



**PROPUESTA DE ALTERNATIVAS PARA MEJORAR
EL FACTOR DE POTENCIA DE LOS
ALIMENTADORES DE 23 kV DE LA ESTACIÓN DE
CAMPO DOS, Dr. JUAN EULOGIO ESTIGARRIBIA,
DEPARTAMENTO DE CAAGUAZÚ**

Pedro Luis Segovia Villaverde

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAAGUAZÚ
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD**

Coronel Oviedo - Paraguay

Año 2021

TÍTULO

Elaborado por

Pedro Luis Segovia Villaverde

Tutor

Ing. Armando Paul Ortiz Cardozo

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

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAAGUAZÚ
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD
Coronel Oviedo - Paraguay
Año 2021

PÁGINA DE APROBACIÓN

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

Prof. Ing.

Prof. Ing.

Prof. Ing.

Dedicado a:

El presente proyecto final de grado está dedicada a mi madre Mirian Teresa Villaverde de Segovia, quien con su sabiduría me ha guiado todo este tiempo y porque es mi inspiración para seguir adelante ya que es un ejemplo de mujer emprendedora, luchadora que no se deja vencer por las adversidades y retos que se presentan en la vida y me ha enseñado a seguir adelante hasta conseguir mis metas y objetivos.

A mi familia, Vania Leilany Segovia Méreles, por ser el motivo principal de mis logros y a su madre Claudia Stefani Méreles Martínez, quien me han brindado su apoyo y acompañado incondicionalmente en todo este tiempo de mi carrera estudiantil de ingeniería.

Agradecimientos:

En primer lugar, a mis padres y hermanos, quienes me han brindado su apoyo incondicional en todo momento, los mismos que me han ayudado a superar cada reto presentado y a todos aquellos que de una u otra forma me brindaron su apoyo durante mi periodo estudiantil de la carrera de ingeniería.

En segundo lugar, a mi director de tesis el Ing. Armando Paul Ortiz Cardozo, quien es una de las personas que más admiro por todos sus conocimientos brindados, también por el tiempo prestado para dar los criterios de ingeniería y dar sus recomendaciones para el proyecto de tesis; al Ing. Ismael Dure, quien me apoyo incondicionalmente y me presto su valiosa ayuda intelectual, equipos e información necesaria sobre el tema; de igual manera a los representantes de la empresa Administración Nacional de Electricidad los mismos que me prestaron todas las facilidades para la toma de datos e información de la empresa.

Finalmente, un entero agradecimiento a mis profesores y a esta prestigiosa universidad, el cual siempre me acogió en sus aulas, formando profesionales competitivos y personas de bien.

**PROPUESTA DE ALTERNATIVAS PARA MEJORAR EL FACTOR DE
POTENCIA DE LOS ALIMENTADORES DE 23 kV DE LA ESTACIÓN DE
CAMPO DOS, Dr. JUAN EULOGIO ESTIGARRIBIA,
DEPARTAMENTO DE CAAGUAZÚ**

Pedro Luis Segovia Villaverde

RESUMEN

El propósito de este trabajo es presentar una propuesta de alternativas técnicas para mejorar el Factor Potencia de los alimentadores de 23 kV de la ES-CDO, ubicado en el distrito de Dr. J.E. Estigarribia, Departamento de Caaguazú. Una vez relevado los datos requeridos para el análisis, se procedió a la simulación de los alimentadores en estudio, el cual básicamente consiste en dos escenarios: el primero consiste en el análisis del estado actual de los alimentadores sin compensación, y el segundo escenario consiste en el análisis del estado con compensación, ambos en condiciones de demanda máxima. Mediante el software CYMDIST 8.2 Rev. 2 se realizó el Flujo de Carga y con ello el perfil de reactivos de los alimentadores, recurriéndose a la Ubicación Óptima de banco de capacitores en dicho Software para determinar la ubicación y tamaño de los bancos de capacitores a ser instalados. Se obtuvo como resultado que la mejor alternativa a ser implementada consiste en instalar banco de capacitores fijos de 300 kVAr en uno de los alimentadores y una combinación de BC's fijos de 300 y 600 kVAr con BC's automáticos de 900 kVAr en los demás alimentadores.

La conclusión más relevante del trabajo es que se pudo mejorar el perfil de reactivos en los alimentadores, mejorar los niveles de tensión y reducir un valor importante de pérdidas en condiciones de demanda máxima. Finalmente, se realizó la evaluación de la mejor alternativa concluyéndose que la misma es rentable por los valores de TIR y VAN obtenidos.

Palabras clave: Sistema eléctrico – Distribución, Flujo de carga – Compensación de Potencia reactiva – Pérdidas en línea media tensión.

PROPOSAL OF ALTERNATIVES TO IMPROVE POWER FACTOR OF CAMPO DOS STATION 'S 23 kV FEEDERS, LOCATED AT Dr. JUAN EULOGIO ESTIGARRIBIA CAAGUAZÚ DEPARTMENT

Pedro Luis Segovia Villaverde

ABSTRACT

The purpose of this work is to present a proposal of technical alternatives to improve the Power Factor of the 23 kV feeders of the ES-CDO, located in the district of Dr. J.E. Estigarribia, Department of Caaguazú. Once the data required for the analysis had been collected, we proceeded to the simulation of the feeders' understudy, which consists of two scenarios: The first scenario consists of the analysis of the current state of the feeders without compensation. The second scenario consists of the analysis of the state with compensation, both under conditions of maximum demand. Utilizing the CYMDIST 8.2 Rev. 2 software, the Load Flow was performed and with it, the reactive power profile of the feeders, resorting to the Optimal Location of the capacitor bank in said Software to determine the location and size of the capacitor banks to be installed. The result was that the best alternative to be implemented consists of installing a bank of 300 kVAR fixed capacitors in one of the feeders and a combination of 300 and 600 kVAR fixed BC's with 900 kVAR automatic BC's in the other feeders.

The most relevant conclusion of the work is that it was possible to improve the reactive power profile in the feeders, improve the voltage levels and reduce a significant value of operating losses. Finally, the evaluation of the best alternative was carried out, concluding that it is profitable due to the IRR and NPV values obtained.

Keywords: Electrical Distribution system -, Load flow, Reactive Power Compensation - Losses on medium-voltage line.

CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	i
Dedicado a:	ii
Agradecimientos:	iii
CONTENIDO.....	vi
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABLAS.....	xx
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xxiii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3
CAPÍTULO 1	3
CONCEPTOS GENERALES SOBRE LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA	3
1.1. ANTECEDENTES HISTORICOS.....	3
1.2. DEFINICIÓN DE TERMINOS BÁSICOS	3
1.3. TEORIAS BÁSICAS.....	4
1.4. FUNDAMENTOS DE LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA	4
1.4.1. Tipos de Cargas	4
1.4.2. Tipos de potencias	7
1.5. Factor de potencia	9
1.6. Métodos de compensación de potencia reactiva	9
1.7. Aplicación de los bancos de capacitores en el sistema eléctricos	10
1.8. Ahorro Monetario	10
CAPITULO 2	12
2. CONCEPTOS GENERALES SOBRE EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.....	12

2.1.	FUNDAMENTOS DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	12
2.1.1.	Definición de un sistema de distribución	12
2.1.2.	Objetivo de la distribución de energía eléctrica	13
2.2.	CLASIFICACIÓN Y ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	14
2.2.1.	Clasificación de los sistemas de distribución.....	14
2.2.2.	Principales elementos constitutivos.....	14
2.2.3.	Líneas primarias de distribución	15
2.2.4.	Transformadores de distribución	16
2.2.5.	Redes secundarias de distribución.....	17
2.2.6.	Acometidas.....	17
2.3.	CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA	17
2.3.1.	Introducción	17
2.3.2.	Carga Eléctrica y Demanda.....	19
2.3.3.	Demanda máxima, Carga Conectada y Capacidad Instalada	20
2.3.4.	Demanda promedio	22
2.3.5.	Factor de Demanda y Factor de Utilización.....	22
2.3.6.	Factor de Carga y Factor de Pérdidas.....	23
2.3.7.	Energía de Pérdidas y Costo de Pérdidas.....	26
CAPITULO 3		27
3.	CONCEPTOS GENERALES SOBRE CAPACITORES	27
3.1.	CAPACITORES	27
3.1.1.	Historia	27
3.1.2.	Capacidad o Capacitancia.....	27
3.2.	CAPACITOR DE POTENCIA.....	29
3.3.	BANCO DE CAPACITORES	30

3.4.	CONEXIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES	30
3.4.1.	Triángulo	32
3.4.2.	Estrella con neutro puesto a tierra.....	32
3.4.3.	Estrella con neutro aislado	33
3.5.	PROTECCIÓN DE LOS BANCOS DE CAPACITORES	35
3.5.1.	Picos de tensión	35
3.5.2.	Sobrecorrientes en los capacitores	35
3.5.3.	Sobretensión permanente en los capacitores	35
3.6.	CONSIDERACIONES DE CONTROL	36
3.6.1.	Bancos de Capacitores Fijos	36
3.6.2.	Bancos de Capacitores Automáticos.....	37
3.6.3.	Control de los Bancos de Capacitores Automáticos.....	38
3.7.	RESONANCIA OCASIONADA POR CAPACITORES	41
3.7.1.	Resonancia serie.....	42
3.7.2.	Resonancia paralelo.....	43
3.8.	COMPONENTES ARMÓNICAS	44
CAPITULO 4		46
4.	COMPENSACIÓN DE LA POTENCIA REACTIVA EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN	46
4.1.	INFLUENCIA DEL BAJO FACTOR DE POTENCIA EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN	46
4.2.	CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA	47
4.2.1.	Inyección de reactivos	48
4.2.2.	Control de tensión	49
4.2.3.	Incremento de la capacidad del sistema	49
4.2.4.	Reducción de las pérdidas del sistema	51
CAPÍTULO 5		52

5. BANCOS DE CAPACITORES EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN	52
5.1. LOCALIZACIÓN DE LOS BANCOS DE CAPACITORES EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN	52
5.1.1. Compensación Concentrada	52
5.1.2. Compensación Distribuida.....	53
5.2. TAMAÑO DE LOS BANCOS DE CAPACITORES.....	67
5.2.1. Tamaño máximo.....	67
5.2.2. Tamaño mínimo.....	68
5.3. ESPECIFICACIONES DE LOS CAPACITORES	69
5.3.1. Clasificación Estándar	69
5.4. CAPACIDADES RELACIONADAS	71
5.4.1. Operación continua	71
CAPITULO 6	72
6. UTILIZACIÓN DEL SOFTWARE	72
6.1. INTRODUCCIÓN AL SIMULADOR CYMDIST	72
6.2. CONSIDERACIONES BÁSICAS EN EL MODELADO DE LAS CARGAS 74	
6.2.1. Tipo de carga	74
6.2.2. Tipo de actividad	77
6.3. COMPENSACIÓN DE LA POTENCIA REACTIVA EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN UTILIZANDO EL MODULO “UBICACIÓN ÓPTIMA DE CONDENSADORES” DEL CYMDIST	77
6.3.1. Análisis de la variación de potencia reactiva en el alimentador a compensar	77
6.3.2. Evaluación de alternativas para la corrección del factor de potencia	77
6.3.3. Diseño del sistema de compensación reactiva.....	77

6.3.4. Utilización del módulo “Ubicación Optima de Condensadores” del CYMDIST	78
III. RESUMEN EJECUTIVO	83
CAPITULO 7	83
7.1. Descripción del trabajo	83
7.2. Métodos y Técnicas utilizadas	83
7.3. Justificación	85
7.4. Finalidad del proyecto.....	85
7.5. Metas	86
7.6. Objetivos	86
7.6.1. Objetivo general	86
7.6.2. Objetivos específicos.....	86
7.7. Beneficiarios	87
7.8. Producto	87
7.9. Localización física y cobertura espacial.....	87
7.10. Especificaciones de actividades y tareas realizadas	87
7.11. Factibilidad técnica	88
7.12. Factibilidad económica	88
7.13. BENEFICIOS	89
7.13.1. Ahorro en términos de Energía.....	89
7.13.2. Costos de implementación de los sistemas de compensación de potencia reactiva.	89
7.14. Evaluación económica	90
7.14.1. Determinación del flujo de caja proyectada.....	90
7.14.2. Determinación de la tasa interna de rendimiento (TIR)	91
7.14.3. Determinación del valor presente neto (VPN)	91

7.14.4. Determinación del periodo de recuperación de la inversión (PRI).....	91
IV. INGENIERÍA DE DISEÑO	92
8. CAPÍTULO 8.....	92
8.1. Datos generales de la Estación de Campo Dos.	92
8.1.1. Área de Influencia.....	92
8.1.2. Estación Campo Dos (ES-CDO).....	94
8.1.3. Alimentadores.....	99
8.2. Situación actual de Compensación de reactivos	106
8.3. compensación distribuida – metodología de análisis	106
8.3.1. Análisis de carga	107
8.3.2. Análisis de la demanda	107
8.4. Modelado del sistema	108
8.5. Análisis de la carga.....	109
8.6. Estudios de los alimentadores de la Es-CDO	109
8.6.1. Estudio del alimentador CDO 03	109
8.6.2. Estudio del alimentador CDO 04	117
8.6.3. Estudio del alimentador CDO 05	124
8.6.4. Estudio del alimentador CDO 07	132
8.6.5. Estudio del alimentador CDO 08	139
8.6.6. Estudio de alimentador CDO 09.....	143
8.6.7. Estudio del alimentador CDO 10	150
8.7. demanda máxima SIMULTÁNEA.....	157
8.7.1. Demanda máxima simultánea sin compensación.....	157
8.7.2. Demanda máxima simultánea con compensación	157
8.8. Selección de los alimentadores a compensar.....	158
8.9. Valoración del factor de potencia.....	159

8.10.	Pérdidas en kW.....	159
8.11.	Costo Anual de las PERDIDAS de los alimentadores correspondientes a la ES-CDO, (Estado actual).....	160
8.12.	Costo anual de la PERDIDAS de los alimentadores correspondientes a la ES-CDO, (Con compensacion).....	160
8.13.	Reducción del costo total Anualde las perdidas de los alimentadores correspondientes a la ES-CDO.	160
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	161
VI.	CONCLUSIONES.....	162
VII.	RECOMENDACIONES	163
VIII.	APÉNDICE	164
	APÉNDICE A: RESUMEN EJECUTIVO.....	164
	APÉNDICE A.1: RESUMEN DE LISTA DE MATERIALES	164
	APÉNDICE A.2: LISTA COMPLETA DE MATERIALES	164
	APÉNDICE B: INGENIERÍA DE DISEÑO	166
	APÉNDICE B.1: CARGA HORARIA TÍPICA DE LA ES-CDO.....	166
	APÉNDICE B.2: CARGA HORARIA TIPICA DE LOS ALIMENTADORES DE LA ES-CDO	167
	Apéndice C: EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	179
	Apéndice C.1: COSTO DE MANTENIMIENTO	179
	Apéndice C.2: ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN DE CARGA	180
	Apéndice C.3: COSTOS DE INSTALACION.....	184
IX.	ANEXO	186
X.	BIBLIOGRAFÍA.....	189

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO 1

Figura 1.4.1: Circuito con carga resistiva, formas de onda del voltaje y corriente...	5
Figura 1.4.2: Circuito con carga inductiva, formas de onda del voltaje y corriente..	6
Figura 1.4.3: Circuito con carga capacitiva, formas de onda del voltaje y corriente.	6
Figura 1.4.4: Triángulo de potencias eléctricas.	8

CAPITULO 2

Figura 2.1.1: Sistema Eléctrico de Potencia.....	13
Figura 2.2.1: Red de distribución	15
Figura 2.3.1: Curvas características de carga	18
Figura 2.3.2: Relación de potencia y tiempo	20
Figura 2.3.3: Representación gráfica de la entrada de una carga súbita a una red eléctrica.....	21
Figura 2.3.4: Potencia demandada por una carga.	22
Figura 2.3.5: Utilización de un sistema y su carga	23
Figura 2.3.6: Representación gráfica de la demanda máxima de una carga variable, del valor de la carga conectada y de la capacidad instalada.....	23
Figura 2.3.7: Potencia promedio y potencia máxima	24
Figura 2.3.8: Ciclos de carga	25
Figura 2.3.9: Ciclo de pérdidas de potencia $Ri^2(t)$ en una resistencia.	25

CAPITULO 3

Figura 3.1.1: Botella de Leyden	27
Figura 3.1.2: Aspecto constructivo del Capacitor	28
Figura 3.2.1: Vista de Corte de un capacitor de dos terminales, donde indica: 1. Terminal de conexión; 2. Terminal de porcelana; 3. Elemento de fijación; 4. Cubierta de acero inoxidable; 5. Parte activa.....	29
Figura 3.2.2: Elementos de un capacitor individual.....	30
Figura 3.4.1: Conexión de un banco de capacitores en triangulo.	32

Figura 3.4.2: Conexión de un banco de capacitores en estrella con neutro puesto a tierra.	32
Figura 3.4.3: Conexión de un banco de capacitores en estrella con neutro aislado.	33
Figura 3.6.1: Demanda de potencia constante.....	37
Figura 3.6.2: Demanda de potencia variable.....	37
Figura 3.6.3: Instalación de bancos de capacitores según la curva de demanda.	38
Figura 3.6.4: Funcionamiento del control de los Bancos Automáticos.	39
Figura 3.6.5: Cableado de TP's en sistemas en "Y".	40
Figura 3.6.6: Cableado de TP's en sistemas en "Delta".....	40
Figura 3.7.1: Circuito resonante serie	42
Figura 3.7.2: Circuito resonante paralelo	43
CAPITULO 4	
Figura 4.2.1: Aplicación del capacitor en paralelo	47
Figura 4.2.2: Diagrama de corrección del factor de potencia. (P) no varía, (S) disminuye, (Q) disminuye e (I) disminuye.	48
Figura 4.2.3: Diagrama de corrección del factor de potencia	50
CAPITULO 5	
Figura 5.1.1: Esquema eléctrico de una subestación 60/10 kV con compensación reactiva concentrada.	52
Figura 5.1.2: Esquema eléctrico de una subestación con compensación reactiva distribuida.....	54
Figura 5.1.3: Efecto de una corriente capacitiva sobre una corriente inductiva	55
Figura 5.1.4: Diagrama fasorial de potencia que ilustra el concepto de capacidad liberada.	55
Figura 5.1.5: Cancelación de la corriente inductiva por la corriente capacitiva en una línea de distribución.	56
Figura 5.1.6: Ciclo $i_2(t)$	57
Figura 5.1.7: Pérdidas de potencia y energía con una línea con carga variable. ...	58
Figura 5.1.8: Diagrama de relaciones vectoriales de una línea corta con capacitores en la carga.	59
Figura 5.1.9: Representación gráfica de los resultados de la Tabla 5.1.....	61

Figura 5.1.10: Diagrama unifilar del alimentador empleado por M. Maxwell	64
--	----

CAPITULO 6

Figura 6.1.1: Ventana de Interfaz gráfica de usuario de CYMDIST.	73
---	----

Figura 6.2.1: Ventana de Interfaz de CYMDIST	74
--	----

CAPITULO 8

Figura 8.1.1: Ubicación de la ES-CDO.....	92
---	----

Figura 8.1.2: Documentación fotográfica de la ES-CDO.....	92
---	----

Figura 8.1.3: Configuración actual de la ES-CDO.....	93
--	----

Figura 8.1.4: Área de influencia de la ES-CDO.....	94
--	----

Figura 8.1.5: Esquema Unifilar de la ES-CDO.	95
---	----

Figura 8.1.6: Esquema Unifilar de la ES-CDO. Barra A-23 KV	97
--	----

Figura 8.1.7: Esquema Unifilar de la ES-CDO. Barra B-23 KV	98
--	----

Figura 8.1.8: Área de influencia del alimentador CDO 03.	100
---	-----

Figura 8.1.9: Área de influencia del alimentador CDO 04.	101
---	-----

Figura 8.1.10: Área de influencia del alimentador CDO 05.	102
--	-----

Figura 8.1.11: Área de influencia del alimentador CDO 07.	103
--	-----

Figura 8.1.12: Área de influencia del alimentador CDO 08.	104
--	-----

Figura 8.1.13: Área de influencia del alimentador CDO 09.	105
--	-----

Figura 8.1.14: Área de influencia del alimentador CDO 10.	106
--	-----

Figura 8.3.1: Comparación de la demanda de potencia activa y reactiva del transformador de potencia de la ES-CDO.....	108
--	-----

Figura 8.6.1: Curvas de la corriente por fase del alimentador CDO 03, carga máxima.....	109
--	-----

Figura 8.6.2: Estado actual del alimentador CDO 03, con carga maxima.....	111
---	-----

Figura 8.6.3: Cuadro de Flujo de Carga máxima del alimentador CDO 03, estado actual.....	111
---	-----

Figura 8.6.4: Estado actual del Perfil de tensión del alimentador CDO 03, carga máxima.....	112
--	-----

Figura 8.6.5: Estado actual del perfil kVA _r del alimentador CDO 03, carga máxima.	113
--	-----

Figura 8.6.6: Representación del estado con compensación del alimentador CDO 03, carga máxima.....	114
---	-----

Figura 8.6.7: Cuadro de flujo de carga del alimentador CDO 03, estado con compensación.....	115
Figura 8.6.8: Representación del estado con compensación del alimentador CDO 03, carga máxima.....	115
Figura 8.6.9: Estado del perfil kVAr con compensación del alimentador CDO 03, carga máxima.....	116
Figura 8.6.10: Demanda de alimentador CDO 04, carga máxima.....	117
Figura 8.6.11: Curvas de la corriente por fase del alimentador CDO 04, carga máxima.....	117
Figura 8.6.12: Estado actual del alimentador CDO 04, carga máxima.....	118
Figura 8.6.13: Cuadro de flujo de carga máxima del alimentador CDO 04, estado actual.....	119
Figura 8.6.14: Estado actual del Perfil de tensión del alimentador CDO 04, carga máxima.....	119
Figura 8.6.15: Estado actual del perfil kVAr del alimentador CDO 04, carga máxima.....	120
Figura 8.6.16: Representación del estado con compensación del alimentador CDO 04, carga máxima.....	121
Figura 8.6.17: Cuadro de flujo de carga del alimentador CDO 04, con compensación.....	122
Figura 8.6.18: Representación del estado con compensación del alimentador CDO 04, carga máxima.....	123
Figura 8.6.19: Estado del perfil kVAr con compensación del alimentador CDO 04, carga máxima.....	123
Figura 8.6.20: Demanda promedio del alimentador CDO 05.....	124
Figura 8.6.21: Curvas de la corriente por fase del alimentador CDO 05.....	125
Figura 8.6.22: Estado actual del alimentador CDO 05, carga máxima.....	126
Figura 8.6.23: Cuadro de flujo de carga máxima del alimentador CDO 04, estado actual.....	126
Figura 8.6.24: Estado actual de Perfil de tensión, carga máxima	127
Figura 8.6.25: Estado actual del perfil kVAr del alimentador CDO 05, carga máxima.....	128

Figura 8.6.26: Representación del estado con compensación del alimentador CDO 05, carga máxima.....	129
Figura 8.6.27: Cuadro de flujo de carga del alimentador CDO 05, estado con compensación.	129
Figura 8.6.28: Estado con compensación del alimentador CDO 05, carga máxima.	130
Figura 8.6.29: Estado con compensación del perfil kVAr del alimentador CDO 05, según carga máxima.....	131
Figura 8.6.30: Curvas de la corriente por fase del alimentador CDO 07.....	132
Figura 8.6.31: Estado actual del alimentador CDO 07 con carga máxima.....	133
Figura 8.6.32: Cuadro de flujo de carga máxima del alimentador CDO 07, estado actual.....	133
Figura 8.6.33. Estado actual de Perfil de tensión del alimentador CDO 07, con carga máxima.....	134
Figura 8.6.34: Estado actual del perfil kVAr del alimentador CDO 07, carga máxima.....	135
Figura 8.6.35: Representación del estado con compensación del alimentador CDO 07, carga máxima.....	136
Figura 8.6.36: Cuadro de flujo de carga del alimentador CDO 07, estado con compensación.	136
Figura 8.6.37: Representación del estado con compensación del alimentador CDO 07, carga máxima.....	137
Figura 8.6.38: Estado con compensación del perfil kVAr del alimentador CDO 07, carga máxima.....	138
Figura 8.6.39: Demanda de alimentador CDO 08.....	139
Figura 8.6.40: Curvas de la corriente por fase del alimentador CDO 08.....	139
Figura 8.6.41: Estado actual del alimentador CDO 08, carga máxima.....	140
Figura 8.6.42: Cuadro de flujo de carga máxima del alimentador CDO 08, estado actual.....	141
Figura 8.6.43: Estado actual de Perfil de tensión con carga máxima.....	141
Figura 8.6.44: Estado actual del perfil kVAr del alimentador CDO 08, carga máxima.....	142

Figura 8.6.45: Demanda de alimentador CDO 09.	143
Figura 8.6.46: Curvas de la corriente por fase del alimentador CDO 09, estado actual.....	143
Figura 8.6.47: Estado actual del alimentador CDO 09, carga máxima.....	144
Figura 8.6.48: Cuadro de flujo de carga máxima del alimentador CDO 09, estado actual.....	145
Figura 8.6.49: Estado actual de Perfil de tensión con carga máxima.....	145
Figura 8.6.50: Estado actual del perfil kVAr del alimentador CDO 09, carga máxima.....	146
Figura 8.6.51: Representación del estado con compensación del alimentador CDO 09, carga máxima.....	147
Figura 8.6.52: Cuadro de flujo de carga del alimentador CDO 09, con compensación.	148
Figura 8.6.53: Representación del estado con compensación del alimentador CDO 09, carga máxima.....	148
Figura 8.6.54: Estado con compensación del perfil kVAr del alimentador CDO 09, según carga máxima.....	149
Figura 8.6.55: Demanda de alimentador CDO 10.	150
Figura 8.6.56: Curvas de la corriente por fase del alimentador CDO 10.....	150
Figura 8.6.57: Estado actual del alimentador CDO 10 con carga máxima.....	151
Figura 8.6.58: Cuadro de flujo de carga máxima del alimentador CDO 10, estado actual.....	152
Figura 8.6.59: Estado actual de Perfil de tensión con carga máxima.....	152
Figura 8.6.60: Estado actual del perfil kVAr del alimentador CDO 10, según carga máxima.....	153
Figura 8.6.61: Representación del estado con compensación del alimentador CDO 10, carga máxima.....	154
Figura 8.6.62: Cuadro de flujo de carga del alimentador CDO 10, estado con compensación.	155
Figura 8.6.63: Representación del estado con compensación del alimentador CDO 10, carga máxima.....	155

Figura 8.6.64: Estado con compensación del perfil kVAr del alimentador CDO 10, carga máxima.....	156
Figura 8.9.1: Valoración del factor de potencia de los alimentadores de ES-CDO.	159
Figura 8.12.1: Compensador dinámico de 300 kVAr/fase	186
Figura 8.12.2: Montaje del compensador dinámico de 300 kVAr/fase	186
Figura 8.12.3: Vista general del compensador dinámico de 300 kVAr/fase	187
Figura 8.12.4: Vista general de un banco de capacitores de 600 kVAr.....	187
Figura 8.12.5: Vista general de un banco de capacitores de 300 kVAr.....	188

LISTA DE TABLAS

CAPITULO 5

Tabla 5.1.1: Simulación del alimentador al variar la capacidad del Banco de Capacitores	60
Tabla 5.3.1: Capacidades estándar según IEEE 18-2002.....	70

CAPITULO 7

Tabla 7.13.1: Costo del ahorro anual en término de energía	89
Tabla 7.13.2: Costo de implementación del sistema de compensación reactiva ..	89
Tabla 7.13.3: Costo de mantenimiento.....	90
Tabla 7.13.4: Costo de reposición.....	90
Tabla 7.14.1: Flujo de caja proyectada	90
Tabla 7.14.2: Valor Presente Neto	91

CAPITULO 8

Tabla 8.1.1: Características principales del alimentador CDO 03.	99
Tabla 8.1.2: Características principales del alimentador CDO 04.	100
Tabla 8.1.3: Características principales del alimentador CDO 05.	101
Tabla 8.1.4: Características principales del alimentador CDO 07.	102
Tabla 8.1.5: Características principales del alimentador CDO 08.	103
Tabla 8.1.6: Características principales del alimentador CDO 09.	104
Tabla 8.1.7: Características principales del alimentador CDO 10.	105
Tabla 8.6.1: Demanda máxima por fase del alimentador CDO 03.	110
Tabla 8.6.2: Reporte sumario del alimentador CDO 03, carga máxima	113
Tabla 8.6.3: Características y ubicación de los Bancos de capacitores.	114
Tabla 8.6.4: Reporte sumario del alimentador CDO 03, carga máxima con compensación.	116
Tabla 8.6.5: Demanda máxima por fase del alimentador CDO 04.	118
Tabla 8.6.6: Reporte sumario del alimentador CDO 04, carga máxima	121
Tabla 8.6.7: Características y ubicación de los Bancos de capacitores.	122
Tabla 8.6.8: Reporte sumario del alimentador CDO 04, según carga máxima con compensación.	124

Tabla 8.6.9: Demanda máxima por fase del alimentador CDO 05.	125
Tabla 8.6.10: Reporte sumario del alimentador CDO 05, carga máxima	128
Tabla 8.6.11: Características y ubicación de los Bancos de capacitores.	129
Tabla 8.6.12: Reporte sumario del alimentador CDO 05, con compensación según carga máxima.....	131
Tabla 8.6.13: Demanda máxima por fase del alimentador CDO 07.	132
Tabla 8.6.14: Reporte sumario del alimentador CDO 07, carga máxima	135
Tabla 8.6.15: Características y ubicación de los Bancos de capacitores.	136
Tabla 8.6.16: Reporte sumario del alimentador CDO 07, con compensado, carga máxima.....	138
Tabla 8.6.17: Demanda máxima por fase del alimentador CDO 08.	140
Tabla 8.6.18: Reporte sumario del alimentador CDO 08, carga máxima	142
Tabla 8.6.19: Demanda máxima por fase del alimentador CDO 09.	144
Tabla 8.6.20: Reporte sumario del alimentador CDO 09, según carga máxima .	146
Tabla 8.6.21: Características y ubicación de los Bancos de capacitores.	147
Tabla 8.6.22: Reporte sumario del alimentador CDO 09, carga máxima, con compensación	149
Tabla 8.6.23: Demanda máxima por fase del alimentador CDO 10.	151
Tabla 8.6.24: Reporte sumario del alimentador CDO 10, carga máxima	153
Tabla 8.6.25: Características y ubicación de los Bancos de capacitores.	154
Tabla 8.6.26: Reporte sumario del alimentador CDO 10, carga máxima con compensación	156
Tabla 8.7.1: Demanda máxima simultanea sin compensación de los alimentadores de la ES-CDO.	157
Tabla 8.7.2: Demanda máxima simultánea con compensación de los alimentadores de la ES-CDO.	157
Tabla 8.8.1: Resultados de la selección de las Capacidades y ubicación óptima de los BC's.....	158
Tabla 8.9.1: Pérdidas en los alimentadores de distribución de la ES-CDO.....	159
Tabla 8.10.1: Pérdidas en los alimentadores de distribución, sin compensación.	160

Tabla 8.11.1: Pérdidas en los alimentadores de distribución, Con compensación.	160
Tabla 8.12.1: Reducción del costo total de las pérdidas de los alimentadores correspondientes a la ES-CDO.	160
Tabla 8.12.1: Resumen de lista de materiales	164
Tabla 8.12.2: Banco de capacitores 300 kVAr - M.T	164
Tabla 8.12.3: Banco de capacitores 600 kVAr - M.T	165
Tabla 8.12.4: Demanda de la ES-CDO, P. activa (MW) y P. reactiva (MVar).....	166
Tabla 8.12.5: Corriente por fase del alimentador CDO 03.	167
Tabla 8.12.6: Carga horaria típica del alimentador CDO 04.....	168
Tabla 8.12.7: Corriente por Fase del alimentador CDO 04.	169
Tabla 8.12.8: Corriente por fase del alimentador CDO 05.	170
Tabla 8.12.9: Corriente por fase del alimentador CDO 05.	171
Tabla 8.12.10: Carga horaria típica del alimentador CDO 07.....	172
Tabla 8.12.11: Corriente por fase del alimentador CDO 07.	173
Tabla 8.12.12: Carga horaria típica del alimentador CDO 08.....	174
Tabla 8.12.13: Corriente por fase del alimentador CDO 08.	175
Tabla 8.12.14: Carga horaria típica del alimentador CDO 09.....	176
Tabla 8.12.15: Corriente por fase del alimentador CDO 09.	177
Tabla 8.12.16: Corriente por fase del alimentador CDO 10.	178
Tabla 8.12.17: Detalles del costo de mantenimiento anual	179
Tabla 8.12.18: Detalles del costo de reposición	179
Tabla 8.12.19: Detalles del costo de instalación CDO 03.	184
Tabla 8.12.20: Detalles del costo de instalación CDO 04	184
Tabla 8.12.21: Detalles del costo de instalación CDO 05	184
Tabla 8.12.22: Detalles del costo de instalación CDO 07.	185
Tabla 8.12.23: Detalles del costo de instalación CDO 09	185
Tabla 8.12.24: Detalles del costo de instalación CDO 10	185

LISTA DE ABREVIATURAS

ANDE: Administración Nacional de Electricidad.

ES-COV: Estación Coronel Oviedo.

ES-CDO: Estación Campo Dos.

SIN: Sistema Interconectado Nacional.

MT: Media Tensión.

A: Amperios, Unidad de Medida de la Corriente.

kV: Kilovoltios, Unidad de Medida de la Tensión.

MW: Mega Watt, Unidad de Medida de la Potencia Activa.

MVA_r: Mega Volt Amper Reactivo, Unidad de Medida de la Potencia Reactiva.

MVA: Mega Volt Amper, Unidad de Medida de la Potencia Aparente.

FP: Factor de Potencia.

BC's: Banco de Capacitores.

RT's: Regulador de Tensión.

I. INTRODUCCIÓN

En el distrito de Dr. Juan Eulogio Estigarribia, Departamento de Caaguazú, la empresa ANDE posee una Estación transformadora 220/23 kV, en la cual la distribución de la energía eléctrica es realizada mediante 8 alimentadores de 23 kV, de los cuales 1 alimentador es del tipo exclusivo, motivo por el cual no fue analizado en el presente trabajo. Actualmente la compensación de potencia reactiva en el nivel de media tensión es realizada solamente en la barra de 23 kV, mediante bancos de capacitores fijos y en atención a las necesidades del transformador de potencia de la Estación de referencia, por lo que los alimentadores de distribución siguen transportando elevada potencia reactiva inductiva hasta los centros de consumo, que conlleva a elevadas pérdidas eléctricas. Según datos obtenidos, el factor de potencia de los 8 alimentadores está por debajo del nivel mínimo exigido en el reglamento de la ANDE, el cual establece como valor mínimo de 0,95 a la demanda máxima y 0,92 como promedio mensual.

A raíz de esto surgió la necesidad de evaluar las distintas alternativas tecnológicas de compensación de potencia reactiva aplicables a los alimentadores de 23 kV de la Estación Campo Dos, con la finalidad de optimizar el suministro de la energía eléctrica, ya que mejorando el factor de potencia se van a reducir las pérdidas, así como mejorar el nivel de tensión y aumentar la disponibilidad de potencia activa en las redes de Media Tensión de la zona de influencia de la ES-CDO, mejorando de esta forma la calidad del servicio de suministro de energía eléctrica.

En el desarrollo del capítulo 1, se realiza una revisión bibliográfica extensa, donde se puede apreciar los antecedentes históricos y la definición de términos básicos. En el capítulo 2, encontramos los conceptos generales sobre el sistema de distribución. En el capítulo 3, se tiene los conceptos generales sobre los capacitores. En el capítulo 4, se detalla sobre la compensación de la potencia reactiva en el sistema de distribución. En el capítulo 6, se muestra el procedimiento de la utilización del software Cymdist 8.2 Rev. 2 que será bastante

útil para el desarrollo de los estudios de este proyecto. En el capítulo 7, abarca el resumen ejecutivo del proyecto. En el capítulo 8, se desarrolla la Ingeniería de Diseño, primeramente, se realiza la descripción de la situación actual de la Estación Campo Dos, luego se analizó el perfil de potencia reactiva en condiciones de demanda máxima para la situación actual y luego simulando las alternativas de mejora de dicho perfil.

Además, se realizó un análisis comparativo de las perdidas en kW por explotación en los escenarios citados, teniendo en cuenta el perfil de reactivos, el perfil de tensión. Finalmente se realiza una evaluación técnica y económica de los resultados obtenidos para la selección de la mejor alternativa.

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

CAPÍTULO 1

CONCEPTOS GENERALES SOBRE LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA

1.1. ANTECEDENTES HISTORICOS

Pedro Pastor González, Universidad Nacional de Caaguazú, en el año 2016 con el proyecto “Análisis de alternativas para compensación de energía reactiva en los alimentadores de 23 kV de la Estación de Caaguazú”. En este proyecto se describe un análisis técnico comparativo en la implementación de bancos de capacitores en la barra de 23 kV y en los alimentadores de distribución, mediante simulaciones de flujo de potencia utilizando el programa Power World Simulator 18.0 en su versión académica y el CYMDIST versión 7.0.

El objetivo de este trabajo fue encontrar una alternativa técnica y económica mediante la compensación reactiva en el sistema de distribución en media tensión de la estación de Caaguazú.

La investigación concluye que el empleo de bancos de capacitores fijos en 4 de los 6 alimentadores emergentes de la Estación Caaguazú, representa una alternativa técnica y económicamente viable que aumenta el factor de potencia en los alimentadores, se reducen las pérdidas y se aumentan el factor de carga del transformador de potencia.

1.2. DEFINICIÓN DE TERMINOS BÁSICOS

Estación: Es un conjunto de dispositivos eléctricos, que forman parte de un sistema eléctrico de potencia; sus funciones principales son: transformar tensiones y derivar circuitos de potencia.

Barras: Conductor eléctrico rígido, ubicado en una Estación con la finalidad de servir como conector de dos o más circuitos eléctricos.

Conductor: Es cualquier material que ofrezca mínima resistencia al paso de una corriente eléctrica. Los conductores más comunes son de cobre o de aluminio y pueden estar aislados o desnudos.

Flujo de carga: Es la cantidad de potencia que debe ser entregada en un punto dado de un sistema eléctrico.

Red de distribución: Son los cables encargados de conducir la energía eléctrica desde las subestaciones de potencia hasta los transformadores de distribución.

Alimentador: Es todo circuito eléctrico que transmite la energía eléctrica desde las subestaciones de distribución hasta los puntos de consumo.

Circuito: Nombre que se le da a las redes eléctricas de distribución que salen de cada uno de los alimentadores de las Subestaciones.

1.3. TEORIAS BÁSICAS

1.4. FUNDAMENTOS DE LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA

En este capítulo se analizan las cargas conectadas a la red eléctrica, algunas de estas cargas provocan variaciones en la forma de onda de tensión y corriente, los métodos para efectuar una compensación de potencia reactiva y como se corrige el factor de potencia, estos conceptos serán de gran utilidad para el estudio de capítulos posteriores. [1]

1.4.1. Tipos de Cargas

Una carga es un elemento que consume energía eléctrica, en general existen dos tipos de cargas dentro de los sistemas eléctricos: Cargas lineales y las Cargas no lineales. Una carga es lineal cuando la tensión aplicada a sus extremos y la corriente que pasan por ella están estrechamente relacionadas. Por el contrario, se dice que una carga es no lineal cuando la relación tensión/corriente no es constante, la carga no lineal conectada a la red de corriente alterna absorben corrientes que no son senoidales. [1]

A continuación, se citan algunas cargas típicas no lineales:

- ✓ Equipos electrónicos, en general monofásicos, que internamente trabajan con corriente continua (ordenadores, impresora, autómatas programables, etc.).
- ✓ Alumbrado Fluorescente y lámparas con balastos electrónicos.
- ✓ Transformadores, reactancias con núcleos de hierro
- ✓ Controles electrónicos de velocidad para motores de CD y CA.

✓ UPS's y PC's.

1.4.1.1. Carga resistiva (R)

En las cargas resistivas como las lámparas incandescentes, calefactores, resistencias de carbón (es toda energía que se convierte en luz y calor) el voltaje y la corriente están en fase. En este caso, se tiene un factor de potencia unitario. [2]

En un circuito puramente resistivo, la corriente está en fase con la tensión y es función inmediata de la tensión. [1]

La característica de estas cargas es que el ángulo de desfase entre el voltaje y la corriente es cero, es decir, se encuentran en fase como se muestra en la Figura 1.4.1.

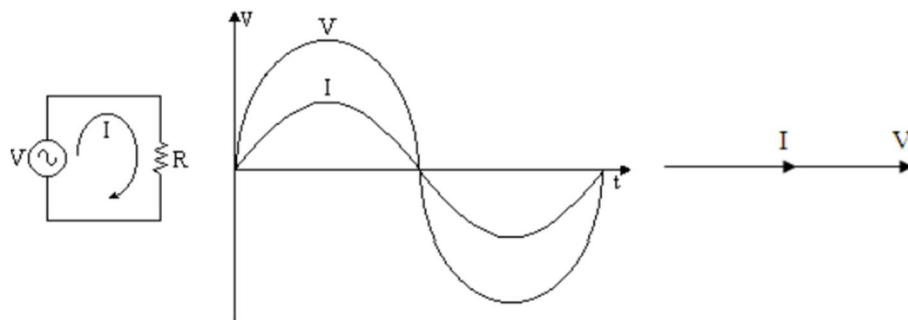


Figura 1.4.1: Circuito con carga resistiva, formas de onda del voltaje y corriente.

Fuente: [2]

1.4.1.2. Carga inductiva (L)

En las cargas inductivas o bobinas como los motores y transformadores la característica principal de estos elementos es la de almacenar y consumir la energía eléctrica convirtiéndola en energía magnética por medio del campo magnético que genera al circular corriente eléctrica por estos elementos, la corriente se encuentra retrasada respecto al voltaje, es decir, existe un desfase negativo (-90). En este caso se tiene un factor de potencia retrasado. [2]

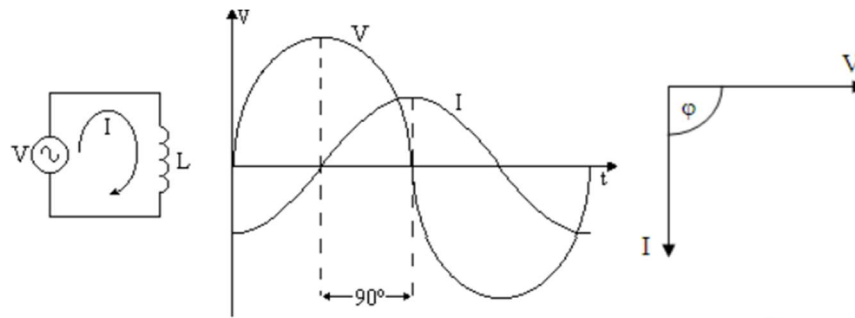


Figura 1.4.2: Circuito con carga inductiva, formas de onda del voltaje y corriente.
Fuente: [2]

En el gráfico se aprecia que la corriente está en atraso de -90 con respecto del voltaje

1.4.1.3. Carga capacitiva (C)

En las cargas capacitivas como los condensadores el mismo que es capaz de almacenar energía en forma de campo eléctrico, la corriente se encuentra adelantada respecto del voltaje por esta razón hay un desfase positivo como se observa en la Figura 1.4.3. En este caso se tiene un factor de potencia adelantado. [2]

En un circuito puramente capacitivo, no existe consumo de energía aún si hay corriente circulando. Las cargas capacitivas generan potencia reactiva expresada en voltios amperios reactivos (VAr). [1]

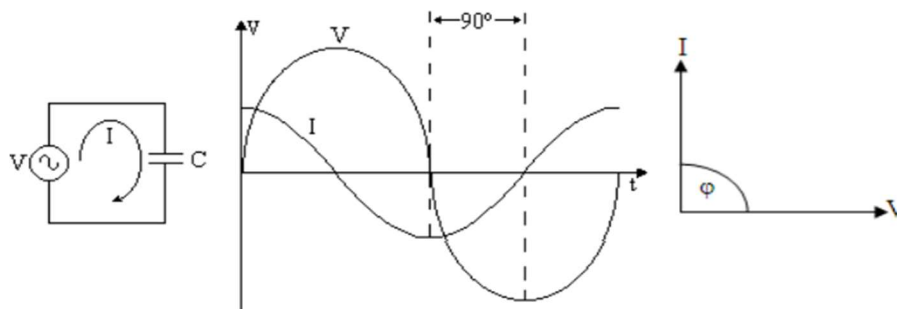


Figura 1.4.3: Circuito con carga capacitiva, formas de onda del voltaje y corriente.
Fuente: [2]

En el gráfico se aprecia que la corriente se encuentra adelantada 90 con respecto al voltaje.

1.4.1.4. Carga combinada

En la práctica una carga no está constituida solamente por cargas resistivas, inductivas o capacitivas, ya que estas tres cargas con frecuencia coexisten en los

circuitos eléctricos. Sin embargo, para el caso de una industria la carga más predominante es la carga inductiva, de ahí que sea el factor por el cual se realiza este trabajo. Las diversas cargas son usualmente abastecidas directamente de la red principal de suministro eléctrico, sin embargo el suministro de potencia reactiva puede ser suministrado por equipos conectados en un punto de la red eléctrica, normalmente se utiliza para ello los bancos de capacitores que son fuentes suministradoras de potencia reactiva. [2]

1.4.2. Tipos de potencias

La potencia es la capacidad de producir o demandar energía de una maquina eléctrica, equipo o instalación por unidad de tiempo. [3]

En todo circuito eléctrico, para el funcionamiento de los diferentes equipos y maquinas se encuentran presentes las siguientes potencias. [4]

- ✓ Potencia Activa
- ✓ Potencia reactiva
- ✓ Potencia Aparente

1.4.2.1. Potencia activa (P)

Es la potencia que representa la capacidad de un circuito para realizar un proceso de transformación de energía eléctrica en trabajo, la origina la componente de la corriente que está en fase con la tensión. Los diferentes dispositivos eléctricos existentes convierten la energía eléctrica en otras formas de energía tales como: mecánica, lumínica, térmica, química, etc. Esta potencia es, por lo tanto, la realmente consumida por los circuitos. Cuando se habla de demanda eléctrica, es esta potencia la que se utiliza para determinar dicha demanda. Sus unidades son kW o MW. Resultado que indica que la potencia activa es debido a los elementos resistivos. [1]

1.4.2.2. Potencia reactiva (Q)

Esta potencia no tiene tampoco el carácter realmente de ser consumida y sólo aparecerá cuando existan bobinas o condensadores en los circuitos que generan campos magnéticos y campos eléctricos. La origina la componente de la corriente que está a 90° con respecto a la tensión, en adelante o en atraso. La potencia reactiva tiene un valor medio nulo, por lo que no produce trabajo útil y se designa

con la letra (Q). Sus unidades son kVAr o MVar. Lo que reafirma en que esta potencia es debida únicamente a los elementos reactivos, los cuales pueden ser del tipo inductivo (QL) o capacitivo (QC). [1]

1.4.2.3. Potencia aparente (S)

La potencia aparente (también llamada compleja) de un circuito eléctrico de corriente alterna es la suma, por ser la potencia total es el vector resultante de sumar la potencia activa y la potencia reactiva. Esta potencia no es la realmente consumida o útil, salvo cuando el factor de potencia es la unidad ($\cos \varphi = 1$) ya que entonces la potencia activa es igual a la potencia aparente, esta potencia también es indicativa de que en la red de alimentación de un circuito no sólo ha de satisfacer la energía consumida por los elementos resistivos, sino que también ha de contarse con la que van a “almacenar” bobinas y condensadores. Se la designa con la letra (S). Sus unidades son kVA o MVA. [1]

1.4.2.4. Triángulo de potencia

El triángulo de potencias es la representación fasorial de la potencia activa (P), la potencia reactiva (Q) y la potencia aparente (S). Figura 1.4.4, es usada para ilustrar las diferentes formas de potencia eléctrica. [5]

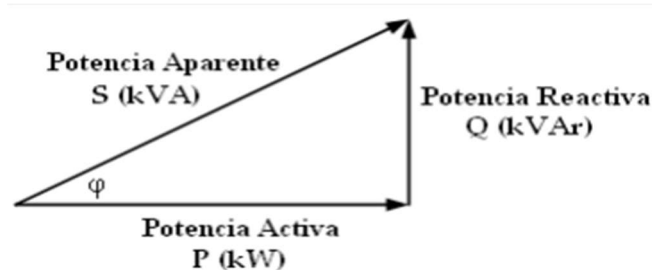


Figura 1.4.4: Triángulo de potencias eléctricas.
Fuente: [5]

Dónde:

P (kW), es la potencia activa

Q (kVAr), es la potencia reactiva, no produce trabajo, pero si hay que pagar por ella.

