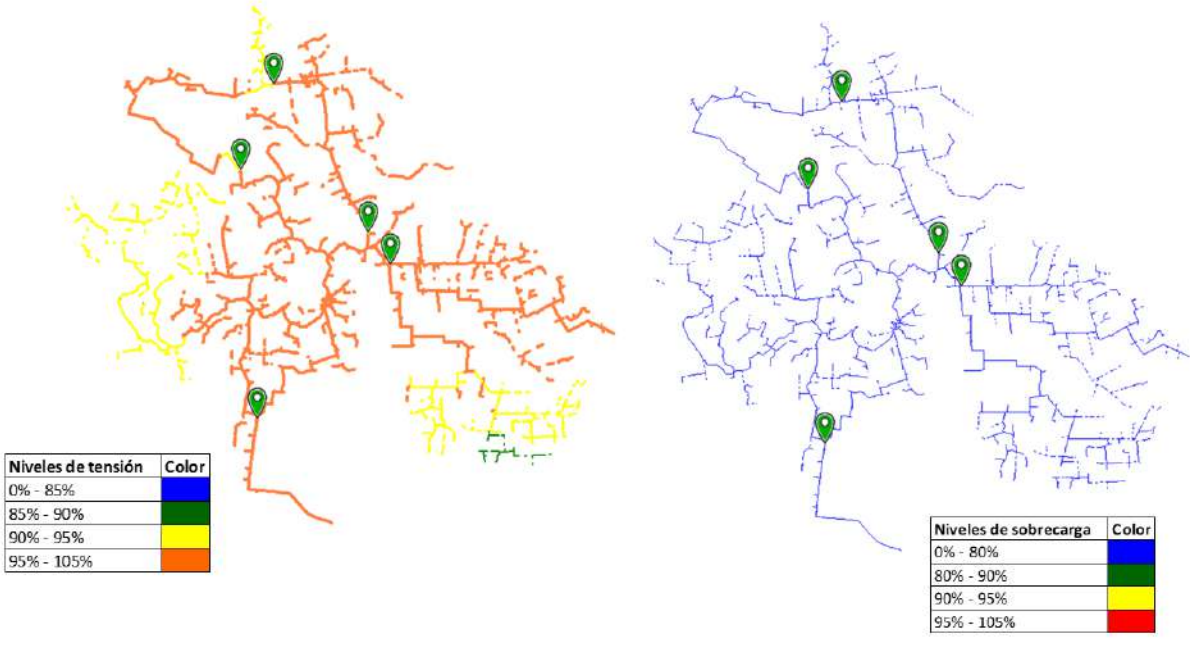


Figura A.14: Niveles de carga y tensión, alternativa construcción de linea

A.5. Alimentador CDO-1

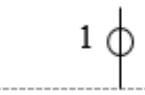
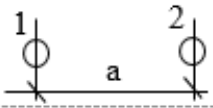
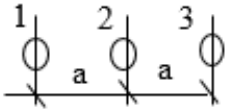
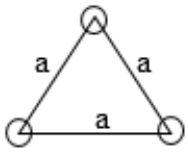
Sistema	Ubicación de los conductores	Esquema Conductores	DMG
Monofásico	1 conductor (retorno por tierra)		$\cong 658\sqrt{\rho/f}$
	2 cables en un mismo plano		a
Trifásico	3 cables en un mismo plano		$a*\sqrt[3]{2}$
	3 cables dispuestos sobre los vértices de un triángulo equilátero		a

Figura A.15: Valores de DMG

$$Zo = Zaa + 2Zab$$

$$\boldsymbol{Zaa = [rx + 0,000988f] + j0,001257f\, ln\frac{658,37 * \sqrt{\rho/f}}{RMG}}$$

$$Zab = 0{,}000988 * f + j0{,}001257 * f * ln\frac{658{,}37 * \sqrt{\rho/f}}{DMG}$$