S (kVA), es la potencia aparente, potencia total requerida para alimentar la carga. De la Figura 1.4.4, se emplea la siguiente ecuación:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1.1)$$

Por lo que se puede conocer la potencia aparente a partir del teorema de Pitágoras aplicado en el triángulo de potencias. [5]

1.5. FACTOR DE POTENCIA

El factor de potencia se define como el coseno del ángulo entre la potencia activa (P) y la potencia aparente (S), según se muestra en el triángulo de potencias de la figura 1.4.

$$\text{Factor de potencia} = \cos \varphi = \frac{\text{Potencia activa (W)}}{\text{Potencia aparente (S)}} = \frac{W}{\sqrt{(W)^2 + (VAr)^2}} \quad (1.2)$$

A partir de la expresión del factor de potencia, se establece que parte de la potencia aparente es consumida para realizar trabajo (Potencia Activa), y que el resto se utiliza en la formación de campos magnéticos (Potencia Reactiva).

Por lo tanto, el factor de potencia es un término utilizado para describir la cantidad de energía eléctrica que se ha convertido en trabajo y sus límites de variación son entre 1 y 0.

Como la potencia activa (P) nunca puede exceder la potencia aparente (S), se deduce que el factor de potencia nunca puede ser mayor que la unidad (0 al 100%). El factor de potencia de un resistor es de 100% porque la potencia aparente que absorbe es igual a la potencia activa. Por otra parte, el factor de potencia de una bobina ideal sin resistencia es cero, porque no consume potencia activa.

1.6. MÉTODOS DE COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA

Con el propósito de realizar la compensación de la potencia reactiva en el sistema eléctrico se emplean dos métodos, los cuales se enumeran y se describen continuación:

- a) Utilización de Compensador Dinámico.
- b) Utilización de Banco de Capacitores fijos.

Los compensadores dinámicos de potencia reactiva con control, conforman un equipo capaz de medir la potencia reactiva consumida en la fase en que se encuentra instalado y provee la potencia reactiva necesaria de modo gradual, de cero al máximo capacitivo y/o de cero al máximo inductivo. Pueden ser utilizados

en sistemas monofásicos o trifásicos, en subestaciones, a lo largo de las líneas de distribución o en la entrada de un consumidor específico.

Los bancos de capacitores fijos son aquellas que se energizan y siempre están conectados al sistema aportando su potencia reactiva, es decir, se usan donde las condiciones de demanda de potencia reactiva son constantes y no varían en el tiempo.

1.7. APLICACIÓN DE LOS BANCOS DE CAPACITORES EN EL SISTEMA ELÉCTRICOS

Al instalar los bancos de capacitores en un sistema eléctrico se mejora el factor de potencia de la carga lográndose los siguientes beneficios:

- ✓ Liberar una cierta capacidad (en kVA) del sistema.
- ✓ Reducir las pérdidas por efectos joule, principalmente en las líneas.
- ✓ Elevar los niveles de tensión y, por lo tanto, mejorar la regulación.

1.8. AHORRO MONETARIO

El mejoramiento obtenido de la operación de un sistema de distribución, al compensar la potencia reactiva, se puede cuantificar para conocer el valor óptimo de la capacidad del banco que se desea instalar. Dado que al instalar los bancos de capacitores se reducen las pérdidas de energía por el efecto Joule y se libera una cierta capacidad, se puede asignar un valor al costo del kWh y del kW liberado, de manera que las unidades eléctricas se conviertan en unidades monetarias; así mismo, como el costo de los capacitores representa un desembolso, este debe considerarse como signo negativo respecto a los ahorros por los otros conceptos. Así entonces, la ecuación que determina los ahorros es: [6]

$$S = K_e R_{PE} + K_p R_{pp} - K_c kVAr \quad (1.3)$$

Donde:

S , es el ahorro en unidades monetarias.

R_{PE} , es la reducción de pérdidas de energía, por efecto Joule, en kWh año.

R_{pp} , es la reducción de pérdidas de potencia, en kW.

$kVAr$, es la magnitud de la potencia reactiva capacitiva instalada, en kVAr.

K_e , es la constante que convierte la reducción de pérdidas de energía por el efecto joule en unidades monetarias.

K_p , es la constante que convierte la reducción de pérdidas de potencia en kW en unidades monetarias. De hecho, es el costo de cada kW de capacidad instalada.

K_c , es la constante que convierte la capacidad de los bancos de capacitores en unidades monetarias. Es el costo de los capacitores.

Dado que la inversión para adquirir los capacitores se hace en un momento dado y los ahorros obtenidos se repiten durante todos los años de que se compone la vida útil de los capacitores, se debe utilizar una técnica de comparación de ingeniería económica que permita convertir la inversión inicial en una serie de pagos anuales, de manera que éstos se puedan comparar con los ahorros obtenidos cada año. La ecuación que permite realizar este cambio del valor del dinero en el tiempo está dada por: [6]

$$R = P \left[\frac{i (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \right] \quad (1.4)$$

Donde:

P , es la cantidad de dinero necesaria para hacer una inversión al inicio del periodo de estudio.

R , es el desembolso anual de una serie de pagos iguales en " n " años; en donde la serie de pagos es equivalente a P a una tasa de interés i .

n , es el número de periodos en que se divide el tiempo total de estudio (normalmente está dado en años).

i , es la tasa de interés.

Asimismo, al factor $\left[\frac{i (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right]$ se le conoce como "factor de recuperación del capital".

CAPITULO 2

CONCEPTOS GENERALES SOBRE EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

2.1. FUNDAMENTOS DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

2.1.1. Definición de un sistema de distribución

Un sistema de distribución de energía eléctrica es el conjunto de elementos encargados de conducir la energía desde una subestación de potencia hasta el usuario. Básicamente, la distribución de la energía eléctrica comprende las líneas primarias de distribución, los transformadores de distribución, las líneas secundarias de distribución, las acometidas y medidores. [6]

De la definición anterior se puede observar que un sistema de distribución forma parte de un sistema eléctrico, ya que éste comprende la generación, la transmisión y la distribución. Debido a la complejidad que han alcanzado los sistemas eléctricos de potencia y de distribución, prácticamente en todo el mundo existe una separación en el estudio de ambos. Es decir que por una parte se trata la generación y la transmisión y por otra la distribución. Inclusive en las empresas eléctricas de todo el mundo cada parte es atendida por gerencias diferentes y grupos de ingenieros especializados en cada una de estas ramas de la ingeniería eléctrica. Los dos campos se han especializado de una manera muy profunda, dando como resultado que sea muy difícil tener una persona que domine estas dos áreas del conocimiento a la vez. [6]

Como resultado de esta brecha que se ha abierto entre los sistemas de potencias y los sistemas de distribución, no solamente existe una diferencia entre estos dos campos de la ingeniería eléctrica en las empresas eléctricas; sino también, en las escuelas del nivel superior en donde en los planes de estudios se contemplan como materias diferentes. Por esta razón en la literatura técnica también se aborda la temática de redes de distribución de manera separa de los sistemas eléctricos de potencia. [6]

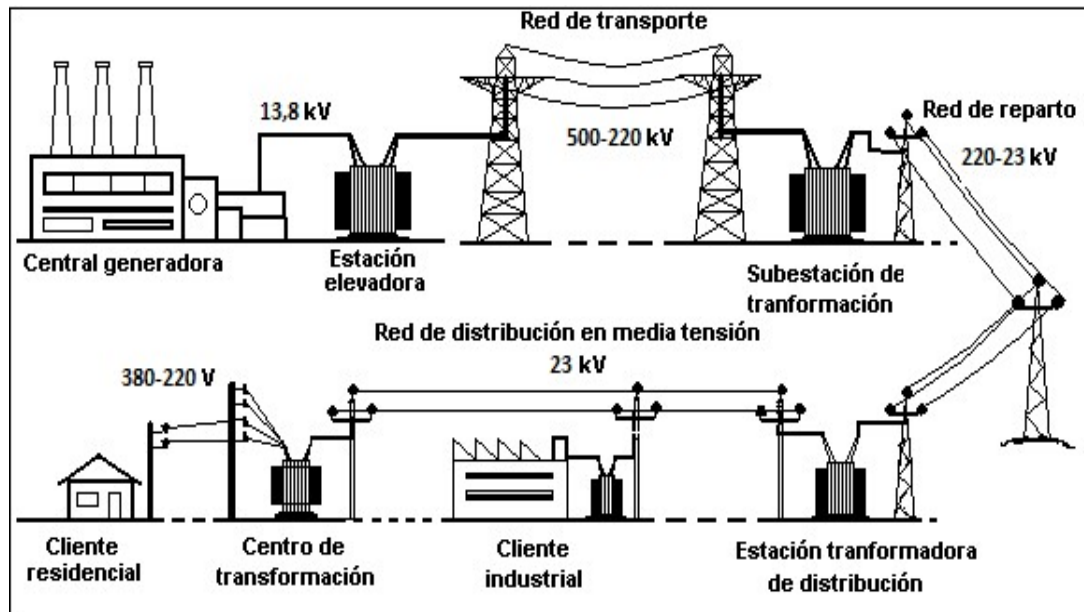


Figura 2.1.1: Sistema Eléctrico de Potencia
Fuente: [7]

2.1.2. Objetivo de la distribución de energía eléctrica

La distribución de energía eléctrica debe realizarse de tal manera que el cliente reciba un servicio continuo, sin interrupciones, con un valor de tensión adecuado que le permita operar sus aparatos eficientemente y que la forma de onda senoidal sea pura, es decir que esté libre de armónicas. La distribución de energía eléctrica debe llevarse a cabo con redes bien diseñadas que soporte el crecimiento propio de la carga, y que además sus componentes sean de la mejor calidad para que resistan el efecto del campo eléctrico y los efectos de la intemperie a que se verán sometidas durante su vida útil. Las redes eléctricas deben ser proyectadas y construidas de manera que tengan la flexibilidad suficiente para ampliarse progresivamente con cambios mínimos en las construcciones existentes, y así asegurar un servicio adecuado y continuo para la carga presente y futura al mínimo costo de operación. [6]

2.2. CLASIFICACIÓN Y ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

2.2.1. Clasificación de los sistemas de distribución

Por la forma en que se construyen los sistemas de distribución se pueden clasificar en: [6]

- ✓ Sistemas aéreos.
- ✓ Sistemas subterráneos.
- ✓ Sistemas mixtos.

Los sistemas aéreos tienen soportados en postes de concreto y acero, los conductores de la red primaria y secundaria, así como los transformadores.

Los sistemas subterráneos son aquellos en que las instalaciones se ocultan bajo tierra, en algunas ocasiones las subestaciones MT-BT (de media a baja tensión) se instalan al nivel del suelo en locales o gabinetes.

En los sistemas mixtos la red primaria está soportada en postes y la red secundaria se oculta bajo el suelo. [6]

2.2.2. Principales elementos constitutivos

Los principales elementos constitutivos de un sistema de distribución son:

1. Líneas primarias.
2. Transformadores de distribución.
3. Líneas secundarias.
4. Acometidas.
5. Equipos de medición.

En la Figura 2.2.1, se puede apreciar una red de distribución en la cual se detallan sus componentes principales. [6]

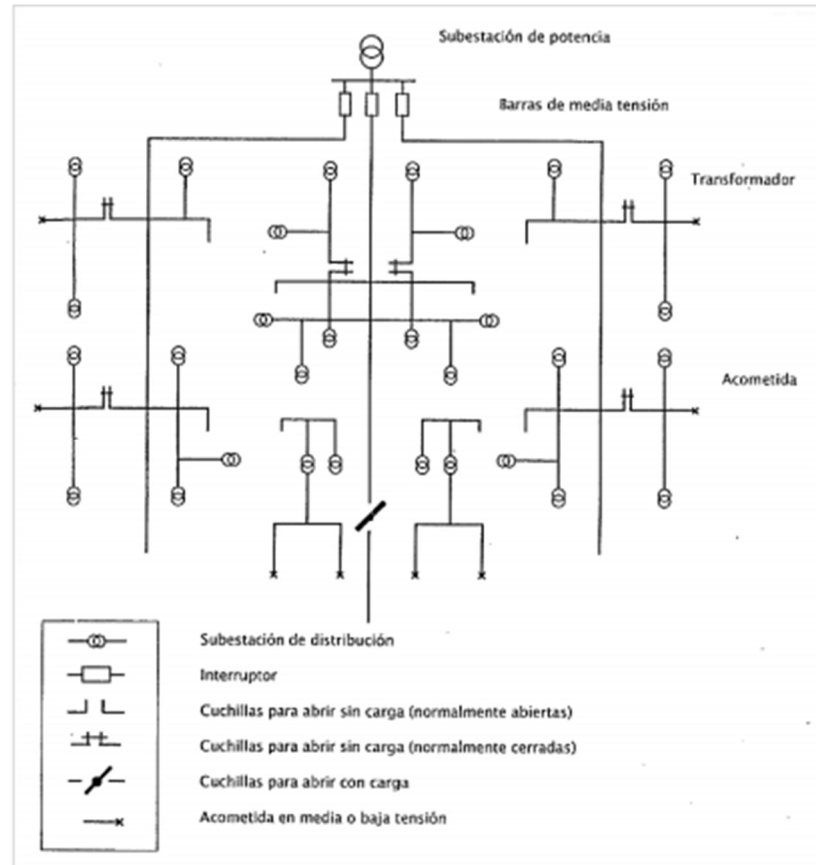


Figura 2.2.1: Red de distribución
Fuente: [6]

2.2.3. Líneas primarias de distribución

Las líneas primarias de distribución son los cables encargados de conducir la energía desde las subestaciones de potencia hasta los transformadores de distribución. La estructura de una línea primaria de distribución se forma con: troncales y ramales. Los troncales de la red primaria son los cables de mayor capacidad de energía. Los ramales son los cables que se derivan de los troncales y a ellos se conectan, normalmente, los transformadores de distribución y servicios privados suministrados en media tensión. [6]

Los alimentadores primarios normalmente se estructuran en forma radial; en un sistema de este tipo la forma geométrica del alimentador semeja la de un árbol en el que el grueso de la energía se transmite a lo largo del troncal derivándose la energía a la carga a lo largo de los ramales. [6]

Las redes primarias se pueden clasificar, por el número de fases e hilos, de la siguiente manera:

- ✓ Trifásicas tres hilos.
- ✓ Trifásicas cuatro hilos.
- ✓ Monofásicas dos hilos
- ✓ Monofásicas 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 trabaja como neutro. Estas redes se utilizan en zonas urbanas.

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 fases; sin embargo, debido a que estos sistemas tienen un coeficiente de aterrizamiento menor que la unidad, los equipos que se conecten a estas líneas requieren de un menor nivel de aislamiento con menor costo de inversión. Estas redes se utilizan en zonas urbanas primordialmente. [6]

Las redes primarias monofásicas de dos hilos se originan de redes trifásicas, de hecho, son derivaciones de líneas trifásicas 3 o 4 hilos que sirven para alimentar transformadores monofásicos, estos transformadores pueden recibir la tensión plena de fase (en el caso de las líneas trifásicas 3 hilos) o la tensión de fase neutro (en el caso de las líneas trifásicas 4 hilos). Este sistema es usado principalmente en zonas rurales o en zonas de baja densidad de carga. [6]

Las redes primarias monofásicas de un hilo son derivaciones de redes trifásicas que permiten alimentar transformadores monofásicos. Este tipo de redes se utilizan principalmente en zonas rurales. [6]

2.2.4. Transformadores de distribución

Los transformadores de distribución son los equipos encargados de cambiar la tensión primaria a un valor menor de tal manera que el usuario puede utilizarla sin necesidad de equipos e instalaciones costosas y peligrosas. [6]

Según el mercado, existen muchos proveedores de transformadores de distintas capacidades y marcas, ya sean nacionales o extranjeros, principalmente

por la alta demanda en los últimos años. Su capacidad puede variar de 30 a 1000 kVA, según el mercado y las características requeridas.

2.2.5. Redes secundarias de distribución

Las redes secundarias de distribución conducen la energía desde los transformadores de distribución hasta las acometidas de los usuarios. [6]

Los sistemas secundarios de distribución se clasifican, según por el número de hilos:

- ✓ Monofásico dos hilos.
- ✓ Monofásico tres hilos.
- ✓ Trifásico tres hilos.
- ✓ Trifásico cuatro hilos.

2.2.6. Acometidas

Las acometidas junto con el equipo de medición son los elementos que ligan al sistema eléctrico de la empresa suministradora con las instalaciones del usuario. Dependiendo de las características de carga del usuario, la medición se puede hacer igualmente en media tensión o en baja tensión dependiendo del tipo de acometida. [6]

2.3. CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA

2.3.1. Introducción

El propósito principal de un sistema de distribución es llevar la energía del sistema de potencia o fuente, al usuario. El diseñador de un sistema eléctrico de distribución, tiene bastante libertad para seleccionar los componentes del sistema; sin embargo, el factor más importante, que es la carga, es un parámetro independiente del diseñador y casi siempre es muy poco el control sobre ella puede tener. [6]

El conocimiento de los factores de la carga sirve para predecir el valor de la demanda máxima, parámetros de diseño, con el que se realizan los cálculos de regulación y de capacidad de conducción de los elementos de la red. El conocimiento de las características de la carga, pretende determinar su efecto en el diseño de la red de distribución. El conocimiento de estos parámetros,

normalmente se obtiene de una medición directa de la demanda de redes en operación, cuyas características son similares a las de la futura red. El conocimiento de los parámetros de la carga es de primordial importancia para lograr un diseño en el que se haga una utilización racional de los recursos materiales, así como de que se asegure una operación satisfactoria de la misma. [6]

Generalmente el problema involucra a diferentes usuarios, en los que la utilización de la energía no se realiza en forma similar, debido a hábitos diferentes y a equipos eléctricos también diferentes. El conocimiento de las características de la carga, pretende determinar su efecto en el diseño de la red de distribución. Esta red eléctrica puede ser la de un fraccionamiento habitacional, la de un edificio, la de una fábrica, etc. [6]

La clasificación de las cargas puede ser de distintas formas; sin embargo, es práctica común clasificarlas de acuerdo con el perfil de la demanda en el tiempo. En los sistemas eléctricos se tienen bien definidos para cada tipo de carga (doméstica, comercial e industrial), en la Figura 2.3.1, se presentan los siguientes casos. [6]

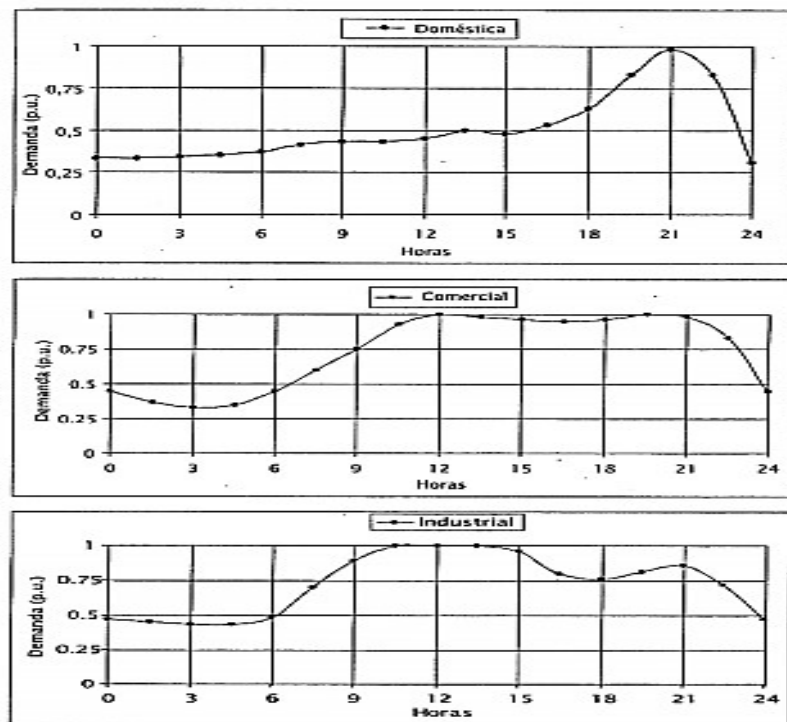


Figura 2.3.1: Curvas características de carga
Fuente: [6]

2.3.2. Carga Eléctrica y Demanda

Hasta este momento se ha hablado de la energía sin que medie una definición de este concepto, por lo que ahora es conveniente hacer un alto en el desarrollo de este capítulo y preguntar: ¿Qué es la carga eléctrica? Carga eléctrica es el aparato o conjunto de aparatos conectados a un sistema eléctrico que demandan una potencia eléctrica. El valor de la potencia demandada es el “valor de la carga”, y normalmente se conoce como la demanda. [6]

Es bien sabido que la potencia es el producto de la tensión por la corriente, así pues, en sistema trifásico la potencia activa está dado por:

$$P = 3vi \cos \phi \quad (2.1)$$

Para efectos prácticos de análisis, la tensión se puede considerar como una constante, razón por la cual algunas curvas de ciclos de carga se acostumbra representarlas en función de la corriente. [6]

A la potencia también se le define como la relación de la energía y el tiempo, es decir, la potencia es la variación en el tiempo con que se transmite la energía. Así, por ejemplo, en la figura 2.4, se muestra un patrón de potencia demandada por un usuario, en donde se aprecia como en los períodos iguales de tiempo t_1 y t_2 , la relación de la energía E_1 y E_2 en estos tiempos es diferente, siendo entonces diferentes los valores de las potencias respectivas P_1 y P_2 . [6]

El hecho de que se haya definido al “valor de la carga” en función de la potencia, se presta a preguntarse: ¿Qué clase de potencia es de la que se habla? Normalmente es de la potencia activa, ya que ésta es independiente del factor de potencia, no como la aparente; sin embargo, en ocasiones la carga está expresada en función de la potencia reactiva, como es el caso de un banco de capacitores, en el que su capacidad está dada en kVAr ya que su potencia activa es mucho menor que su potencia reactiva. [6]

Como se dijo anteriormente el “valor de la carga” es la potencia demandada, o simplemente la demanda; sin embargo, en esta etapa del estudio cabe preguntar: dado que el ciclo de la carga es variable ¿Cuál es el valor que caracteriza a la

carga? La contestación es que, para fines de diseño, normalmente, se hace referencia a la demanda máxima. [6]

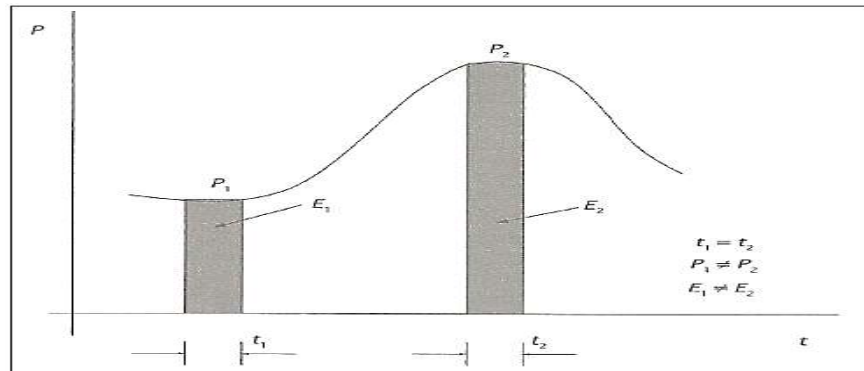


Figura 2.3.2: Relación de potencia y tiempo
Fuente: [6]

2.3.3. Demanda máxima, Carga Conectada y Capacidad Instalada

La demanda máxima de un sistema o de una instalación es la mayor de todas las potencias demandadas que han ocurrido durante un periodo especificado de tiempo.

A la potencia máxima demandada, por simplicidad, se le conoce como demanda máxima. Dado que la potencia máxima demandada de una carga, presenta el caso más crítico, como se asentó anteriormente, este valor es con el que normalmente se llevan a cabo los cálculos de regulación y los de capacidad de conducción. [6]

En un sistema eléctrico, se pueden tener variaciones súbitas de la demanda, razón por la cual se acostumbra establecer un período mínimo de tiempo en el que se debe mantener este valor de potencia, para que se considere éste como el máximo. [6]

Así por ejemplo en la Figura 2.3.2, se muestra un valor de potencia máxima P_1 , el cual no se mantiene durante un período mínimo de tiempo t , razón por la cual no se puede decir que éste sea el valor de la demanda máxima. En forma diferente el valor P_2 , se puede considerar como el de la demanda máxima, si suponemos que el tiempo t_2 que dura, es mayor que el tiempo t mínimo especificado. [6]

En la Figura 2.3.3, se puede explicar el alto valor de la potencia P_1 , en un tiempo excesivamente corto, como cuando se presenta el arranque de un motor conectado a un sistema eléctrico. En este caso, a pesar de ser mayor la demanda P_1 que la demanda P_2 , se anula la demanda P_1 ya que ésta se presenta en un tiempo muy corto, razón por la cual se considera a P_2 como la demanda máxima. Este criterio se basa en que, en tiempos muy cortos, como cuando arranca un motor, la inercia térmica de los aparatos no afecta a los aislamientos de los equipos, y por consiguiente sería muy costoso diseñar un sistema bajo la consideración de una demanda alta que se presenta en un tiempo excesivamente corto, de digamos algunos segundos, como es el caso del arranque de un motor, o la puesta en servicio de un transformador. Los aparatos encargados de medir la demanda máxima, normalmente están calibrados para considerar como demanda máxima aquella que se mantiene durante un periodo de 15 minutos. [6]

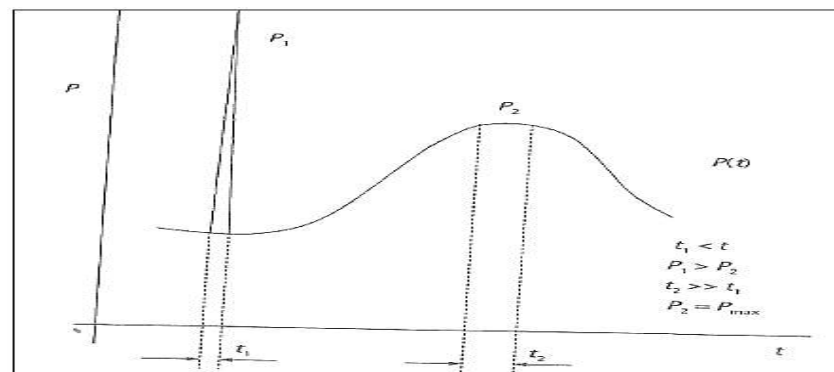


Figura 2.3.3: Representación gráfica de la entrada de una carga súbita a una red eléctrica
Fuente: [6]

Se entiende por “Carga Conectada” a la suma de las potencias nominales de los equipos que utilizan la energía. Dado que la demanda máxima y la carga conectada están dadas en las mismas unidades, el factor de demanda no tiene unidades. El factor de demanda normalmente es menor que uno. [6]

La “Capacidad Instalada” es la suma de las potencias nominales de los equipos que suministran la energía (generadores y transformadores).

Justo es reconocer que los términos: carga y carga conectada, pueden confundirse; sin embargo, cabe puntualizar que cuando se habla de la carga normalmente se está haciendo alusión al valor de demanda máxima de la curva

del ciclo de carga; y cuando se habla de la carga conectada, se hace referencia a la suma de las potencias nominales de los equipos o aparatos de la instalación, de que se trate, que en un momento dado pueden hacer uso de la energía. [6]

2.3.4. Demanda promedio

La demanda promedio se define como la relación entre el consumo de energía del usuario durante un intervalo dado y el intervalo mismo. Se calcula mediante la ecuación:

$$D_{prom} = \frac{\text{Energía consumida en el Tiempo, } T}{\text{Tiempo, } T} \quad (2.2)$$

En la siguiente Figura 2.3.4, se muestra la potencia máxima ($P_{\text{máx}}$) y promedio (P_{prom}) demandada por una carga cualquiera.

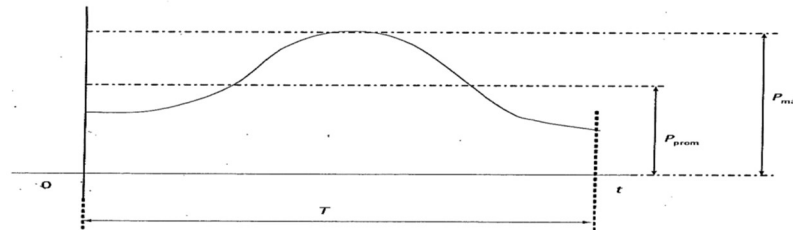


Figura 2.3.4: Potencia demandada por una carga.
Fuente: [6]

2.3.5. Factor de Demanda y Factor de Utilización

El “factor de demanda” se define como: la relación existente entre la demanda máxima y la carga conectada, y como se dijo anteriormente no tiene unidades. [6]

$$\text{Factor de Demanda} = \frac{\text{Demanda máxima}}{\text{Carga conectada}} \quad (2.3)$$

El “factor de utilización” es la relación que existe entre la demanda máxima de un sistema y su capacidad instalada. Mientras que el factor de demanda indica el grado con el que se utiliza la carga conectada, el factor de utilización indica el grado con el que se utilizan los equipos que suministran energía. En la Figura 2.3.5, se aprecia un sistema que alimenta una carga, dado que el valor de la carga conectada y el de la capacidad instalada del sistema pueden ser diferentes, entonces es factible que el factor de demanda y el factor de utilización sean diferentes. [6]

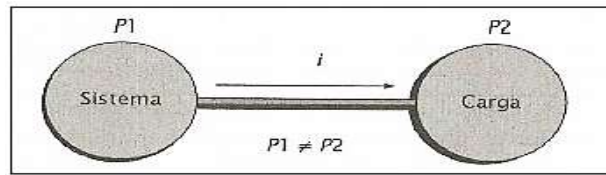


Figura 2.3.5: Utilización de un sistema y su carga
Fuente: [6]

En la Figura 2.3.6, se muestran gráficamente los valores de demanda máxima 40 kW de una instalación cuyo ciclo es variable, la carga conectada es de 60 kW y la capacidad instalada es de 75 kW.

Así en el ejemplo de la Figura 2.3.6, el factor de demanda es 40/60, que es igual a 0.66; y el factor de utilización es 40/75, que es igual a 0.53. [6]

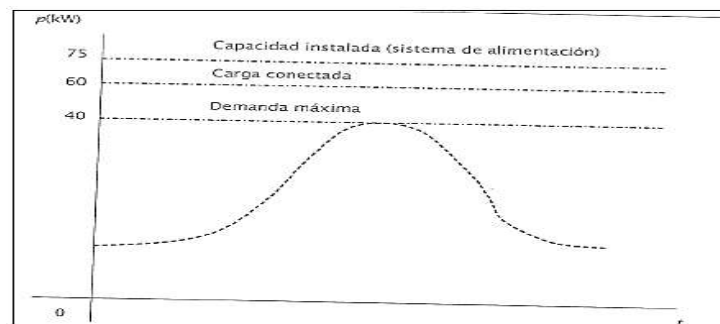


Figura 2.3.6: Representación gráfica de la demanda máxima de una carga variable, del valor de la carga conectada y de la capacidad instalada.
Fuente: [6]

2.3.6. Factor de Carga y Factor de Pérdidas

Dada una función $p(t)$, de la Figura 2.3.7, que representa la potencia instalada demandada por una carga cualquiera, el factor de carga está definido en un intervalo T , como se aprecia en la ecuación: [6]

$$F.C. = \frac{1}{P_{\text{máx}}} \int_0^T \frac{p(t) dt}{T} \quad (2.4)$$

En donde la expresión dentro de la integral, indica el valor promedio de la función $p(t)$ y la expresión fuera de la integral es el recíproco del valor máximo de la potencia ($P_{\text{máx}}$). [6]

$$\text{Factor de Carga} = \frac{\text{Potencia promedio}}{\text{Potencia máxima}} = \frac{P_{\text{prom}}}{P_{\text{máx}}} \quad (2.5)$$

De acuerdo con lo anterior, el “factor de carga” se puede definir como la relación existente de la demanda promedio y la demanda máxima. Este factor se puede medir convenientemente con un medidor de energía que tenga un marcador de demanda máxima; el factor de carga se calcula entonces dividiendo la potencia promedio entre la potencia máxima. El factor de carga es mayor que cero y menor o igual a uno. Una carga constante tiene un factor de carga igual a uno; esto está bien representado por una carga de alumbrado público que, normalmente, entra y sale toda a la vez. [6]

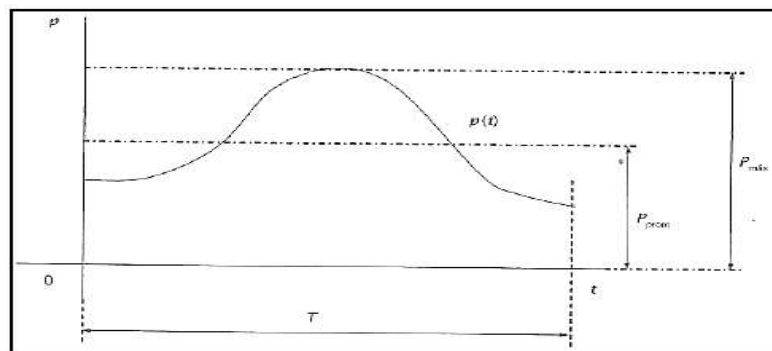


Figura 2.3.7: Potencia promedio y potencia máxima
Fuente: [6]

Básicamente el factor de carga indica el grado con que se mantiene el valor de la potencia máxima. De acuerdo con esto, al analizar las dos curvas de la figura 2.10 que representan dos ciclos de carga diferentes, se observa que en la primera el factor de carga es casi igual a uno al ser las demandas A y B casi iguales. En cambio, en la segunda figura el factor de carga se aproxima a 0.5.

En este caso, considerando que la duración de (D) es lo suficientemente grande para que la capacidad del sistema se seleccione en base de ella, se puede afirmar que la capacidad del sistema se está utilizando en una forma muy pobre. En la práctica el factor de carga está comprendido en un rango de 0.25 a 0.85. [6]

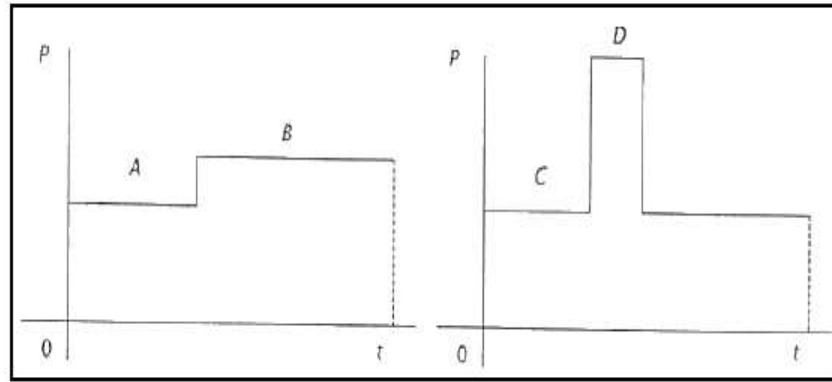


Figura 2.3.8: Ciclos de carga
Fuente: [6]

Dada una función $p(t)$, de la Figura 2.3.8, que representa las pérdidas instantáneas Ri^2 de potencia, en una resistencia cualquiera, el factor de pérdidas se define en un intervalo T , como se aprecia en la ecuación:

$$F_{\text{pér}} = \frac{1}{RI^2_{\text{máx}}} \int_0^T \frac{Ri^2(t) dt}{T} \quad (2.6)$$

En donde la expresión dentro de la integral, indica el valor promedio de las pérdidas Ri^2 y la expresión fuera de la integral es el recíproco de las pérdidas durante de la demanda máxima. [6]

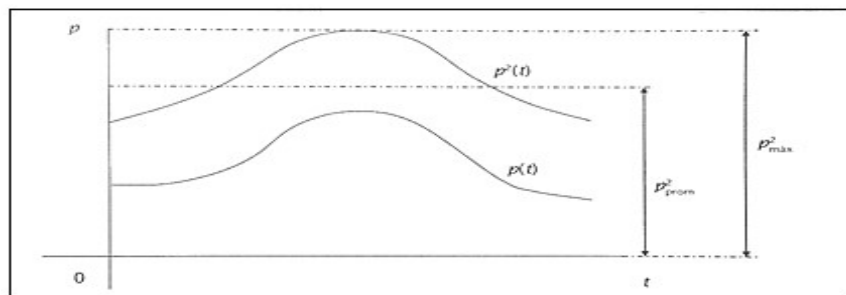


Figura 2.3.9: Ciclo de pérdidas de potencia $Ri^2(t)$ en una resistencia.
Fuente: [6]

$$\text{Factor de pérdidas (anual)} = F_{\text{pér}} = X * f_C + (1 - X) * f_C^2 \quad (2.7)$$

Donde:

$F_{\text{pér}}$, factor de pérdidas anual.

f_C , factor de Carga anual.

X , es un variable que depende de la curva de la carga, y que habitualmente toma valores: $0 \leq X \leq 0,3$ con un valor recomendado de $X = 0,15$.

2.3.7. Energía de Pérdidas y Costo de Pérdidas

$$\text{Energía de Pérdidas (anual)} = \text{Pot}_{\text{pér}} * f_{\text{pér}} * T = \text{kWh/año} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \text{Costo de Pérdidas (anual)} &= \text{Energía de Pérdidas (anual)} * \text{Costo medio de Generación} \\ &= \text{kWh/año} * \frac{\$}{\text{kWh}} = \$ / \text{año} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Donde:

$\text{Pot}_{\text{pér}}$, es la potencia de pérdidas del alimentador, kW

T, es el valor del tiempo anual, 8760 h

Costo medio de Generación, es el costo marginal de largo plazo a nivel de 23 kV (entregada en línea), \$/kWh (anual).

CAPITULO 3

CONCEPTOS GENERALES SOBRE CAPACITORES

3.1. CAPACITORES

3.1.1. Historia

En 1745, Pieter van Musschenbroek, profesor de física y matemáticas en la Universidad de Leiden, Países Bajos, descubrió la carga electrostática. Experimentó con un frasco de vidrio, que ahora se conoce como la botella de Leyden (figura 3.1.1). Otras investigaciones afirman que al mismo tiempo Ewald Georg Kleist, un inventor alemán, descubrió el primer condensador. La primera botella de Leyden era un frasco de vidrio, parcialmente con agua y cerrada con un tapón de corcho, con un conductor insertado por la boca de la botella y sumergido en el agua. Cuando el conductor se ponía en contacto con un generador de electricidad estática, el frasco almacenaba carga estática. Si cualquier conductor entrara en contacto con o en estrecha proximidad del conductor, la carga almacenada en la botella de Leyden se descargaba. [8]



Figura 3.1.1: Botella de Leyden
Fuente: [8]

3.1.2. Capacidad o Capacitancia

La capacidad o capacitancia puede definirse en términos generales como la propiedad de un circuito eléctrico, que le permite almacenar energía eléctrica por medio de un campo electrostático y liberar esta energía posteriormente. A los dispositivos que introducen capacitancia a un circuito o sistema eléctrico se le llaman capacitores. [9]

Antiguamente los capacitores se conocían como condensadores, hasta hoy en día, pero el término capacitor es el más correcto y está formado por dos conductores o placas paralelas de sección (S), separadas a una distancia (d) por un material aislante denominado dieléctrico de permitividad (ϵ), como se muestra en la Figura 3.1.2. [9]

Al aplicar una diferencia de potencial entre las placas $u(t)$ se produce un campo eléctrico (E) en el interior del capacitor, que provoca una separación de las cargas $q(t)$ que aparecen en las placas y que son iguales y de sentidos opuestos. [9]

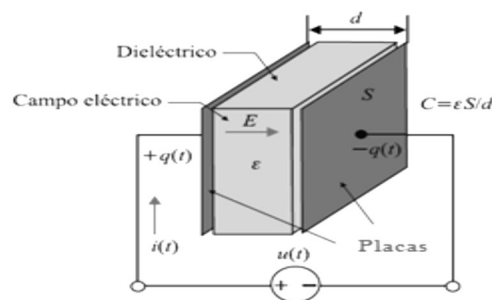


Figura 3.1.2: Aspecto constructivo del Capacitor
Fuente: [9]

La capacitancia de un capacitor se define como la cantidad de carga eléctrica almacenada en dos conductores, cuando existe una diferencia de potencial aplicada entre los mismos, y se expresa de la siguiente manera:

$$C = \frac{q(t)}{u(t)} = \frac{\text{Coulomb}}{\text{Voltio}} = \text{Faradio} \quad (3.1)$$

Dónde:

C = Capacidad.

$q(t)$ = Carga eléctrica en función del tiempo.

$u(t)$ = Diferencia de Potencial.

Su unidad de medida es el faradio (F), en honor al físico Michael Faraday por sus contribuciones a la ingeniería eléctrica. Un Faradio es en realidad demasiado grande para las aplicaciones prácticas, por lo que se utilizan unidades mucho más pequeñas como el microfaradio y picofaradio. [9]

$$1 \text{ Microfaradio } (1 \mu\text{F}) = 10^{-6} \text{ F} \quad (3.2)$$

$$1 \text{ Picofaradio } (1 \text{ pF}) = 10^{-12} \text{ F} \quad (3.3)$$

3.2. CAPACITOR DE POTENCIA

Desde hace 30 años los capacitores de potencia vienen experimentando mejoras a través del diseño de materias primas y equipamientos que permiten nuevas técnicas de fabricación y mayor eficiencia, posibilitando un aumento de potencia de unidades de 10 kVAr para 100, 200, 300 y hasta 400 kVAr, hoy disponibles. [10]

Uno de los más significativos avances en el desarrollo de materiales ocurrió con el fluido utilizado para la impregnación de los capacitores. Debido a la influencia de las entidades de protección ecológicas, hoy en día está prohibida la utilización de impregnante tipo PCB (Askarels). Los nuevos fluidos disponibles no contaminan el ambiente y no traen peligro para la salud. En muchos casos estos materiales tienen propiedades eléctricas y químicas superiores al PCB. [10]

Un capacitor es un dispositivo pasivo utilizado en electricidad y electrónica, capaz de almacenar energía sustentando un campo eléctrico. Está formado por un par de superficies conductoras, generalmente en forma de láminas o placas, en situación de influencia total (esto es, que todas las líneas de campo eléctrico que parten de una van a parar a la otra) separadas por un material dieléctrico o por el vacío. Las placas, sometidas a una diferencia de potencial, adquieren una determinada carga eléctrica, positiva en una de ellas y negativa en la otra, siendo nula la variación de carga total. [10]

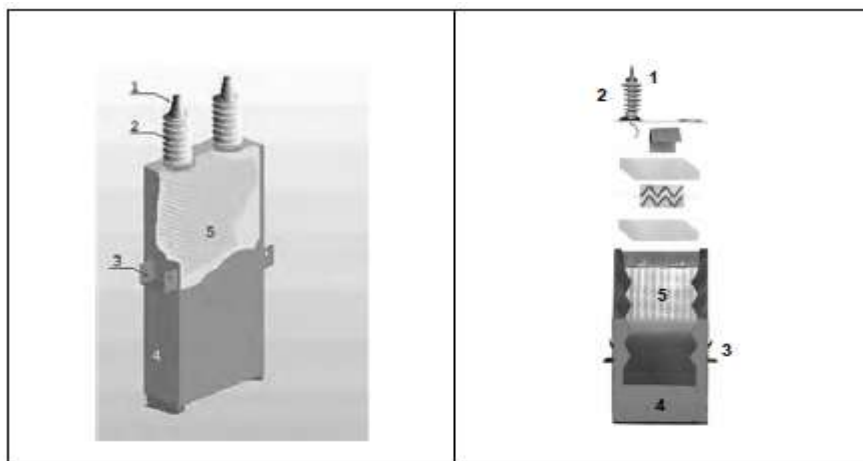


Figura 3.2.1: Vista de Corte de un capacitor de dos terminales, donde indica: 1. Terminal de conexión; 2. Terminal de porcelana; 3. Elemento de fijación; 4. Cubierta de acero inoxidable; 5. Parte activa.

Fuente: [8]

La parte activa principal usada en la construcción de los capacitores consiste en un papel o película de polipropileno o papel y película de aluminio y líquido de impregnación, este último hace preferencia los biodegradables. En la siguiente Figura 3.2.2, se muestra los principales elementos de un capacitor individual. [11]

En la actualidad, la parte activa se encuentra alojada en una cuba metálica sellada y fabricada de chapas de acero inoxidable austenítico tipo AISI 316 u otro material de calidad superior. Cada capacitor tiene dos aisladores pasantes idénticos, con un adecuado nivel de aislación y en coordinación con el nivel de aislamiento de los componentes internos y contruidos de porcelana vitrificada, resina cicloalifática o goma silicona. Los electrodos se construyen de armadura de láminas de aluminio que están impregnados con un dieléctrico líquido (sin PCB), biodegradable. (EE.TT N° 02.65.15 – Rev. 3 – ANDE). [11]

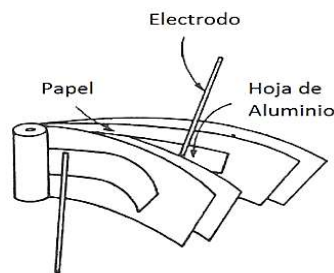


Figura 3.2.2: Elementos de un capacitor individual
Fuente: [11]

3.3. BANCO DE CAPACITORES

Los bancos de capacitores están constituidos por una asociación serie/paralelo de unidades capacitivas. Normalmente se realiza un estudio técnico-económico teniendo en cuenta la conexión de los bancos al sistema eléctrico.

3.4. CONEXIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

En esta sección se comentan algunos hechos relevantes de conexiones de bancos de capacitores, y que pueden ayudar a seleccionar la más adecuada, según sea el caso que se trate: [7]

Para formar un banco de capacitores, las unidades en serie proporcionan el nivel de tensión y las unidades en paralelos la potencia. [7]

La conexión en estrella con neutro flotante es la que ofrece más ventajas, debido a que con ésta la tensión aplicada a las unidades es la tensión al neutro y

además requiere de protecciones de menor capacidad interruptiva; esto sobre todo para instalaciones de bancos de capacitores en sistemas de distribución, en donde los bancos son de gran tamaño y cuyas unidades individuales son de menor tensión nominal que la del sistema. En sistemas industriales, en donde los bancos por lo general son pequeños y formados por unidades individuales cuya tensión nominal es el mismo que el del sistema, se tienen que emplear la conexión que dé la tensión de operación que más se acerque a la del diseño de las unidades. [7]

Cuando los bancos de capacitores no son de gran potencia, la protección en grupo es la más indicada y el aterrizamiento del banco presenta ciertas ventajas, por lo que a continuación se expone. Cuando se aplica un fusible para proteger unidades en grupo, la corriente nominal de él es grande con respecto a la de cada unidad individual; entonces, si una de estas unidades fallara, la corriente resultante no sería suficiente para fundir el fusible, a menos que el banco esté con el neutro conectado a tierra. Existe el requisito, ya mencionado que el fusible debe aislar la falla en 300 segundos o menos. Esto se satisface fácilmente cuando el banco está conectado a tierra o en delta, ya que cuando una unidad falla, se tiene una falla de línea a tierra o entre fases, respectivamente. [7]

De los dos puntos anteriores se puede concluir que en aplicaciones industriales se puede tener toda la gama de conexiones posibles, dependiendo de cada caso en particular. [7]

Cuando en un banco con neutro aterrizado con una sección serie por fase, abre un fusible individual o en grupo, la tensión a través de las unidades restante permanece constante. Por el contrario, en un banco neutro aislado la pérdida de una unidad incrementa la tensión de operación en las unidades sanas. Lo anterior es crítico para bancos pequeños, donde una unidad individual puede representar un alto porcentaje de la potencia total por fase. [7]

Cuando en un sistema se tienen bancos de capacitores conectados a tierra, se incrementa la probabilidad de que los apartarrayos se dañen; ya que un banco se puede descargar a través de un apartarrayos operado por un transitorio y esta corriente de descarga puede ser mayor que la que soporta tal equipo. [7]

3.4.1. Triángulo

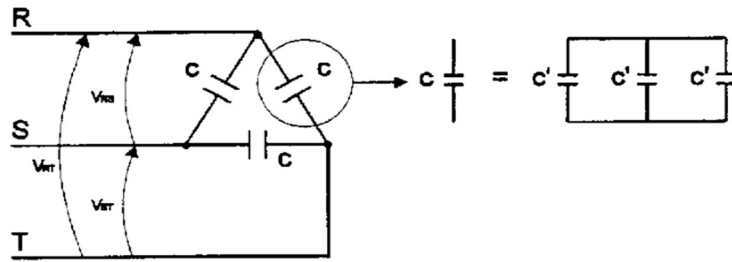


Figura 3.4.1: Conexión de un banco de capacitores en triángulo.
Fuente: [12]

Características:

- Utilizados en bancos con tensión y potencia reducida.
- Sistemas de conexión complejos.
- No hay circulación de armónicos de 3er orden.
- Los sistemas de protección son relativamente caros.
- Aptos para sistemas con neutro aislado o puesto a tierra.

Caso típico: bancos para instalación en industrias (hasta 300 kVAr – 2400 kV)

3.4.2. Estrella con neutro puesto a tierra

El más utilizado es “Estrella con neutro puesto a tierra”, esquematizado en la figura siguiente. [10]

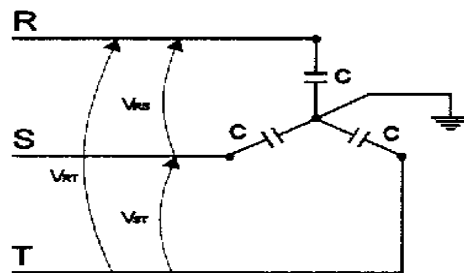


Figura 3.4.2: Conexión de un banco de capacitores en estrella con neutro puesto a tierra.
Fuente: [12]

Características:

- Utilizados en un amplio rango de tensión y potencia de bancos.
- Sistemas de conexión simplificados.
- Reducen el nivel de armónicas en la línea.

- Los sistemas de protección son relativamente baratos.
- Aptos solo para sistemas con neutro puesto a tierra.

Caso típico: bancos para instalación en poste (hasta 1200 kVAr – 13,8 kV)

3.4.3. Estrella con neutro aislado

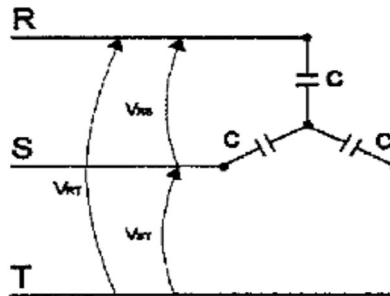


Figura 3.4.3: Conexión de un banco de capacitores en estrella con neutro aislado.
Fuente: [12]

Características:

- Utilizados en un amplio rango de tensión y potencia de bancos.
- Sistemas de conexión simplificados.
- No hay circulación de armónicos de 3er orden.
- Los sistemas de protección son los más baratos.
- Aptos para sistemas con neutro aislado o puesto a tierra.

Caso típico: bancos para subestaciones (hasta 60 MVar – 69 kV).

Los capacitores de potencia aplicados en derivación, en los sistemas de distribución generalmente se encuentran en las líneas de distribución o en las subestaciones. Analizaremos los capacitores ubicados en las líneas de distribución, que pueden estar montados en postes. Los bancos de capacitores de distribución a menudo incluyen de tres a nueve unidades de capacitores conectados en configuraciones de estrella puesto a tierra, estrella sin conexión a tierra, o delta. Como están más cerca de la carga, los capacitores ubicados en las líneas de distribución representan un medio más efectivo para suministrar los requisitos de potencia reactiva mientras se minimizan las pérdidas del sistema.

En sistemas sin conexión a tierra, con conexión a tierra mediante impedancia, o con una conexión a tierra (lado fuente del transformador de potencia conectado a tierra), solo se deben usar las configuraciones de banco de capacitores en

estrella sin conexión a tierra y delta. En sistemas efectivamente puestos a tierra se pueden conectar en las configuraciones estrella puesto a tierra, estrella flotante o delta.

Hay ciertas ventajas y desventajas asociadas con los bancos puestos a tierra en comparación a los de neutro flotantes; algunas de ellas se enumeran a continuación:

- a) Las fases están aisladas entre sí. Cuando se utiliza seccionamiento monofásico en un sistema múltiplemente puesto a tierra, la conexión a tierra del neutro del banco de capacitores evita los problemas asociados con fases desconectadas.
- b) Costo inicial del banco de capacitor puede ser inferior, ya que el neutro no tiene que estar aislado de tierra, por lo que el nivel del BIL del capacitor puede ser menor que en el caso de conexiones de neutro flotante.
- c) Niveles de tensión reducidos en la conmutación de los capacitores.
- d) Cuando se compara con la estrella sin conexión a tierra, no se producirá sobretensión en las unidades de capacitores sin falla durante la operación de un fusible del capacitor con falla en otra fase. (La misma ventaja existe para los bancos de capacitores conectados delta).

Las desventajas de la disposición estrella puesto a tierra en comparación con la estrella no conectada a tierra son las siguientes:

- a) El neutro conectado a tierra puede generar corrientes armónicas de secuencia cero y causar interferencias telefónicas.
- b) Las corrientes a tierra transitoria causadas por la conmutación del capacitor o fallas cercanas pueden inducir tensiones indeseables en otros circuitos que comparten la misma tierra que el capacitor conectado a tierra.

Los capacitores configurados en estrella con conexión a tierra, en estrella sin conexión a tierra y en delta pueden estar sujetos a sobretensiones ferresonantes, si se conectan junto con bancos de transformadores de ciertas conexiones de devanado, con dispositivos de conmutación unipolares o si se produce un atascamiento de un polo de un dispositivo trifásico. Para el capacitor sin conexión a tierra, si el transformador tiene un neutro conectado a tierra o incluso si consta de muchos transformadores monofásicos distribuidos

aproximadamente a lo largo del alimentador, existe un circuito potencialmente ferresonantes, si los dispositivos de conmutación monofásica son operados aguas arriba. Tanto los transformadores como los descargadores de sobretensiones han fallado en estas condiciones. Si el transformador es trifásico sin conexión a tierra, entonces el banco de capacitores con conexión a tierra se debe evitar por la misma razón. Aunque la ferresonancia puede ocurrir y ocurre en estos circuitos, se presenta efectivamente solo en raras ocasiones, porque la carga resistiva en los transformadores puede evitar que ocurra.

3.5. PROTECCIÓN DE LOS BANCOS DE CAPACITORES

La protección de los bancos de capacitores de potencia debe establecer protección contra tres problemas básicos, los cuales son:

- ✓ Picos de tensión provocados por descargas atmosféricas y picos de tensión de maniobra
- ✓ Sobrecorrientes en los Capacitores
- ✓ Sobretensión permanente en los Capacitores

Normalmente estos esquemas se llevan a cabo por los siguientes tipos de protección:

3.5.1. Picos de tensión

Estos transitorios son amortiguados con un dimensionamiento adecuado del resistor de pre-inserción del interruptor de maniobra del banco y/o con la instalación de pararrayos adicionales de óxido de zinc (ZnO) junto a los bancos.

3.5.2. Sobrecorrientes en los capacitores

Son amortiguados mediante las siguientes medidas:

- ✓ Fusibles en los capacitores.
- ✓ Una distribución apropiada de los capacitores en conexión serie/paralelo.
- ✓ Utilización de resistores de pre-inserción del interruptor de maniobra del banco.

3.5.3. Sobretensión permanente en los capacitores

Estas sobretensiones podrán ser amortiguadas si:

- ✓ Hay una inspección periódica en los fusibles (cuando estos fuesen del tipo externo).
- ✓ Hay sensores de desequilibrio del neutro.
- ✓ Hay relés diferenciales de tensión para bancos con estrella puesto a tierra.

3.6. CONSIDERACIONES DE CONTROL

Los bancos de capacitores pueden ser fijos o automáticos. Generalmente, para determinar el tipo de banco de capacitores necesarios, se puede considerar las siguientes pautas:

- ✓ Bancos de Capacitores Fijos están dimensionados para condiciones de carga mínima.
- ✓ Bancos de Capacitores Automáticos están diseñados para niveles de carga superiores a la condición mínima hasta la carga máxima.

La variación de carga de un Sistema de Distribución varía dependiendo del tipo de consumidor al cual se suministra la energía eléctrica. De esta forma, los Bancos de Capacitores se clasifican de acuerdo al régimen de operación en dos tipos: los fijos y los automáticos.

3.6.1. Bancos de Capacitores Fijos

Los bancos de capacitores fijos suministran una potencia reactiva constante y están conectados de forma permanente al sistema, se instalan principalmente cuando la demanda de potencia reactiva de la carga a compensar sea poco variable. [11]

El total de kVAr compensado por los capacitores fijos instalados en cada alimentador debe ser aproximadamente igual a la potencia reactiva solicitada en la barra de la Estación reductora por dicho alimentador en condiciones de demanda ligera o media. Para la instalación de los bancos de capacitores fijos, se debe tener en cuenta una previsión del aumento de las cargas energizadas por el alimentador a un plazo de 3 a 5 años. Esto permitirá compensar prácticamente toda la potencia reactiva producida en condiciones de carga leve, aun si el crecimiento de la carga sea un poco diferente de lo previsto. [11]

En la Figura 3.6.1, se puede observar como al colocar bancos de capacitores fijos, siempre nos encontraremos con horas que no estarán compensadas completamente y horas en las que estarán sobrecompensadas.

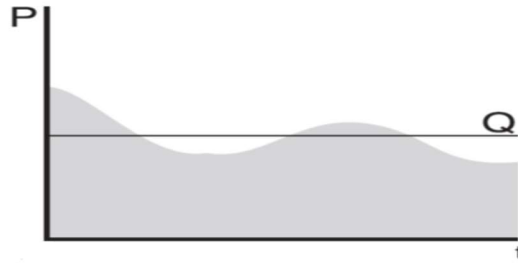


Figura 3.6.1: Demanda de potencia constante
Fuente: [11]

3.6.2. Bancos de Capacitores Automáticos

Su función es proporcionar diferentes niveles de potencia reactiva al sistema para poder compensar la deficiencia de reactivos en los períodos de demanda máxima, están programados para una operación de entrada y salida en el sistema, ya sea en forma manual o automática. De igual manera se puede instalar en un poste de la red de distribución o en la barra de una Estación, con sus respectivos elementos adicionales.

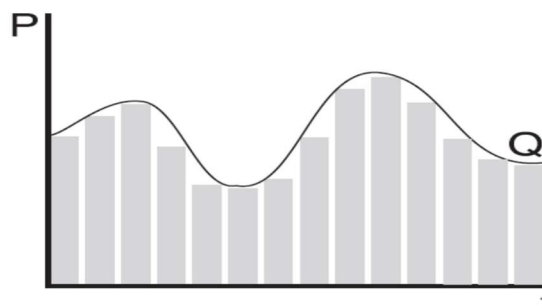


Figura 3.6.2: Demanda de potencia variable
Fuente: [11]

Los bancos automáticos se instalan principalmente bajo las siguientes circunstancias: [13]

Cuando las cargas poseen una demanda de potencia reactiva considerablemente variable, ya sea con la finalidad de corregir el factor de potencia, reducir pérdidas eléctricas o aumentar la capacidad de carga del sistema. Los bancos de capacitores automáticos pueden proveer potencia

reactiva en los momentos de mayor demanda, saliendo fuera de operación al disminuir la misma. [13]

Cuando se trata de mejorar la regulación de tensión en las líneas de distribución se puede requerir el uso de capacitores con potencias considerables durante las horas de plena carga o demanda máxima, que deben ser desconectados cuando la carga del sistema disminuye. De lo contrario, pueden producirse sobretensiones muy peligrosas. [13]

En la Figura 3.6.3, define el estado de operación del sistema a través del cual se planifica el intervalo de operación de los bancos de capacitores (fijos o automáticos) según la variación de la demanda.

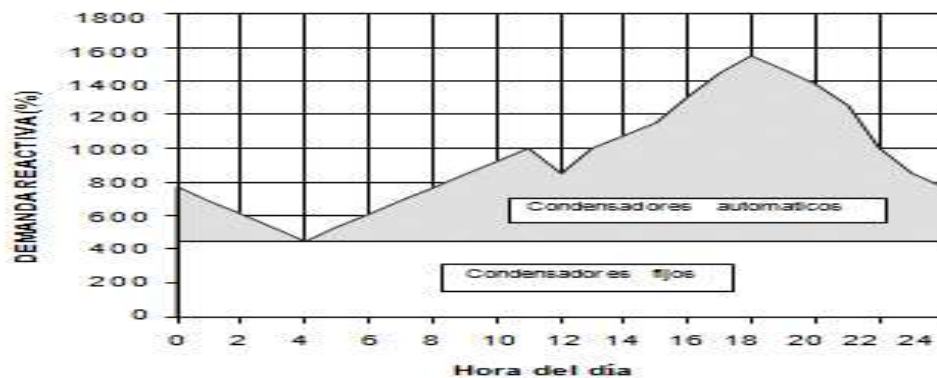


Figura 3.6.3: Instalación de bancos de capacitores según la curva de demanda.
Fuente: [14]

3.6.3. Control de los Bancos de Capacitores Automáticos

El valor objetivo de cierre y el valor objetivo de apertura son valores que, cuando son alcanzados y/o excedidos por el parámetro de control principal durante una cantidad de tiempo igual al retardo de tiempo para conmutación, causará que ocurra una operación de conmutación de Cierre o Disparo. [15]

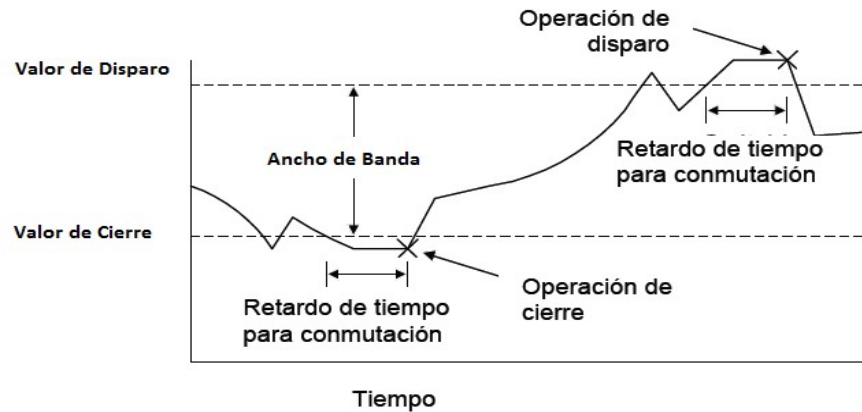


Figura 3.6.4: Funcionamiento del control de los Bancos Automáticos.
Fuente: [16]

Algunos de los parámetros de control más utilizados son citados a continuación:

3.6.3.1. Control de operación por potencia reactiva

- La operación, según el modo de control por potencia reactiva, conmuta el banco de capacitores con base al valor de la potencia reactiva (VAr) de la línea. [16]
- La potencia reactiva generalmente es medida por el promedio del valor de la tensión instantánea y multiplicada por el componente de corriente de cuadratura. [16]
- Los valores objetivos de conmutación por potencia reactiva recomendados pueden calcularse de la siguiente manera: [16]
 - ✓ El valor objetivo de Cierre: $2/3$ por tamaño del banco de capacitores (en kVAr), retraso (+).
 - ✓ El valor objetivo de Disparo: Valor de Cierre – $(1.25 \text{ por tamaño del banco})$, será (-) = adelanto.

Ejemplo:

Asumiendo una aplicación de banco de 600 kVAr.

Valor objetivo de Cierre: $2/3 \times 600 \text{ kVAr} = +400 \text{ kVAr}$ (retraso).

Valor objetivo de Disparo: $400 \text{ kVAr} - (1.25 \times 600 \text{ kVAr}) = -350 \text{ kVAr}$ (atrasado).

- Un sensor de corriente debe ser utilizado para control por potencia reactiva.

- Para el control por Potencia Reactiva, el sensor de corriente debe ubicarse en el lado fuente (Estación) del banco de capacitores de modo que el controlador pueda detectar el cambio real en kVAr de línea debido a la conmutación del banco.
- El cableado para transformadores (TP) en sistemas en “Y” y sistemas en “Delta” deben ser configurados correctamente.

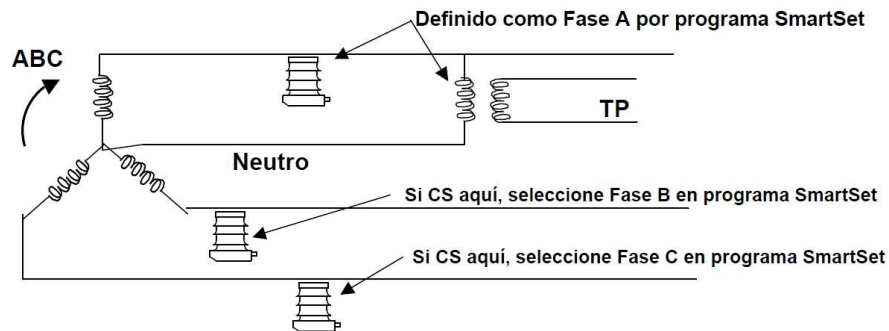


Figura 3.6.5: Cableado de TP's en sistemas en "Y".
Fuente: [16]

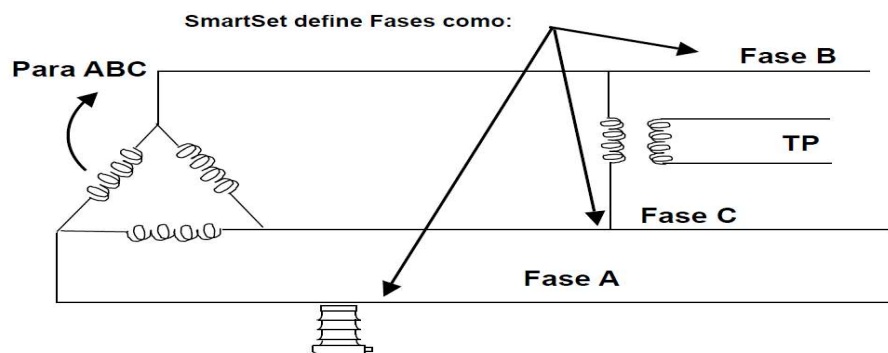


Figura 3.6.6: Cableado de TP's en sistemas en "Delta".
Fuente: [16]

3.6.3.2. Control de operación por tensión

- La operación de control por Tensión conmuta el banco con base en la amplitud medida de la tensión de línea, por lo tanto, debe suministrarse entrada de voltaje procedente de un transformador reductor o secundario. [15]
- En este caso se usa el transformador usado para alimentar el control. [15]

- El ancho de banda de valores objetivo sea al menos 1,5 veces el cambio de tensión esperado, debido al banco de capacitores (se recomienda un ancho de banda de al menos 3 ó 4 voltios para un secundario de 120 V).
- Este valor objetivo de disparo debe ajustarse por debajo del valor de la tensión de carga liviana normal, de modo que el banco no esté activado durante esta condición. [15]

3.6.3.3. Control de operación por corriente

- La operación de control por Corriente conmuta el banco con base en la amplitud medida de la corriente de línea monofásica, requiriendo un sensor de corriente o Transformador de Corriente (TC), por cada fase. [15]
- Los valores objetivos de conmutación del control por corriente. usualmente se basan en corrientes de carga conocidas del alimentador. [15]
- La corriente de línea proporciona una medición indirecta de la corriente reactiva y es proporcional a la caída de tensión, por lo tanto, el control por Corriente proporciona una buena combinación de reducción de pérdidas y control del valor de la tensión para ciertas aplicaciones. [15]
- Cuando se utiliza el control por Corriente, el sensor de corriente debe ubicarse en el lado de carga (opuesto a la Estación). [15]

3.6.3.4. Control de operación por horario

- ✓ El control por Horario proporciona la conmutación de los capacitores con base en un cronograma por calendario/horario, el cual es programado de acuerdo a la necesidad. [15]
- ✓ El control por Horario no depende de ninguna condición medida de la línea.

3.6.3.5. Control de operación por temperatura

- ✓ El modo de control por temperatura proporciona conmutación de los capacitores con base en la temperatura ambiente.
- ✓ No se utiliza ninguna medida de línea.
- ✓ El control posee un sensor por temperatura. [15]

3.7. RESONANCIA OCASIONADA POR CAPACITORES

La resonancia ocurre para una frecuencia particular en un circuito donde existe una combinación de elementos resistivos, inductivos y capacitivos. Este efecto

produce sobrecorrientes y sobretensiones en el circuito dependiendo de que los elementos resonantes estén en serie o en paralelo.

Los capacitores instalados para la corrección del factor de potencia en los sistemas eléctricos pueden formar un circuito resonante paralelo con las impedancias de la carga y del transformador, pudiéndose aumentar considerablemente la reactancia del sistema, produciendo perturbaciones en la operación de dicho sistema y daños a sus componentes.

Muchos de los sistemas de energía están equipados con capacitores para corrección del factor de potencia. La capacitancia forma un circuito resonante paralelo con las impedancias de la carga y del transformador.

Las condiciones de resonancia causan sobrecorrientes y sobretensiones. Hay dos posibilidades de condiciones de resonancia como se explica a continuación.

[1]

3.7.1. Resonancia serie

La combinación de reactancias inductiva y capacitiva en serie forma un circuito resonante serie. El comportamiento de la impedancia de este circuito se ilustra en la Figura 3.7.1. Se observa que a una frecuencia llamada frecuencia de resonancia, la impedancia se reduce a un valor mínimo el cual es muy bajo y de naturaleza resistiva. El circuito ofrece una impedancia muy baja a esta frecuencia lo cual causa un aumento en muchas veces de la corriente. [1]

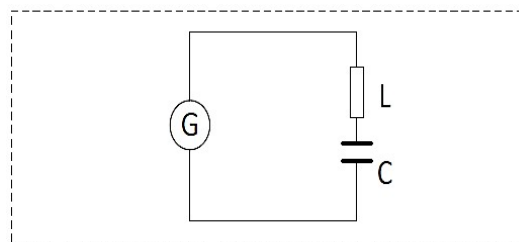


Figura 3.7.1: Circuito resonante serie
Fuente: [1]

La resonancia serie ocurre en muchos casos, cuando las armónicas están presentes en lado primario del transformador. Los transformadores junto con los capacitores en el lado secundario de baja tensión actúan como un circuito resonante serie para el lado de alta tensión. Si la frecuencia de resonancia de la combinación L y C coincide con una frecuencia armónica existente puede

sobrecargarse el equipo. Este circuito resonante serie provee un paso de baja impedancia a las armónicas en este caso. La cantidad de absorción dependerá de la posición relativa de la frecuencia de resonancia con respecto a la frecuencia de la armónica. Esta corriente armónica impone una carga adicional al transformador y especialmente a los capacitores. La tensión del lado de baja tensión del sistema se distorsiona como resultado de la resonancia. [1]

3.7.2. Resonancia paralelo

Una combinación en paralelo de reactancia inductiva y una capacitiva forma un circuito resonante paralelo. El comportamiento de la impedancia de este circuito se muestra en la Figura 3.7.2. A la frecuencia de resonancia la reactancia inductiva igual a la capacitiva. [1]

La impedancia resultante del circuito aumenta a valores muy altos a la frecuencia de resonancia. La excitación de un circuito resonante paralelo causa una tensión muy alta sobre las impedancias y corrientes. [1]

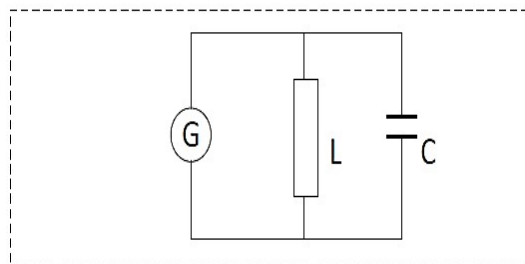


Figura 3.7.2: Circuito resonante paralelo
Fuente: [1]

Muchos de los sistemas de energía están equipados con capacitores para corrección del factor de potencia. La capacitancia forma un circuito resonante paralelo con las impedancias de la carga y del transformador. En consecuencia, el generador de armónicas encuentra una aumentada reactancia de red. Consecuentemente la corriente armónica causa una tensión armónica aumentada comparada con la red no compensada (XL) la cual puede ser acompañada por distorsión de la fundamental. [1]

Entre la red y el capacitor fluyen corrientes iguales que pueden llegar a sumar un múltiplo de la corriente armónica. Los transformadores y capacitores son cargados adicionalmente lo cual puede causar la sobrecarga de los mismos. [1]

El punto de resonancia paralelo depende de la inductancia de la red y de la potencia capacitiva. Por lo tanto, es posible ubicar el punto de resonancia de manera de asegurar la menor perturbación. En realidad, la impedancia de la red no permanece constante todo el tiempo porque está determinada por la potencia de cortocircuito de la red y de las cargas conectadas a ellas. La potencia de cortocircuito de la red varía con el estado de conexión y el punto de resonancia paralelo se mueve con la configuración de la red. Por lo tanto, el fenómeno puede ser más complicado cuando el equipo de corrección del factor de potencia varía por pasos. [1]

En general, es evidente que la ocurrencia de resonancia serie o paralelo puede causar sobretensiones y sobrecorrientes de niveles peligrosamente altos. Las armónicas que crean una posibilidad de resonancia no solo sobrecargan los componentes del sistema sino también deterioran la calidad de energía en términos de distorsión y caídas de tensión. [1]

El problema en los capacitores es debido a la resonancia que presentan con el sistema, esta frecuencia de resonancia muchas veces se encuentran cercana a los 5ª o 7ª armónica, las cuales son armónicas muy comunes en los sistemas eléctricos. [1]

De esta manera la frecuencia de resonancia a la cual está expuesta un banco de capacitores es dado por la ecuación, la cual es:

$$F_{res} = \sqrt{\frac{MVA_{CC}}{MVA_{RS_{CAP}}}} \quad (3.4)$$

Dónde:

MVA_{CC} , Es la potencia de corto circuito donde está conectado el banco de capacitores.

$MVA_{RS_{CAP}}$, Es la potencia del banco de capacitores.

3.8. COMPONENTES ARMÓNICAS

Las Componentes armónicas son aquellas que se manifiestan dentro de los sistemas eléctricos a una frecuencia múltiplo de la fundamental 60 o 50 Hz, por ejemplo, la 3ra tiene una frecuencia de 180 o 150 Hz respectivamente. La distorsión de la onda senoidal fundamental, generalmente ocurre en múltiplos de

la frecuencia fundamental. [1] . La presencia de armónicos provoca sobrecargas en los capacitores debido al aumento de la corriente circundante, una vez que su impedancia es inversamente proporcional a la frecuencia, es decir, que cuando la frecuencia del sistema es alta, la impedancia se reduce, pudiendo aumentar considerablemente la corriente. Estas altas frecuencias deben ser evitadas ya que reducen la vida útil del dieléctrico de los capacitores, en el peor caso llegando a la explosión.

Para que se puedan disminuir los armónicos en el sistema, se deben adoptar las siguientes medidas:

- ✓ Disminuir las sobretensiones en el sistema, desconectando los bancos de capacitores cuando su presencia no sea necesaria, como, por ejemplo, durante las cargas leves o bajas.
- ✓ Distribuir adecuadamente los bancos de capacitores en distintos puntos del sistema, para evitar la acumulación de reactivos en un solo punto.
- ✓ Utilizar filtros para los armónicos más importantes.

CAPITULO 4

COMPENSACIÓN DE LA POTENCIA REACTIVA EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

4.1. INFLUENCIA DEL BAJO FACTOR DE POTENCIA EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

El bajo factor de potencia del sistema, trae como consecuencia los siguientes efectos en la red de distribución:

- ✓ Incremento de las pérdidas por efecto joule

La potencia que se pierde por calentamiento está dada por la expresión I^2R donde I es la corriente total y R es la resistencia eléctrica de los equipos (bobinados de generadores y transformadores, conductores de los circuitos de distribución, etc.).

Las pérdidas por efecto Joule se manifestarán en:

- Calentamiento de cables.
- Calentamiento de bobinados de los transformadores de distribución.
- Disparo sin causa aparente de los dispositivos de protección.

Uno de los mayores problemas que causa el sobrecalentamiento es el deterioro irreversible del aislamiento de los conductores que, además de reducir la vida útil de los equipos, puede provocar cortocircuitos.

- ✓ Sobrecarga de los generadores, transformadores y líneas de distribución.

El exceso de corriente debido a un bajo factor de potencia, ocasiona que los generadores, transformadores y líneas de distribución, trabajen con cierta sobrecarga.

- ✓ Aumento de la caída de tensión

La circulación de corriente a través de los conductores ocasiona una pérdida de potencia transportada por el cable y una caída de tensión o diferencia entre las tensiones de origen y la que lo canaliza, resultando en un insuficiente suministro de potencia a las cargas (motores, lámparas, etc.); estas cargas sufren una reducción en su potencia de salida. Esta caída de tensión afecta a:

- Los bobinados de los transformadores de distribución.
- Los cables de alimentación.

- Sistemas de protección y control.
- ✓ Mayor inversión en redes y transformadores

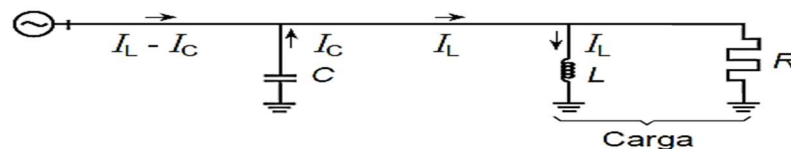
4.2. CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA

La mayoría de las cargas de un sistema de alimentación, así como todos los elementos que se utilizan para entregar la energía (Generadores, Líneas de transmisión y transformadores) son de naturaleza inductiva y por lo tanto operan con un factor de potencia atrasado, al operar con un factor de potencia atrasado el sistema de suministro eléctrico requiere en flujo de potencia reactiva adicional, lo que trae como resultado que se reduzca la capacidad del sistema, aumenten las pérdidas en el sistema y disminuyan los perfiles de tensión.

La compensación de la potencia reactiva tiende a mejorar la calidad del suministro en el sistema eléctrico de distribución, reduciendo los efectos del bajo factor de potencia mencionados en el apéndice anterior, es decir, al disminuir el flujo de la potencia reactiva a través de la red, se logra una reducción importante en las pérdidas técnicas y por lo tanto las económicas asociadas a esa red.

- La aplicación de un capacitor en paralelo se puede demostrar en la siguiente Figura 4.2.1.

a) Patrón de flujo de los componentes de corriente reactiva



b) Cuando $I_C = I_L$, la batería de condensadores suministra toda la potencia reactiva

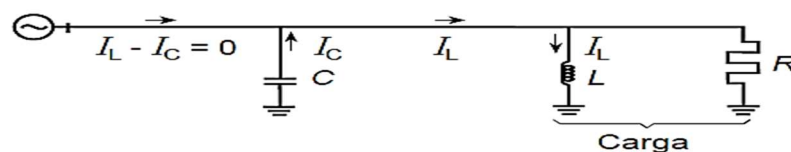


Figura 4.2.1: Aplicación del capacitor en paralelo
Fuente: [17]

Dónde:

R = Representa los elementos de potencia activa de la carga.

L = Representa los elementos de potencia reactiva (inductiva) de la carga.

C = Representa los elementos de potencia reactiva (capacitiva) del equipo de corrección del factor de potencia.

Si se añade a la carga un grupo de capacitores, su corriente reactiva (capacitiva) recorrerá la misma trayectoria a través del sistema de alimentación que la de la corriente reactiva de carga. Como esta corriente capacitiva I_c (que desfasa la tensión 90 grados) está en oposición de fase directa a la corriente reactiva de carga I_L , las dos componentes que fluyen a través de la misma trayectoria se anularan mutuamente, de tal forma que si el grupo de capacitores es suficientemente grande e $I_c = I_L$, no habrá flujo de corriente reactiva en el sistema aguas arriba de los capacitores. Es decir, si añadimos a la instalación un grupo de capacitores con una potencia reactiva igual o mayor que la demandada por la instalación, aguas arriba del grupo de capacitores no habrá demanda de energía reactiva. [17]

En la Figura 4.2.2, se puede observar que al reducir la potencia reactiva Q_1 , a un valor más pequeño Q_2 , mediante un grupo de capacitores de potencia reactiva Q_C , la magnitud de la potencia aparente S_1 se reduce a S_2 .

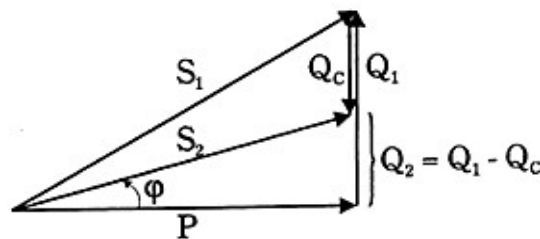


Figura 4.2.2: Diagrama de corrección del factor de potencia. (P) no varía, (S) disminuye, (Q) disminuye e (I) disminuye.

Fuente: [10]

De esta manera, podemos enumerar los beneficios más importantes de la aplicación de Capacitores en paralelo:

4.2.1. Inyección de reactivos

La inyección de reactivos abarca mucho de los beneficios que ofrece la compensación reactiva en derivación, tales como un mejor control de tensión, un mejor factor de potencia, reducción de las pérdidas del sistema y de la entrega de reactivos por parte del generador. [14]

4.2.2. Control de tensión

La aplicación de capacitores en paralelo en un sistema, da como resultado un aumento de la tensión desde el punto de la instalación hasta la generación en un sistema con factor de potencia en retraso, esto ocurre porque la corriente que circula por el sistema disminuye, y por lo tanto la caída de tensión tanto resistiva como reactiva del sistema, es menor. [14]

Existen distintas fórmulas que se pueden utilizar para estimar el aumento de tensión que producen los capacitores; una de las más utilizadas es la siguiente:

$$\Delta V = \frac{(\text{kVAr}) (X_L)}{10 (\text{kV})^2} \quad (4.1)$$

Dónde:

ΔV , Es el porcentaje de incremento del voltaje en el punto de instalación del capacitor.

kV, Es el voltaje línea-línea del sistema sin el capacitor en servicio.

kVAr, Es el valor trifásico del banco de capacitores.

X_L , Es la reactancia inductiva del sistema en el punto de instalación del capacitor, en ohmios.

Los bancos de capacitores son instalados típicamente en las barras de distribución o en las barras de alimentación de los clientes para proveer soportes de tensión en zonas más pequeñas y clientes individuales, los bancos de capacitores instalados en líneas de distribución suben el perfil de tensión a lo largo de toda la línea.

4.2.3. Incremento de la capacidad del sistema

El incremento de la capacidad del sistema es el beneficio más importante, y es el que justifica la adición de capacitores en derivación en un sistema de distribución. Esto es muy significativo cuando las cargas alimentadas por el sistema, van en aumento rápidamente. La adición de los capacitores en paralelo, reduce la carga en kilovoltamperios del sistema, liberando así una capacidad que puede ser utilizada para cargas futuras. El factor de potencia óptimo y económico para un sistema, referente a la capacidad liberada, se puede estimar mediante el uso de la siguiente fórmula: [14]

$$PF = \sqrt{1 - \left(\frac{C_i}{S_i}\right)^2} \quad (4.2)$$

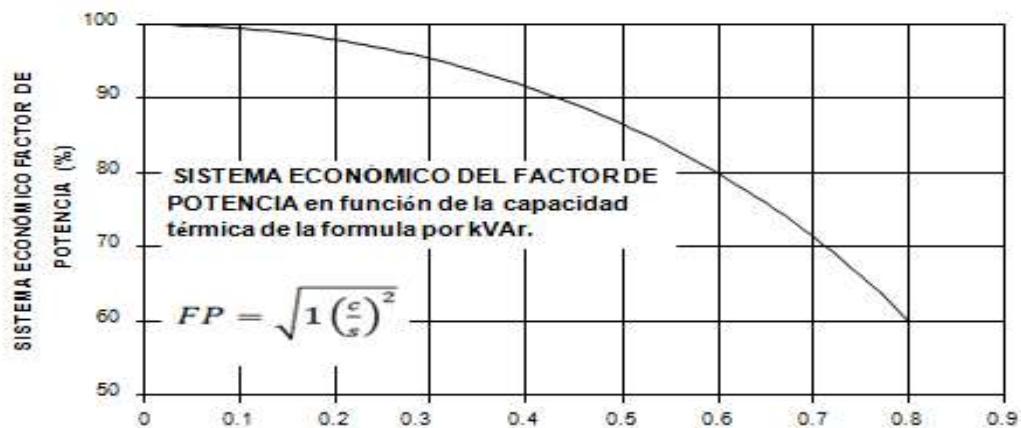
Dónde:

C_i , Es el costo por kVAr del banco de capacitores.

S_i , Es el costo por kVA del sistema.

PF, Es el factor de potencia óptimo.

En la fórmula se compara el costo del banco de capacitores con el costo de transformadores, u otros métodos alternativos para proporcionar mayor capacidad al sistema. La grafica de la formula, óptimo factor de potencia en función de la relación de costo del banco de capacitores y otros equipos alternativos se muestra en la Figura 4.2.3. [14]



$$\frac{\text{Costo del capacitor } \$/\text{kVAr}}{\text{Costo del sistema } \$/\text{kVA}} = \quad (4.3)$$

Figura 4.2.3: Diagrama de corrección del factor de potencia
Fuente: [14]

El factor de potencia necesario para liberar una cantidad deseada de kilovoltamperios del sistema, se puede determinar de la siguiente forma: [14]

$$PF_{\text{nuevo}} = \frac{PF_{\text{viejo}}}{1 - S_1} \quad (4.4)$$

Dónde:

PF_{nuevo} , Es el factor de potencia corregido.

PF_{viejo} , Es el factor de potencia del sistema.

S_1 , Es la cantidad de kVA que se desean liberar (en por unidad de kVA existentes).

Para calcular los kVAr capacitivos necesarios para corregir a un nuevo factor de potencia, se debe restar los kVAr inductivos del factor de potencia nuevo del factor de potencia viejo, la diferencia es entonces la cantidad de kVAr capacitivos que se debe añadir al sistema. En la siguiente fórmula se muestra una manera de realizar esto: [14]

$$Q_C \text{ kVAr} = P_S \text{ kW} [\tan(\cos^{-1} \text{PF}_{\text{viejo}}) - \tan(\cos^{-1} \text{PF}_{\text{nuevo}})] \quad (4.5)$$

Dónde:

$P_S \text{ kW}$, Es toda la carga en kW conectada al sistema

$Q_C \text{ kVAr}$, Es el valor de los kVAr capacitivos que serán añadidos

4.2.4. Reducción de las pérdidas del sistema

La instalación de bancos de capacitores en derivación, ayuda a disminuir las pérdidas de manera significativa en los sistemas distribución, esto es debido a que como ya se mencionó antes, el flujo de corriente en el sistema disminuye desde el punto de instalación de los capacitores hasta la generación. [14]

Dado que las pérdidas de potencia son directamente proporcionales al cuadrado de la corriente, entonces una reducción del flujo de corriente resulta en una reducción mucho mayor de las pérdidas de potencia, por esta razón los capacitores son conectados lo más cerca posible de las cargas. [14]

La relación de las pérdidas del sistema asociado a la carga global, con y sin condensadores instalados se pueden estimar con la fórmula que se muestra a continuación, donde se asumen que tanto la potencia activa como la tensión son constantes en la carga. [14]

$$\text{relacion de pérdidas} = \frac{\text{pérdidas con capacitores}}{\text{pérdidas sin capacitores}} = \left(\frac{\text{PF}_{\text{viejo}}}{\text{PF}_{\text{nuevo}}} \right)^2 \quad (4.6)$$

CAPÍTULO 5

BANCOS DE CAPACITORES EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

5.1. LOCALIZACIÓN DE LOS BANCOS DE CAPACITORES EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Dependiendo de las características del sistema a compensar, los bancos de capacitores pueden implementarse en dos puntos principales de la red:

- ✓ Compensación Concentrada.
- ✓ Compensación Distribuida.

5.1.1. Compensación Concentrada

En este enfoque toda la potencia requerida a compensar, se realiza por medio de la instalación de uno o más bancos de capacitores conectados a la barra de media tensión de la Estación, tal como se muestra en la siguiente Figura 5.1.1.

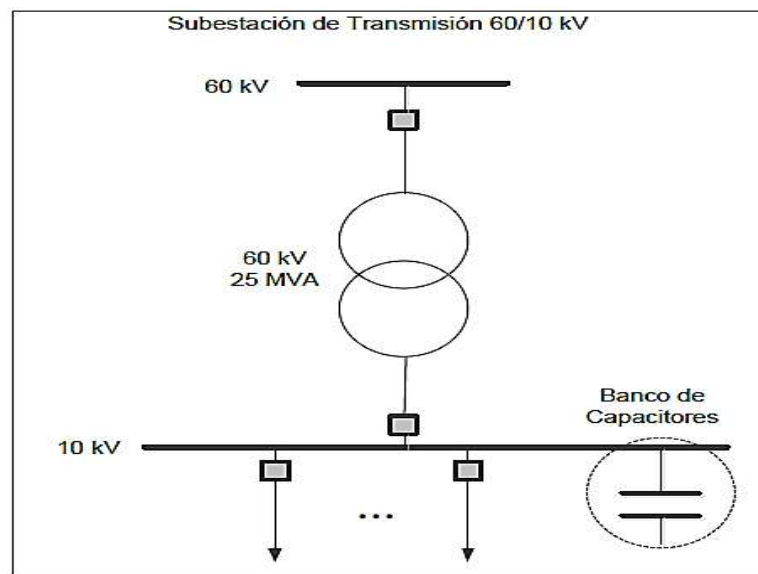


Figura 5.1.1: Esquema eléctrico de una subestación 60/10 kV con compensación reactiva concentrada.

Fuente: [18]

Son varios los motivos para la instalación de Bancos de Capacitores en la barra de distribución de las subestaciones. [19]

Proximidad excesiva entre bancos de capacitores fijos y automáticos en los alimentadores de Distribución: Cuando los alimentadores no son extensos, y alimentan cargas de gran porte, concentradas en puntos específicos del

alimentador, es posible con los bancos de capacitores fijos o automáticos necesarios para la compensación en la demanda mínima o máxima queden instalados en puntos del alimentador relativamente próximos entre sí. En esas condiciones, la resistencia del tramo del alimentador entre esos puntos puede no ser suficiente para amortiguar adecuadamente las sobretensiones que se presentan cuando los capacitores inician su operación en el sistema. En algunos casos puede ser necesario disminuir la cantidad de potencia reactiva de los bancos de capacitores fijos instalados a lo largo del alimentador para controlar el problema mencionado. En ese caso será necesario instalar bancos de capacitores fijos adicionales en la barra de distribución de la SE, con la capacidad igual a la que fue reducida la potencia reactiva por los capacitores fijos o automáticos pequeños instalados a lo largo del/los alimentadores. [19]

Necesidad de compensación complementaria para una gran demanda: Aun cuando todos los capacitores fijos y automáticos puedan ser instalados a lo largo del alimentador, es conveniente disponer de una compensación adicional instalada en la barra de distribución de la SE, que pueda entrar en servicio en los casos de demanda elevada de potencia reactiva, de magnitud mucho mayor a las máximas atendidas mediante la compensación distribuida. [19]

Elevar el factor de potencia aguas arriba del transformador de potencia: Los bancos de capacitores instalados en la barra de distribución de la SE, permiten compensar la gran demanda de reactivos de los alimentadores de distribución, las pérdidas reactivas de los transformadores de potencia, disminuyendo así la potencia reactiva requerida en las líneas de transmisión. [19]

Elevar la tensión de llegada en las subestaciones de distribución.

5.1.2. Compensación Distribuida

Según este enfoque la compensación reactiva se realiza por medio de la instalación de bancos de capacitores a lo largo de los alimentadores de distribución, lo más próximo posible a la carga, tal como se puede apreciar en la siguiente Figura 5.1.2.

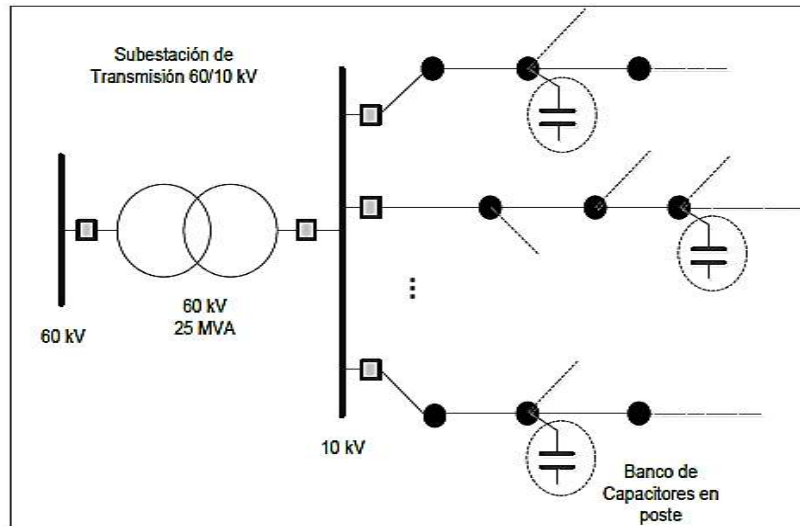


Figura 5.1.2: Esquema eléctrico de una subestación con compensación reactiva distribuida.
Fuente: [18]

Como una de las ventajas de esta técnica se enumera la simplicidad de la instalación de los Bancos de Capacitores, que generalmente van montados en los postes de las líneas de distribución; pero debido a la complejidad del sistema de distribución, es preciso determinar la capacidad y la ubicación óptimas de los capacitores, para obtener los resultados trazados en la etapa de diseño de la compensación reactiva de la red.

5.1.2.1. Compensación de potencia reactiva en una línea de distribución con carga concentrada en su extremo final

Al instalar los bancos de capacitores en un sistema eléctrico se mejora el factor de potencia de la carga lográndose los siguientes beneficios: [7]

- ✓ Liberar una cierta capacidad (en kVA) del sistema.
- ✓ Reducir las pérdidas por efecto joule, principalmente en las líneas.
- ✓ Elevar los niveles de tensión y, por lo tanto, mejorar la regulación.

5.1.2.1.1. Capacidad liberada

R. F. Cook estableció la definición de “capacidad liberada” en un circuito eléctrico cuando se instala un banco de capacitores para mejorar el factor de potencia de la siguiente manera: capacidad liberada es la cantidad de carga (en kVA) que se puede agregar con el factor de potencia original, de manera que la magnitud de la carga (en kVA) sea la misma antes y después de agregar los

capacitores. Esto se aprecia en la 5.1.3. La ecuación que calcula la capacidad liberada es la siguiente: [7]

$$\Delta kVA = kVA_1 \left[-\cos \theta_1 (\cos \theta_1 + \sin \theta_1 \tan \theta_2) \cos^2 \theta_1 \sqrt{1 + 2 \tan \theta_1 \tan \theta_2 - \tan^2 \theta_2 + \frac{\tan^2 \theta_1}{\cos^2 \theta_1}} \right] \quad (5.1)$$

Al instalar un banco de capacitores en un circuito de corriente alterna compuesto por elementos resistivos e inductivos, se tiene un circuito RLC, en el cual se ve disminuida la corriente reactiva inductiva I_L por la corriente reactiva capacitiva del banco, la cual está adelantada 90° del vector tensión. Esto origina que el valor del ángulo θ disminuya, reduciéndose el valor de la corriente del circuito I_A y las pérdidas RI^2 en las líneas y se libera una cierta capacidad; además, al disminuir la corriente se mejora la tensión en la carga. [7]

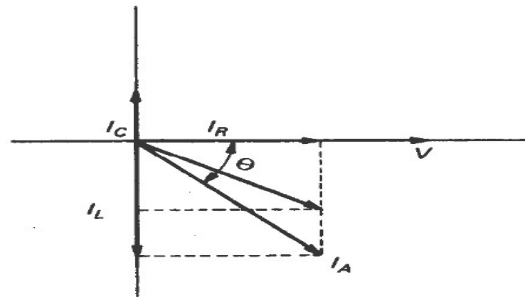


Figura 5.1.3: Efecto de una corriente capacitiva sobre una corriente inductiva
Fuente: [7]

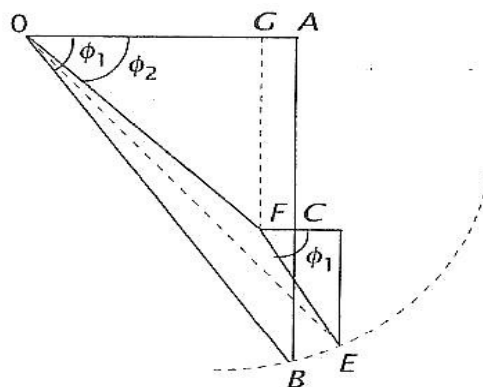


Figura 5.1.4: Diagrama fasorial de potencia que ilustra el concepto de capacidad liberada.
Fuente: [7]

Dónde:

OA = kW iniciales.

AB = kVAr iniciales inductivos.

CB = kVAr del capacitor.

OB = kVA iniciales.

OE = kVA finales.

OB = OE

FE = Capacidad Liberada.

AG = Reducción en los kW.