Figura A.16: Cálculo de reactancia homopolar

Figura A.17: Niveles de tensión y carga VAQ-2

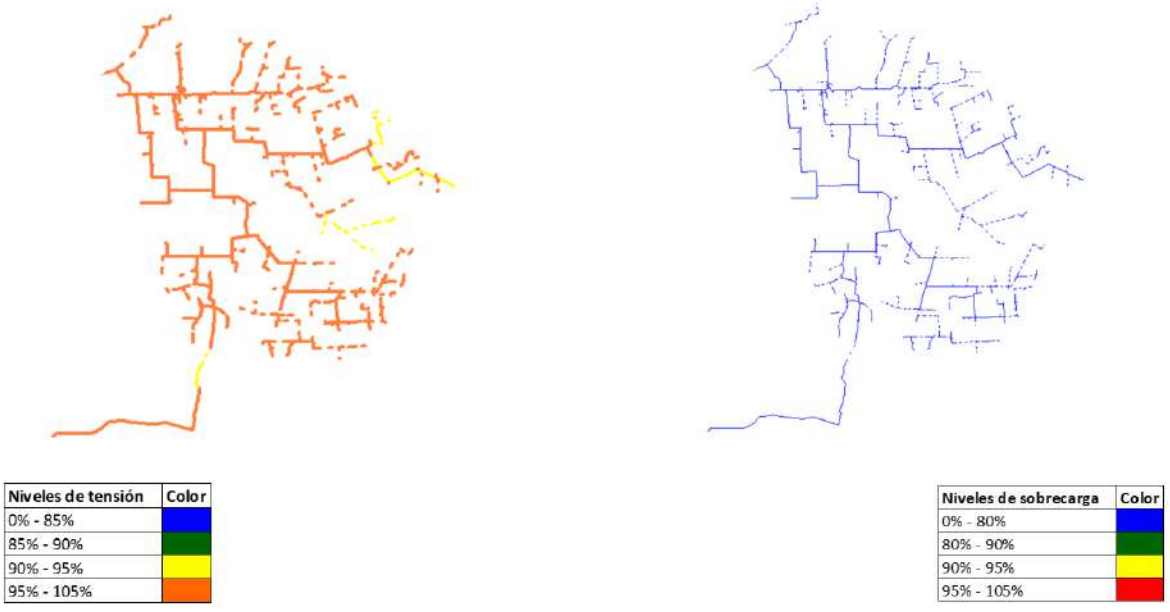


Figura A.18: Niveles de tensión y carga CDO-1

Sección (mm^2)	Diámetro Conductor (mm)	Diámetro aislamiento (mm)	Diámetro exterior (mm)	Ancho cinta (mm)	Sección pantalla (mm^2)	Peso (Kg/Km)	R (Ω/km)	X (Ω /km)	C (µF/km)	Aire libre (A) [1]	Enterrado (A) [2]	Entubado (A) [3]
1 x 50	8,0	22,4	29,5	90	27	770	0,817	0,141	0,143	184	152	144
1 x 95	11,1	25,5	32,6	100	30	995	0,320	0,127	0,175	280	221	210
1 x 120	12,7	27,1	34,2	100	30	1.115	0,253	0,121	0,191	324	252	240
1 x 150	13,9	28,3	35,4	110	33	1.235	0,206	0,118	0,203	368	281	267
1 x 185	15,5	30,6	37,7	110	33	1.405	0,164	0,113	0,222	424	317	303
1 x 240	18,0	32,4	39,5	120	36	1.625	0,125	0,109	0,244	502	367	351
1 x 300	20,0	35,0	41,1	130	39	1.770	0,100	0,103	0,27	577	414	397
1 x 400	22,8	37,4	44,5	140	42	2.195	0,0778	0,101	0,293	673	470	451
1 x 500	26,3	41,2	48,3	150	45	2.580	0,0605	0,097	0,331	777	542	519
1 x 630	29,8	44,4	51,5	160	48	3.060	0,0469	0,094	0,363	895	615	588
1 x 800	34,0	48,9	56,0	170	51	3.680	0.0367	0,090	0,407	1.036	700	670

Determinación de impedancias

R1:	0,21
X1:	0,2076
R0:	0,3082
X0:	1,776

Características medioambientales
Resistencia a los rayos ultravioleta según UNE 211605
Resistencia al agua: AD8 Sumersión.

PROTECCIÓN AD8 CONTRA LA EXPOSICIÓN AL AGUA EN LOS CABLES ELÉCTRICOS: posibilidad de inundación de agua de forma permanente y total.