5.1.2.1.2. Reducción de pérdidas

La reducción de las pérdidas por efecto joule en las líneas que van desde las fuentes hasta el punto donde se desea compensar la potencia reactiva, se debe a la cancelación de una parte de la componente de la corriente inductiva jI_{xi} por la corriente capacitiva jI_{xc} de los capacitores. En el circuito de la Figura 5.1.5, se muestran estas variables. [7]

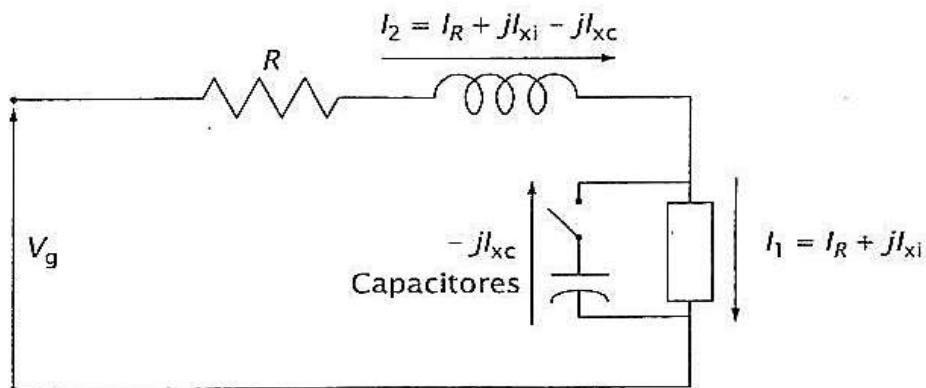


Figura 5.1.5: Cancelación de la corriente inductiva por la corriente capacitiva en una línea de distribución.

Fuente: [7]

Al compensar la potencia reactiva de una carga la reducción de las pérdidas de potencia R_{pp} en las líneas, se obtiene al restar las pérdidas de potencia en la línea con capacitores, de las pérdidas de potencia en la línea sin capacitores: [7]

$$R_{pp} = 3RI_1^2 - 3RI_2^2 \quad (5.2)$$

Dónde:

R , es la resistencia de la línea, en Ohmios.

I_1 , es la corriente de la línea, en amperes, antes de instalar los capacitores.

I_2 , es la corriente de la línea, en amperes, después de instalar los capacitores.

Junto con la reducción de pérdidas de potencia R_{pp} se tiene una reducción de pérdidas de energía R_{pe} , que se calcula de la siguiente manera: [7]

$$R_{pe} = 3RI_1^2 T F_{per} - 3RI_2^2 T F_{per} \quad (5.3)$$

Donde:

F_{per} , es el factor de pérdidas.

T , es el tiempo en que se evalúa la reducción de energía

El factor de pérdidas se define como la relación del promedio de las pérdidas de potencia, en un ciclo de carga dado, y las pérdidas de potencia durante la demanda máxima; o sea: [7]

$$F_{pér} = \frac{RI_{prom}^2}{RI_{máx}^2} = \frac{I_{prom}^2}{I_{máx}^2} \quad (5.4)$$

Esta definición se ilustra en la figura 5.5, en la que se muestra una curva de $i^2(t)$, de una carga cualquiera, y las variables I_{prom} , $I_{máx}$ y el tiempo T en que se evalúan las pérdidas de energía. [7]

El factor de pérdidas también se puede calcular con la ecuación de F. H. Buller y C. A. Woodrow: [7]

$$F_{pér} = 0.3 FC + 0.7 FC^2 \quad (5.5)$$

Donde:

FC , es el factor de carga.

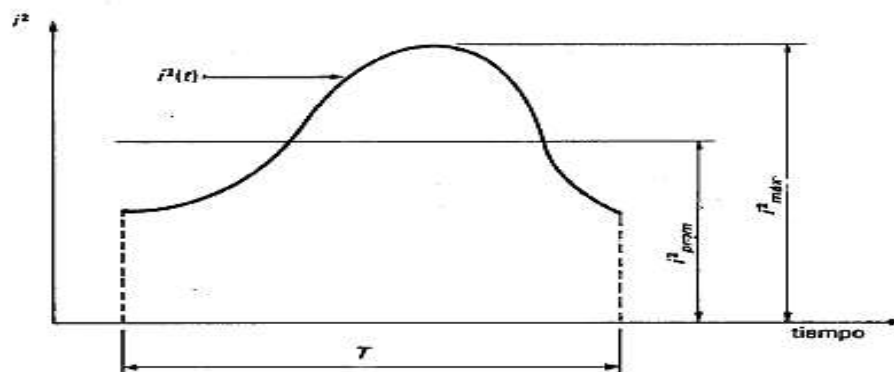


Figura 5.1.6: Ciclo $i^2(t)$
Fuente: [7]

Este diagrama ilustra la reducción de pérdidas en un sistema de potencia al introducir capacitores. El eje vertical representa la potencia y el eje horizontal el tiempo. Se muestra un ciclo de potencia con una duración total T . La curva superior, sombreada con líneas diagonales, representa las 'Pérdidas sin capacitores' y alcanza una potencia máxima de RI_1^2 . La curva inferior, representada por una línea punteada, muestra las 'Pérdidas con capacitores' y alcanza una potencia máxima reducida de RI_2^2 . La diferencia entre estas curvas, también sombreada, indica la potencia ahorrada, etiquetada como R_{PE} . El nivel de potencia residual de las pérdidas con capacitores se indica como R_{PP} .

5.1.2.1.3. Elevación de Tensión

La reactancia (X) de un alimentador de distribución, en Ω/km , es cerca de 3 veces mayor que la resistencia (R) del mismo, en Ω/km . En consecuencia, se puede demostrar fácilmente que la caída de tensión producida por la transmisión de 1 MVar es equivalente a la caída de tensión producida por la transmisión de 3 MW de potencia activa.

Como se mencionó anteriormente al instalar bancos de capacitores en las líneas, se incrementa el valor de la tensión en las terminales de la carga y la ecuación con la que se puede calcular esa elevación de tensión se deduce con ayuda de la Figura 5.1.8.

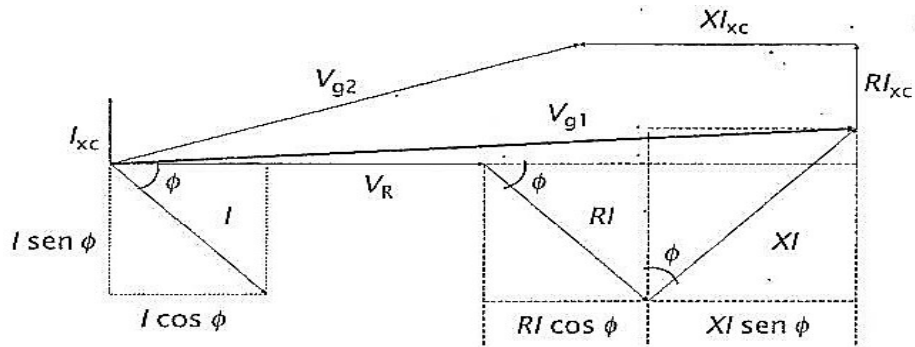


Figura 5.1.8: Diagrama de relaciones vectoriales de una línea corta con capacitores en la carga.

Fuente: [7]

Donde:

I , es la corriente en línea.

V_R , es la tensión en las terminales de la carga.

V_{G1} , es la tensión en la fuente (sin capacitores).

V_{G2} , es la tensión en la fuente (con capacitores).

$RI \cos \phi$, es la caída en la resistencia de la línea por la componente activa de corriente.

$RI \sin \phi$, es la caída en la reactancia por la componente reactiva de corriente.

RI_c , es la caída en la resistencia de la línea por la corriente de los capacitores.

XI_c , es la caída en la reactancia de la línea por la corriente de los capacitores.

La caída de tensión en una línea con carga concentrada se calcula con la expresión siguiente:

$$\Delta V = RI \cos \phi + XI \sin \phi \quad (5.6)$$

Dónde:

R , es la resistencia de la línea, en ohmios.

X , es la reactancia de la línea, en ohmios.

$I \cos \phi$, es la componente activa del vector corriente (en fase con el vector tensión V_r), en amperes.

$I \sin \phi$, es la componente reactiva del vector corriente (atrasada 90° el vector tensión V_r), en amperes.

Al conectar un banco de capacitores cuya corriente sea I_C , se puede aproximar la caída de tensión por fase “V” con la ecuación: [7]

$$\Delta V = RI \cos \phi + XI \sin \phi - XI_{XC} \quad (5.7)$$

La corrección de la tensión usando capacitores en paralelo constituye un instrumento muy valioso. A menudo, con los capacitores se consigue la corrección de tensión necesaria a un costo menor que con cualquier otra técnica, además se consigue mejorar el factor de potencia del alimentador donde se encuentra instalado. Sin embargo, su efecto sobre la tensión es el mismo durante los periodos de poca carga, lo que puede dar lugar a una elevación de la tensión de los usuarios, a menos que se tenga sumo cuidado en su aplicación. Las instalaciones variables resultan especialmente adecuadas en estos casos, ya que los kVAr en exceso respecto a los admisibles de los periodos de poca carga pueden ser atendidos con este sistema. Son instalados de manera que queden conectados durante las puntas de cargas y se desconectan durante los periodos de poca carga. Al simular la condición de un alimentador trifásico de 13,2 kV, de 10 km de longitud y que alimenta una carga de 3000 kVA con un factor de potencia de 0,8 en atraso, en la cual se hace variar la magnitud del Banco de Capacitores en pasos de 300 kVAr, se obtiene los valores de la Tabla 5.1, y luego reflejadas en la Figura 5.8.

Capacidad del Banco kVAr	Capacidad Liberada kVA	Factor de Potencia de la Carga	Reducción de Potencia kW	Pérdidas Energía kWh
cero	cero	- 0,800	cero	cero
300	170	- 0,848	11,3	32234
600	317	- 0,893	20,6	59004
900	437	- 0,936	29,4	83952
1200	527	- 0,970	32,9	94057
1500	582	- 0,991	36,0	102924
1800	600	1,000	37,0	105759
2100	582	0,992	36,0	102924
2400	527	0,970	32,9	94057
2700	437	0,936	29,4	83952
3000	317	0,894	20,6	59004

Tabla 5.1.1: Simulación del alimentador al variar la capacidad del Banco de Capacitores
Fuente: [6]

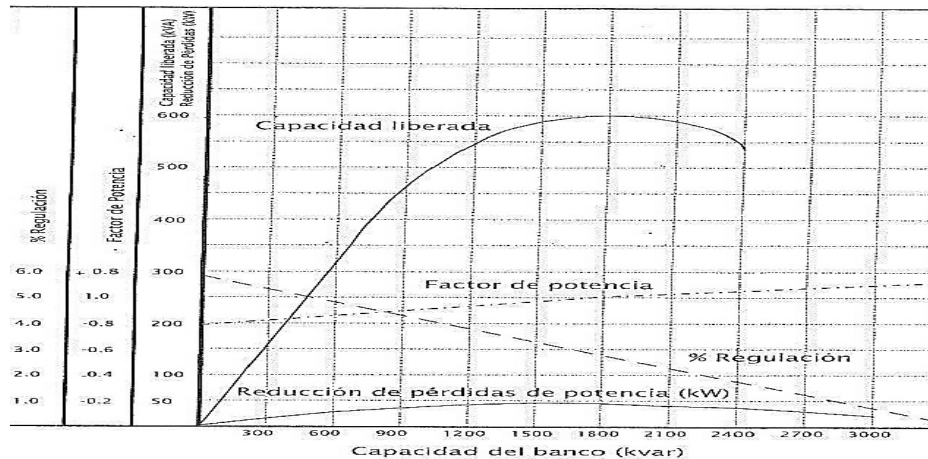


Figura 5.1.9: Representación gráfica de los resultados de la Tabla 5.1.
Fuente: [6]

De los resultados consignados en la tabla.5.1 se observa que la reducción máxima de pérdidas de potencia y energía se logra cuando se instala un banco de capacitores de 1800 kVAr, que es el correspondiente a un factor de potencia igual a uno.

5.1.2.2. Compensación de potencia reactiva en una línea de distribución con cargas distribuidas

Para obtener un beneficio óptimo de los capacitores de potencia conectados en derivación o Shunt instalados en el sistema de distribución, los mismos deben estar localizados en puntos en donde producen la máxima reducción de pérdidas y la mayor elevación de tensión, generalmente en las cercanías de las grandes cargas. Cuando esto no resulta práctico, varias reglas pueden ser utilizadas para la localización rápida de los capacitores, que son citadas a continuación:

- ✓ Para cargas distribuidas uniformemente, el condensador debe estar colocado a dos tercios de la distancia de la Estación.
- ✓ Para cargas distribuidas y uniformemente decrecientes, el condensador debe ser colocado a la mitad de la distancia de la Estación.
- ✓ Para una elevación máxima de la tensión, el condensador debe ser colocado cerca del final de la línea.

Más concretamente, se requieren bancos de capacitores en lugares donde las mediciones de campo indican baja tensión, o bajo factor de potencia.

Una vez que se han obtenido estas medidas, se pueden usar para determinar el aumento de tensión y los parámetros kilovoltamperios.

De esta manera, el tamaño y la ubicación de los capacitores han sido determinadas haciendo uso de diferentes técnicas y métodos que serán expuestas en el punto 5.1.2.3.

5.1.2.2.1. Compensación de potencia reactiva en una línea de distribución con cargas distribuidas al azar

Este fue uno de los primeros métodos empleados para optimizar la localización de bancos de capacitores en alimentadores de distribución. Se basa en el cálculo de la reducción de pérdidas de potencia y energía que se presentan en cada uno de los segmentos de un alimentador cuando se instalan en él, uno o varios bancos de capacitores. [7]

Con este método se calculan las pérdidas de potencia en un segmento dado del circuito debidas a la corriente inductiva de carga; posteriormente, las pérdidas de potencia debidas a la corriente inductiva de carga, menos la corriente capacitiva de los capacitores; con base en estos resultados, se determina la reducción de pérdidas de potencia en el segmento de interés. Para calcular las pérdidas de energía, se procede en forma similar. En el punto 5.1.2.3.3 se establecen las ecuaciones fundamentales del método M. Maxwell. [7]

5.1.2.3. Métodos de ubicación de los bancos de capacitores en los alimentadores de distribución

5.1.2.3.1. Métodos analíticos

Estos métodos son utilizados cuando los recursos computacionales no están disponibles o son muy caros. El método analítico usa el cálculo para maximizar la función de beneficios sobre los costos. Los pioneros para la ubicación óptima de capacitores, Neagle y Samson, Cook, Schmill, Chang y Bae utilizaron el método analítico para obtener una solución aproximada en la maximización de la función de beneficio. [20]

5.1.2.3.2. Método de los 2/3

Este método se denomina el criterio de los 2/3 y se aplica en alimentadores con carga uniformemente distribuida y conductor de calibre constante.

El fundamento de la regla de los 2/3, se expresa de la siguiente manera: “Para lograr la máxima reducción de pérdidas de potencia en un alimentador con carga uniformemente distribuida, los capacitores se deben instalar a 2/3 de distancia de la fuente y su capacidad debe ser igual a 2/3 de la potencia reactiva de la línea, a la hora de la demanda máxima”.

Esta regla se aplicó durante muchos años en las compañías eléctricas de los Estados Unidos.

El criterio de los 2/3 es el más conocido de los métodos analíticos, pero este método cae en el error al asumir una carga uniforme al igual que las características de la red. [20]

La mayoría de los alimentadores de distribución de energía eléctrica no tienen una distribución uniforme de las cargas, sino están dispersas a lo largo del mismo y para la ubicación de capacitores en los casos de cargas distribuidas al azar se puede determinar con los métodos de Maxwell y Schmill, abordados a continuación.

5.1.2.3.3. Método de Maxwell

Las pérdidas de potencia P_{LK} , en un segmento K, de un alimentador trifásico están dadas por:

$$P_{LK} = 3R_K I_K^2 \quad (5.8)$$

Donde:

I_K , es la corriente que circula por el segmento K.

R_K , es la resistencia óhmica del segmento K.

Si se considera que la corriente aparente, en el segmento K está formada por un componente activa y reactiva representadas por, I_{AK} e I_{XK} la ecuación anterior se puede escribir de la siguiente manera:

$$P_{LK} = 3R_K (I_{AK}^2 + I_{XK}^2) \quad (5.9)$$

Al conectar a la línea un banco de capacitores en paralelo, las pérdidas de potencia en el segmento K se obtienen por medio de la siguiente expresión:

$$P_{LC} = 3R_K [I_{AK}^2 + (I_{XK} - I_{CK})^2] \quad (5.10)$$

Donde:

I_{CK} , Es la corriente del banco de capacitores en el segmento K.

La reducción de las pérdidas de potencia P_{LK} en watts, al instalar los capacitores, se obtiene de restar la ecuación 5.9 de la ecuación 5.10. Para expresarla en kW se divide entre 1000:

$$P_{LC} = 3R_K [I_{AK}^2 + (I_{XK} - I_{CK})^2] \frac{1}{1000} \quad (5.11)$$

En este método, la reducción de pérdidas de potencia en un alimentador trifásico se obtiene con la siguiente ecuación:

$$R_p = [3R_1 (2I_1 I_{C1} - I_{C1}^2) + 3R_2 (2I_2 I_{C2} - I_{C2}^2) + \dots + 3R_n (2I_n I_{Cn} - I_{Cn}^2)] \quad (5.12)$$

$$10^{-3}$$

Y la reducción de pérdidas de energía:

$$R_E = [3R_1 (2I_1 I_{C1} FC - I_{C1}^2) + 3R_2 (2I_2 I_{C2} FC - I_{C2}^2) + \dots + 3R_n (2I_n I_{Cn} FC - I_{Cn}^2)] T \times 10^{-3} \quad (5.13)$$

Dónde:

R_p , es la reducción de las pérdidas de potencia.

R_E , es la reducción de las pérdidas de energía.

R_1 , es la resistencia del segmento uno de la troncal.

I_1 , es la corriente inductiva durante la demanda máxima en el segmento 1 de la troncal.

I_{C1} , es la corriente capacitiva en el segmento uno de la troncal.

I_n , es la corriente inductiva durante la demanda máxima en el segmento "n" de la troncal.

FC, es el factor de carga.

T, es el tiempo, normalmente se toman 8760 horas (que tiene un año).

A continuación, se muestra el diagrama unifilar del alimentador propuesto por Maxwell.

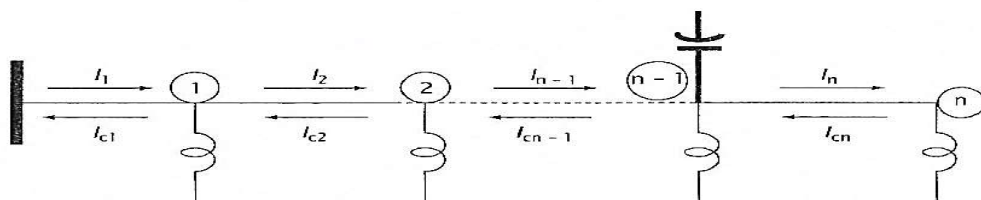


Figura 5.1.10: Diagrama unifilar del alimentador empleado por M. Maxwell
Fuente: [6]

Para convertir la reducción de pérdidas de potencia y energía en unidades monetarias se asigna un costo a un kW y a un kWh y se le aplica la siguiente expresión.

$$S = K_e \text{kWh} + K_p \text{kW} \quad (5.14)$$

Donde:

K_e , es la constante para convertir kWh a unidades monetarias.

K_p , es la constante para convertir kW a unidades monetarias.

En función del comportamiento de la reducción de pérdidas M. Maxwell escribió un programa de computadora que permite trabajar un alimentador de hasta 100 nodos. El programa selecciona de la información de entrada, las corrientes reactivas en el nodo “n” (inductiva y capacitiva), así como el valor de la resistencia R_n , para calcular las reducciones en las pérdidas de potencias y energía en la última sección del alimentador. Si no se han agregado condensadores en el nodo “n”, la reducción en las pérdidas es cero, y si se agregaron demasiados condensadores, las pérdidas aumentan en lugar de disminuir y la reducción de las pérdidas es negativa. Después de hacer este cálculo, la computadora almacena ambas corrientes en la siguiente sección (n-1) con las correspondientes corrientes de la sección “n”, y con estos valores y el de R_{n-1} calcula las reducciones en las pérdidas en el segmento (n-1) del alimentador. Este procedimiento continúa hasta que se calculan las reducciones en las pérdidas en todas las secciones del alimentador. Por último, suma todas las reducciones y calcula el ahorro monetario debido a la instalación de los capacitores.

5.1.2.3.4. Método de Schmill

Este método fue ideado por el Ingeniero José V. Schmill; también se le conoce como el método de los Momentos Eléctricos. [6]

La reducción de las pérdidas de potencia en kW, para el caso de un banco de capacitores instalado en un alimentador trifásico, se obtiene con la siguiente ecuación: [6]

$$R_p = 3[2 I_c (M_O^N - M_{N1}^N) - R_{N1} I_c^2] 10^{-3} \quad (5.15)$$

Y la reducción de pérdidas de energía en kWh:

$$RE = 3[2 I_c F_c (M_O^N - M_{N1}^N) - R_{N1} I_c^2] T \times 10^{-3} \quad (5.16)$$

Dónde:

I_c , es la corriente por fase del banco de capacitores.

F_c , es el factor de carga.

M_O^N , es la suma de momentos eléctricos de las corrientes inductivas tomando como “fulcro” el inicio del alimentador.

M_{N1}^N , es la suma de momentos eléctricos de las corrientes inductivas tomando como “fulcro” el punto N1 donde se localizan los capacitores.

R_{N1} , es la resistencia eléctrica en ohmios desde el inicio del alimentador hasta el nodo en que se instalan los capacitores.

T , es el tiempo en que se calcula la reducción de las pérdidas de energía, normalmente es un año (8760 horas).

N , es el último nodo del alimentador.

$N-1$, es el nodo en el que se instalan los capacitores.

5.1.2.3.5. Métodos Heurísticos

Son métodos basados en técnicas de búsqueda heurística. La aplicación de estos métodos ha sido de gran importancia en la localización de capacitores para minimización de pérdidas. Se caracterizan por su fácil entendimiento e implementación de otros métodos, sin embargo los resultados no resultan ser los más óptimos.

5.1.2.3.6. Métodos basados en inteligencia artificial

Estos métodos se caracterizan por su poder de resolver el problema de localización de capacitores de manera óptima; están basados en las diferentes aéreas de la inteligencia artificial. Uno de ellos son los algoritmos genéticos.

Los algoritmos genéticos son métodos que desarrollan una búsqueda selectiva basada en algoritmos con evolución biológica, los cuales centralizan su búsqueda hacia una solución óptima, por medio de codificación, combinación y operaciones

de mutación sobre ellos para generar un mejor conjunto de parámetros ya codificados.

5.2. TAMAÑO DE LOS BANCOS DE CAPACITORES

El tamaño y la cantidad de los capacitores en derivación, en un sistema de potencia son determinados, modelando el sistema para varias contingencias, teniendo como uno de los objetivos el de mantener el valor de la tensión del sistema aceptable. Los capacitores de distribución, a menudo se dimensionan para suministrar los requerimientos de potencia reactiva de la carga más los requisitos reactivos de los bancos de transformadores en la carga máxima. Esto proporciona también la corrección del factor de potencia en el lado de alta de los bancos de transformadores de potencia. Los capacitores de la Estación a menudo se dimensionan y se ubican según el flujo de carga y los estudios de estabilidad de la red de transmisión. Los capacitores minimizan las pérdidas del sistema, aumentan el valor de la tensión del sistema, y aumentan los márgenes de estabilidad. Después de conocer los requisitos del capacitor, el tamaño del banco de capacitores individual, se determina la cantidad de pasos. Para aprovechar las economías asociados con los equipamientos estandarizados, otras condiciones pueden influir en el tamaño máximo y mínimo del banco de capacitores utilizados.

5.2.1. Tamaño máximo

El tamaño máximo del banco de capacitores está influenciado por los siguientes factores: [14]

- ✓ Cambio en la tensión del sistema en la conmutación del banco de capacitores.
- ✓ Limitaciones de interrupciones de corriente continua.

Cuando un banco de capacitores se energiza o se desconecta, la tensión fundamental del sistema aumenta o disminuye, respectivamente. Para tener un efecto mínimo sobre las cargas del cliente, este cambio del valor de la tensión es a menudo limitado a un valor en el rango de 2 a 3%. Este cambio de tensión (ΔV) se puede estimar mediante la siguiente ecuación: [14]

$$\Delta V = \left(\frac{Q_C MVA_r}{S_{SC} MVA} \right) \times 100\% \quad (5.17)$$

Dónde:

MVAr, Es el tamaño en MVAr del banco de capacitores.

MVAsc, Es el cortocircuito trifásico expresado en MVA en el punto de ubicación del banco de condensadores.

El nivel de corriente continua admisible del interruptor, utilizado para la conmutación de bancos de capacitores puede ser un factor a la hora de elegir el tamaño del banco de capacitores. El nivel generalmente se determina multiplicando la corriente nominal del capacitor por 1,25 para los bancos de capacitores sin conexión a tierra y por 1,35 para los bancos de capacitores puestos a tierra en estrella. Donde las corrientes con componentes armónicos sustanciales, es probable que se encuentren presentes, por tanto, se deben tomar las precauciones para determinar la capacidad de los interruptores automáticos, fusibles y otros dispositivos auxiliares sin perder de vista esta corriente adicional. [14]

5.2.2. Tamaño mínimo

Si bien no hay un tamaño mínimo absoluto del banco de capacitores, el tamaño mínimo práctico del banco de capacitores puede ser influenciado por los siguientes factores: [14]

- ✓ El tipo de banco de capacitores utilizado: fusibles externos, fusibles internos, sin fusibles, etc.
- ✓ La disponibilidad de las unidades capacitadoras.
- ✓ Consideraciones de desequilibrio del banco de capacitores.
- ✓ Funcionamiento y/o coordinación del fusible.
- ✓ El costo de los interruptores y protecciones requeridas.

Las principales preocupaciones al instalar un banco de capacitores pequeño son el rendimiento adecuado y el costo de la instalación. En algunas circunstancias, el costo de la instalación puede ser reducido instalando el capacitor en un bus de tensión más bajo en la misma Estación. [14]

5.3. ESPECIFICACIONES DE LOS CAPACITORES

5.3.1. Clasificación Estándar

5.3.1.1. Voltaje rms terminal y potencia reactiva

La salida de potencia reactiva puede ser calculada como se muestra en la siguiente ecuación: [14]

$$Q_{op} = \frac{(2 f * C) V_A^2}{1000} \quad (5.18)$$

Dónde:

Q_{op} , es la potencia reactiva de operación en kVAr.

V_A , es la tensión aplicada en Voltios

F , es la frecuencia de suministro en Hz.

C , es la capacitancia del capacitor en Faradios

La salida de potencia reactiva variará de acuerdo con la tensión aplicada, que puede ser distinta de la tensión nominal. El kVAr operativo también puede ser calculado como se muestra en la siguiente ecuación: [14]

$$Q_{op} \text{ kVAr} = Q_R \text{ kVAr} \left(\frac{V_A}{V_R} \right)^2 \quad (5.19)$$

Dónde:

Q_{op} , es la potencia reactiva de operación en kVAr.

Q_R , es la potencia reactiva nominal del condensador.

V_A , es la tensión aplicada.

V_R , es la tensión nominal.

5.3.1.2. Clase de aislamiento

Las capacidades estándar se encuentran definidas en la Norma IEEE Std 18-2002 (IEEE, 2002) y se muestran en la tabla 5.2, los capacitores no deben ser aplicados si se violan cualquiera de las siguientes limitaciones: [14]

- 110% del voltaje rms, y el pico no exceda $1.2\sqrt{2}$ del voltaje rms, incluyendo armónicas, pero excluyendo transitorios.
- 135% de los kVA nominales
- 135% de la corriente nominal basada en su potencia y voltaje nominales.

Según el estándar IEEE 18-2002 (IEEE, 2002), los capacitores no darán menos que potencia reactiva a voltaje sinusoidal y frecuencia nominal, y no más de 110 % de este valor, medido a 25°C en contenedor uniforme y temperatura interna [14].

Voltaje rms de terminal a terminal, en Voltios	KVAr	El número de fases	BIL kVA
2400	50, 100, 150, 200, 300 y 400	1 y 3	75, 95, 125, 150 y 200
2770	50, 100, 150, 200, 300, 400 y 500	1 y 3	75, 95, 125, 150 y 200
4160, 4800	50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700 y 800	1 y 3	75, 95, 125, 150 y 200
6640, 7200, 7620, 7960, 8320, 9540, 9960, 11400, 12470, 13280, 13800, 14400	50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700 y 800	1	95, 125, 150 y 200
15125	50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700 y 800	1	125, 150 y 200
19920	100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700 y 800	1	125, 150 y 200
20800, 21600, 22800, 23800, 24940	100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700 y 800	1	150 y 200

Tabla 5.3.1: Capacidades estándar según IEEE 18-2002.

Fuente: [14]

5.3.1.3. Frecuencia

Capacitores de potencia están diseñados para funcionar a la frecuencia nominal del dispositivo de 50 Hz. Cuando los capacitores operan a frecuencias inferiores a la nominal, tanto la potencia reactiva como la corriente capacitiva se reducen en proporción directa a la frecuencia de operación, tal como se muestran en las siguientes ecuaciones: [14]

$$Q_{op} \text{ kVAr} = \left(\frac{f_{op}}{f_R} \right) Q_R \text{ kVAr} \quad (5.20)$$

$$I_{op} = I_{NOM} \left(\frac{f_{op}}{f_R} \right) \quad (5.21)$$

Dónde:

Q_{op} , es la potencia reactiva de operación del capacitor, en kVAr.

Q_R , es la potencia reactiva nominal del capacitor, kVAr.

I_{op} , es la corriente capacitiva en la frecuencia aplicada y la tensión nominal.

I_{NOM} , es la corriente capacitiva a la frecuencia y la tensión nominal.

f_{op} , es la frecuencia de operación del capacitor.

f_R , es la frecuencia nominal del capacitor.

5.4. CAPACIDADES RELACIONADAS

5.4.1. Operación continua

Los capacitores son adecuados para un funcionamiento continuo al 135% de potencia reactiva nominal. Este máximo de potencia reactiva incluye los siguientes factores, siempre que los efectos combinados no excedan de 135%. [14]

- ✓ Potencia reactiva debido a una tensión superior a la especificada en la frecuencia fundamental, pero dentro de los límites de tensión admisible.
- ✓ Potencia reactiva debido a voltajes armónicos superpuestos en la frecuencia fundamental.
- ✓ Potencia reactiva que excede la especificación de la placa de identificación debido a la tolerancia de fabricación dentro de los límites especificados.

5.4.1.1. Limitaciones en el funcionamiento continuo

Los capacitores están diseñados para operar a su voltaje y frecuencia nominales o por debajo de esos valores. Los capacitores son capaces de funcionar continuamente bajo ciertas condiciones específicas y condiciones de contingencia, siempre que ninguna de las siguientes limitaciones se exceda. [14]

- ✓ 110% de la tensión nominal rms.
- ✓ 120% de la tensión de cresta nominal, es decir, voltaje de cresta que no exceda de $1,2 \times \sqrt{2} \times$ Tensión eficaz nominal, incluyendo armónicos pero excluyendo transitorios.
- ✓ 135% de la corriente nominal rms en base a la tensión y kVAr nominal, incluyendo la fundamental y las corrientes armónicas.
- ✓ 135% de kVAr nominal

CAPITULO 6

UTILIZACIÓN DEL SOFTWARE

6.1. INTRODUCCIÓN AL SIMULADOR CYMDIST

El CYMDIST, es un programa para el análisis de redes eléctricas, es una serie robusta y completa de herramientas avanzadas de simulación que ayudan a los ingenieros en redes eléctricas de transporte, distribución e industriales en sus labores diarias. El programa de análisis de redes de distribución CYMDIST fue diseñado para realizar estudios de planteamiento y simular el comportamiento de las redes de distribución en distintas condiciones de funcionamiento y distintos escenarios. Es una herramienta muy potente para crear sus propios estudios predictivos por simulación para evaluar el impacto de los cambios efectuados en la red. [21]

Algunas de las características y capacidades con el que cuenta este programa son:

- Flujo de carga y caída de tensión.
- Cálculo de cortocircuito.
- Dimensionamiento y ubicación óptima de condensadores.
- Balance, distribución y evaluación de cargas.
- Análisis en régimen permanente con perfiles de carga.
- Análisis armónico.
- Optimización de la configuración de las redes eléctricas.
- Administrador avanzado de proyectos y planificador de redes.
- Ubicación óptima de condensadores.
- Ubicación óptima de reconectores.

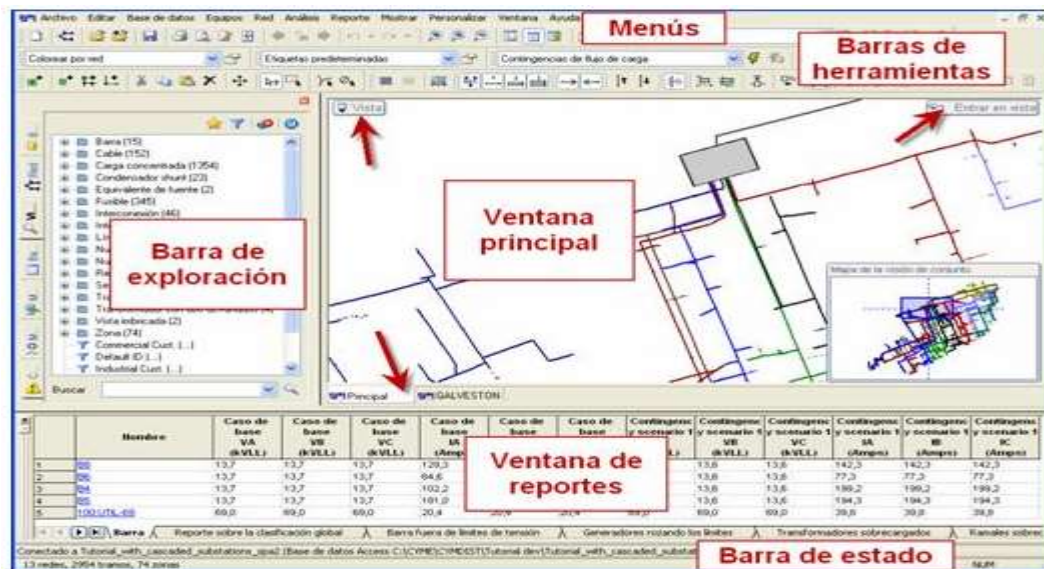


Figura 6.1.1: Ventana de Interfaz gráfica de usuario de CYMDIST.

Fuente: [21]

El programa CYMDIST proporciona una amplia variedad de reportes gráficos y códigos de colores del diagrama unifilar para indicar condiciones de sobretensión o de subtensión, equipos sobrecargados, tramos aislados, niveles de falla, niveles de tensión, etc. [21]

Entre las funciones que serán utilizadas para este proyecto se encuentran la distribución de carga, análisis de flujo de carga y ubicación óptima de condensadores. [21]

- ✓ El análisis de distribución de carga se usa para ajustar la carga conectada para igualarla a la medida de la demanda.
- ✓ El análisis de flujo de carga se basa en analizar el desempeño en régimen permanente de la red de distribución de energía bajo diversas condiciones de explotación.
- ✓ La ubicación óptima de condensadores es una herramienta que permite determinar las ubicaciones óptimas de condensadores o capacitores en una red de distribución en función de los diferentes parámetros y configuraciones requeridas por el usuario.

6.2. CONSIDERACIONES BÁSICAS EN EL MODELADO DE LAS CARGAS

6.2.1. Tipo de carga

6.2.1.1. Flujo de carga

La pestaña Flujo de carga sirve para definir el Modelo de carga en función de la sensibilidad de tensión (que se puede definir como un modelo compuesto (ZIP) o como un Modelo exponencial), el Modelo de carga en función de la sensibilidad de la frecuencia y la Tensión de umbral bajo la cual todas las cargas se convierten en modelos de impedancia constante. [21]

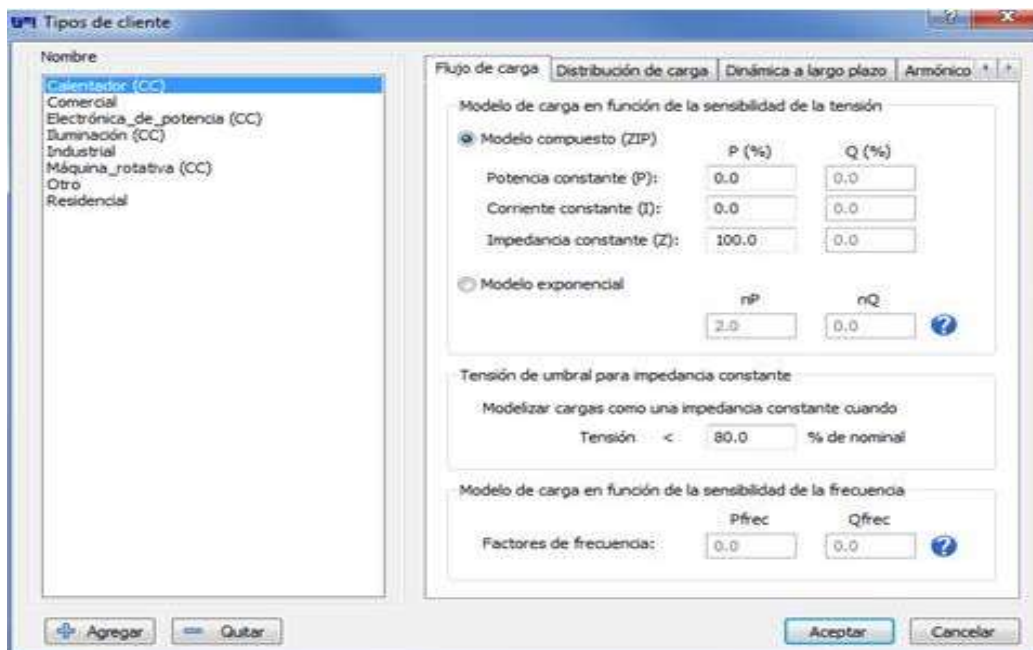


Figura 6.2.1: Ventana de Interfaz de CYMDIST.
Fuente: [21]

Los modelos de carga de sensibilidad de tensión se pueden definir de dos maneras:

- ✓ Modelo compuesto (ZIP).
- ✓ Modelo exponencial.

Potencia constante: es una típica representación de la carga industrial que contiene gran cantidad de motores. Este modelo es válido para pequeñas variaciones de tensión en un rango de variación entre 75% - 120% de la tensión nominal y se asume que la potencia permanece constante frente a la variación de

tensión, mientras que la corriente de la carga disminuye con el aumento en la tensión. [21]

Corriente constante: es una típica representación de la carga comercial, caracterizada por centros de negocios, edificios de oficinas, alumbrado y aires acondicionados. El modelo trabaja adecuadamente para rangos de voltaje entre 75 % - 120 % de la tensión nominal. [21]

Este modelo establece la condición que la carga mantenga la corriente constante a diferentes tensiones.

Impedancia constante: es una típica representación de la carga residencial caracterizada por elementos como resistencia, calentadores, alumbrado y carga reactiva pequeña como los motores de los electrodomésticos. Este modelo establece como condición que la impedancia de la carga permanece constante, es decir la potencia varía con el cuadrado de la variación de la tensión. [21]

Modelo compuesto	Le permite especificar la porción de la carga que es la potencia constante (P), la corriente constante (I) y la impedancia constante (Z). El total debe totalizar 100% para P y Q. La relación entre la potencia de salida útil y la tensión aplicada se puede expresar como: $P = P_o \times \left(\frac{V}{V_{base}} \right)^{nP} \quad Q = Q_o \times \left(\frac{V}{V_{base}} \right)^{nQ}$ Dónde: Po = Potencia activa nominal Qo = Potencia reactiva nominal
Modelo exponencial	Los componentes activos y reactivos de cualquier carga variarán con la tensión. Los exponentes nP y nQ determinan cómo las potencias activas y reactivas varían con la tensión de la barra o del nudo. Nota: • nP o nQ = 0.0 significa carga de potencia constante. • nP o nQ = 1.0 significa carga de corriente constante. • nP o nQ = 2.0 significa carga de impedancia constante.
Modelo de carga en función de la sensibilidad de la frecuencia	Los modelos se calculan del modo siguiente: $P = P_o \times \left(\frac{V}{V_{base}} \right)^{nP} \cdot \left(1 - P_{freq} \left(\frac{F}{F_{base}} - 1 \right) \right)$ $Q = Q_o \times \left(\frac{V}{V_{base}} \right)^{nQ} \cdot \left(1 - Q_{freq} \left(\frac{F}{F_{base}} - 1 \right) \right)$

El parámetro Tensión de umbral se usa principalmente como parámetro matemático que ayuda a que los sistemas muy cargados converjan convirtiendo todas las cargas cuya tensión cae bajo el límite especificado de impedancia constante. Para evitar la conversión inesperada de los modelos de carga durante la simulación, se recomienda dar a (Vz) un valor bajo (<=80%). [21]

6.2.2. Tipo de actividad

6.2.2.1. Tipos de cliente

Este comando permite definir y administrar los tipos y categorías de clientes. Las cuatro categorías: Residencial, Comercial, Industrial y Otras conforman las clases de base y como tal no pueden ser eliminadas. Pulse el botón Nuevo para crear nuevas clases que se agregarán a esta lista. [21]

También se puede acceder a esta función pulsando el botón Tipos de cliente que se encuentra en la barra de herramientas Modelo de carga. [21]

6.3. COMPENSACIÓN DE LA POTENCIA REACTIVA EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN UTILIZANDO EL MODULO “UBICACIÓN ÓPTIMA DE CONDENSADORES” DEL CYMDIST

6.3.1. Análisis de la variación de potencia reactiva en el alimentador a compensar

Determinar los kVAr mínimo y máximo a compensar, así también para evaluar la variabilidad en un intervalo de tiempo determinado.

- ✓ Con los kVAr mínimo se puede dimensionar el/los bancos de capacitores fijos y de la diferencia entre los kVAr máximo y mínimo es posible dimensionar el/los bancos de capacitores variables o automáticos.
- ✓ Con la determinación de la variación de la potencia reactiva se puede diseñar del sistema de compensación reactiva.

6.3.2. Evaluación de alternativas para la corrección del factor de potencia

Son definidos los objetivos de la compensación reactiva, que básicamente son: control de tensión o reducción máxima de pérdidas, en base a los resultados arrojados por el estudio de distribución y flujo de carga.

6.3.3. Diseño del sistema de compensación reactiva

Es realizado mediante el análisis de variabilidad de los kVAr, es decir si este valor en el alimentador analizado no presentan grandes variaciones, se plantean soluciones con bancos de capacitores fijos, generalmente de capacidad para atender la demanda leve o media; y si la variación de los kVAr se torna importante, entonces se plantean soluciones con bancos variables o una

combinación de bancos fijos y bancos automáticos, estos últimos dimensionados para cubrir la diferencia entre los kVAr máximo y medio/leve dependiendo del criterio adoptado para dimensionamiento de los bancos fijos.

La cantidad depende del trazado del alimentador y los centros de cargas atendidas por el mismo. Cuando hay varios centros de cargas con problemas de baja tensión o factor de potencia bajo, conviene realizar la compensación mediante varios bancos de capacitores de menor capacidad y no con un solo banco de mayor capacidad.

Si se tiene el caso de densidad de carga alta al final del alimentador conviene realizar con un solo banco, siempre y cuando que los kVAr presente no tengan variabilidad importante, para ese caso es posible llegar a una solución óptima con una combinación de un banco fijo y otro automático, o en su defecto con un solo banco variable.

Generalmente los bancos automáticos se instalan a una distancia menor de la fuente (Estación) que los bancos fijos.

6.3.4. Utilización del módulo “Ubicación Óptima de Condensadores” del

CYMDIST

Los datos necesarios, para la realización del estudio son citados a continuación:

a) Transformador de Potencia: V, MVA, FP, kW, kVAr

En esta etapa del estudio se determina la factibilidad de la compensación distribuida, ya que generalmente en las barras de 23 kV ya se cuenta con una compensación concentrada. Este análisis se realiza para evitar una posible sobrecompensación del transformador y/o de la línea de transmisión afectada.

Es deseable siempre que se realice primero la compensación distribuida en las líneas troncales de distribución, por los beneficios para el sistema (aumento de tensión y reducción de pérdidas) y simplicidad de la técnica, y después la compensación en barra quedando reducidos la potencia nominal de los mismos, ya que serán dimensionadas para atender posibles variaciones bruscas de potencia reactiva en las líneas de distribución y/o los requerimientos de la línea de transmisión afectada.

b) Alimentador: I, V, MVA, FP, kW, kVAr

Configuración base: límites, RT's instalados (corriente nominal, conexasión, distancia de la fuente, marca), BC's (potencia nominal, distancia de la fuente, estado: conexasión o desconexasión), conductores (sección, distancia recorrido, monofásico o trifásico, anillado), corrección de errores (transformadores desconexasión, tramos monofásicos y trifásicos).

Verificar si la potencia total instalada no es menor a los valores de la potencia total a ser distribuida en la simulación, para asegurarse la convergencia de la simulación (distribución y flujo de carga).

En caso de no disponer de las corrientes máximas por fases del alimentador, se realiza una estimación de los mismos, luego se verifica la correspondencia entre las fases (según el txt del alimentador y las corrientes por fases). Una forma de revisión rápida de la correspondencia es verificando los kVA instalados en las distintas fases.

Bloquear las cargas con potencias nominales iguales y mayores a 400 kVA, con la ayuda del sistema OPEN/SGC.

Realizado y verificado los puntos anteriores citados, se ejecutan la distribución y flujo de carga, obteniendo de esta forma las condiciones anormales del alimentador en estudio.

Posterior a esto se realiza la evaluación de las alternativas de compensación reactiva y finalmente se diseña el sistema de compensación.

A continuación, se explican los pasos básicos para la utilización del módulo Ubicación Óptima de Condensadores del CYMDIST.

En un primer escenario se tiene un alimentador con deficiencias de tensión y bajo factor de potencia, a esto se suma la puesta en servicio de una nueva carga que empeora el perfil de tensión de ese alimentador.

Como alternativa de solución se hace un diseño del sistema de compensación de potencia reactiva, con lo cual se mejora el perfil de tensión y se reducen las pérdidas en el alimentador.

El análisis de ubicación de condensadores sugiere las ubicaciones óptimas para la instalación de las baterías de condensadores en un determinado alimentador de acuerdo al objetivo definido por el usuario, ya sea la *Minimización de pérdidas de kW* o el *Mejoramiento de la tensión del sistema*.

1 Primeros pasos

Este ejercicio consiste en conectar un nuevo cliente industrial al alimentador GA04 y en corregir los problemas de tensión introducidos utilizando el análisis de Ubicación de Condensadores

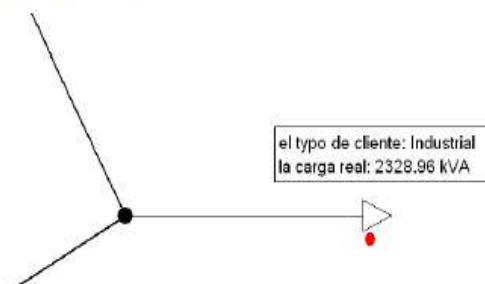
1. Cargue el fichero del estudio autónomo *UbicOptimCondens.sxst*.
2. Ejecute un análisis de flujo de carga en la red. Para esto, seleccione análisis de **Flujo de carga** en la lista desplegable de la barra de herramientas **Simulación** y presione el botón **Ejecutar simulación** para abrir el dialogo correspondiente. Presione el botón **Ejecutar**.



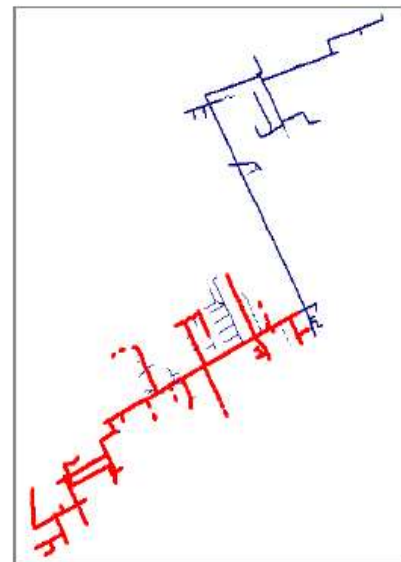
Verifique que no hayan condiciones anormales en la red pulsando el boton **Mostrar condiciones anormales**.

2 Adición de una Planta industrial

1. El cliente industrial (2.3 MVA) va a ser conectado al **nudo 14499**.
2. Agrande con el Zoom el **nudo 14499** para ver la carga industrial.
3. Conecte el cliente industrial, para ello haga clic derecho sobre la carga y seleccione el comando **Conectado** del menú contextual.



4. Ejecute el Análisis de flujo de carga en la red y haga clic en el botón **Mostrar condiciones anormales**. Tal como indicado por el color rojo, la adición de la carga industrial habrá provocado una caída de tensión substancial en el alimentador.

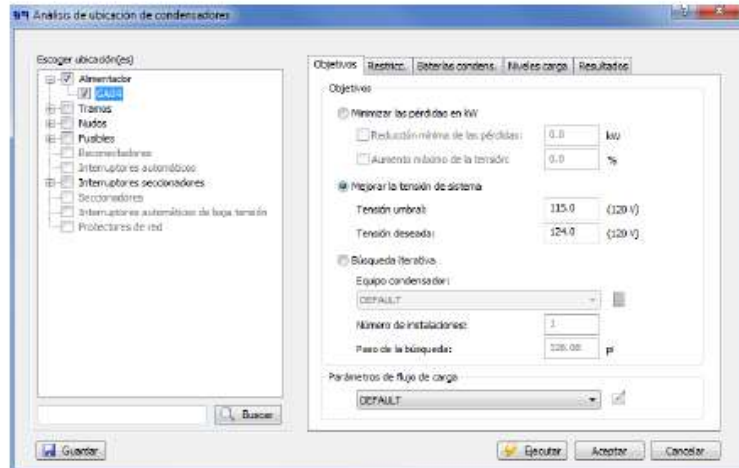


3 Análisis de Ubicación de condensadores

1. Para resolver el problema de baja tensión, ejecute un Análisis de ubicación de condensadores. Use el menú **Análisis > Ubicación de condensadores > Ejecutar** o seleccione **Ubicación de condensadores** en el menú desplegable de la barra de herramientas **Simulación** y presione el botón **Ejecutar** simulación.

2. Seleccione la lengüeta **Objetivos** y seleccione las siguientes opciones en el cuadro de diálogo:

- **Objetivo: Mejorar la tensión de sistema.**
- **Tensión umbral: 115 V.** Es la tensión debajo de la cual CYMDIST iniciará el proceso de añadir los Condensadores.
- **Tensión deseada: 124 V.**



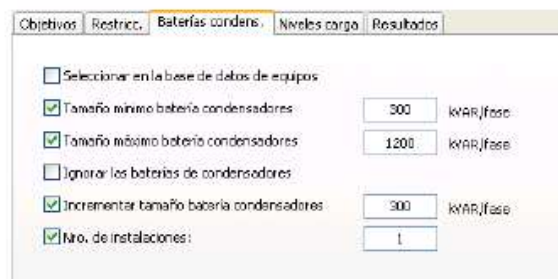
3. Presione en la lengüeta **Restricc.** y seleccione **Ignorar monofásicos** e **Ignorar bifásicos**, e **Ignorar tramos subterráneos**.



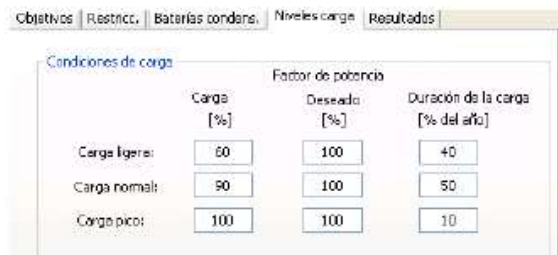
4. Pulse la lengüeta **Baterías condens.** para especificar el tamaño de los condensadores disponibles para el análisis. Seleccione:

- el **Tamaño mínimo batería condensadores** a 300 kvar/phase
- el **Tamaño máximo batería condensadores** a 1200 kvar/phase
- **Incrementar tamaño batería condensadores** a 300 kvar/phase

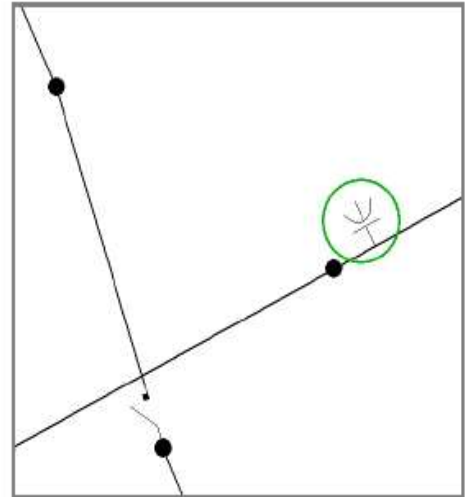
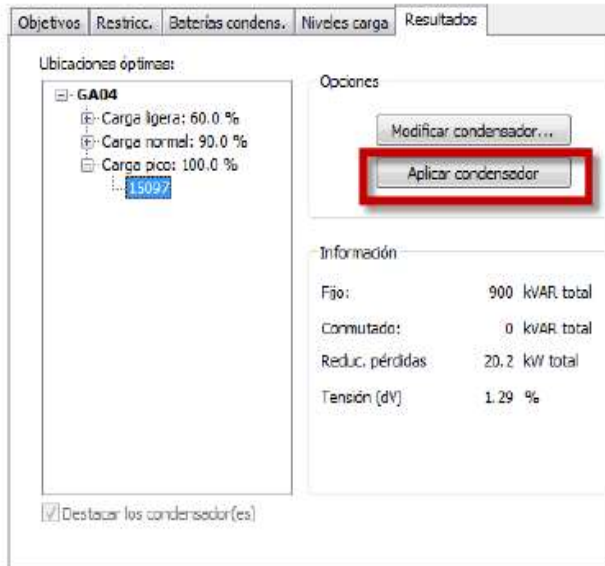
Aquí usted puede especificar el número de ubicaciones para instalar las baterías de condensadores. En nuestro caso, solo se permite una ubicación para instalar las baterías de condensadores



5. En la lengüeta **Niveles carga**, especifique los niveles de carga del alimentador como se indica. Esto determinará el tamaño de los condensadores fijos y conmutados requeridos para cada condición de carga del alimentador.



6. Pulse el botón **Ejecutar** para lanzar el análisis y que aparezcan los resultados en pantalla.
7. En la lengüeta **Resultados**, haga clic en el botón  para expandir la vista en árbol y así mostrar la ubicación óptima sugerida para la instalación de la batería de condensadores, es decir el tramo **15097**. Haciendo clic sobre el tramo **15097** mostrara el tamaño de las baterías (fijas o conmutadas) y la reducción de pérdidas de kW.
8. Seleccione **Carga pico: 100.0 %** y pulse el botón **Aplicar condensador** para instalar el condensador en el tramo **15097**. Presione el botón **Aceptar**.



9. Vuelva a ejecutar el Análisis de Flujo de carga, presione el botón **Mostrar condiciones anormales** y genere el reporte sumario de Flujo de carga. Como notará, la adición de la batería de condensadores eliminó todos los problemas de tensión en las fases A y B mientras redujo significativamente el problema de baja tensión en la fase C del alimentador. .

III. RESUMEN EJECUTIVO

CAPITULO 7

7.1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

El propósito de este trabajo es presentar una propuesta de alternativas para mejorar el factor de potencia de los alimentadores de la ES-CDO, el cual se desarrolló sobre la base de cálculos y simulaciones con el software Cymdist 8.2 rev2 propiedad de ANDE, que permitieron seleccionar la mejor alternativa técnica y económica para la compensación de potencia reactiva.

Se analizó las demandas de cada uno de los alimentadores de la ES-CDO. De esta manera el estudio de las cargas máxima consistió en dos escenarios, los cuales son:

En el primer escenario se realizó el análisis del estado actual de los alimentadores sin compensación, en condiciones de demanda máxima.

En el segundo escenario se realizó el análisis del estado con compensación, en condiciones de demanda máxima.

Por último, se realizó un análisis comparativo de las pérdidas en kW por explotación entre el estado actual sin compensación y el estado con compensación, que permitió un ahorro económico, disminuyendo las pérdidas en los alimentadores. También se describen las características principales y beneficios de los bancos de capacitores en las líneas de distribución.

7.2. MÉTODOS Y TÉCNICAS UTILIZADAS

Según la estructura y dimensión que implica este proyecto final de grado, es de carácter descriptivo, debido a que busca especificar propiedades y características de flujo de carga en los alimentadores de distribución. En cuanto a la estrategia general que se adopta para responder al problema planteado se obtiene un diseño de campo no experimental por el hecho de no manipular variables.

Finalmente, tiene un enfoque mixto puesto que los datos obtenidos son analizados en forma cuantitativa y cualitativa, con base a la simulación de valores

de los principales parámetros eléctricos, a través de estos realizar la evaluación del comportamiento del sistema considerado.

Para obtener los datos de este proyecto final de grado se adoptó la técnica de la observación libre o no estructurada, mediante visitas técnicas, notas, fotografías e instrumentos de medición para reunir la mayor cantidad de información posible.

Otro instrumento que se utilizó, es la entrevista a los profesionales del área, de acuerdo al número de participantes es la entrevista individual, según su estructura enmarcándose dentro de una entrevista mixta, obteniendo informaciones relevantes de la realidad de la institución.

Para el desarrollo y cumplimiento de los objetivos trazados, se llevaron a cabo las siguientes fases:

En primer lugar se realizó una nota dirigida al presidente de la empresa estatal Administración Nacional de Electricidad (ANDE), y a los distintos jefes de unidades afines a las actividades definidas en este Proyecto Final de Grado, para la realización de visitas técnicas y/o consultas, tales como: el Departamento de Transmisión Centro (GT/TCE), Departamento de Operación de Distribución Zona Centro (DR/DRC), ambas unidades asentadas en la ciudad de Coronel Oviedo, así también al Departamento de Estudios y Normalización de Operación y Mantenimiento de Distribución (DD/NOM) y el Departamento de Estudios de Generación y Trasmisión (DP/DEG), asentadas en la ciudad de Asunción.

Al mismo tiempo, los datos necesarios para la realización de las distintas simulaciones de los alimentadores de 23 kV emergentes de la ES-CDO, fueron posibles mediante el acceso a los instrumentos de medición instalados en las cabeceras de cada uno de los alimentadores operativos, así como las informaciones referentes a la configuración base y características topológicas de los alimentadores.

Asimismo, las informaciones revisadas referente a las técnicas de compensación de potencia reactiva en líneas de distribución, y conforme a la disponibilidad en el mercado y las utilizadas por la ANDE, diferentes catálogos de principales fabricantes, investigaciones científicas, planes pilotos e implementaciones de nuevas técnicas.

Reunido los datos requeridos, se procedió a la simulación de los alimentadores en estudio, el cual básicamente consistió en el análisis de Distribución de Carga y Flujo de Carga de los mismos, mediante el software CYMDIST 8.2 Rev. 2; determinando de esta forma principalmente el flujo de potencia reactiva a través de los mismos, para el diseño posterior de la técnica de compensación de potencia reactiva, así como la alternativa tecnológica más conveniente a aplicar.

Posterior a la definición de los arreglos más convenientes, se cuantifica los costos-beneficios de la implementación.

Finalmente, para la evaluación técnica económica de este proyecto final de grado se utilizó el método de Costo-Beneficio, en donde fueron identificados los costos y beneficios asociados a los arreglos propuestos. Para ello, se utilizó el VPN y el TIR como herramientas financieras.

7.3. JUSTIFICACIÓN

La energía eléctrica es fundamental para el desarrollo de una región o país, sin ella se dificulta el avance socioeconómico y tecnológico, por lo que es importante su utilización en forma sustentable y eficiente. Una forma de utilización eficiente de la energía eléctrica es mediante la aplicación de técnicas que disminuyan las pérdidas eléctricas, y una de esas técnicas es la compensación de potencia reactiva en las redes de Media Tensión ya que las pérdidas eléctricas en el Sistema de Distribución son reducidas, aparte de obtener los beneficios de mayor calidad y confiabilidad del suministro de energía eléctrica.

En ese sentido, la ANDE es la empresa responsable de administrar y gerenciar todo el Sistema Interconectado Nacional (SIN) del país, velando por la calidad, continuidad y la eficiencia en el suministro de energía eléctrica, por lo que el estudio abordado en este Proyecto Final de Grado resulta de vital importancia para cumplir con aquella finalidad.

7.4. FINALIDAD DEL PROYECTO

El motivo por el cual se lleva a cabo este proyecto final de grado es la de optimizar la utilización de la energía eléctrica, específicamente mediante la compensación de potencia reactiva, evaluando las distintas alternativas tecnológicas aplicables en los alimentadores de 23 kV de la ES-CDO.

De modo que pretende:

- Reducir las pérdidas en las redes de Media Tensión de la zona de influencia de la ES-CDO.
- Mejorar la calidad del servicio de suministro de energía eléctrica, por su incidencia en los perfiles de tensión del alimentador.
- Aumentar la disponibilidad de potencia activa en los alimentadores en estudio, así como del transformador de potencia asociado.
- Mejorar los niveles de tensión en la zona de estudio.
- Mejorar el factor de potencia.

7.5. METAS

- Liberar una cierta capacidad de la potencia aparente del sistema.
- Reducir las pérdidas de los alimentadores, principalmente por efecto joule.
- Elevar los niveles de tensión y, por lo tanto, mejorar la regulación de tensión de los alimentadores en estudio.

7.6. OBJETIVOS

7.6.1. Objetivo general

Proponer alternativas para mejorar la eficiencia en la utilización de la energía eléctrica, mediante la compensación de potencia reactiva de los alimentadores de 23 kV de la ES-CDO, los cuales abastecen de energía eléctrica principalmente a los usuarios del distrito de Dr. Juan Eulogio Estigarribia, Departamento de Caaguazú.

7.6.2. Objetivos específicos

- Releva datos para la realización del análisis de flujo de carga de los alimentadores de 23 kV de la ES-CDO.
- Determinar los diferentes diseños y alternativas tecnológicas de compensación de potencia reactiva en alimentadores de 23 kV aplicables al caso de estudio.
- Realizar las simulaciones necesarias para la aplicación de los diferentes diseños de compensación de potencia reactiva en los alimentadores de la ES-CDO.

- Evaluar técnica y económicamente las distintas alternativas aplicadas.

7.7. BENEFICIARIOS

Mediante la aplicación de las recomendaciones propuestas en este proyecto final de grado será beneficiada en forma directa la empresa ANDE, disminuyendo los niveles de pérdidas técnicas en sus líneas de distribución en la zona de estudio, aumentando la cargabilidad de los mismos, elevando sus niveles de tensión, y consecuentemente beneficiando también a los usuarios de las zonas que accederán a un servicio de energía eléctrica de mayor calidad.

7.8. PRODUCTO

El principal producto de este proyecto final de grado es, la de determinar los diseños o alternativas tecnológicas de compensación de potencia reactiva más adecuada, aplicables a los alimentadores de 23 kV de la ES-CDO.

7.9. LOCALIZACIÓN FÍSICA Y COBERTURA ESPACIAL

La ES-CDO está ubicado en el distrito de Dr. Juan Eulogio Estigarribia del Departamento de Caaguazú y los alimentadores emergentes de esa Estación abastecen de energía eléctrica principalmente a las localidades del distrito de Dr. Juan Eulogio Estigarribia, José Domingo Ocampos, Nueva Toledo, Tembiapora, Raúl Arsenio Oviedo.

7.10. ESPECIFICACIONES DE ACTIVIDADES Y TAREAS REALIZADAS

- Fueron realizados visitas a la ES-CDO para la configuración de multimedidores y extracción de los datos de parámetros eléctricos, mediante el acceso a los instrumentos de medición instalados en las cabeceras de cada uno de los alimentadores de 23 kV. Los datos extraídos corresponden a los meses de: diciembre del año 2018, y enero y febrero del año 2019.
- Obtención de datos referentes al trazado de la red de media tensión, cargas instaladas, equipos de maniobras y protección, equipos de regulación de tensión de los alimentadores, en formato txt. Estos datos fueron proveídos por el Departamento de Operación de Distribución Regional Centro (DR/DRC) de la ANDE.

- Los datos obtenidos fueron procesados mediante una simulación de distribución y flujo de carga de los alimentadores de 23 kV en estudio con el software Cymdist. Este software fue adquirido por la ANDE con el propósito de realizar estudios eléctricos a los alimentadores de 23 kV del Sistema Interconectado.
- Las simulaciones fueron realizadas mediante la orientación de profesionales de las unidades de los Departamentos: de Estudios y Normalización de Operación y Mantenimiento (DD/NOM) y de Estudios y Normalización del Sistema de Distribución (DD/NSD) de la ANDE.
- Evaluación económica mediante el método costo-beneficio.
- Presentación del Informe Final.

7.11. FACTIBILIDAD TÉCNICA

La solución técnicamente factible a la que se ha llegado consiste en mejorar el perfil de reactivos en los alimentadores de 23 kV de la ES-CDO, logrando a la vez una mejora del perfil de tensión y una reducción importante de pérdidas en kW, mediante la instalación combinada de bancos de capacitores fijos y automáticos de 300, 600 y 900 kVAr.

Con la aplicación de la solución propuesta se logró:

- Reducción de las pérdidas técnicas en los alimentadores, por efectos joule en 17,1%.
- Mejora de los perfiles de tensión de los alimentadores, llevándola del 0,88 pu al 1,02 pu aproximadamente.
- Aumento de la cargabilidad de los alimentadores en 8,1%.
- Mayor confiabilidad y calidad del sistema de distribución en la zona de influencia de la ES-CDO.
- Mejora del factor de potencia de los alimentadores de distribución, llevándola del 0,91 a un valor mayor de 0,96.

7.12. FACTIBILIDAD ECONÓMICA

A continuación, se elaborará el flujo de caja para realizar la evaluación económica de la solución propuesta, para lo cual se construirán los componentes del flujo de beneficios y costos del proyecto.

7.13. BENEFICIOS

7.13.1. Ahorro en términos de Energía

La implementación del proyecto redituará en una reducción del flujo de la potencia aparente a través de los alimentadores de la ES-CDO, este hecho permitirá el mejor aprovechamiento del sistema eléctrico de distribución en la zona de estudio, lo que implica una reducción de energía activa demandada a la Estación, lo que posibilitará la venta de ese ahorro a nuevos clientes y/o contrato de una menor potencia/energía a las principales fuentes de generación de energía eléctrica (Itaipú, Yacyreta) por parte de la concesionaria ANDE. En la tabla 7.13.1, se muestra los beneficios de la implementación de la solución propuesta. La memoria de cálculo se encuentra en el Apéndice C.

Alimentador	kW	kW-h/año	\$/año
CDO 03	920,83	3.803.400,29	119.046,43
CDO 04	97,40	402.301,39	12.592,03
CDO 05	17,39	71.827,73	2.248,21
CDO 07	94,42	389.992,78	12.206,77
CDO 09	12,84	53.034,39	1.659,98
CDO 10	28,40	117.303,49	3.671,60
Pérdidas totales	1.171,28	4.837.860,08	151.425,02

Tabla 7.13.1: Costo del ahorro anual en término de energía

7.13.2. Costos de implementación de los sistemas de compensación de potencia reactiva.

En la tabla 7.13.2, se muestra los costos de la implementación de la solución propuesta. La memoria de cálculo se encuentra en el Apéndice C.3.

Alimentador	Costo
CDO 03	88.772 USD
CDO 04	92.759 USD
CDO 05	87.634 USD
CDO 07	88.772 USD
CDO 09	6.269 USD
CDO 10	86.569 USD
Total:	450.775 USD

Tabla 7.13.2: Costo de implementación del sistema de compensación reactiva

Para el de mantenimiento anual de cada banco de capacitores se considera un costo de 11.677 USD, cuya memoria de cálculo se detallan en la tabla 8.12.17 del apéndice C1.

Costo de Mantenimiento	Total Gs	72.400.000
	Total USD	11.677

Tabla 7.13.3: Costo de mantenimiento

Por ultimo se considera la reposición de un banco de capacitores. Este valor representa los daños que podrían ocurrir en los capacitores a los cinco años de funcionamiento. La memoria de cálculo se detalla en la tabla 8.12.18 del apéndice C1.

Costo de Reposición	Total Gs	27.780.000
	Total USD	4.481

Tabla 7.13.4: Costo de reposición

7.14. EVALUACIÓN ECONÓMICA

7.14.1. Determinación del flujo de caja proyectada

Para la determinación del flujo de caja se tendrán en cuenta el costo total de la implementación del sistema de compensación y los ahorros por reducción de pérdidas, que representa la mejor alternativa adoptada. En la Tabla 7.14.1, se muestra los detalles de flujo de caja proyectada.

AÑO	INVERSIÓN	COSTO DE REPOSICIÓN	COSTO DE MANTENIMIENTO	TOTAL EGRESO	AHORRO POR IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO	FLUJO DE CAJA PROYECTADO
0	\$ 450.774,63			\$ -450.774,63		\$ -450.774,63
1	\$ -		\$ 11.677,00	\$ -11.677,00	\$ 151.425,02	\$ 139.748,02
2	\$ -		\$ 11.817,12	\$ -11.817,12	\$ 165.204,70	\$ 153.387,57
3	\$ -	\$ 4.481,00	\$ 11.958,93	\$ -16.439,93	\$ 178.984,37	\$ 162.544,44
4	\$ -		\$ 12.102,44	\$ -12.102,44	\$ 192.764,05	\$ 180.661,61
5	\$ -		\$ 12.247,67	\$ -12.247,67	\$ 206.543,73	\$ 194.296,06

Tabla 7.14.1: Flujo de caja proyectada

7.14.2. Determinación de la tasa interna de rendimiento (TIR)

La tasa interna de retorno es del 23 %. Este valor está por encima de la tasa de interés utilizada por el sistema bancario nacional, correspondiente al 12 % según informe anual de la política monetaria del BCP y estudios realizados por la Secretaria Nacional de Inversión Pública (SNIP) con lo que el proyecto es viable para un horizonte de 5 años.

7.14.3. Determinación del valor presente neto (VPN)

El valor del VPN es de 137.038,47 USD para un periodo de 5 años. Este valor indica que la Compensación de reactivos implementando el método de Compensación Distribuida resultará económicamente viable. En la Tabla 7.14.2, se muestra los detalles del valor presente neto.

AÑO	INVERSIÓN	COSTO DE REPOSICIÓN	COSTO DE MANTENIMIENTO	TOTAL EGRESO	AHORRO POR IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO	FLUJO DE CAJA PROYECTADO	VPN ACUMULADO	HISTORIAL VPN
0	\$ 450.774,63			\$ -450.774,63		\$ -450.774,63		
1	\$ -		\$ 11.677,00	\$ -11.677,00	\$ 151.425,02	\$ 139.748,02	\$ 124.775,02	\$ -325.999,61
2	\$ -		\$ 11.817,12	\$ -11.817,12	\$ 165.204,70	\$ 153.387,57	\$ 122.279,63	\$ -203.719,98
3	\$ -	\$ 4.481,00	\$ 11.958,93	\$ -16.439,93	\$ 178.984,37	\$ 162.544,44	\$ 115.695,93	\$ -88.024,05
4	\$ -		\$ 12.102,44	\$ -12.102,44	\$ 192.764,05	\$ 180.661,61	\$ 114.813,72	\$ 26.789,67
5	\$ -		\$ 12.247,67	\$ -12.247,67	\$ 206.543,73	\$ 194.296,06	\$ 110.248,80	\$ 137.038,47

Tabla 7.14.2: Valor Presente Neto

7.14.4. Determinación del periodo de recuperación de la inversión (PRI)

La recuperación de la inversión se conseguirá en un periodo de 4 años. En la Tabla 7.14.2, se muestra como el VPN es positivo a partir del cuarto año posterior a la implementación del proyecto.

IV. INGENIERÍA DE DISEÑO

CAPÍTULO 8

8.1. DATOS GENERALES DE LA ESTACIÓN DE CAMPO DOS.

8.1.1. Área de Influencia.

La ES-CDO suministra la energía eléctrica a los distritos de: Raúl Arsenio Oviedo, Paso Yobai, Tres de Febrero, J. E. Estigarribia, Juan M. Fruto, Yhu, José Domingo Ocampo y Repatriación.



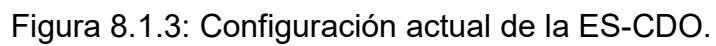
Figura 8.1.1: Ubicación de la ES-CDO.



Foto 1. Vista parcial del patio de 220kV

Foto 2. Casa de control

Figura 8.1.2: Documentación fotográfica de la ES-CDO.



Pedro Luis
Segovia Villaverde

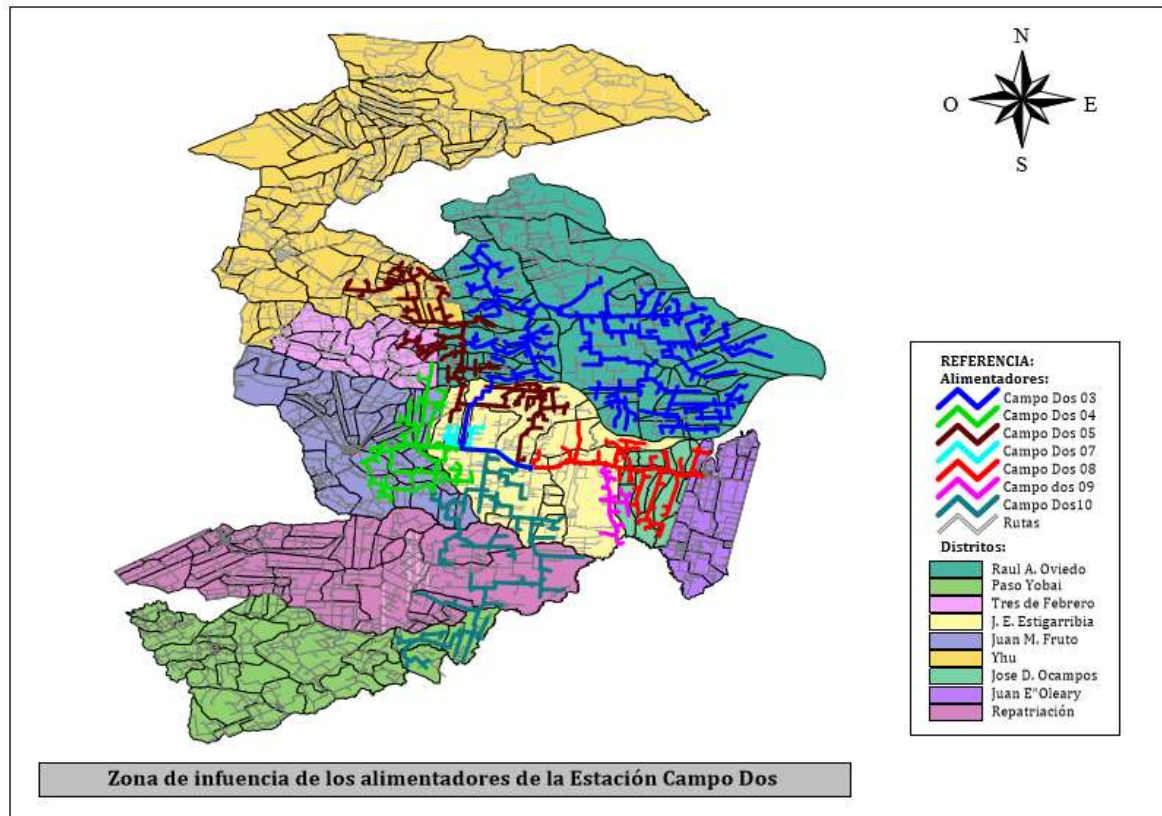


Figura 8.1.4: Área de influencia de la ES-CDO.

En la Figura 8.1.4, se muestra el área de influencia de los alimentadores de la ES-CDO.

8.1.2. Estación Campo Dos (ES-CDO).

Es una Estación transformadora en derivación de un sistema radial conformado por la línea de Transmisión Acaray 1 (LT-ACY 1). Esta línea conecta a las SS.EE. Kilómetro 30 (SE - K30) y Coronel Oviedo (ES - COV), la disposición de los mismos se muestra en el esquema unifilar de la Figura 8.1.5.

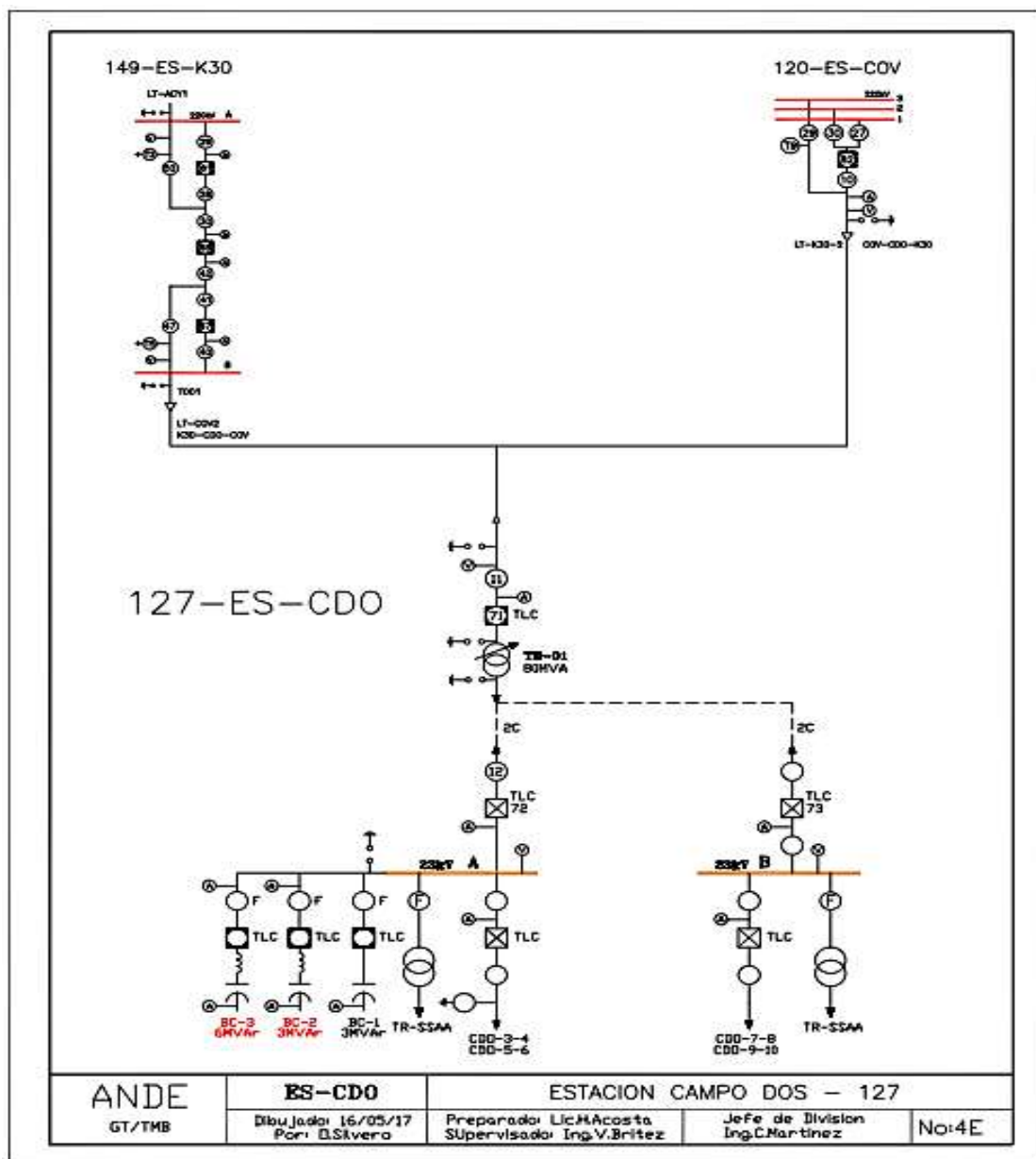


Figura 8.1.5: Esquema Unifilar de la ES-CDO.

La ES-CDO, cuenta con tensiones nominales de 220 kV en alta tensión y 23 kV en media tensión, con una potencia instalada de 80 MVA y una demanda media de 55 MW y máxima de 61 MW según registros obtenidos. Actualmente está formado con una configuración de conexión de barra simples e independientes del cual parten 8 alimentadores de 23 kV, de los cuales 1 alimentador es de tipo exclusivo, motivo por el cual no será analizado en el presente trabajo y las posiciones de la barra de lado de 23 kV dentro de la Estación. En efecto se puede apreciar en el esquema unifilar de la Figura 8.1.5.

La barra A: tiene actualmente 6 posiciones de salidas de alimentadores: CDO 01, CDO 02, CDO 03, CDO 04, CDO 05, CDO 06, según se aprecia en la Figura 8.1.6

La barra B: tiene actualmente 4 posiciones de salidas de alimentadores: CDO 07, CDO 08, CDO 09 y CDO 10 según se aprecia en la Figura 8.1.7.

A la barra de 23 kV está conectado tres bancos de capacitores (BC-1 de 3 MVAR, BC-2 de 3 MVAR y BC-3 de 6 MVAR) en paralelo a los alimentadores de media tensión (MT) y dos transformadores de servicios auxiliares de 200 kVA (TR-SS-AA1 y TR-SS-AA2) independientes para cada barra. De esta forma se busca atender la demanda creciente de la zona residencial, comercial e industrial de dicha ciudad y sus inmediaciones.

La Estación dispone de equipamientos básicos: de maniobras, de mediciones y de protecciones de patio en 220 kV, tales como interruptores de potencia, seccionadores de potencia, transformadores de corriente (TC) y transformadores de potencia (TP), al igual para el patio de 23 kV, del tipo exterior expuesto a la intemperie, comandado desde el tablero de mando ubicado en la actual casa de control. La disposición de todos estos equipos se aprecia en el diagrama unifilar de la Figura 8.1.5.

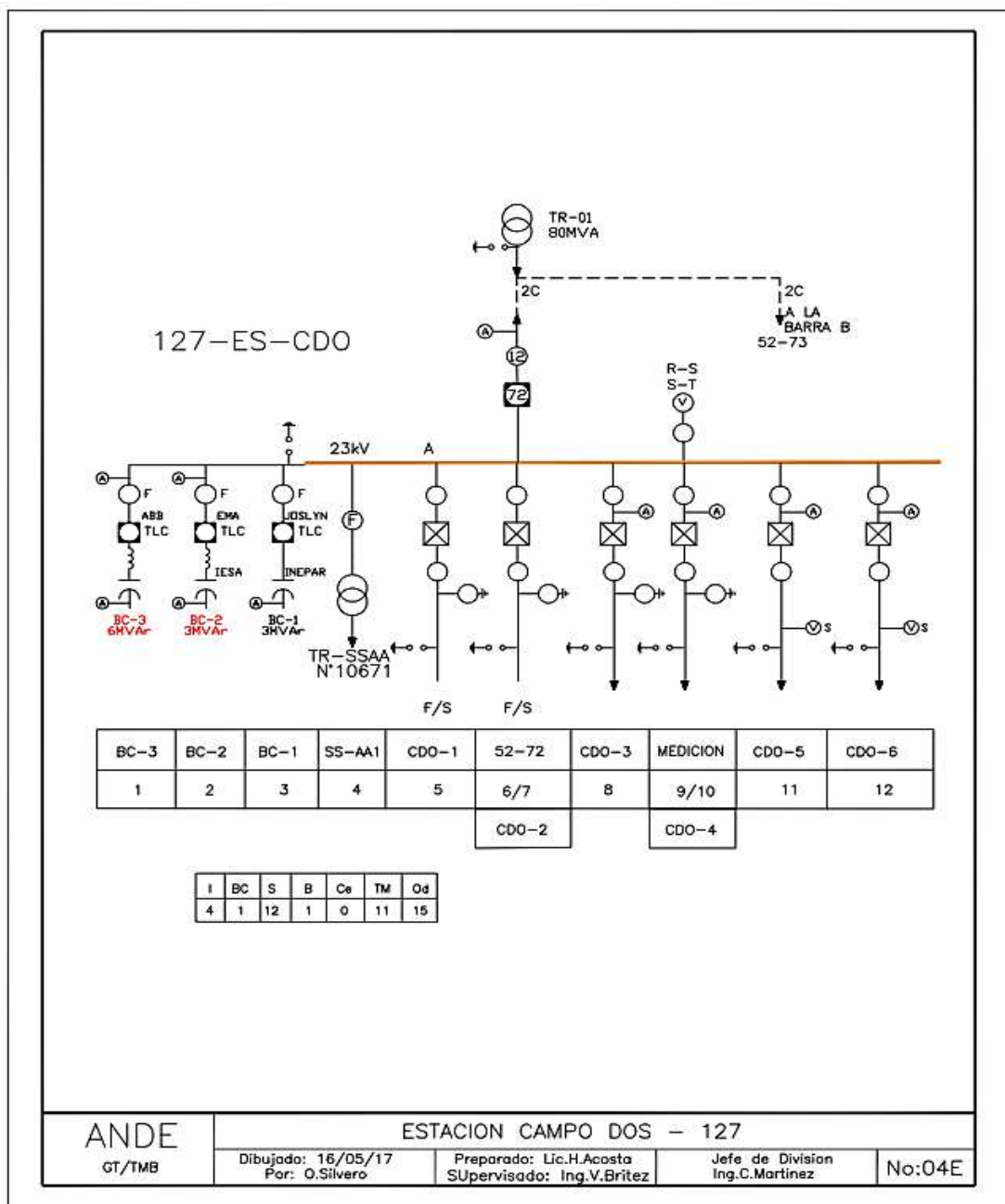


Figura 8.1.6: Esquema Unifilar de la ES-CDO. Barra A-23 KV

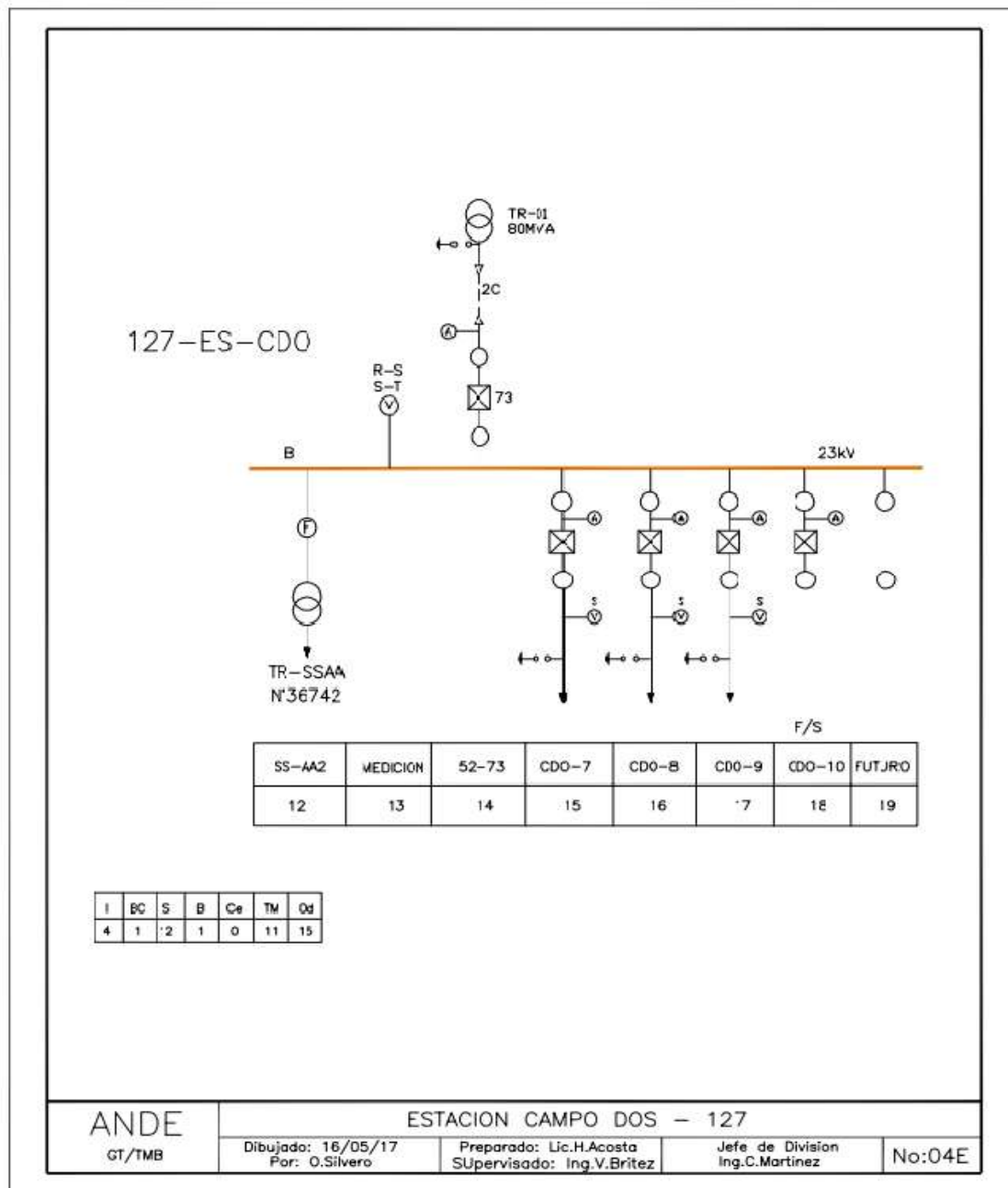


Figura 8.1.7: Esquema Unifilar de la ES-CDO. Barra B-23 KV

8.1.3. Alimentadores.

Los alimentadores de la ES-CDO, distribuyen la energía eléctrica desde el centro de distribución, en el nivel de 23 kV y entrega a los transformadores de distribución para su conversión final entregando la energía hasta los puntos de consumo en 380/220 V. (Disponen de equipos de protección, seccionamientos y transferencia de carga, en caso de mantenimientos o contingencias).

A continuación, se dará una explicación detallada de las características principales de cada uno de los alimentadores primarios.

8.1.3.1. Alimentador CDO 03.

El alimentador CDO 03, cuyo trazado inicia en la Estación y se expande por el distrito de Raúl Arsenio Oviedo. En la siguiente tabla podemos observar las características principales de este alimentador.

Descripción	Detalle		
Longitud de líneas MT. (km)	89 km		
Sección de conductor (mm ²)	24,1 km	41,4 km	23,5 km
	150 mm ²	70 mm ²	35 mm ²
Carga Instalada (kVA)	14.039 kVA		
Carga máxima registrada por fase (A)	I _A	I _B	I _C
	341	264	335
Factor de potencia por fase (FP)	0,91	0,91	0,91
Tipo de red	Desnudo		

Tabla 8.1.1: Características principales del alimentador CDO 03.

Fuente: Departamento de Operación de Distribución Zona Centro, ANDE.

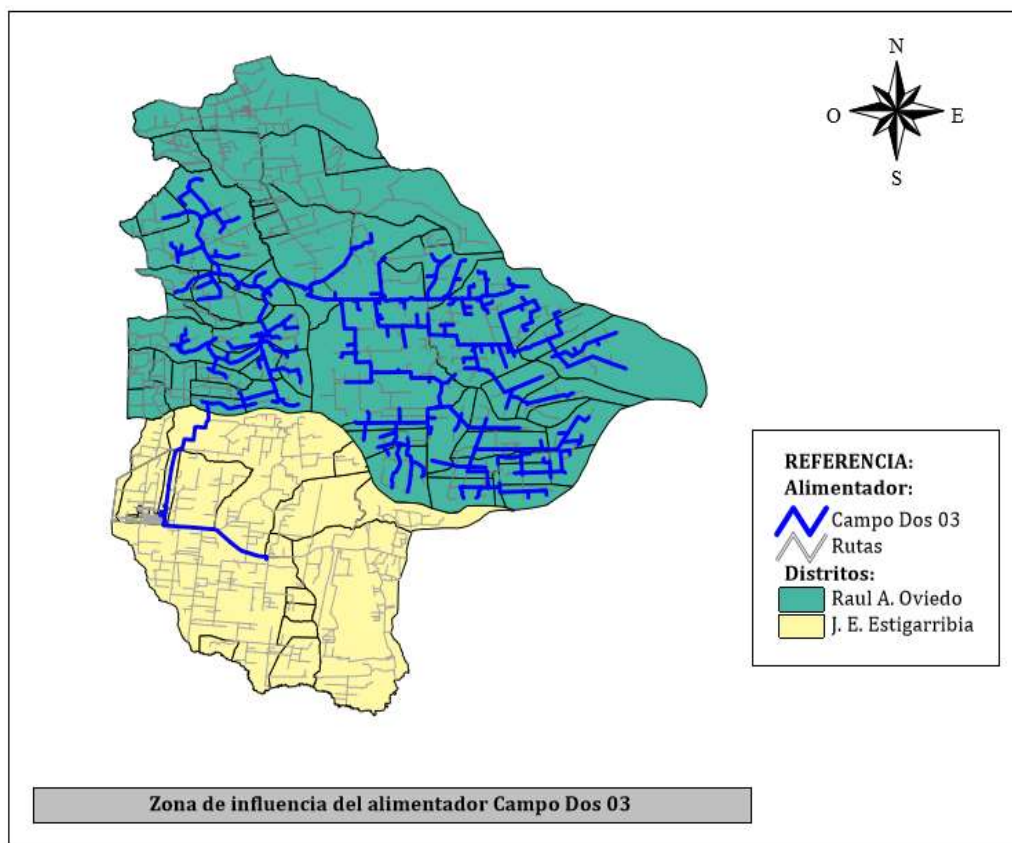


Figura 8.1.8: Área de influencia del alimentador CDO 03.
Fuente: Cartografía Geológico del Paraguay.

8.1.3.2. Alimentador CDO 04.

El alimentador CDO 04, cuyo trazado inicia en la Estación y se expande por los distritos de: Juan Manuel Frutos y Tres de febrero. En la siguiente tabla podemos observar las características principales de este alimentador.

Descripción	Detalle		
Longitud de líneas MT. (km)	25 km		
Sección de conductor (mm ²)	12,3 km	12,7 km	
	150 mm ²	70 mm ²	
Carga Instalada (kVA)	11.844 kVA		
Carga máxima registrada por fase (A)	I _A	I _B	I _C
	283	282	308
Factor de Potencia por fase (FP)	0,94	0,94	0,94
Tipo de red	Desnudo		

Tabla 8.1.2: Características principales del alimentador CDO 04.
Fuente: Departamento de Operación de Distribución Zona Centro, ANDE.

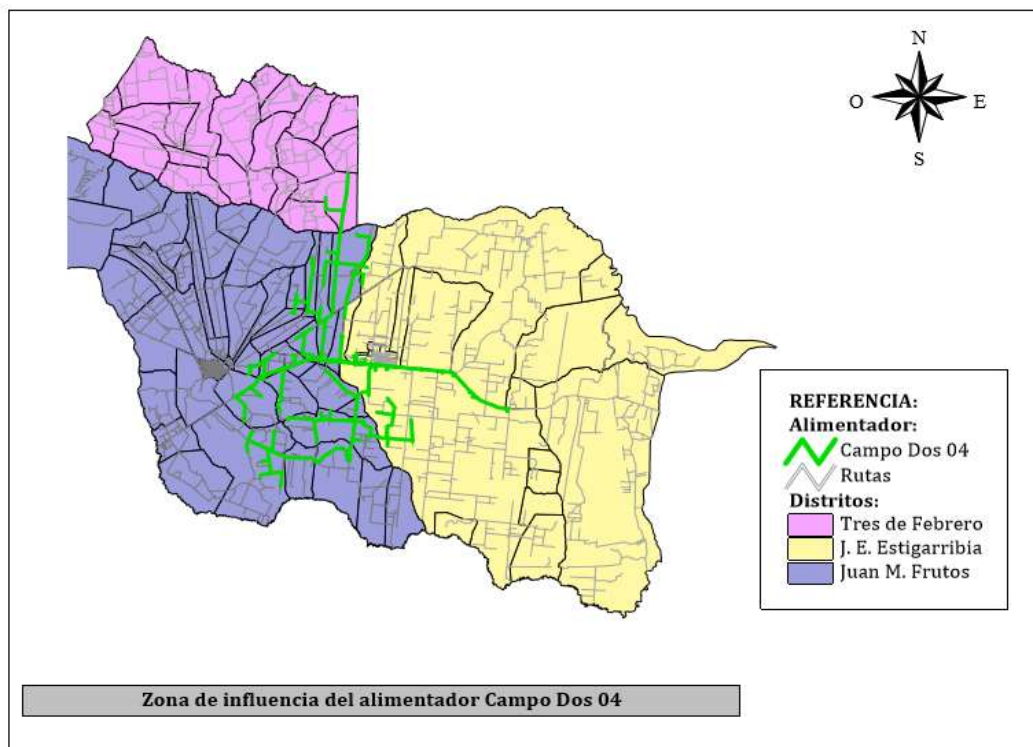


Figura 8.1.9: Área de influencia del alimentador CDO 04.
Fuente: Cartografía Geológico del Paraguay.

8.1.3.1. Alimentador CDO 05

El alimentador CDO 05, cuyo trazado inicia en la Estación y se expande por los distritos de: J.E. Estigarribia, Raúl Arsenio, Tres de febrero y Yhu. En la siguiente tabla podemos observar las características principales de este alimentador.

Descripción	Detalle		
Longitud de líneas MT. (km)	57.9 km		
Sección de conductor (mm ²)	43.4 km	14.5 km	
	70 mm ²	35 mm ²	
Carga Instalada (kVA)	11.782,33 kVA		
Carga máxima registrada por fase (A)	I _A	I _B	I _C
	151	147	142
Factor de Potencia por fase (FP)	0,92	0,92	0,92
Tipo de red	Desnudo		

Tabla 8.1.3: Características principales del alimentador CDO 05.
Fuente: Departamento de Operación de Distribución Zona Centro, ANDE.