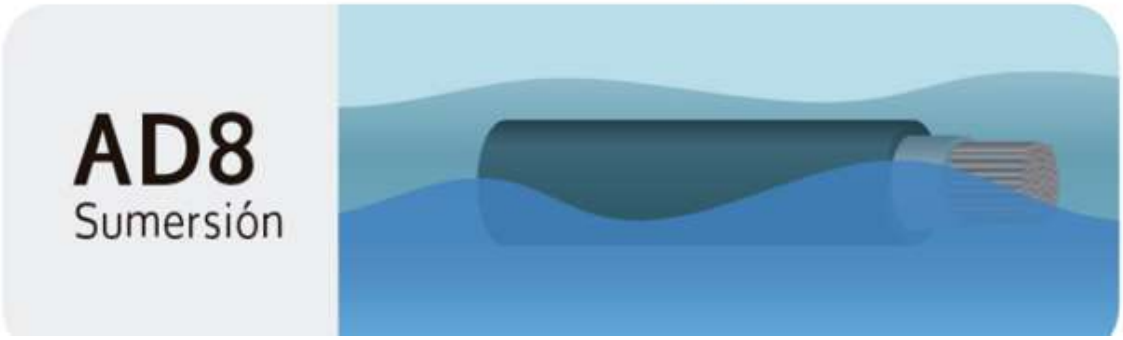


Figura A.19: Cable sub-acuático seleccionado

A.6. Evaluación económica

AÑO	Corriente	Kw incremental	kWh	Venta (100 %)
0	306,0	400		0
1	329,9	697,951744	6114057,28	1.901.471.813
2	355,6	1228,18948	10758939,9	3.346.030.303
3	383,3	1799,78577	15766123,3	4.903.264.354
4	413,2	2415,96656	21163867,1	6.581.962.662
5	445,5	3080,20946	26982634,8	8.391.599.438

Tabla A.12: Producción del arreglo propuesto

AÑO	kW	kWh	Ahorro
0			
1	1784	4733616,23	1.088.731.732
2	1784	4733616,23	1.088.731.732
3	1784	4733616,23	1.088.731.732
4	1784	4733616,23	1.088.731.732
5	1784	4733616,23	1.088.731.732

Tabla A.13: Ahorro por mejoras en pérdidas técnicas

AÑO	KW	KWH	Costo compra
1	698	6114057,28	1.406.233.174
2	1228	10758939,9	2.474.556.172
3	1800	15766123,3	3.626.208.365
4	2416	21163867,1	4.867.689.428
5	3080	26982634,8	6.206.006.015

Tabla A.14: Costo de adquisición de la energía

Bibliografía

[1] O. I. Correa Maza, "Estudio de reconfiguración y optimización de los alimentadores de la subestación machala perteneciente a la corporación nacional de electricidad sa-regional el oro," B.S. thesis, 2010.

[2] J. F. Franco, R. A. Gallego, y D. E. R. Rendón, "Localización óptima de reguladores de tensión en sistemas de distribución con un modelamiento trifásico," *Scientia et technica*, vol. 12, no. 32, pp. 109–114, 2006.

[3] J. F. Franco, Y. S. Restrepo, y P. Tabares, "Repotenciación de alimentadores primarios para la reducción de pérdidas," *Scientia et technica*, vol. 12, no. 30, pp. 19–24, 2006.

[4] M. Galarza, D. Noboa, y J. Gallo, "Proyecto de instalaciones subterráneas de media tensión," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2015.

[5] J. García Trasancos, *Instalaciones eléctricas en media y baja tensión 7.* Ediciones Paraninfo, SA, 2016.

[6] GC/ADC, "Reporte de crecimiento de carga por estaciones," 2020.

[7] R. Granobles, G. Caicedo, J. F. Díaz, y J. M. Gers, "Estado del arte en reconfiguración de sistemas de distribución," *Energía y Computación*, vol. 10, no. 1, pp. 50–61, 2001.

[8] J. D. Juárez Cervantes, *Sistemas de distribución de energía eléctrica.* Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, División de . . . , 1995.

[9] Y. Tang, X. Mao, y R. Ayyanar, "Distribution system modeling using cymdist for study of high penetration of distributed solar photovoltaics," in *2012 North American Power Symposium (NAPS)*. IEEE, 2012, pp. 1–6.

[10] F. V. E. VILLACRÉS y C. A. S. ARCOS, "Utilización de cable protegido para redes aéreas de media tensión," *Escuela Politécnica Nacional*, 2009.

[11] J. A. YEBRA MORON, "Definición de un sistema de distribución," *Sistema Eléctricos de Distribución, Primera edición. Mexico Reverte*, 2009.