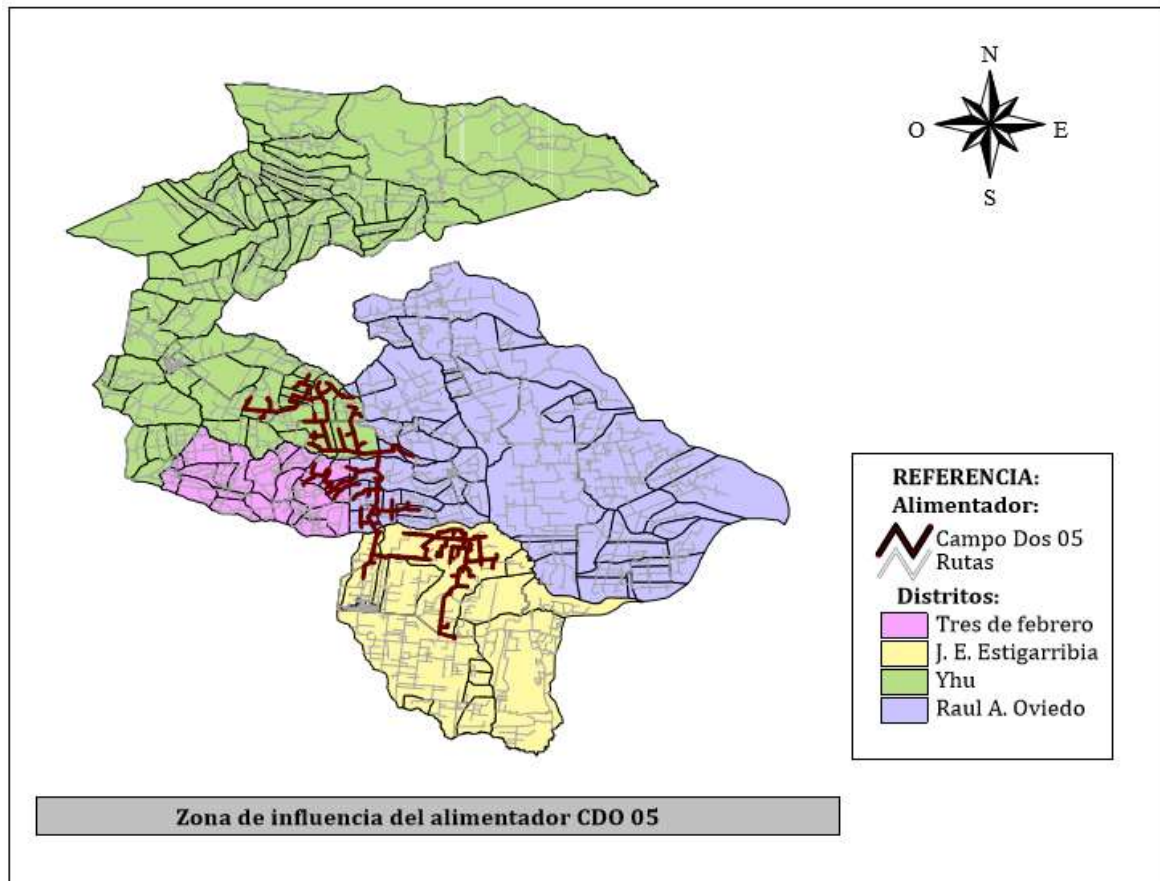


Figura 8.1.10: Área de influencia del alimentador CDO 05.
Fuente: Cartografía Geológico del Paraguay.

8.1.3.2. Alimentador CDO 07.

El alimentador CDO 07, cuyo trazado inicia en la Estación y se expande por el distrito de Juan Eulogio Estigarribia. En la siguiente tabla podemos observar las características principales de este alimentador.

Descripción	Detalle		
Longitud de líneas MT. (km)	16.2 km		
Sección de conductor (mm²)	12.4 km	3.8 km	
	150 mm²	35 mm²	
Carga Instalada (kVA)	10.477,5 kVA		
Carga máxima registrada por fase (A)	I _A	I _B	I _C
	318	342	344
Factor de Potencia por fase (FP)	0,93	0,93	0,93
Tipo de red	Desnudo		

Tabla 8.1.4: Características principales del alimentador CDO 07.
Fuente: Departamento de Operación de Distribución Zona Centro, ANDE.

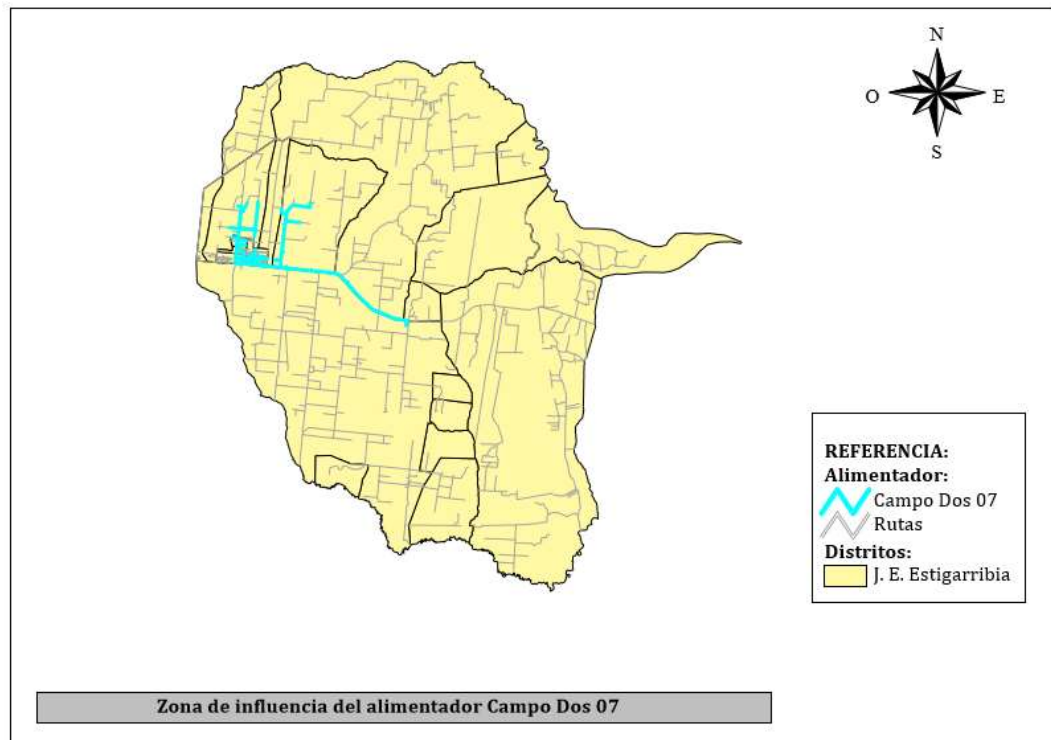


Figura 8.1.11: Área de influencia del alimentador CDO 07.
Fuente: Cartografía Geológica del Paraguay.

8.1.3.3. Alimentador CDO 08.

El alimentador CDO 08, cuyo trazado inicia en la Estación y se expande por los distritos de: Juan Eulogio Estigarribia y José Domingo Ocampos. En la siguiente tabla podemos observar las características principales de este alimentador.

Descripción	Detalle		
Longitud de líneas MT. (km)	23 km		
Sección de conductor (mm²)	10.6 km	12.4 km	
	150 mm²	70 mm²	
Carga Instalada (kVA)	7296, 34 kVA		
Carga máxima registrada por fase (A)	I _A	I _B	I _C
	71	90	65
Factor de Potencia por fase (FP)	0,93	0,93	0,93
Tipo de red	Desnudo		

Tabla 8.1.5: Características principales del alimentador CDO 08.
Fuente: Departamento de Operación de Distribución Zona Centro, ANDE.

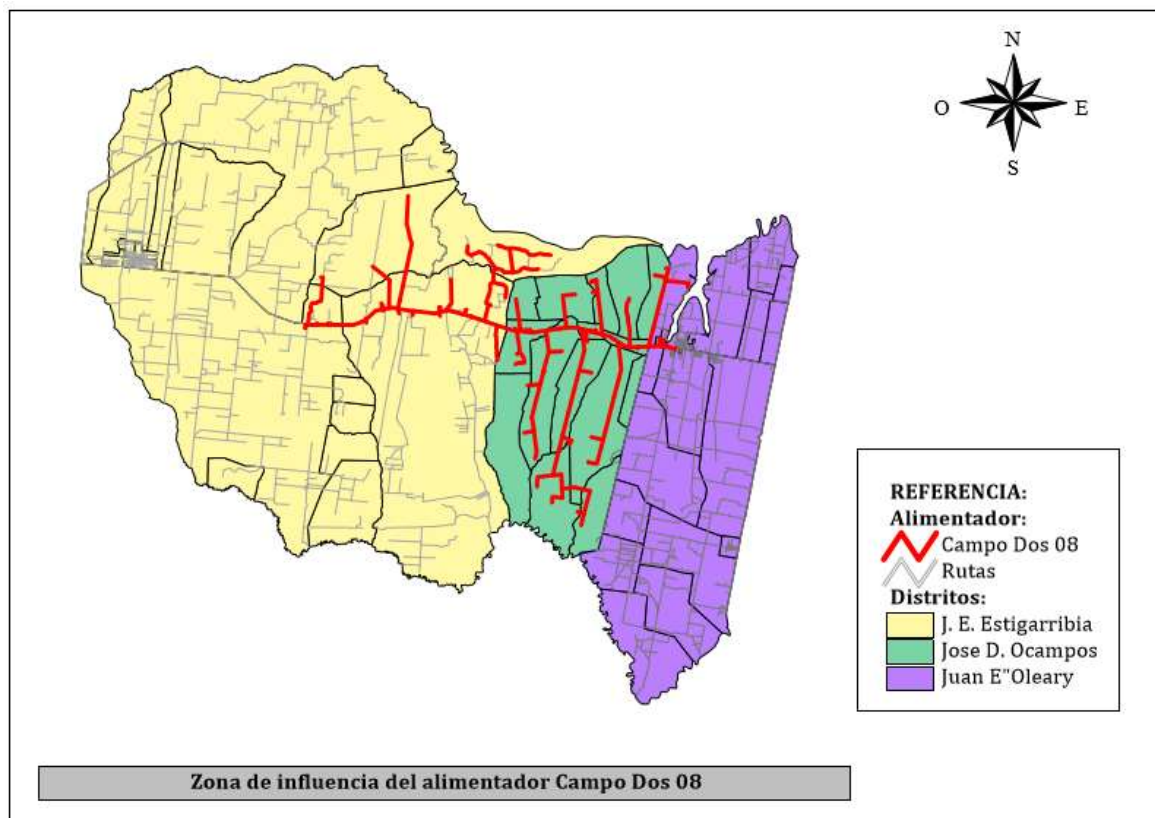


Figura 8.1.12: Área de influencia del alimentador CDO 08.
Fuente: Cartografía Geológica del Paraguay.

8.1.3.4. Alimentador CDO 09.

El alimentador CDO 09, cuyo trazado inicia en la Estación y se expande por los distritos de: Juan Eulogio Estigarribia y José Domingo Ocampos. En la siguiente tabla podemos observar las características principales de este alimentador.

Descripción	Detalle		
Longitud de líneas MT. (km)	27 km		
Sección de conductor (mm ²)	10.6 km	16.4 km	
	150 mm ²	70 mm ²	
Carga Instalada (kVA)	1725,5 kVA		
Carga máxima registrada por fase (A)	I _A	I _B	I _C
	72	73	75
Factor de Potencia por fase (FP)	0,93	0,93	0,93
Tipo de red	Desnudo		

Tabla 8.1.6: Características principales del alimentador CDO 09.
Fuente: Departamento de Operación de Distribución Zona Centro, ANDE.

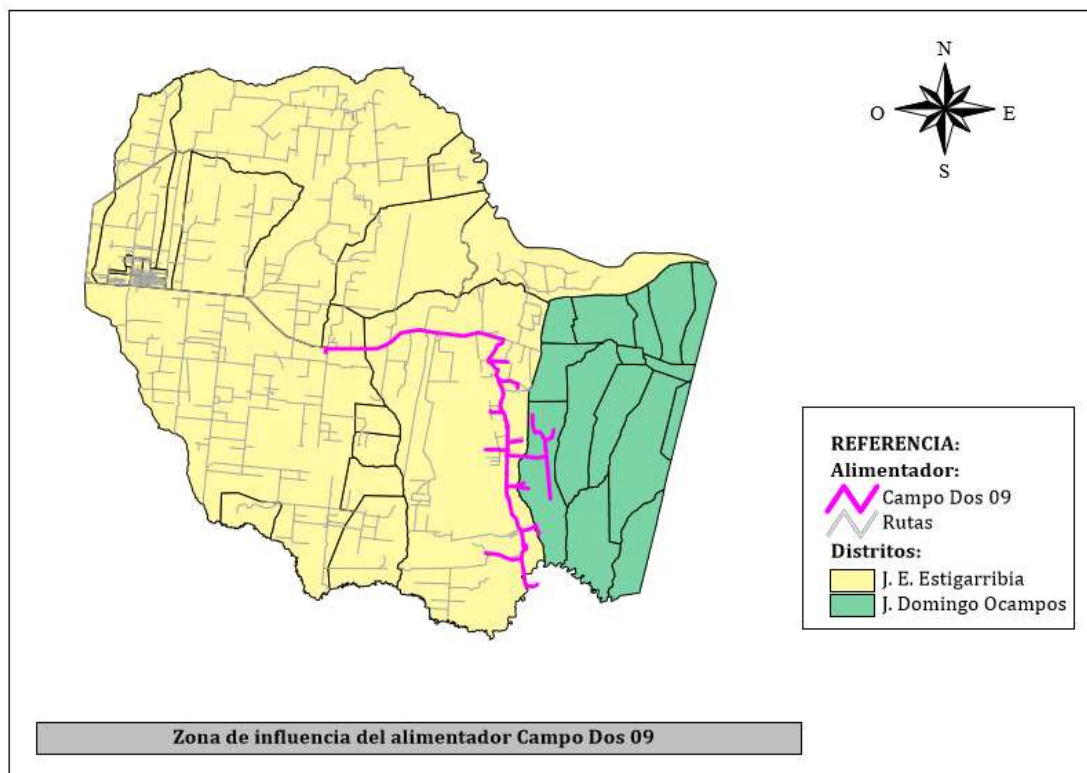


Figura 8.1.13: Área de influencia del alimentador CDO 09.
Fuente: Cartografía Geológica del Paraguay.

8.1.3.5. Alimentador CDO 10.

El alimentador CDO 10, cuyo trazado inicia en la Estación y se expande por los distritos de: Juan Eulogio Estigarribia, Juan Manuel Frutos, Repatriación y Paso Yobai. En la siguiente tabla podemos observar las características principales de este alimentador.

Descripción	Detalle		
Longitud de líneas MT. (km)	59 km		
Sección de conductor (mm ²)	8 km	11.1 km	39.9 km
	150 mm ²	70 mm ²	35 mm ²
Carga Instalada (kVA)	7933 kVA		
Carga máxima registrada por fase (A)	I _A	I _B	I _C
	181	178	175
Factor de Potencia por fase (FP)	0,94	0,94	0,94
Tipo de red	Desnudo		

Tabla 8.1.7: Características principales del alimentador CDO 10.
Fuente: Departamento de Operación de Distribución Zona Centro, ANDE.

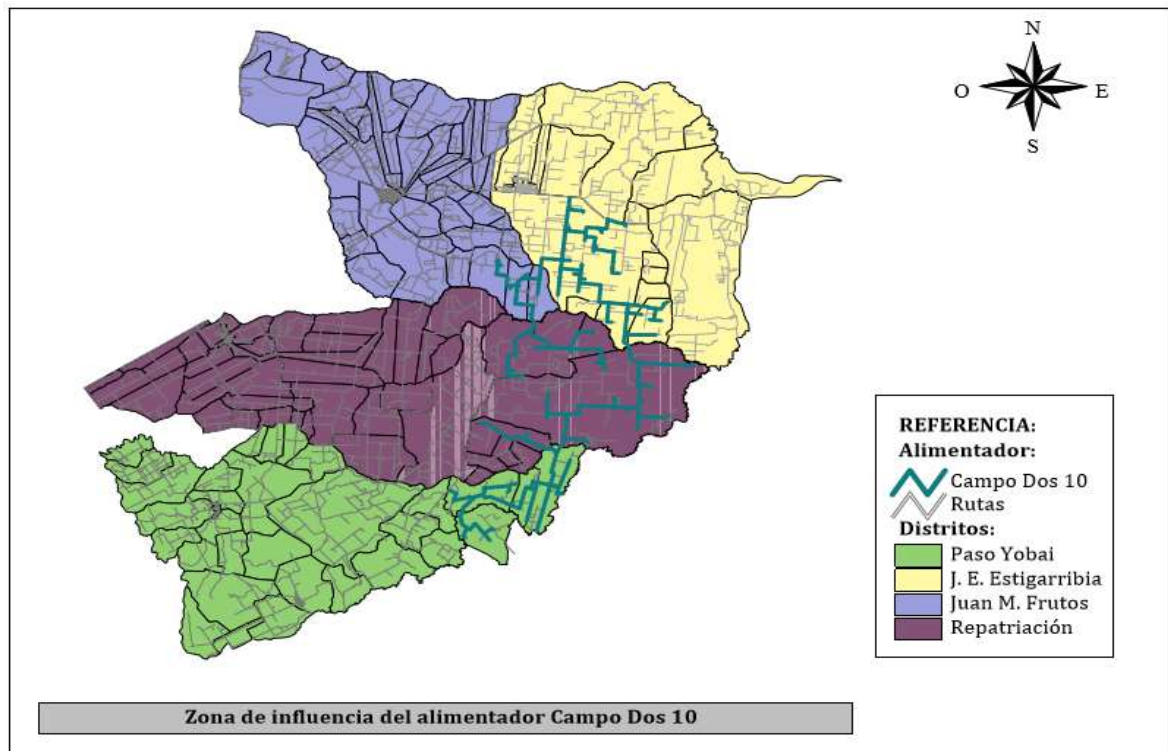


Figura 8.1.14: Área de influencia del alimentador CDO 10.
Fuente: Cartografía Geológico del Paraguay.

8.2. SITUACION ACTUAL DE COMPENSACIÓN DE REACTIVOS

En la actualidad los alimentadores en 23 kV de la ES-CDO cuenta con una compensación concentrada, consistente en bancos de capacitores (BC's) conectados a las barras de 23 kV, en una cantidad de tres BC's (BC-1 de 3 MVar, BC-2 de 3 MVar y BC-3 de 6 MVar, totalizándose de 12 MVar). Estos bancos de capacitores funcionan en una configuración en derivación con los alimentadores de media tensión (MT).

8.3. COMPENSACION DISTRIBUIDA – METODOLOGIA DE ANALISIS

A seguir se analizará un esquema de compensación distribuida como alternativa a la compensación concentrada existente. Para definir el tipo de compensación (compensación fija o automática) y la capacidad de los capacitores, se plantea la siguiente metodología:

- ✓ Análisis de la carga, donde se evalúa la potencia activa y reactiva que será atendida por la Estación, y su perfil de carga diario.

- ✓ Selección de alternativas de compensación en base a los resultados del análisis de la carga.
- ✓ Desarrollo de cada alternativa, con el objeto de determinar las pérdidas e inversiones asociadas.
- ✓ Finalmente, se selecciona la alternativa de menor costo total; inversión + pérdidas.

8.3.1. Análisis de carga

El objetivo es analizar el comportamiento de la carga en días típicos como: particulares, sábados y domingos (feriados están incluidos en los domingos).

Para el estudio de la carga se consideró tres aspectos importantes los cuales son:

- ✓ Variación del perfil de carga
- ✓ Variación del factor de potencia
- ✓ Factor de utilización

8.3.2. Análisis de la demanda

Se estudia la demanda de la ES-CDO, según como varían conforme a los datos descargados de los multimedidores referentes a la potencia activa y reactiva.

A continuación, se presentan las curvas de carga del transformador de potencia en un día particular con una demanda máxima, el cual se observa en la siguiente Figura 8.3.1.

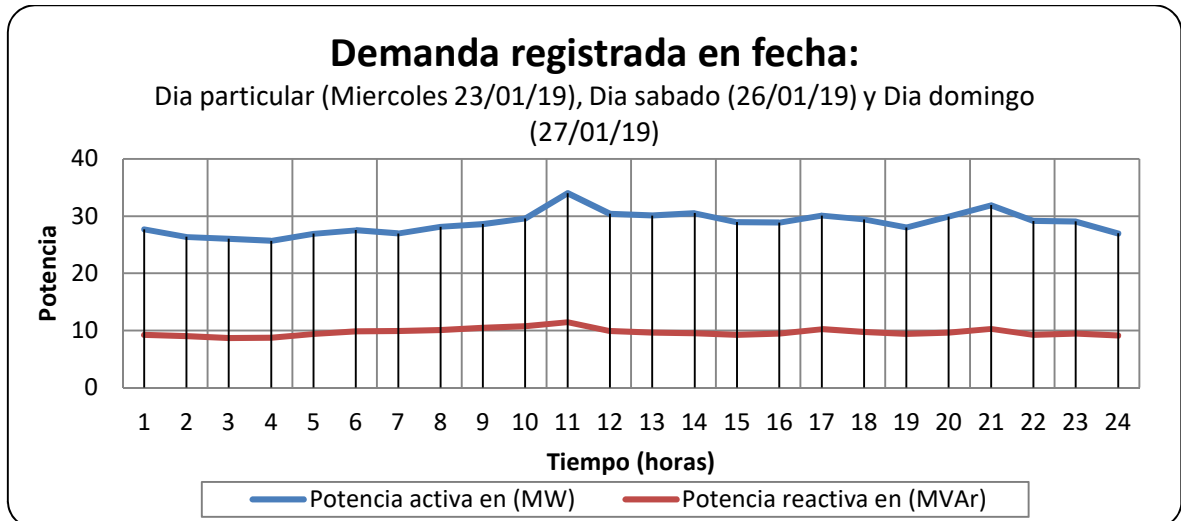


Figura 8.3.1: Comparación de la demanda de potencia activa y reactiva del transformador de potencia de la ES-CDO.

Fuente: Multimeditores ION 7330. ES-CDO, ANDE.

Para el diseño de un sistema de compensación de potencia reactiva desde el punto de vista operativo, es necesario conocer la variación de la demanda típica del sistema tal como se puede observar en la figura 8.3.1.

Según la ecuación 2.5, se obtuvo el valor del factor de carga que nos da 0,66 y aplicando la fórmula 2.7, obtenemos el valor de factor de pérdidas siendo de 0.47. El valor “X” de la fórmula de factor de pérdidas de la expresión 2.7, se le adoptó un valor de 0,15.

8.4. MODELADO DEL SISTEMA

Con la ayuda del software CYMDIST 8.2 Rev. 2, propiedad de ANDE, se efectuaron las respectivas simulaciones de: Distribución de carga, Flujo de carga y Ubicación óptima de capacitores, tomando en cuenta los parámetros obtenidos de los multimeditores y configuraciones actuales del sistema de la ES-CDO proveídos por la ANDE, el cual fue obtenido mediante la configuración de los multimeditores ION 7330 durante un periodo tres meses (diciembre, enero y febrero), a fin de que el resultado obtenido sea lo más cercano al comportamiento real del sistema actual para las distintas demandas exigidas en cada caso.

8.5. ANÁLISIS DE LA CARGA

El análisis de Flujo de carga tiene por objetivo analizar el desempeño en régimen permanente del sistema de potencia bajo diversas condiciones de funcionamiento.

Es la herramienta de base para el planeamiento, diseño y operación de cualquier sistema eléctrico de potencia. Puede aplicarse a redes de distribución, industriales o de transporte de energía eléctrica.

A continuación, se presentan los datos asociados a la operación actual de cada alimentador de la ES-CDO y un análisis de cada uno de ellos. De esta manera el estudio de la carga máxima consistió en el análisis del estado actual y el estado con compensación.

8.6. ESTUDIOS DE LOS ALIMENTADORES DE LA ES-CDO

En esta instancia, se inició el análisis de carga, procesando los datos asociados a la operación actual y un análisis de los alimentadores de la ES-CDO. (Carga Máxima).

Los datos de cargas, extraído de los multimedidores ION 7330 de cada alimentador, son expresados a continuación.

8.6.1. Estudio del alimentador CDO 03

8.6.1.1. Análisis de la demanda del alimentador CDO 03

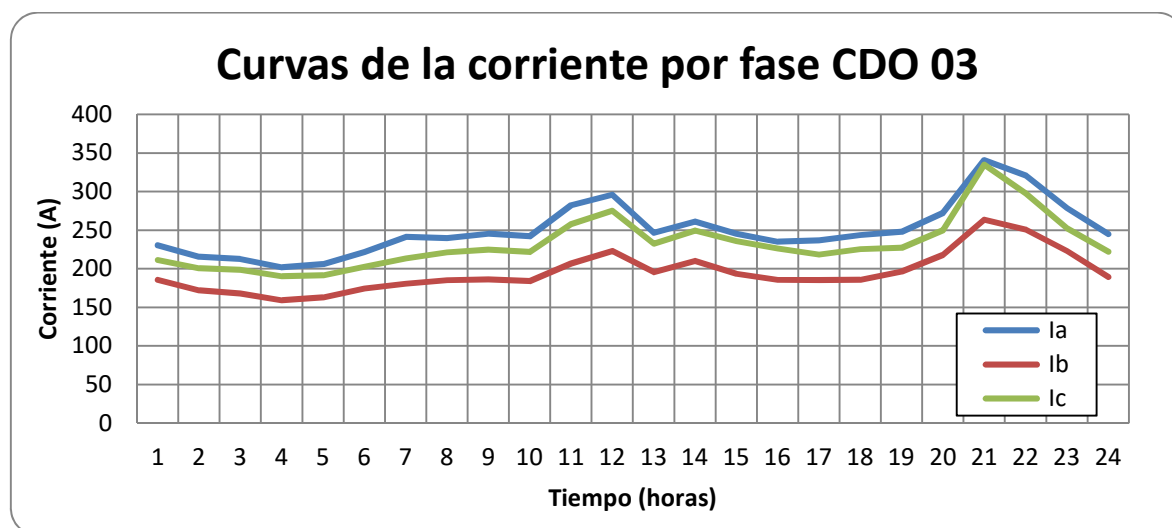


Figura 8.6.1: Curvas de la corriente por fase del alimentador CDO 03, carga máxima.

Fuente: Multimedidores ION 7330. ES-CDO, ANDE.

En la figura 8.6.1, se muestra el comportamiento de las curvas de la corriente por fase del alimentador CDO 03, el cual presenta una demanda máxima que es comprendido entre las 18 y 22 horas, en épocas más calurosas del año, verano, encontrándose en el horario de punta de carga, por lo que se deduce que es a consecuencia de una demanda de origen residencial.

8.6.1.2. Desarrollo del estado actual del alimentador CDO 03

En el estado actual, se procede a distribuir el Flujo Carga para poder analizar el circuito en condiciones de demanda máxima.

De esta forma, para el análisis de la Distribución de Carga, se cargó los datos extraídos de la Figura 8.6.1, curvas de las corrientes por fase y factor de potencia, las mismas se muestran en la tabla siguiente.

Fases	Corriente (A)	Fp (%)
A	341	91
B	264	91
C	335	91

Tabla 8.6.1: Demanda máxima por fase del alimentador CDO 03.

Una vez introducido estos datos en el software Cymdist, se inicia el análisis, a fin de verificar los resultados de la Distribución de Carga, dicho proceso se aprecia en el apéndice C 2.1.

Seguidamente detallaremos el proceso mencionado con anterioridad en este caso, del estado actual planteado.

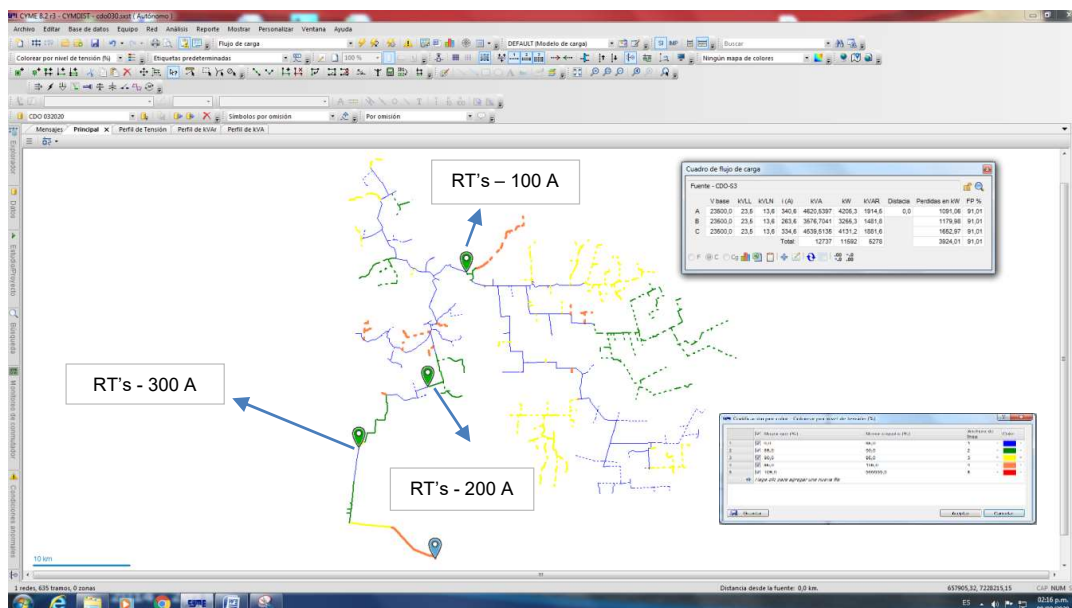


Figura 8.6.2: Estado actual del alimentador CDO 03, con carga máxima.
Fuente: Software Cymdist, ANDE

Los resultados del estado actual analizado se observan en la Figura 8.6.2, así también el trazado del CDO 03, donde se tiene tensiones dentro del umbral establecido por la empresa, el cual es de $\pm 5\%$, este rango, se utilizó como base para este y los demás análisis. También en dicha figura se evidencia los valores de salida del alimentador.



Figura 8.6.3: Cuadro de Flujo de Carga máxima del alimentador CDO 03, estado actual.
Fuente: Software Cymdist, ANDE

Uno de los principales resultados arrojados por el software Cymdist son los que se pueden ver en la Figura 8.6.3, seleccionando la fuente, se tiene su consumo total, este es de 11.592 kW, además siguiendo el mismo resultado se tiene pérdidas por explotación igual a 3.924 kW, y como este escenario aún no tiene modificaciones, el factor de potencia corresponde al cargado, se carga

también el valor de la tensión de la fuente igual a 23,5 kV, estos parámetros se tuvieron en cuenta para los estudios siguientes en donde se busca mejorar el factor de potencia.

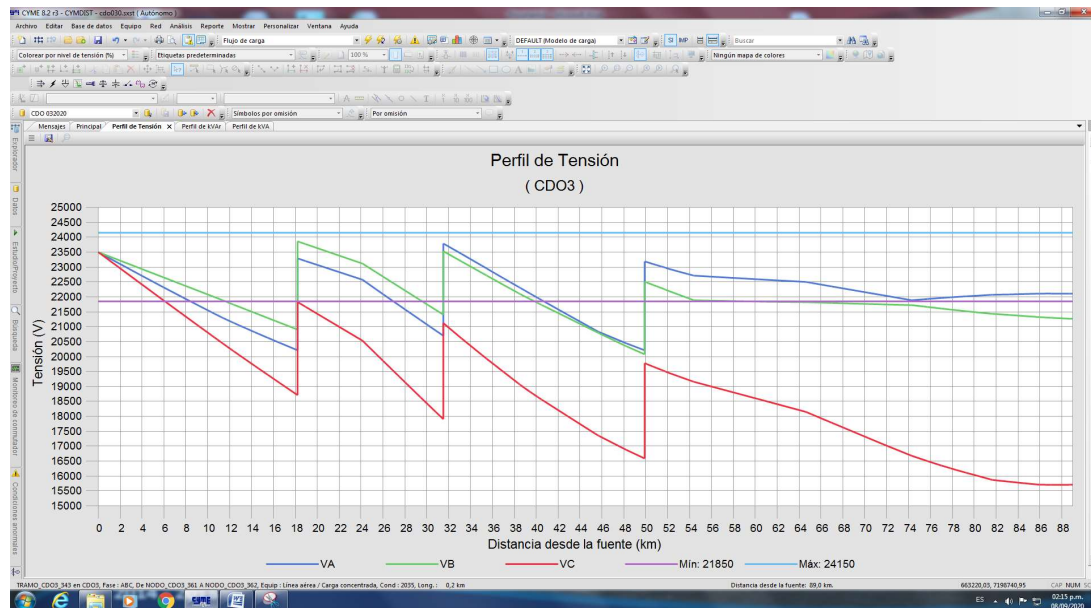


Figura 8.6.4: Estado actual del Perfil de tensión del alimentador CDO 03, carga máxima.

Fuente: Software Cymdist, ANDE

En la figura 8.6.4, puede observarse el perfil de tensión, en este escenario base del alimentador CDO 03, donde existe una caída de tensión de las tres fases, a consecuencia de su amplia extensión y cuya tensión de referencia es de $\pm 5\%$ establecida por la Administración Nacional de Electricidad - ANDE y son los siguientes:

- Tensión Mínima: 21.850 Voltios
- Tensión Máxima: 24.150 Voltios

También, cabe mencionar referente a la figura 8.6.4, un caso peculiar, debido a la presencia de equipos de reguladores de tensión, la curva presenta tres picos, estos reguladores son de 300, 200 y 100 Amperios, sin embargo por el desequilibrio de los niveles de tensión y por propiedades de la extensión del alimentador, los valores de tensión salen del rango inferior.

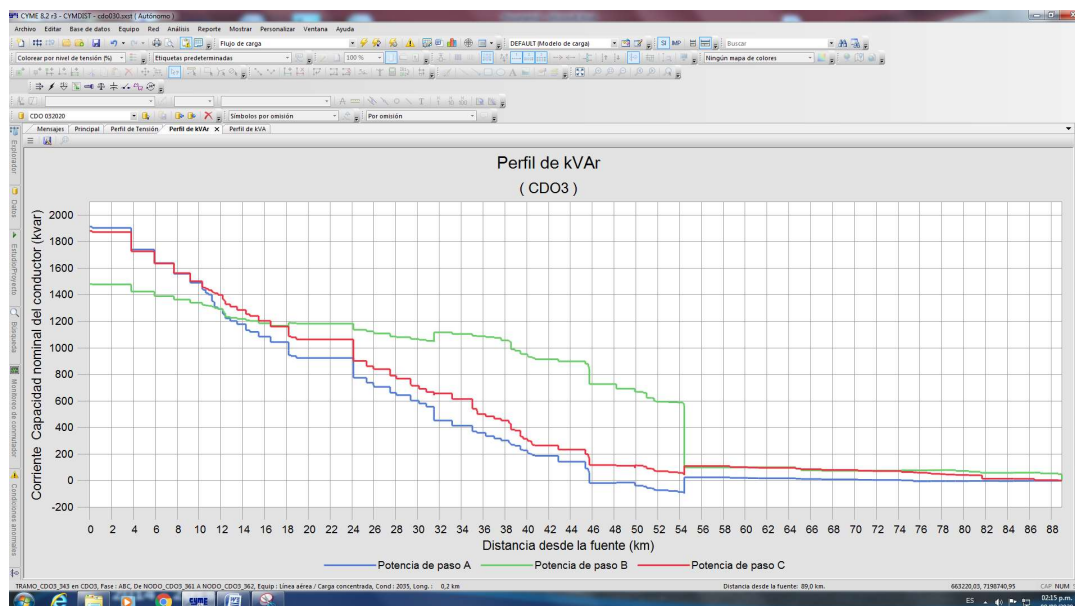


Figura 8.6.5: Estado actual del perfil kVAr del alimentador CDO 03, carga máxima.
Fuente: Software Cymdist, ANDE

Otro resultado se observa en la figura 8.6.5, donde se percibe las curvas de la potencia reactiva en kVAr del alimentador CDO 03, a lo largo de su trazado.

8.6.1.3. Reporte sumario de la carga y pérdidas

Alimentador: CDO 03								
	Carga total		Carga total		Pérdidas totales		Pérdidas totales	
RED	kVA	FP (%)	kW	FP (%)	kVA	FP (%)	kW	FP (%)
CDO3	12737,02	91,01	11592,08	91,01	5488,91	71,49	3924,01	71,49
Total	12737,02	91,01	11592,08	91,01	5488,91	71,49	3924,01	71,49

Tabla 8.6.2: Reporte sumario del alimentador CDO 03, carga máxima

En la tabla 8.6.2, se observa el reporte sumario de las cargas y pérdidas totales del alimentador CDO 03.

8.6.1.4. Desarrollo del estado con compensación del alimentador CDO 03

Continuando con el análisis estado con compensación, para la demanda máxima, se buscó compensar, utilizando el complemento “Ubicación Óptima de Capacitores” del software Cymdist.

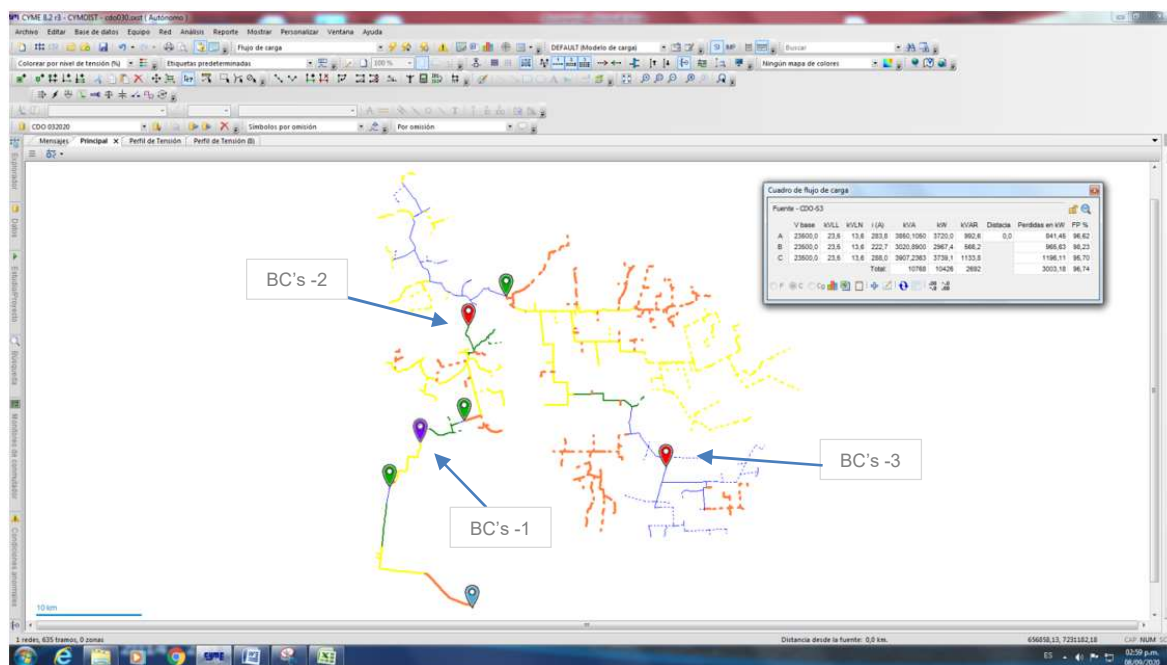


Figura 8.6.6: Representación del estado con compensación del alimentador CDO 03, carga máxima.

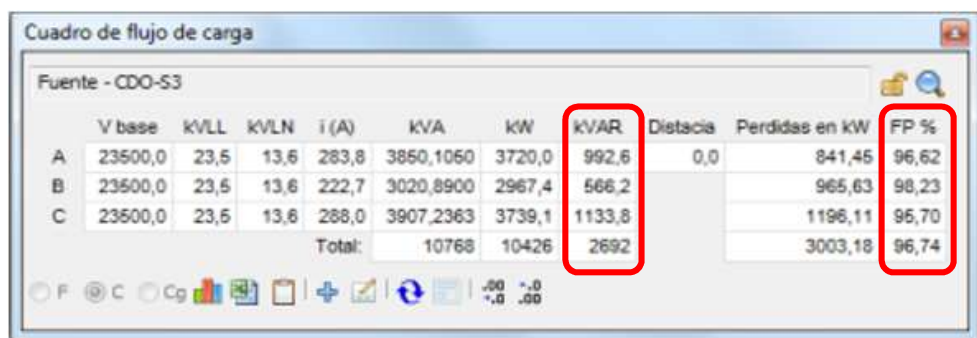
Fuente: Software Cymdist, ANDE

En la figura 8.6.6, se observa el arreglo del alimentador CDO 03, posterior a este análisis se detalla en la tabla 8.6.3, las características y ubicaciones óptimas de cada banco de capacitores.

Ubicación óptima de los Banco de Capacitores			
ítem	Capacidad kVAr/Fase	Tipo	Distancia de la fuente
BCs-1	300	Automático	38,5 km
BCs-2	200	Fijo	45,6 Km
BCs-3	200	Fijo	80,5 km

Tabla 8.6.3: Características y ubicación de los Bancos de capacitores.

Fuente: Elaboración propia



	V base	kVLL	kVLN	I (A)	kVA	kW	kVAR	Distancia	Perdidas en kW	FP %
A	23500,0	23,5	13,6	283,8	3850,1060	3720,0	992,6	0,0	841,45	96,62
B	23500,0	23,5	13,6	222,7	3020,8900	2967,4	566,2		965,63	98,23
C	23500,0	23,5	13,6	288,0	3907,2363	3739,1	1133,8		1196,11	95,70
Total:					10768	10426	2692		3003,18	96,74

Figura 8.6.7: Cuadro de flujo de carga del alimentador CDO 03, estado con compensación.

Fuente: Software Cymdist, ANDE.

Al ejecutar el software Cymdist y analizar los reportes entregados se pudo establecer la ubicación óptima de capacitores mostrada en la figura 8.6.6. En la tabla 8.6.3, indica el banco de capacitor es en kVAr que se debe instalar, el tramo donde se debe instalar. En la figura 8.6.7, el Flujo de Carga obtenido después de realizar la compensación, donde se observa un nuevo valor del Factor de Potencia. Igual a 96,74, mayor al escenario anterior, por otra parte, el total de pérdidas en kW disminuyó respecto al escenario base.

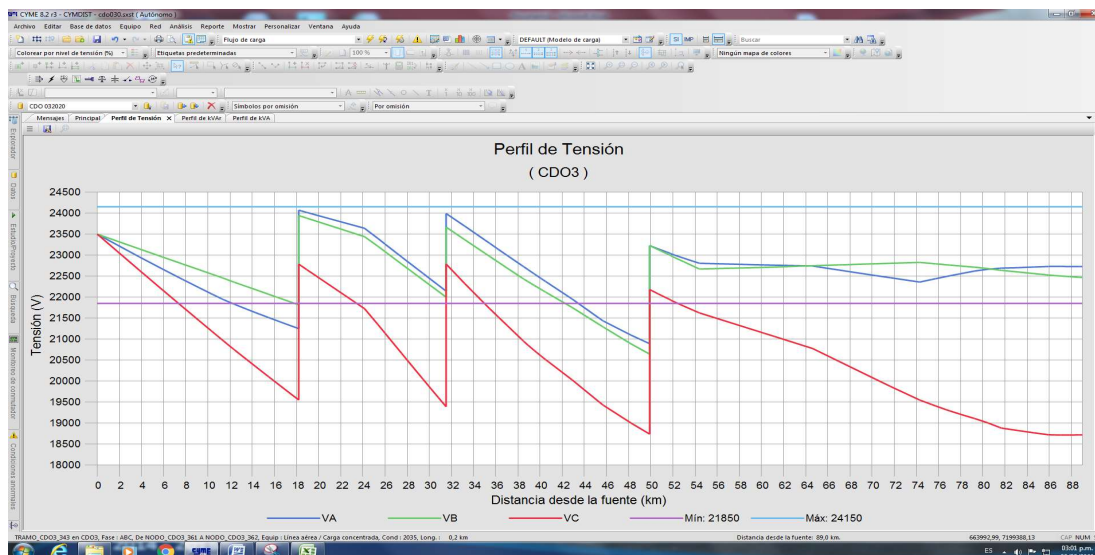


Figura 8.6.8: Representación del estado con compensación del alimentador CDO 03, carga máxima.

Fuente: Software Cymdist, ANDE

En la figura 8.6.8, se observa el perfil de tensión del alimentador CDO 03 con compensación y demuestra una eficacia producida en la ubicación optima de los bancos capacitores, lograndose una mejora en la caída de tensión de las tres fases.

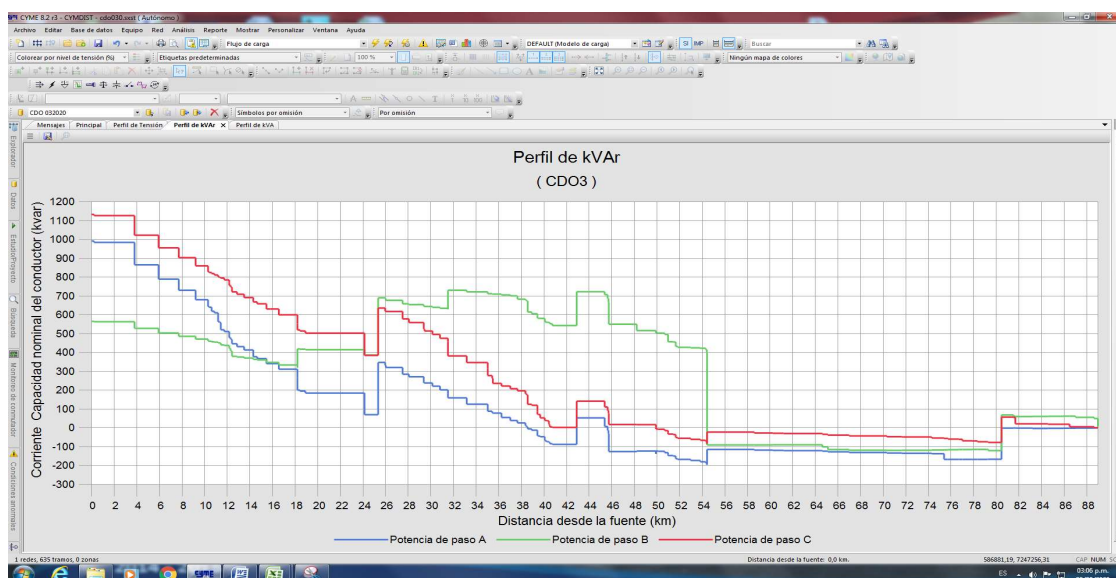


Figura 8.6.9: Estado del perfil kVar con compensación del alimentador CDO 03, carga máxima.

Fuente: Software Cymdist, ANDE

En la figura 8.6.9, se muestra el mejoramiento en las curvas de la potencia reactiva en kVar del alimentador CDO 03.

8.6.1.5. Reporte sumario de la carga y pérdidas

Alimentador: CDO 03								
	Carga total		Carga total		Pérdidas totales		Pérdidas totales	
RED	kVA	FP (%)	kW	FP (%)	kVA	FP (%)	kW	FP (%)
CD03	7861,20	92,32	7275,68	92,32	2259,56	73,90	1669,82	73,90
Total	7881,20	92,32	7275,68	92,32	2259,56	73,90	1669,82	73,90

Tabla 8.6.4: Reporte sumario del alimentador CDO 03, carga máxima con compensación.

En la tabla 8.6.4, se observa un reporte sumario de las cargas y pérdidas totales del alimentador CDO 03 con compensación.

8.6.2. Estudio del alimentador CDO 04

8.6.2.1. Análisis de la demanda del alimentador CDO 04

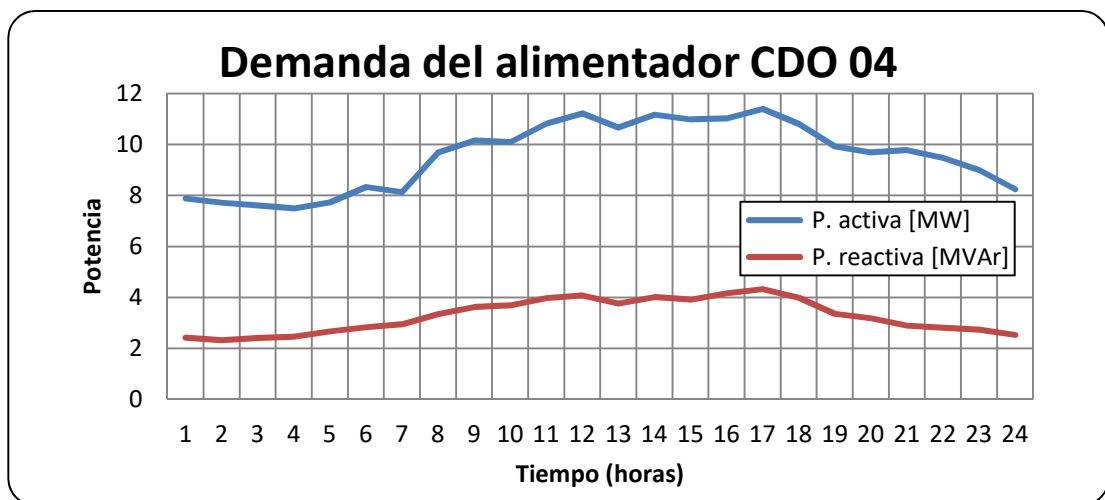


Figura 8.6.10: Demanda de alimentador CDO 04, carga máxima.
Fuente: Multimedidores ION 7330. ES-CDO, ANDE.

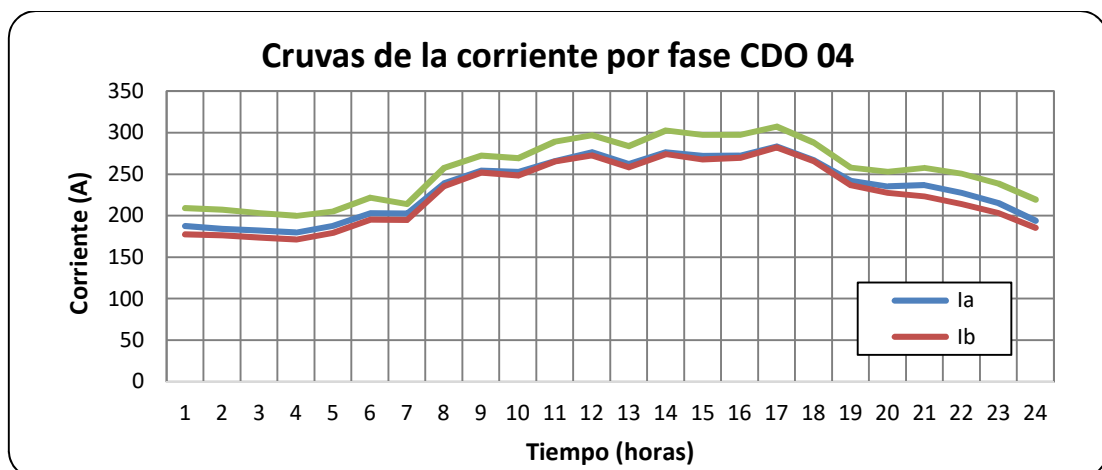


Figura 8.6.11: Curvas de la corriente por fase del alimentador CDO 04, carga máxima.
Fuente: Multimedidores ION 7330. ES-CDO, ANDE.

En la figura 8.6.11, se muestra el comportamiento de las curvas de la corriente por fase del alimentador CDO 04, el cual presenta una demanda máxima.

Para el caso de la demanda máxima, que es comprendido entre las 9 y 18 horas, en épocas más calurosas del año, verano, encontrándose en el horario de fuera punta de carga, por lo que se deduce que es a consecuencia de una demanda de origen industrial.

8.6.2.2. Desarrollo del estado actual del alimentador CDO 04

En el análisis del estado actual, se procede a distribuye el Flujo Carga para poder analizar el circuito en condiciones de demanda máxima.

Asimismo, para el análisis de la Distribución de Carga máxima, se cargó los datos extraídos de la figura 8.6.11, curvas de la corriente por fase y factor de potencia, las mismas se aprecian en la tabla siguiente.

Fases	Corriente (A)	Fp (%)
A	283	94
B	282	94
C	335	94

Tabla 8.6.5: Demanda máxima por fase del alimentador CDO 04.

Una vez introducido estos datos en el software Cymdist, se inicia el análisis, a fin de verificar los resultados de la distribución de carga, dicho proceso se aprecia en el apéndice C 2.2.

Seguidamente detallaremos el proceso mencionado con anterioridad en este caso, del estado actual planteado.

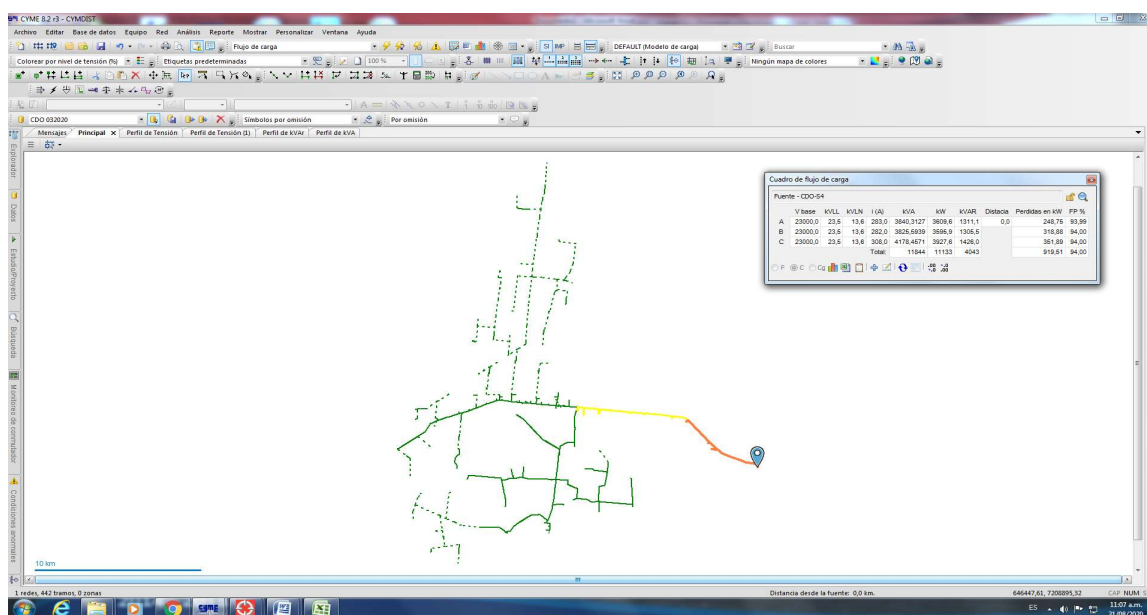
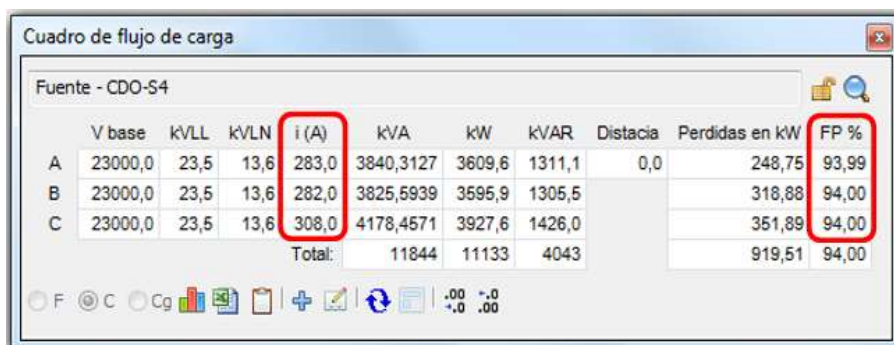


Figura 8.6.12: Estado actual del alimentador CDO 04, carga máxima.
Fuente: Software Cymdist, ANDE

Los resultados de este escenario analizado se observan en la figura 8.6.12, así también el trazado del CDO 04, se tiene tensiones dentro del umbral establecido

por la empresa, el cual es de $\pm 5\%$, este rango, se utilizó como base para este y los demás análisis. También en dicha figura se evidencia los valores de salida del alimentador.



	V base	kVLL	kVLN	I (A)	kVA	kW	kVAR	Distancia	Perdidas en kW	FP %
A	23000,0	23,5	13,6	283,0	3840,3127	3609,6	1311,1	0,0	248,75	93,99
B	23000,0	23,5	13,6	282,0	3825,5939	3595,9	1305,5		318,88	94,00
C	23000,0	23,5	13,6	308,0	4178,4571	3927,6	1426,0		351,89	94,00
Total:					11844	11133	4043		919,51	94,00

Figura 8.6.13: Cuadro de flujo de carga máxima del alimentador CDO 04, estado actual.

Fuente: Software Cymdist, ANDE

Uno de los principales resultados arrojados por el software son los que se muestran en la figura 8.6.13, seleccionando la fuente, se tiene su consumo total, este es de 11.133 kW, además siguiendo el mismo resultado se tiene pérdidas por explotación igual a 919 kW, y como este escenario aún no tiene modificaciones, el factor de potencia corresponde al cargado, se carga también el valor de la tensión de la fuente igual a 23,5 kV, estos parámetros se tuvieron en cuenta para los escenarios siguientes en donde se busca compensar el factor de potencia.

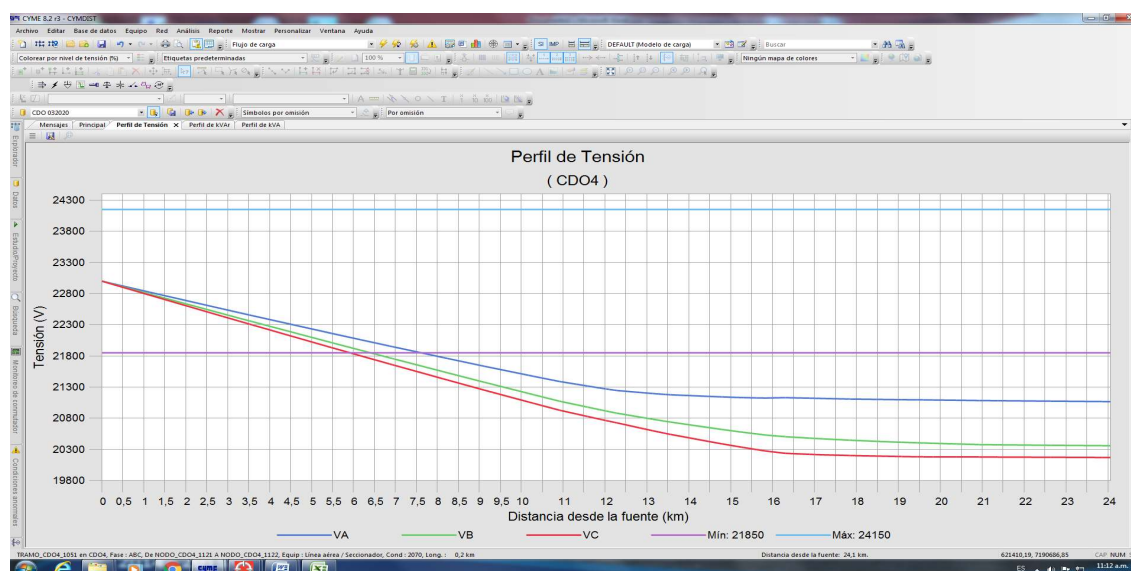


Figura 8.6.14: Estado actual del Perfil de tensión del alimentador CDO 04, carga máxima

Fuente: Software Cymdist, ANDE

En la figura 8.6.14, puede observarse el perfil de tensión, en este escenario base del alimentador CDO 04, donde existe una caída de tensión de las tres fases, a consecuencia de su amplia extensión y cuya tensión de referencia es de $\pm 5\%$ establecida por la Administración Nacional de Electricidad - ANDE y son los siguientes:

- Tensión Mínima: 21.850 Voltios
- Tensión Máxima: 24.150 Voltios

Asimismo, cabe mencionar referente a la Figura 8.6.14, un caso peculiar, debido a que no cuenta con equipo de regulador de tensión, sin embargo por el desequilibrio de los niveles de tensión y por propiedades de la extensión del alimentador, los valores de tensión salen del rango inferior.

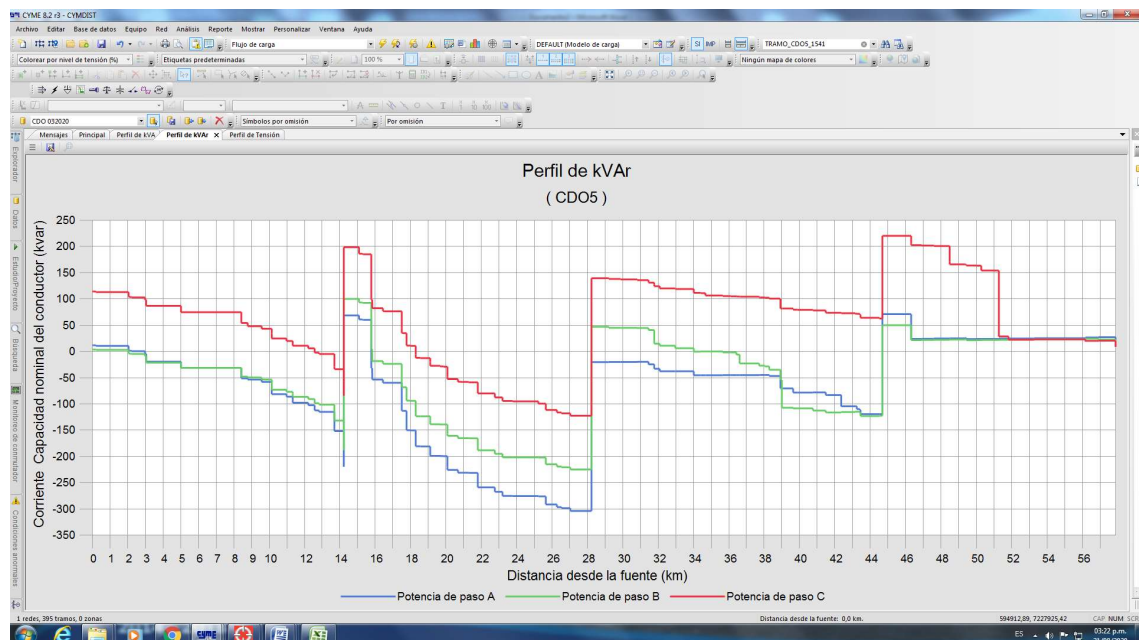


Figura 8.6.15: Estado actual del perfil kVar del alimentador CDO 04, carga máxima.

Fuente: Software Cymdist, ANDE

Otro resultado analizado se observa en la figura 8.6.15, las curvas de la potencia reactiva en kVar del alimentador CDO 04, a lo largo de su trazado.

8.6.2.3. Reporte sumario de la carga y pérdidas

Alimentador: CDO 04								
	Carga total		Carga total		Pérdidas totales		Pérdidas totales	
RED	kVA	FP (%)	kW	FP (%)	kVA	FP (%)	kW	FP (%)
CDO4	11844,36	94,00	11133,12	94,00	1424,88	64,53	919,51	64,53
Total	11844,36	94,00	11133,12	94,00	1424,88	64,53	919,51	64,53

Tabla 8.6.6: Reporte sumario del alimentador CDO 04, carga máxima

En la tabla 8.6.6, se observa un reporte sumario de cargas y pérdidas totales del alimentador CDO 04.

8.6.2.4. Desarrollo del estado con compensación del alimentador CDO 04

Continuando con el análisis del estado con compensación, para la demanda máxima, se buscó compensar, utilizando el complemento “Ubicación Óptima de Capacitores” del software Cymdist.

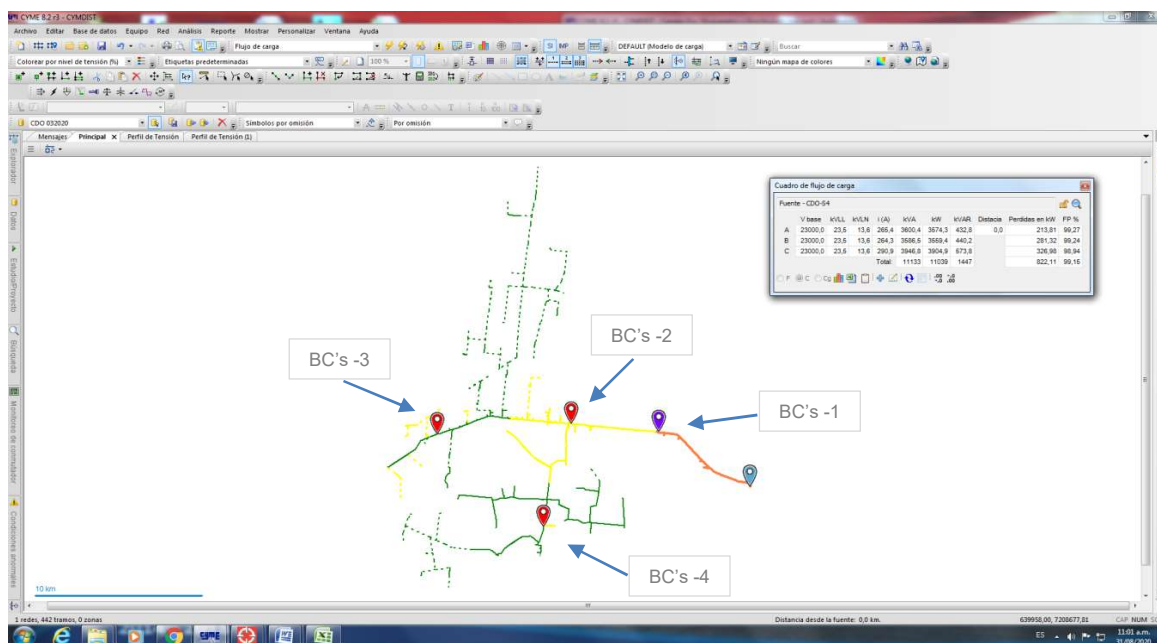


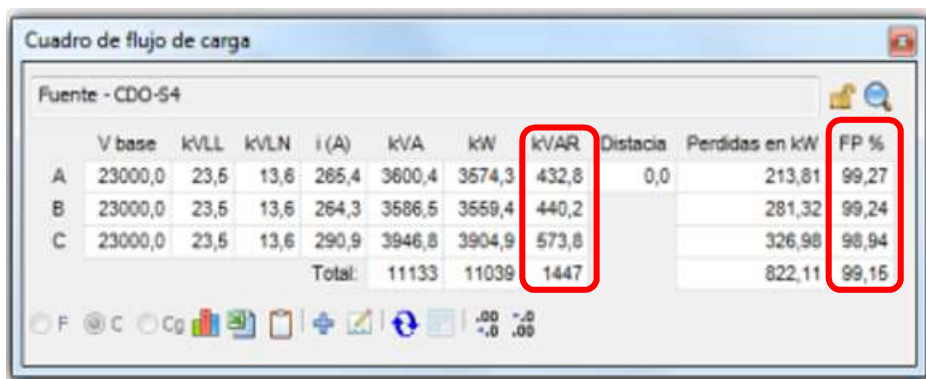
Figura 8.6.16: Representación del estado con compensación del alimentador CDO 04, carga máxima.

Fuente: Software Cymdist, ANDE

En la figura 8.6.16, se observa el arreglo del alimentador CDO 04, posterior a este análisis se detalla en la tabla 8.6.7, las características y ubicaciones de cada banco de capacitores.

Ubicación óptima de los Banco de Capacitores			
ítem	Capacidad kVAr/Fase	Tipo	Distancia de la fuente
BCs-1	300	Automático	6,9 km
BCs-2	200	Fijo	12,2 Km
BCs-3	200	Fijo	20 km
BCs-4	200	Fijo	20,5 km

Tabla 8.6.7: Características y ubicación de los Bancos de capacitores.
Fuente: Elaboración propia



Cuadro de flujo de carga										
Fuente - CDO-54										
	V base	KVLL	KVLN	I (A)	KVA	KW	KVAR	Distacia	Perdidas en kW	FP %
A	23000,0	23,5	13,6	265,4	3600,4	3574,3	432,8	0,0	213,81	99,27
B	23000,0	23,5	13,6	264,3	3586,5	3559,4	440,2		281,32	99,24
C	23000,0	23,5	13,6	290,9	3946,8	3904,9	573,8		326,98	98,94
Total:					11133	11039	1447		822,11	99,15

Figura 8.6.17: Cuadro de flujo de carga del alimentador CDO 04, con compensación.
Fuente: Software Cymdist, ANDE.

Al ejecutar el software Cymdist y analizar los reportes entregados se pudo establecer la ubicación óptima de capacitores mostrada en la figura 8.6.16. En la tabla 8.6.7, se indica el banco de capacitores en kVAr que se debe instalar y el tramo donde se debe instalar. La figura 8.6.17, se muestra el Flujo de Carga obtenido después de realizar la compensación, en donde se observa un nuevo valor del Factor de Potencia. Igual a 99,15, mayor al escenario anterior, por otra parte, el total de pérdidas en kW disminuyo respecto al escenario base.

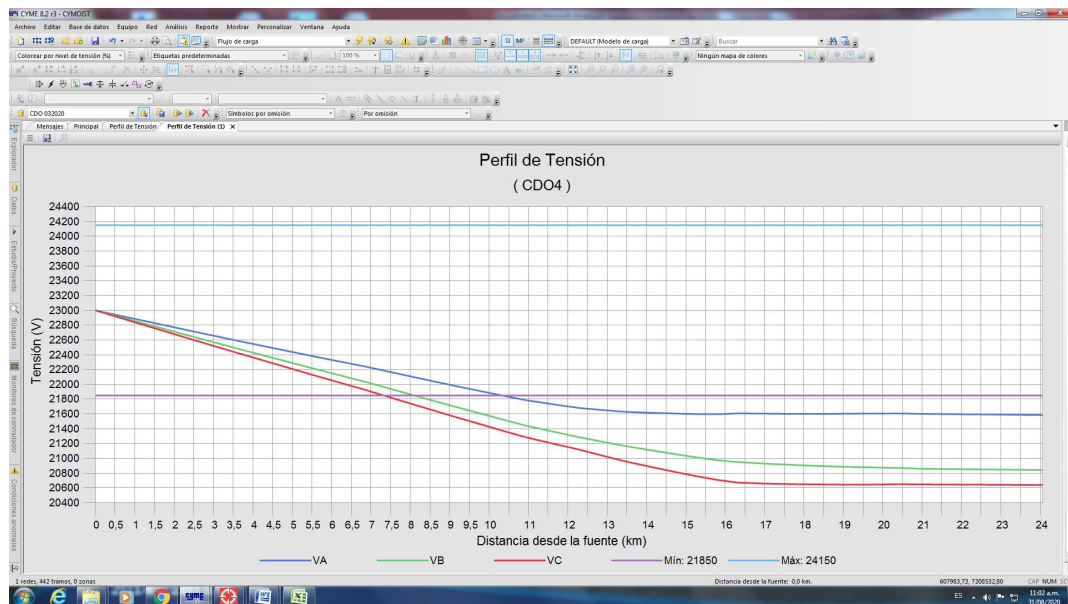


Figura 8.6.18: Representación del estado con compensación del alimentador CDO 04, carga máxima.
Fuente: Software Cymdist, ANDE

En la figura 8.6.18, puede observarse el perfil de tensión del alimentador CDO 04 con compensación lo que demuestra una eficacia producida en la ubicación optima de los bancos capacitores, lograndose una mejora en la caída de tensión de las tres fases.

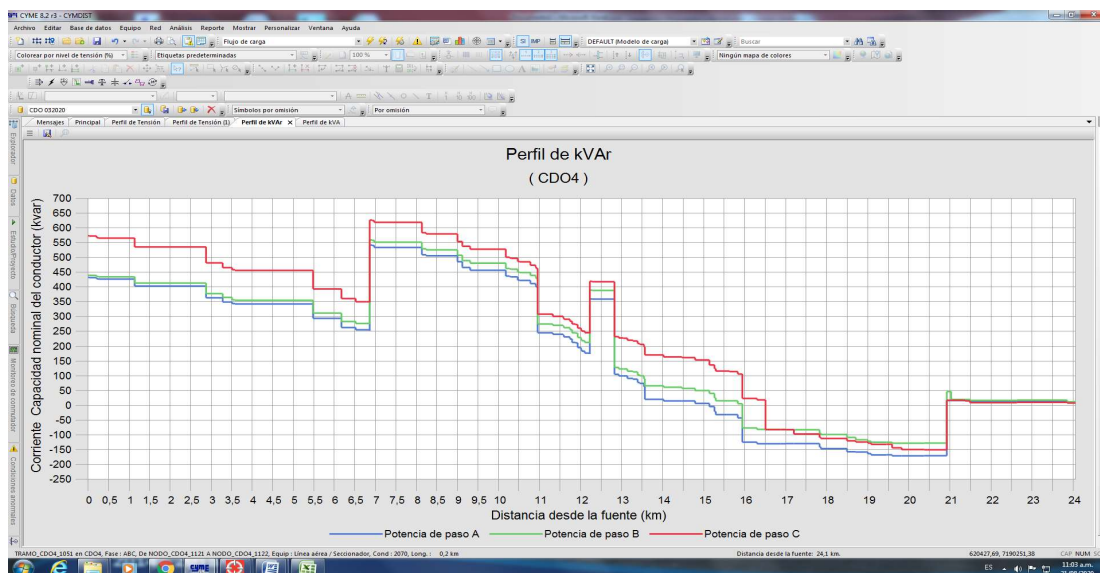


Figura 8.6.19: Estado del perfil kVar con compensación del alimentador CDO 04, carga máxima.
Fuente: Software Cymdist, ANDE

En la figura 8.6.19, se muestra una mejora en las curvas de la potencia reactiva en kVAr del alimentador CDO 04, a lo largo de su trazado.

8.6.2.5. Reporte sumario de la carga y pérdidas

Alimentador: CDO 04								
	Carga total		Carga total		Pérdidas totales		Pérdidas totales	
RED	kVA	FP (%)	kW	FP (%)	kVA	FP (%)	kW	FP (%)
CDO4	11132,98	99,15	11038,57	99,15	1273,18	64,57	822,11	64,57
Total	11132,98	99,15	11038,57	99,15	1273,18	64,57	822,11	64,57

Tabla 8.6.8: Reporte sumario del alimentador CDO 04, según carga máxima con compensación.

En la tabla 8.6.8, se observa un reporte sumario de las cargas y pérdidas totales del alimentador CDO 04 con compensación.

8.6.3. Estudio del alimentador CDO 05

8.6.3.1. Análisis demanda del alimentador CDO 05

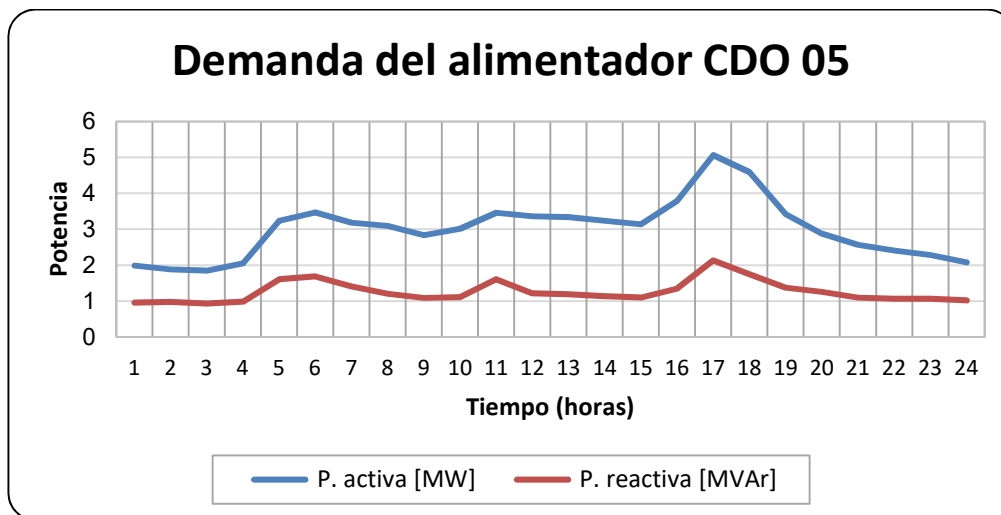


Figura 8.6.20: Demanda promedio del alimentador CDO 05.
Fuente: Multimeditores ION 7330. ES-CDO, ANDE.

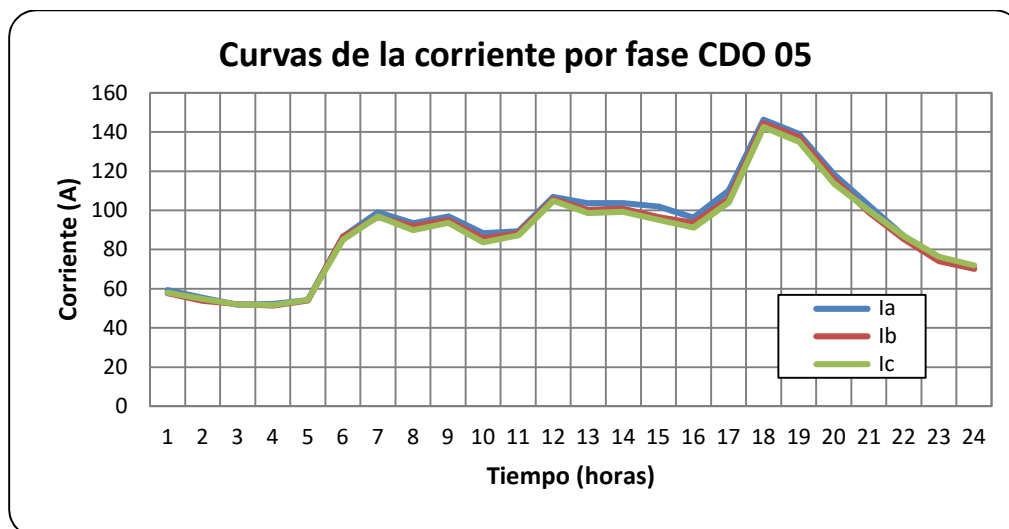


Figura 8.6.21: Curvas de la corriente por fase del alimentador CDO 05.
Fuente: Multimeditores ION 7330. ES-CDO, ANDE.

En la figura 8.6.21, se muestra el comportamiento de las curvas de la corriente por fase del alimentador CDO 05, el cual presenta una demanda máxima.

Para el caso de la demanda máxima, que es comprendido entre las 16 y 20 horas, en épocas más calurosas del año, verano, encontrándose en el horario de punta de carga, por lo que se deduce que es a consecuencia de una demanda de origen residencial.

8.6.3.2. Desarrollo del estado actual del alimentador CDO 05

En el análisis del estado actual, se procede a distribuye el Flujo Carga para poder analizar el circuito en condiciones de demanda máxima.

De esta forma, para el análisis de la Distribución de Carga máxima, se cargó los datos extraídos de la figura 8.6.21, curvas de la corriente por fase y factor de potencia, las mismas se aprecian en la tabla siguiente.

Fases	Corriente (A)	Fp (%)
A	151	92
B	147	92
C	142	92

Tabla 8.6.9: Demanda máxima por fase del alimentador CDO 05.

Una vez introducido estos datos en el software Cymdist, se inicia el análisis, a fin de verificar los resultados de la Distribución de Carga, dicho proceso se aprecia en el apéndice C.2.3.

Seguidamente detallaremos el proceso mencionado con anterioridad en este caso, del estado actual planteado.

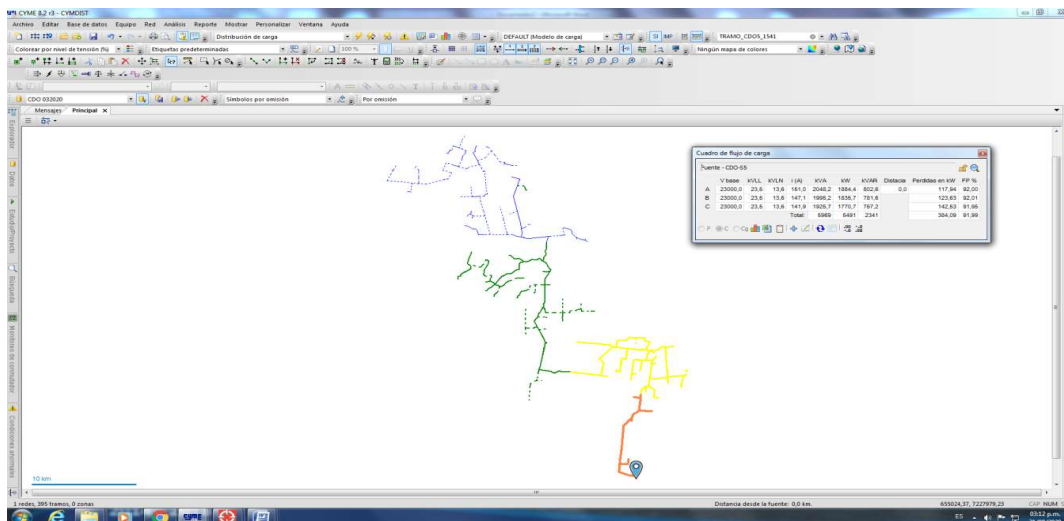


Figura 8.6.22: Estado actual del alimentador CDO 05, carga máxima
Fuente: Software Cymdist, ANDE

Los resultados de este escenario analizado se observan en la figura 8.6.22, así también el trazado del CDO 05, se tiene tensiones dentro del umbral establecido por la empresa, el cual es de $\pm 5\%$, este rango, se utilizó como base para este y los demás análisis. También en dicha figura se evidencia los valores de salida del alimentador.

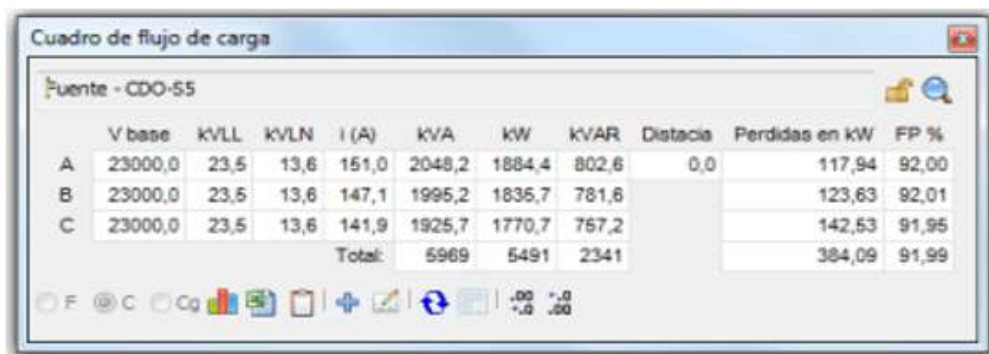


Figura 8.6.23: Cuadro de flujo de carga máxima del alimentador CDO 04, estado actual.
Fuente: Software Cymdist, ANDE

Uno de los principales resultados arrojados por el software son los que se pueden ver en la figura 8.6.23, seleccionando la fuente, se tiene su consumo total, este es de 5.491 kW, además siguiendo el mismo resultado se tiene pérdidas por explotación igual a 384 kW, y como este escenario aún no tiene modificaciones, el

factor de potencia corresponde al cargado, se carga también el valor de la tensión de la fuente igual a 23,5 kV, estos parámetros se tuvieron en cuenta para los escenarios siguientes en donde se busca compensar el factor de potencia.

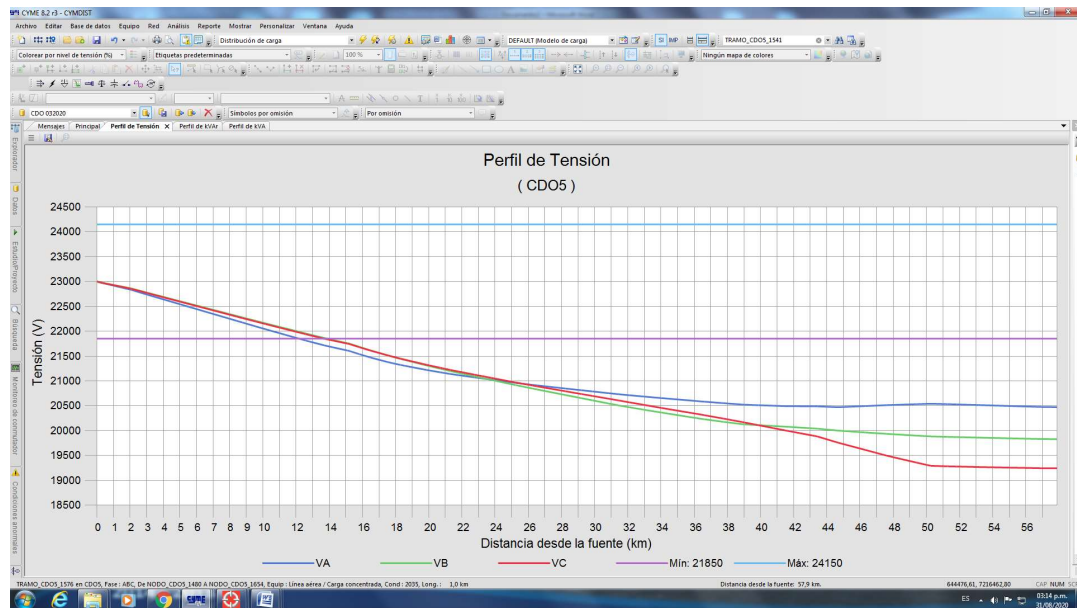


Figura 8.6.24: Estado actual de Perfil de tensión, carga máxima
Fuente: Software Cymdist, ANDE

En la figura 8.6.24, puede observarse el perfil de tensión, en este escenario base del alimentador CDO 05, donde existe una caída de tensión de las tres fases, a consecuencia de su extensión y cuya tensión de referencia es de $\pm 5\%$ establecida por la Administración Nacional de Electricidad - ANDE y son los siguientes:

- Tensión Mínima: 21.850 Voltios
- Tensión Máxima: 24.150 Voltios

También, cabe mencionar referente a la figura 8.6.24, debido a que no cuenta con ningún equipo de regulador de tensión, sin embargo por el desequilibrio de los niveles de tensión y por propiedades de la extensión del alimentador, los valores de tensión salen del rango inferior

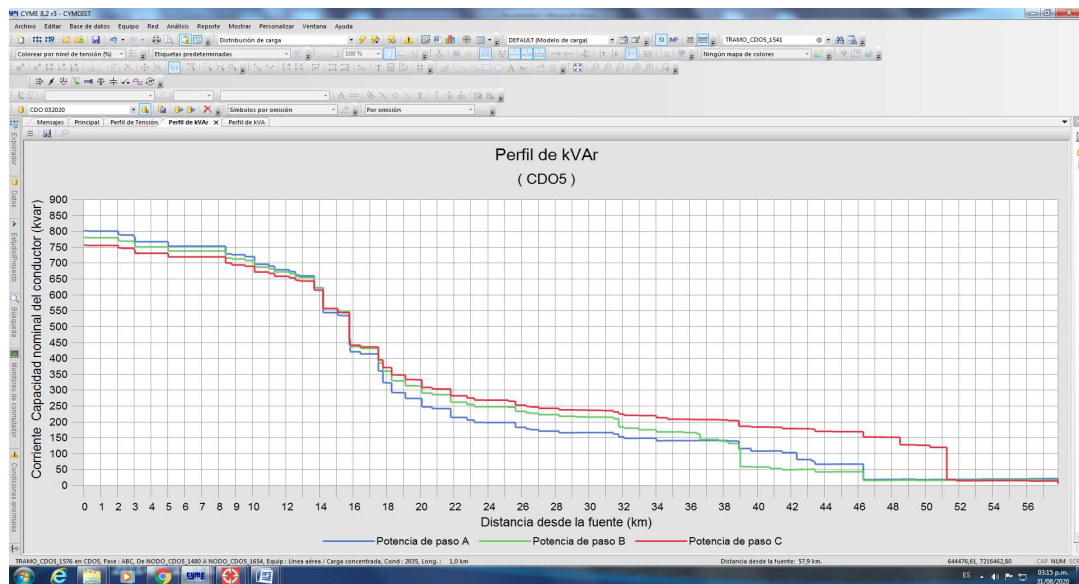


Figura 8.6.25: Estado actual del perfil kVar del alimentador CDO 05, carga máxima.

Fuente: Software Cymdist, ANDE

Otro resultado analizado se observa en la figura 8.6.25, las curvas de la potencia reactiva en kVar del alimentador CDO 05, a lo largo de su trazado.

8.6.3.3. Reporte sumario de la carga y pérdidas

Alimentador: CDO 05								
	Carga total		Carga total		Pérdidas totales		Pérdidas totales	
RED	kVA	FP (%)	kW	FP (%)	kVA	FP (%)	kW	FP (%)
CDO5	5969,11	91,99	5490,74	91,99	556,55	69,01	384,09	69,01
Total	5969,11	91,99	5490,74	91,99	556,55	69,01	384,09	69,01

Tabla 8.6.10: Reporte sumario del alimentador CDO 05, carga máxima

En la tabla 8.6.10, se observa un reporte sumario de cargas y pérdidas totales del alimentador CDO 05.

8.6.3.4. Desarrollo del estado con compensación del alimentador CDO 05

Continuado con el análisis del estado con compensación, para la demanda máxima, se buscó compensar, utilizando el complemento “Ubicación Óptima de Capacitores” software Cymdist.

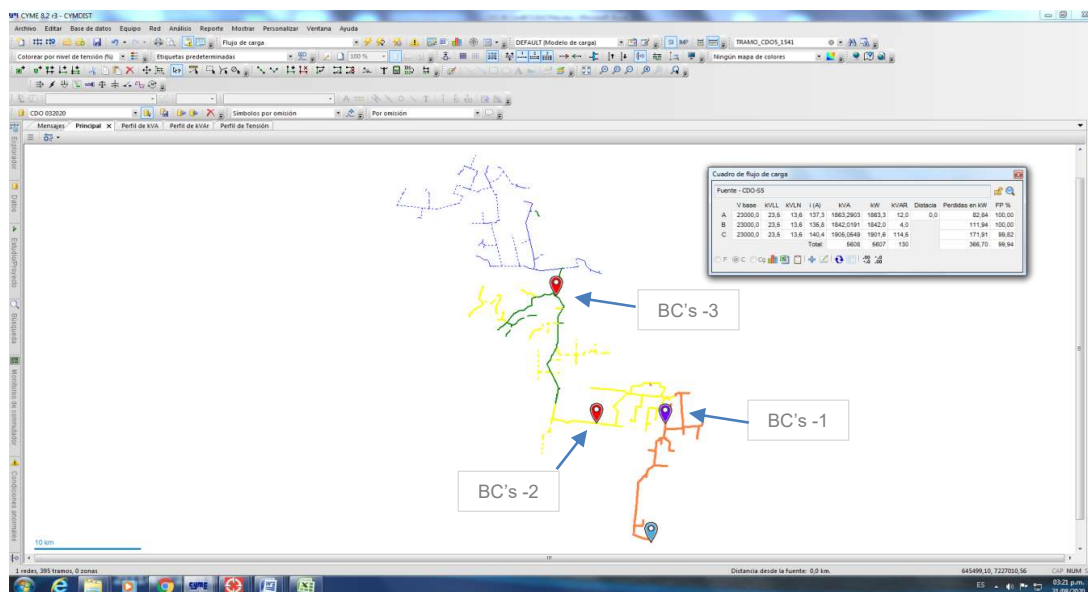


Figura 8.6.26: Representación del estado con compensación del alimentador CDO 05, carga máxima.
Fuente: Software Cymdist, ANDE

En la figura 8.6.26, se observa el arreglo del alimentador CDO 05, posterior a este análisis se detallan en la tabla 8.6.11, las características y ubicación óptimas de los banco de capacitores.

Ubicación óptima de los Banco de Capacitores			
Ítem	Capacidad kVar/Fase	Tipo	Distancia de la fuente
BCs-1	300	Automático	14,2 km
BCs-2	300	Fijo	28,2 km
BCs-3	200	Fijo	44,7 km

Tabla 8.6.11: Características y ubicación de los Bancos de capacitores.
Fuente: Elaboración propia

Cuadro de flujo de carga										
Fuente - CDO-55										
	V base	kVLL	kVLN	I (A)	kVA	kW	kVAR	Distancia	Perdidas en kW	FP %
A	23000,0	23,5	13,6	137,3	1863,2903	1863,3	12,0	0,0	82,84	100,00
B	23000,0	23,5	13,6	135,8	1842,0191	1842,0	4,0		111,94	100,00
C	23000,0	23,5	13,6	140,4	1905,0549	1901,6	114,5		171,91	99,82
Total:					5608	5607	130		366,70	99,94

Figura 8.6.27: Cuadro de flujo de carga del alimentador CDO 05, estado con compensación.
Fuente: Software Cymdist, ANDE.

Al ejecutar el software Cymdist y analizar los reportes entregados se pudo establecer la ubicación óptima de capacitores mostrada en la figura 8.6.26. En la tabla 8.6.11, se indica el banco de capacitores en kVAr que se debe instalar y el tramo donde se debe instalar. La figura 8.6.27, se muestra el Flujo de Carga obtenido después de realizar la compensación, en donde se obtiene un nuevo valor del Factor de Potencia. Igual a 99,94, mayor al escenario anterior, por otra parte, el total de pérdidas en kW disminuyó respecto al escenario base.

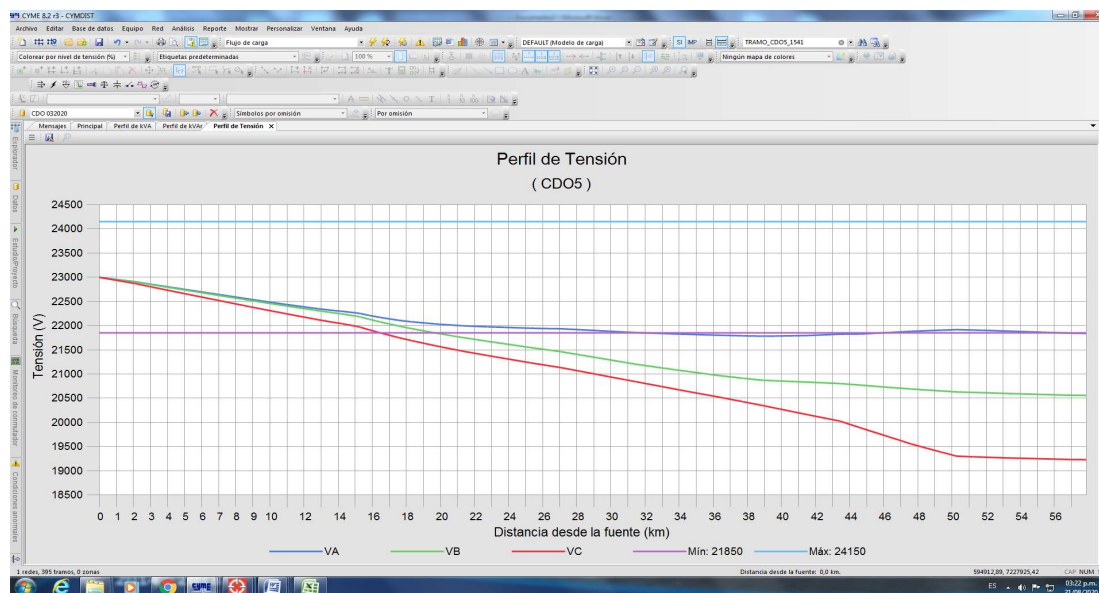


Figura 8.6.28: Estado con compensación del alimentador CDO 05, carga máxima.
Fuente: Software Cymdist, ANDE

En la figura 8.6.28, se observa el perfil de tensión del alimentador CDO 05, con compensación y demuestra una eficacia producida en la ubicación óptima de los bancos, lograndose una mejora en la caída de tensión de las tres fases.

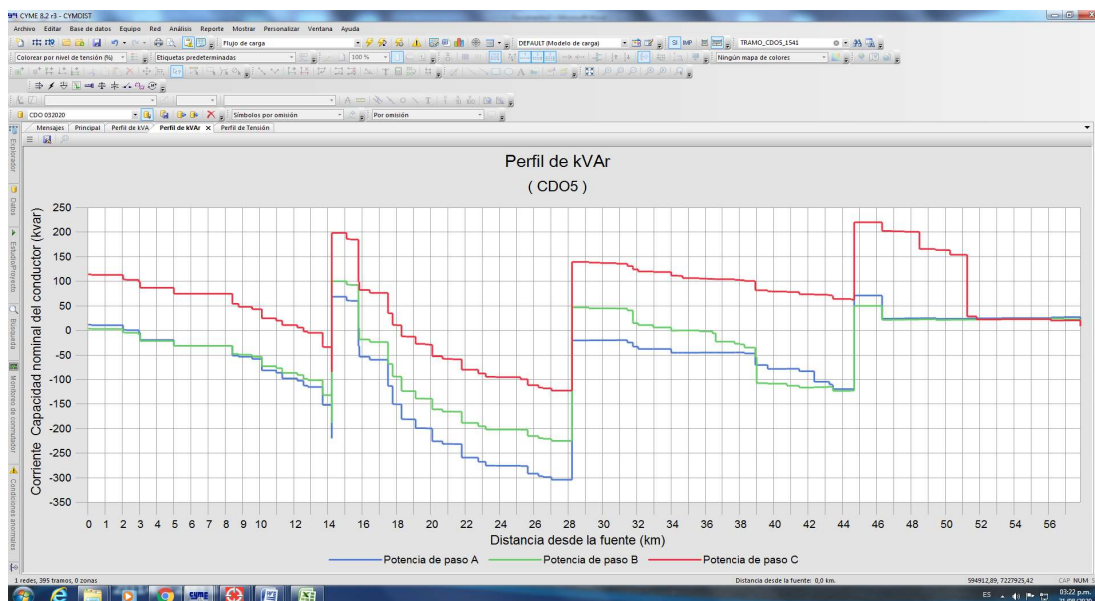


Figura 8.6.29: Estado con compensación del perfil kVar del alimentador CDO 05, según carga máxima.
Fuente: Software Cymdist, ANDE

En la figura 8.6.29, se muestra una mejora en las curvas de la potencia reactiva en kVar del alimentador CDO 05.

8.6.3.5. Reporte sumario de la carga y pérdidas

Alimentador: CDO 05								
	Carga total		Carga total		Pérdidas totales		Pérdidas totales	
RED	kVA	FP (%)	kW	FP (%)	kVA	FP (%)	kW	FP (%)
CDO5	5608,40	99,97	5606,88	99,97	528,17	69,43	366,70	69,43
Total	5608,40	99,97	5606,88	99,97	528,17	69,43	366,70	69,43

Tabla 8.6.12: Reporte sumario del alimentador CDO 05, con compensación según carga máxima

En la tabla 8.6.12, se observa un reporte sumario de las cargas y pérdidas totales del alimentador CDO 05 con compensación.

8.6.4. Estudio del alimentador CDO 07

8.6.4.1. Análisis demanda del alimentador CDO 07

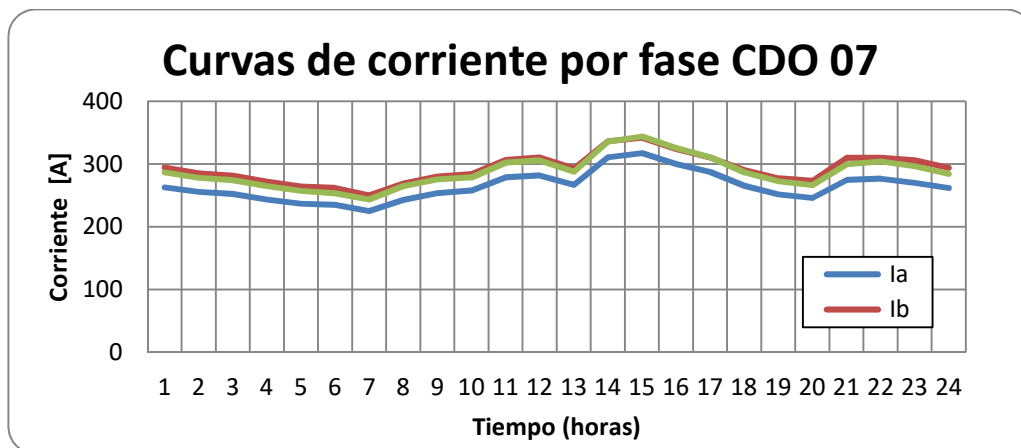


Figura 8.6.30: Curvas de la corriente por fase del alimentador CDO 07.
Fuente: Multimedidores ION 7330. ES-CDO, ANDE.

En la figura 8.6.30, se muestra el comportamiento de las curvas de la corriente por fase del alimentador CDO 07, el cual presenta una demanda máxima.

Para el caso de la demanda máxima, que es comprendido entre las 13 y 17 horas, en épocas más calurosa, verano, encontrándose en el horario de fuera de punta de carga, por lo que se deduce que es a consecuencia de una demanda de origen industrial.

8.6.4.2. Desarrollo del estado actual del alimentador CDO 07

En el análisis del estado actual, se procede a distribuir el Flujo de Carga para poder analizar el circuito en condiciones de demanda máxima.

De esta forma, para el análisis de la Distribución de Carga, se cargó los datos para el análisis de la distribución de carga máxima, cargaremos los datos extraídos de la figura 8.6.30, curvas de la corriente por fase y factor de potencia, las mismas se aprecian en la tabla siguiente.

Fases	Corriente (A)	Fp (%)
A	318	93
B	342	93
C	344	93

Tabla 8.6.13: Demanda máxima por fase del alimentador CDO 07.

Una vez introducido estos datos en el software Cymdist, se inicia el análisis, a fin de verificar los resultados de la Distribución de Carga, dicho proceso se aprecia en el apéndice C.2.4.

Seguidamente detallaremos el proceso mencionado con anterioridad en este caso, del estado actual planteado.

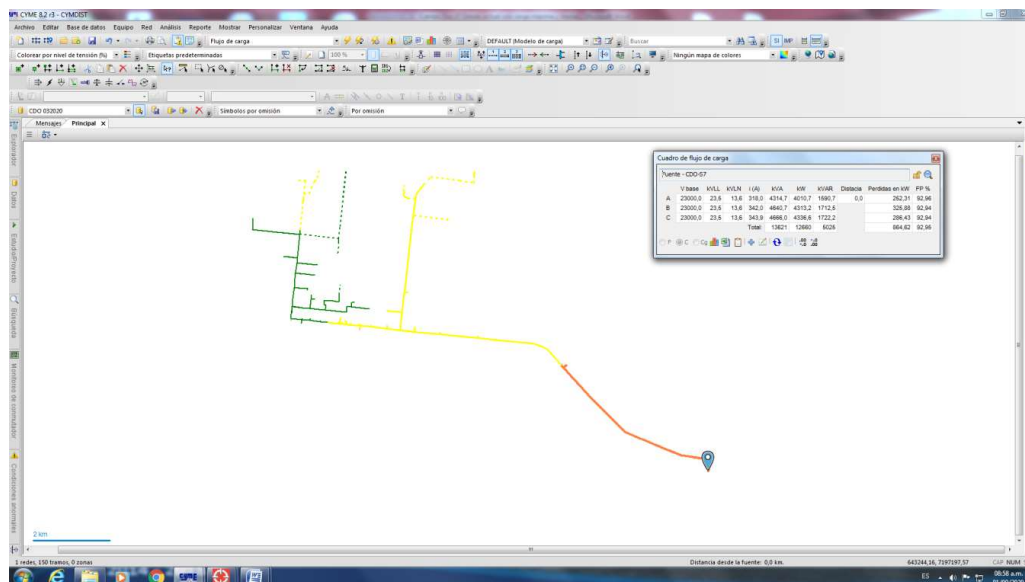


Figura 8.6.31: Estado actual del alimentador CDO 07 con carga máxima.
Fuente: Software Cymdist.

Los resultados de este escenario analizado se observan en la figura 8.6.31, así también el trazado del CDO 07, se tiene tensiones dentro del umbral establecido por la empresa, el cual es de $\pm 5\%$, este rango, se utilizó como base para este y los demás análisis. También en dicha figura se evidencia los valores de salida del alimentador.

Fuente - CDO-07										
	V base	kVLL	kVLLN	I (A)	kVA	kW	kVAR	Distancia	Perdidas en kW	FP %
A	23000,0	23,5	13,6	318,0	4314,7	4010,7	1590,7	0,0	252,31	92,96
B	23000,0	23,5	13,6	342,0	4640,7	4313,2	1712,5		325,88	92,94
C	23000,0	23,5	13,6	343,9	4666,0	4336,6	1722,2		286,43	92,94
Total					13621	12660	5025		864,62	92,95

Figura 8.6.32: Cuadro de flujo de carga máxima del alimentador CDO 07, estado actual.
Fuente: Software Cymdist, ANDE

Uno de los principales resultados arrojados por el software son los que se pueden ver en la figura 8.6.32, seleccionado la fuente, se tiene su consumo total, este es de 12.660 kW, además siguiendo el mismo resultado se tiene pérdidas por explotación igual a 864.62 kW y como este escenario aún no tiene modificaciones, el factor de potencia corresponde al cargado, se carga también el valor de la tensión de la fuente igual a 23,5 kV, estos parámetros se tuvieron en cuenta para los escenarios siguientes en donde se busca compensar el factor de potencia.

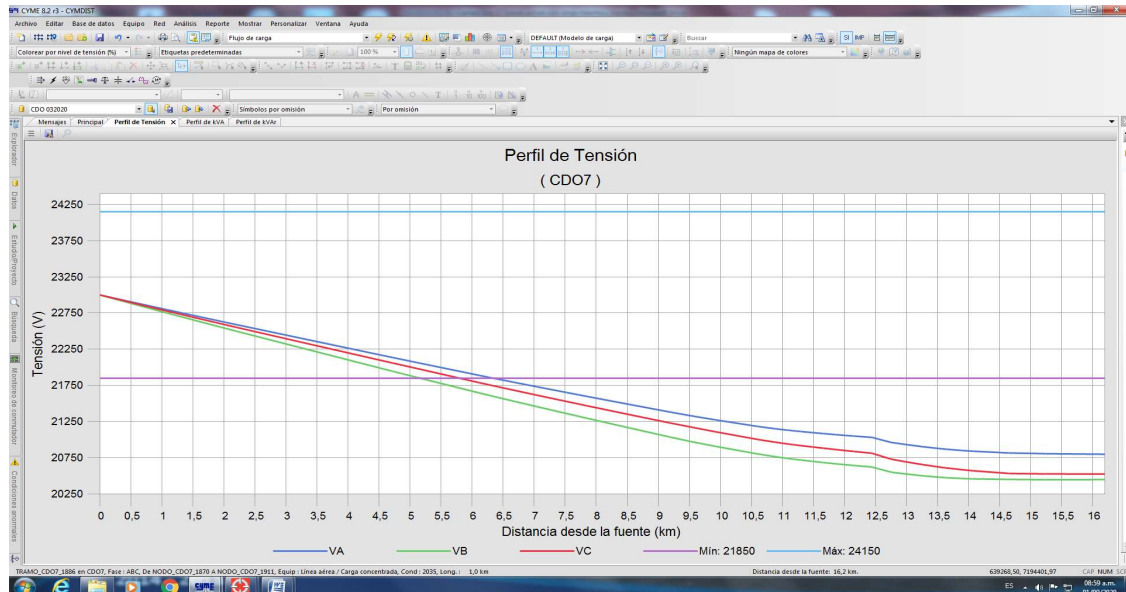


Figura 8.6.33. Estado actual de Perfil de tensión del alimentador CDO 07, con carga máxima
Fuente: Software Cymdist, ANDE

En la figura 8.6.33, puede observarse el perfil de tensión, en este escenario base del alimentador CDO 07, donde existe una caída de tensión de las tres fases, a consecuencia de su extensión y cuya tensión de referencia es de $\pm 5\%$ establecida por la Administración Nacional de Electricidad - ANDE y son los siguientes:

- Tensión Mínima: 21.850 Voltios
- Tensión Máxima: 24.150 Voltios

También, cabe mencionar referente a la Figura 8.6.33, debido a que no cuenta con ningún equipo de regulador de tensión, sin embargo por el desequilibrio de los niveles de tensión y por propiedades de la extensión del alimentador, los valores de tensión salen del rango inferior

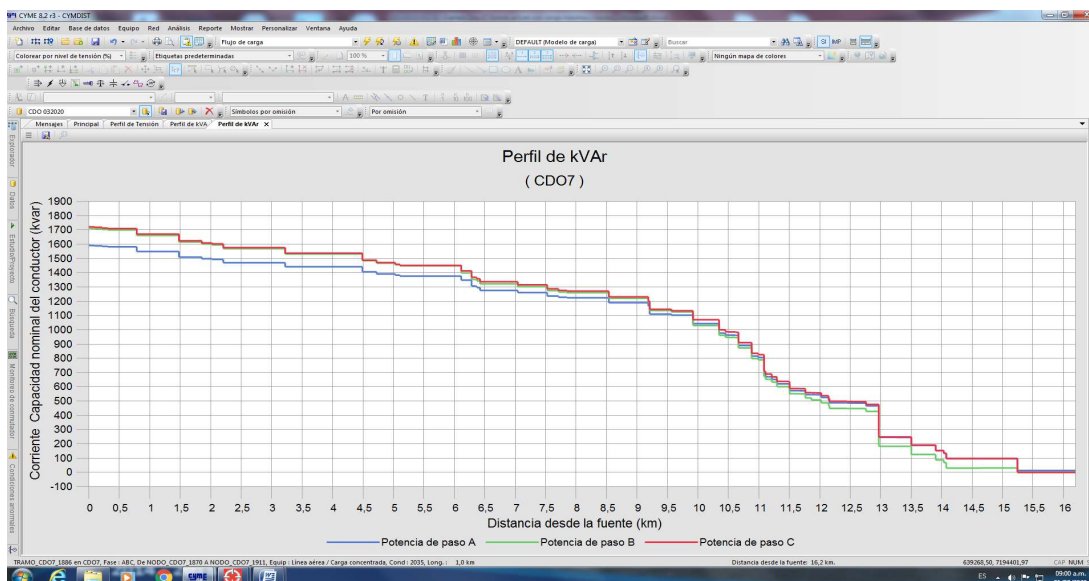


Figura 8.6.34: Estado actual del perfil kVar del alimentador CDO 07, carga máxima.

Fuente: Software Cymdist, ANDE

Otro resultado analizado se observa en la figura 8.6.34, se muestran las curvas de la potencia reactiva en kVar del alimentador CDO 07, a lo largo de su trazado.

8.6.4.3. Reporte sumario de la carga y pérdidas

Alimentador: CDO 07								
	Carga total		Carga total		Pérdidas totales		Pérdidas totales	
RED	kVA	FP (%)	kW	FP (%)	kVA	FP (%)	kW	FP (%)
CDO7	13621,36	92,95	12660,44	92,95	1388,63	62,26	864,62	62,26
Total	13621,36	92,95	12660,44	92,95	1388,63	62,26	864,62	62,26

Tabla 8.6.14: Reporte sumario del alimentador CDO 07, carga máxima

En la tabla 8.6.14, se observa un reporte sumario de cargas y pérdidas totales del alimentador CDO 07.

8.6.4.4. Desarrollo del estado con compensación del alimentador CDO 07

Continuado con el análisis del estado con compensación, para la demanda máxima, seguidamente plantearemos la forma de compensar las pérdidas de este alimentador en particular, para el cual procedimos a la “Ubicación óptima de Capacitores” del software Cymdist.

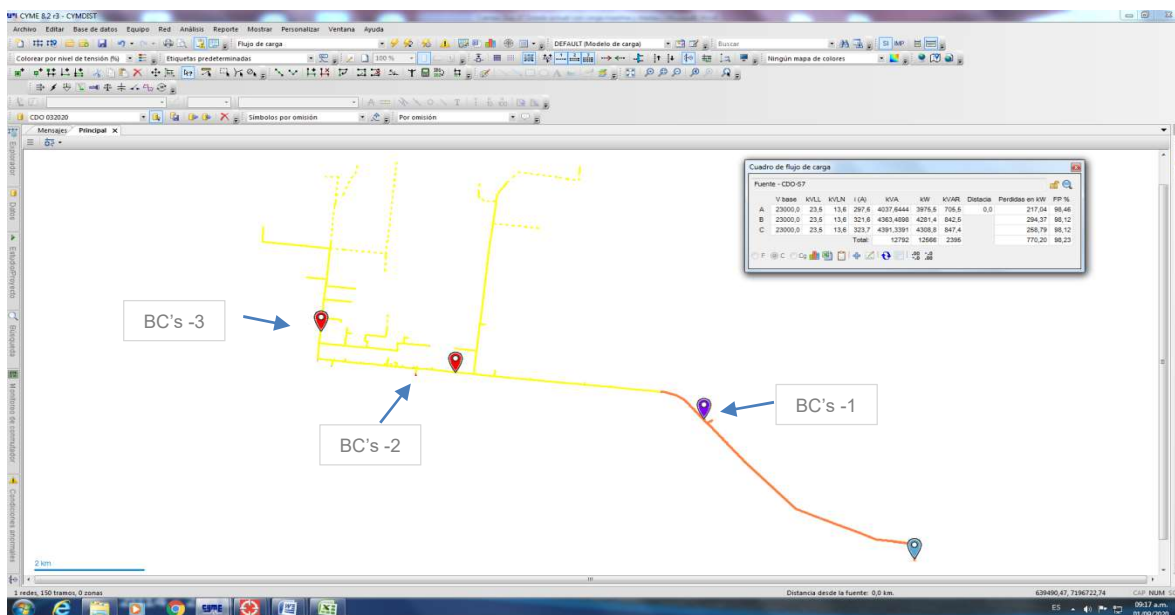


Figura 8.6.35: Representación del estado con compensación del alimentador CDO 07, carga máxima.

Fuente: Software Cymdist, ANDE

En la figura 8.6.35, se observa el arreglo del alimentador CDO 07, posterior a este análisis se detallan en la tabla 8.6.15, las características y ubicaciones optimas de cada banco de capacitores.

Ubicación óptima de los Banco de Capacitores			
ítem	Capacidad kVAr/Fase	Tipo	Distancia de la fuente
BCs-1	300	Automático	6,2 km
BCs-2	200	Fijo	9,9 km
BCs-3	200	Fijo	13,3 km

Tabla 8.6.15: Características y ubicación de los Bancos de capacitores.

Fuente: Elaboración propia

Cuadro de flujo de carga									
Fuente: CDO-07									
	V base	KVLL	KVLN	I(A)	KVA	KW	KVAR	Distancia	Perdidas en kW
A	23000,0	23,5	13,6	297,6	4037,6444	3975,5	705,5	0,0	217,04
B	23000,0	23,5	13,6	321,6	4363,4898	4281,4	842,5		294,37
C	23000,0	23,5	13,6	323,7	4391,3391	4306,8	847,4		258,79
Total:					12792	12666	2395		770,20
									FP %
A									98,46
B									98,12
C									98,12
Total:									98,23

Figura 8.6.36: Cuadro de flujo de carga del alimentador CDO 07, estado con compensación.

Fuente: Software Cymdist, ANDE.

Al ejecutar el software Cymdist y analizar los reportes entregados se pudo establecer la ubicación óptima de capacitores mostrada en la figura 8.6.5. En la tabla 8.6.15, se indica el banco de capacitores en kVAr que se debe instalar y el tramo donde se debe instalar. La figura 8.6.36, se muestra el Flujo de Carga obtenido después de realizar la compensación, donde se observa un nuevo valor del Factor de Potencia igual a 98,23, mayor al escenario anterior, por otra parte, el total de pérdidas en kW disminuyó respecto al escenario base.

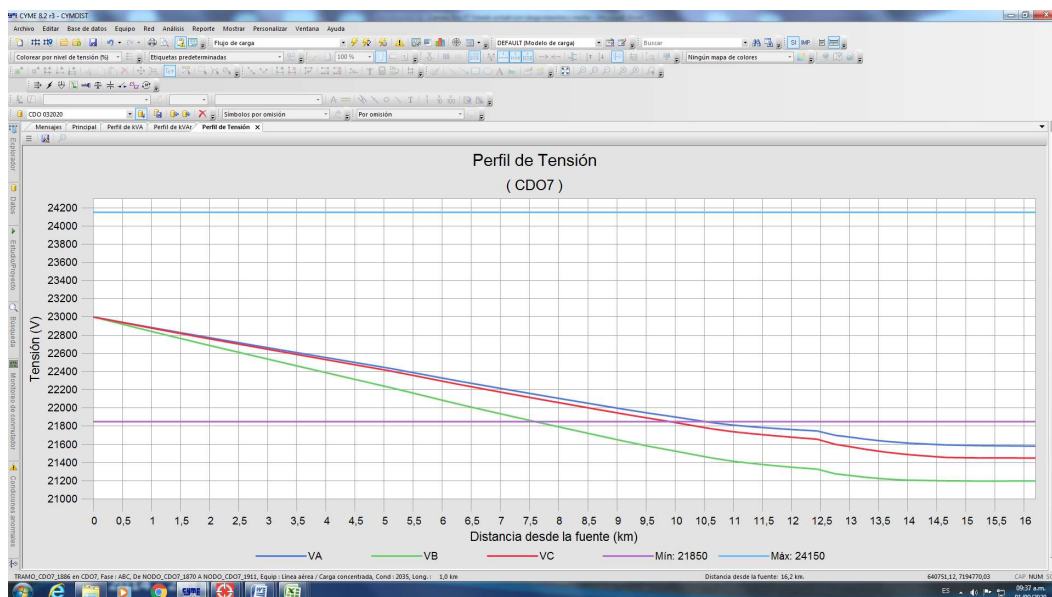


Figura 8.6.37: Representación del estado con compensación del alimentador CDO 07, carga máxima.

Fuente: Software Cymdist, ANDE

En la figura 8.6.37, se observa el perfil de tensión del alimentador CDO 07 con compensación y demuestra una eficacia producida en la ubicación óptima de los bancos, lograndose una mejora en la caída de tensión de las tres fases.

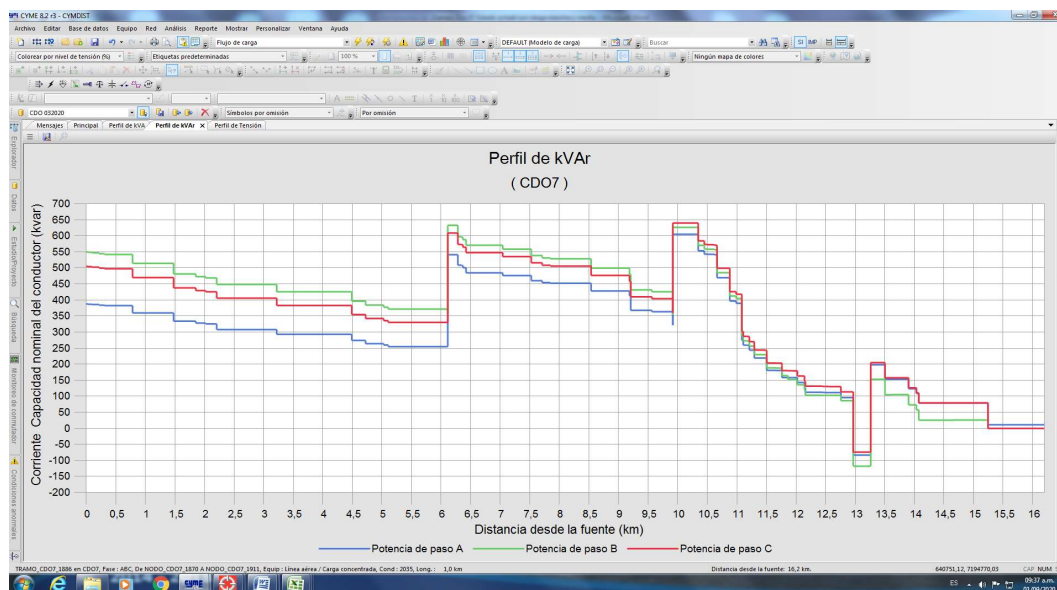


Figura 8.6.38: Estado con compensación del perfil kVAr del alimentador CDO 07, carga máxima.
Fuente: Software Cymdist, ANDE

En la figura 8.6.38, se muestra el mejoramiento en las curvas de la potencia en kVAr del alimentador CDO 07.

8.6.4.5. Reporte sumario de la carga y pérdidas

Alimentador: CDO 07								
	Carga total		Carga total		Pérdidas totales		Pérdidas totales	
RED	kVA	FP (%)	kW	FP (%)	kVA	FP (%)	kW	FP (%)
CDO7	12792,00	98,23	12565,71	98,23	1236,47	62,29	770,20	62,29
Total	12792,00	98,23	12565,71	98,23	1236,47	62,29	770,20	62,29

Tabla 8.6.16: Reporte sumario del alimentador CDO 07, con compensado, carga máxima

En la tabla 8.6.16, se observa un reporte sumario de las cargas y pérdidas totales del alimentador CDO 07 con compensación.

8.6.5. Estudio del alimentador CDO 08

8.6.5.1. Análisis demanda del alimentador Campo Dos 08

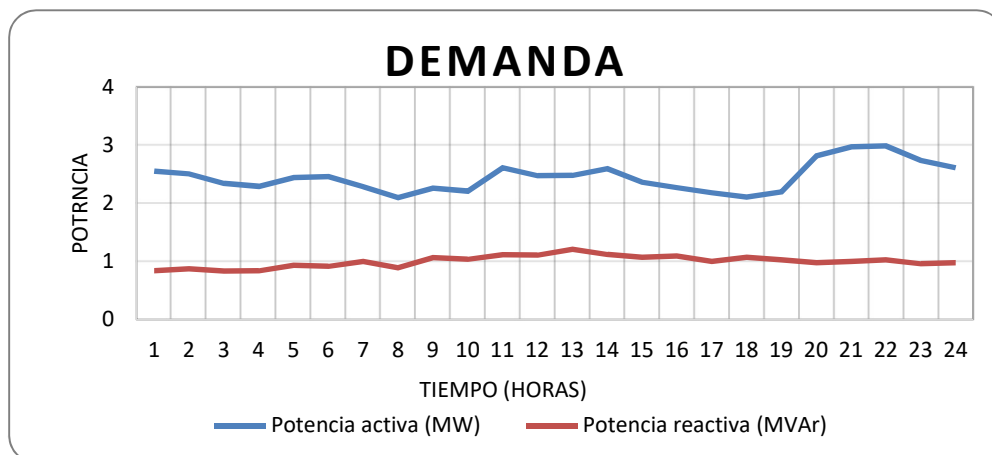


Figura 8.6.39: Demanda de alimentador CDO 08.
Fuente: Multimeditores ION 7330. ES-CDO, ANDE.

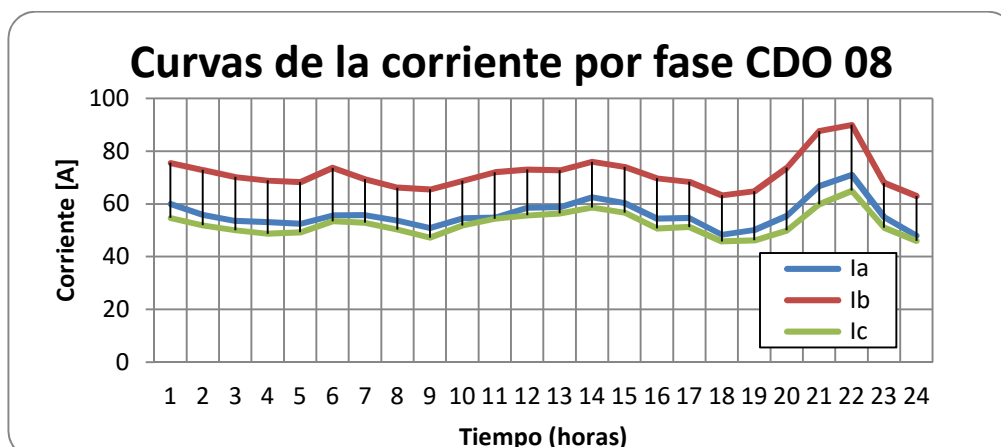


Figura 8.6.40: Curvas de la corriente por fase del alimentador CDO 08.
Fuente: Multimeditores ION 7330. ES-CDO, ANDE.

En la figura 8.6.40, se muestra el comportamiento de las curvas de la corriente por fase del alimentador CDO 08, el cual presenta una demanda máxima.

Para el caso de la demanda máxima, que es comprendido entre las 19 y 23 horas, en épocas más calurosas del año, verano, encontrándose en el horario de punta de carga, por lo que se deduce que es a consecuencia de una demanda de origen residencial.

8.6.5.2. Desarrollo del estado actual del alimentador CDO 08

En el análisis del estado actual, se procede a distribuye el Flujo Carga para poder analizar el circuito en condiciones de demanda máxima.

De esta forma, para el análisis de la Distribución de Carga máxima, se cargó los datos extraídos de la figura 8.6.40, curvas de la corriente por fase y factor de potencia, las mismas se aprecian en la tabla siguiente.

Fases	Corriente (A)	Fp (%)
A	71	93
B	90	93
C	65	93

Tabla 8.6.17: Demanda máxima por fase del alimentador CDO 08.

Una vez introducido estos datos en el software Cyndist, se inicia el análisis, a fin de verificar los resultados de la Distribución de Carga, dicho proceso se aprecia en el apéndice C.2.5.

Seguidamente detallaremos el proceso mencionado con anterioridad en este caso, del estado actual planteado.

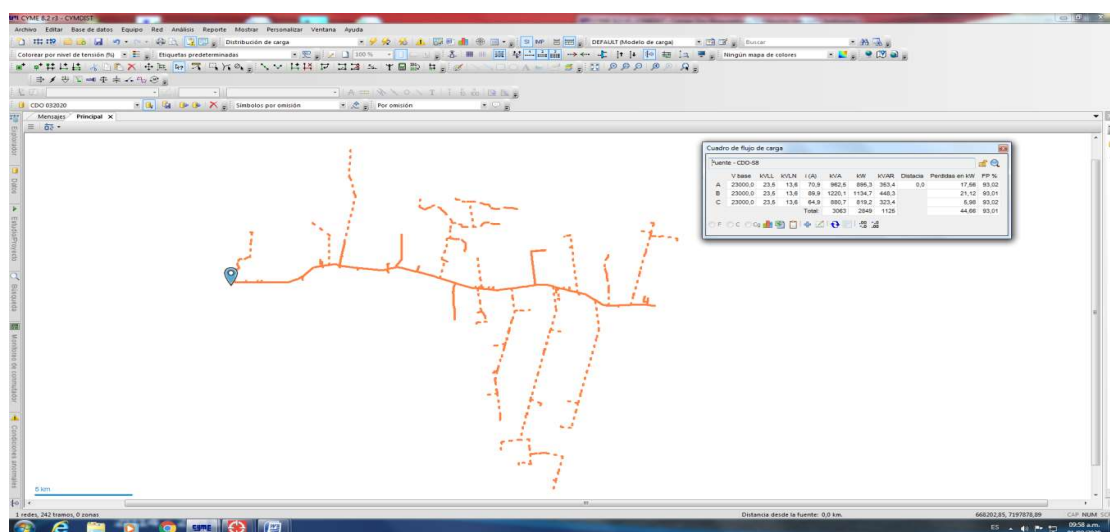


Figura 8.6.41: Estado actual del alimentador CDO 08, carga máxima
Fuente: Software Cyndist, ANDE

Los resultados de este escenario analizado se observan en la figura 8.6.41, así también el trazado del CDO 08, se tiene tensiones dentro del umbral establecido por la empresa, el cual es de $\pm 5\%$, este rango, se utilizó como base para este y

los demás análisis. También en dicha figura se evidencia los valores de salida del alimentador.

	V base	KVLL	KVLLN	I (A)	KVA	KW	KVAR	Distancia	Perdidas en kW	FP %
A	23000,0	23,5	13,6	70,9	962,5	895,3	363,4	0,0	17,56	93,02
B	23000,0	23,5	13,6	89,9	1220,1	1134,7	448,3		21,12	93,01
C	23000,0	23,5	13,6	64,9	880,7	819,2	323,4		5,98	93,02
Total					3063	2849	1125		44,66	93,01

Figura 8.6.42: Cuadro de flujo de carga máxima del alimentador CDO 08, estado actual.

Fuente: Software Cymdist, ANDE

Uno de los principales resultados arrojados por el software son los que se pueden ver en la figura 8.6.42, seleccionado la fuente, se tiene su consumo total, este es de 2.849 kW, además siguiendo el mismo resultado se tiene pérdidas por explotación igual a 44,66 kW y como este escenario aún no tiene modificaciones, el factor de potencia corresponde al cargado, se carga también el valor de la tensión de la fuente igual a 23,5 kV, estos parámetros se tuvieron en cuenta para los escenarios siguientes en donde se busca compensar el factor de potencia.

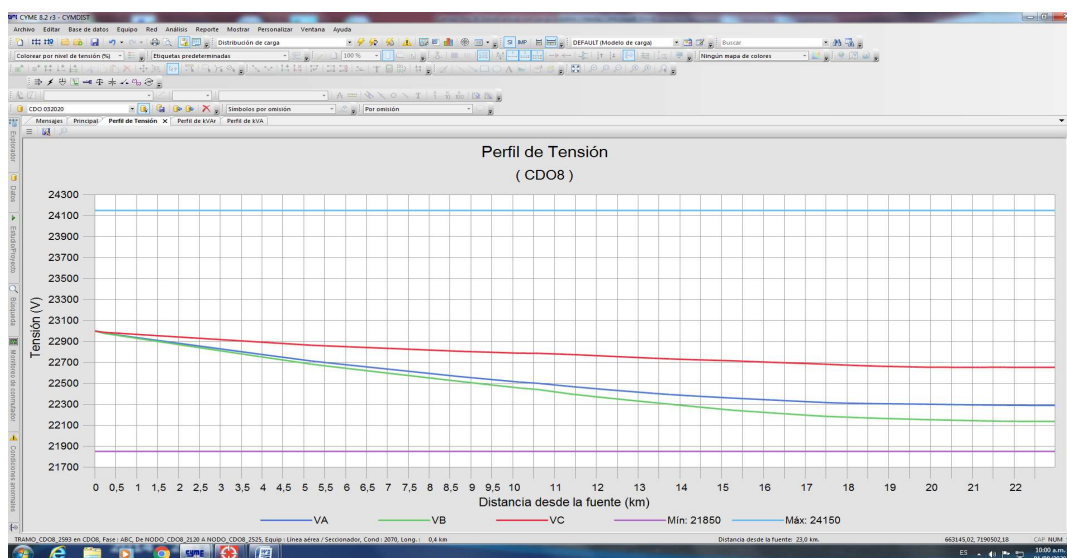


Figura 8.6.43: Estado actual de Perfil de tensión con carga máxima
Fuente: Software Cymdist, ANDE

En la figura 8.6.43, puede observarse el perfil de tensión, en este escenario base del alimentador CDO 08, donde existe una caída de tensión de las tres

fases, pero esta entre la tensión de referencia de $\pm 5\%$ establecida por la Administración Nacional de Electricidad - ANDE y son los siguientes:

- Tensión Mínima: 21.850 Voltios
- Tensión Máxima: 24.150 Voltios

También, cabe mencionar referente a la Figura 8.6.43, debido a que no cuenta con ningún equipo de regulador de tensión.

Asimismo, si bien se realizó la introducción de los datos pertinentes en el simulador, este arrojó mínimas pérdidas, por lo que el investigador concluyó no realizar la compensación con este alimentador en particular.

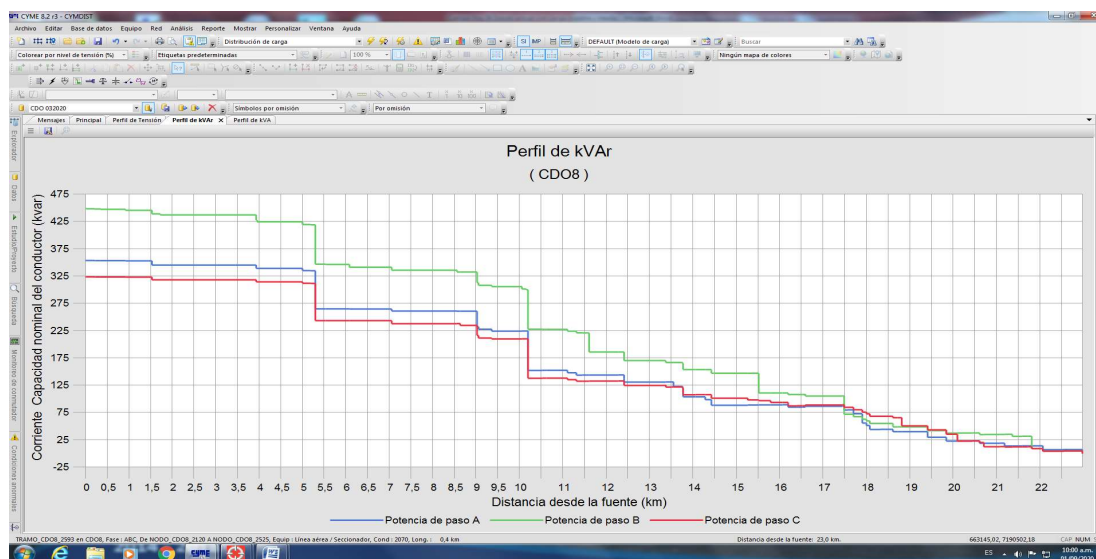


Figura 8.6.44: Estado actual del perfil kVAr del alimentador CDO 08, carga máxima.

Fuente: Software Cymdist, ANDE

En la figura 8.6.44, se muestra el comportamiento de la potencia reactiva en kVAr del alimentador CDO 08.

8.6.5.3. Reporte sumario de la carga y pérdidas

Alimentador: CDO 08								
	Carga total		Carga total		Pérdidas totales		Pérdidas totales	
RED	kVA	FP (%)	kW	FP (%)	kVA	FP (%)	kW	FP (%)
CDO8	3063,28	93,01	2849,22	93,01	69,73	64,05	44,66	64,05
Total	3063,28	93,01	2849,22	93,01	69,73	64,05	44,66	64,05

Tabla 8.6.18: Reporte sumario del alimentador CDO 08, carga máxima

En la tabla 8.6.18, se observa un reporte sumario de cargas y pérdidas totales del alimentador CDO 08.

8.6.6. Estudio de alimentador CDO 09

8.6.6.1. Análisis demanda del alimentador CDO 09

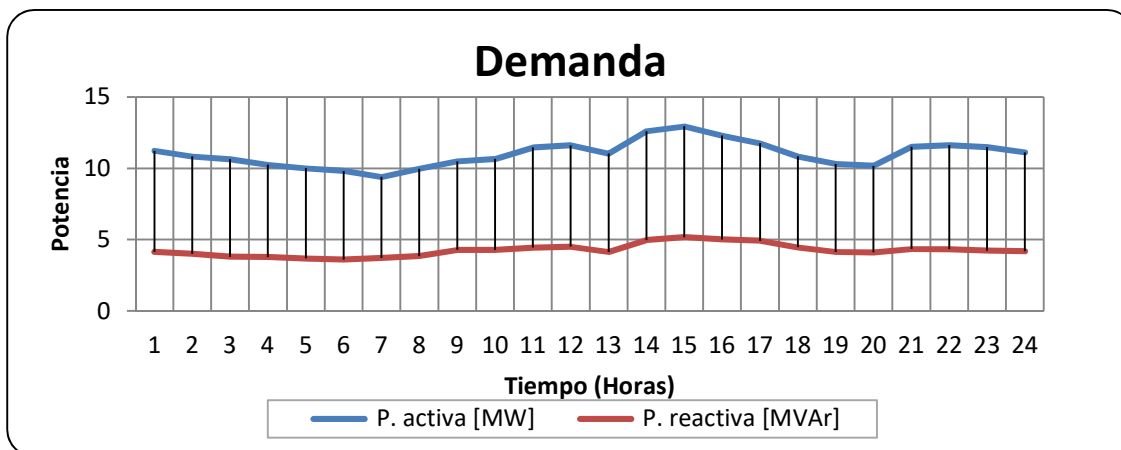


Figura 8.6.45: Demanda de alimentador CDO 09.
Fuente: Multimedidores ION 7330. ES-CDO, ANDE.

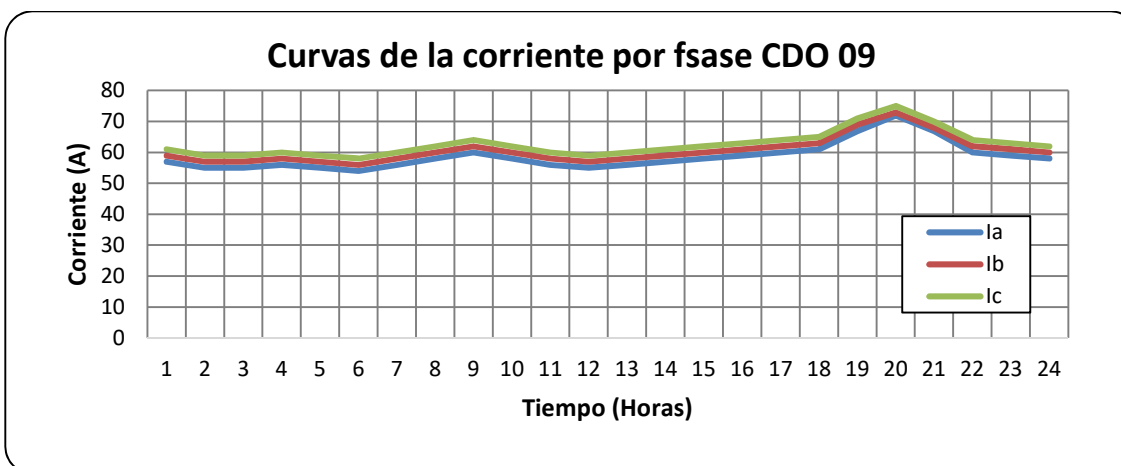


Figura 8.6.46: Curvas de la corriente por fase del alimentador CDO 09, estado actual.
Fuente: Multimedidores ION 7330. ES-CDO, ANDE.

En la figura 8.6.46, se muestra el comportamiento de las curvas de la corriente por fase del alimentador CDO 09, el cual presenta una demanda máxima.

Para el caso de la demanda máxima, que es comprendido entre las 18 y 22 horas, en épocas más calurosas del año, verano, encontrándose en el horario de punta de carga, por lo que se deduce que es a consecuencia de una demanda de origen residencial.

8.6.6.2. Desarrollo del estado actual del alimentador CDO 09

En el análisis del estado actual, se procede a distribuye el Flujo Carga para poder analizar el circuito en condiciones de demanda máxima.

De esta forma, para el análisis de la Distribución de Carga máxima, se cargó los datos extraídos de la figura 8.6.46, curvas de la corriente por fase y factor de potencia, las mismas se aprecian en la tabla siguiente.

Fases	Corriente (A)	Fp (%)
A	72	93
B	73	93
C	75	93

Tabla 8.6.19: Demanda máxima por fase del alimentador CDO 09.

Una vez introducido estos datos en el software Cymdist, se inicia el análisis, a fin de verificar los resultados de la Distribución de Carga, dicho proceso se aprecia en el apéndice C.2.6.

Seguidamente detallaremos el proceso mencionado con anterioridad en este caso, del estado actual planteado.

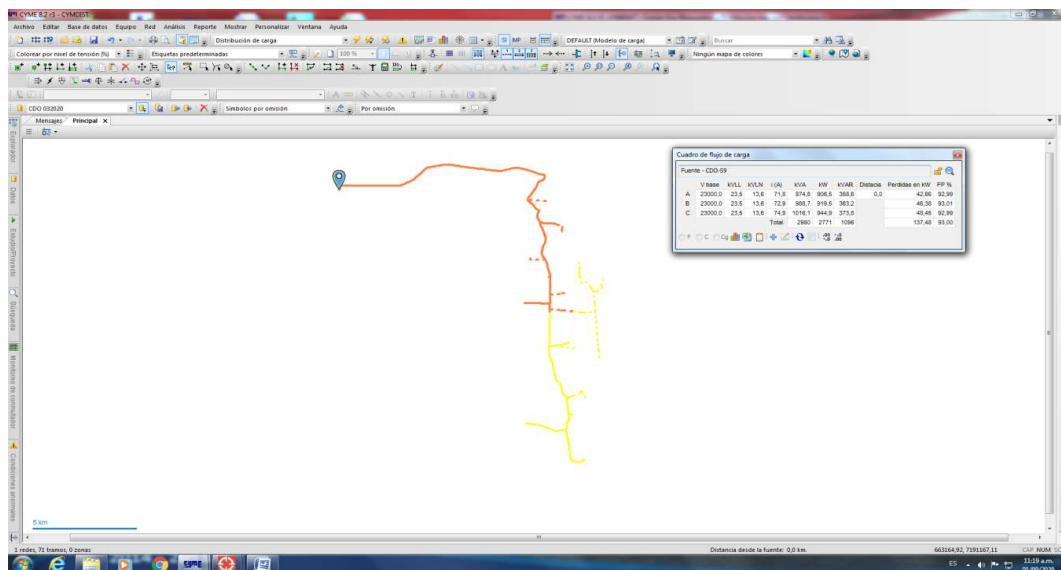
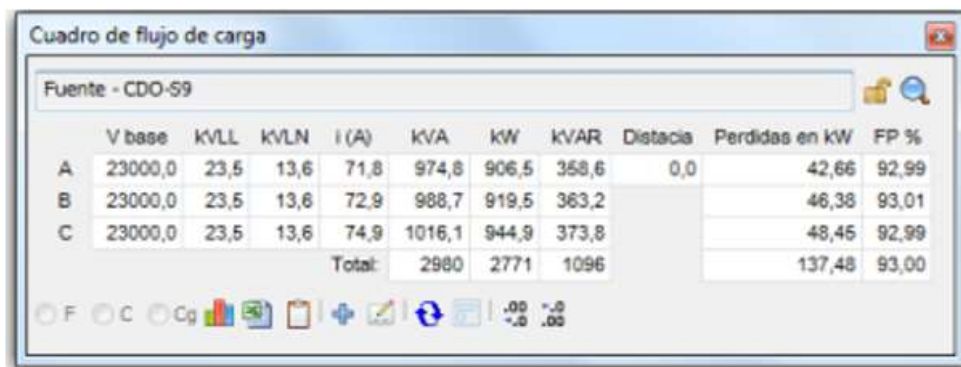


Figura 8.6.47: Estado actual del alimentador CDO 09, carga máxima
Fuente: Software Cymdist, ANDE

Los resultados de este escenario analizado se observan en la figura 8.6.47, así también el trazado del CDO 09, se tiene tensiones dentro del umbral establecido por la empresa, el cual es de $\pm 5 \%$, este rango, se utilizó como base para este y

los demás análisis. También en dicha figura se evidencia los valores de salida del alimentador.



	V base	KVLL	KVLN	I (A)	KVA	kW	KVAR	Distacia	Perdidas en kW	FP %
A	23000,0	23,5	13,6	71,8	974,8	906,5	358,6	0,0	42,66	92,99
B	23000,0	23,5	13,6	72,9	988,7	919,5	363,2		46,38	93,01
C	23000,0	23,5	13,6	74,9	1016,1	944,9	373,8		48,45	92,99
Total:					2980	2771	1096		137,48	93,00

Figura 8.6.48: Cuadro de flujo de carga máxima del alimentador CDO 09, estado actual.

Fuente: Software Cymdist, ANDE

Uno de los principales resultados arrojados por el software son los que se pueden ver en la figura 8.6.48, seleccionado la fuente, se tiene su consumo total, este es de 2.771 kW, además siguiendo el mismo resultado se tiene pérdidas por explotación igual a 137,48 kW y como este escenario aún no tiene modificaciones, el factor de potencia corresponde al cargado, se carga también el valor de la tensión de la fuente igual a 23,5 kV, estos parámetros se tuvieron en cuenta para los escenarios siguientes en donde se busca compensar el factor de potencia.

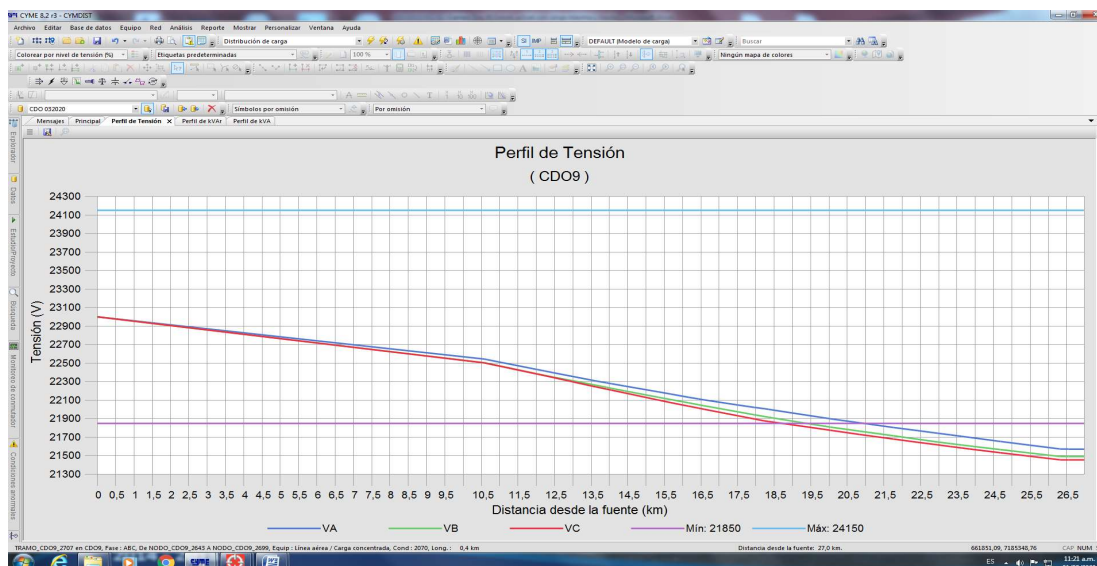


Figura 8.6.49: Estado actual de Perfil de tensión con carga máxima

Fuente: Software Cymdist, ANDE

En la figura 8.6.49, puede observarse el perfil de tensión, en este escenario base del alimentador CDO 09, donde existe una caída de tensión de las tres fases, a consecuencia de su extensión y cuya tensión de referencia es de $\pm 5\%$ establecida por la Administración Nacional de Electricidad - ANDE y son los siguientes:

- Tensión Mínima: 21.850 Voltios
- Tensión Máxima: 24.150 Voltios

También, cabe mencionar referente a la figura 8.6.49, debido a que no cuenta con ningún equipo de regulador de tensión, sin embargo por el desequilibrio de los niveles de tensión y por propiedades de la extensión del alimentador, los valores de tensión salen del rango inferior

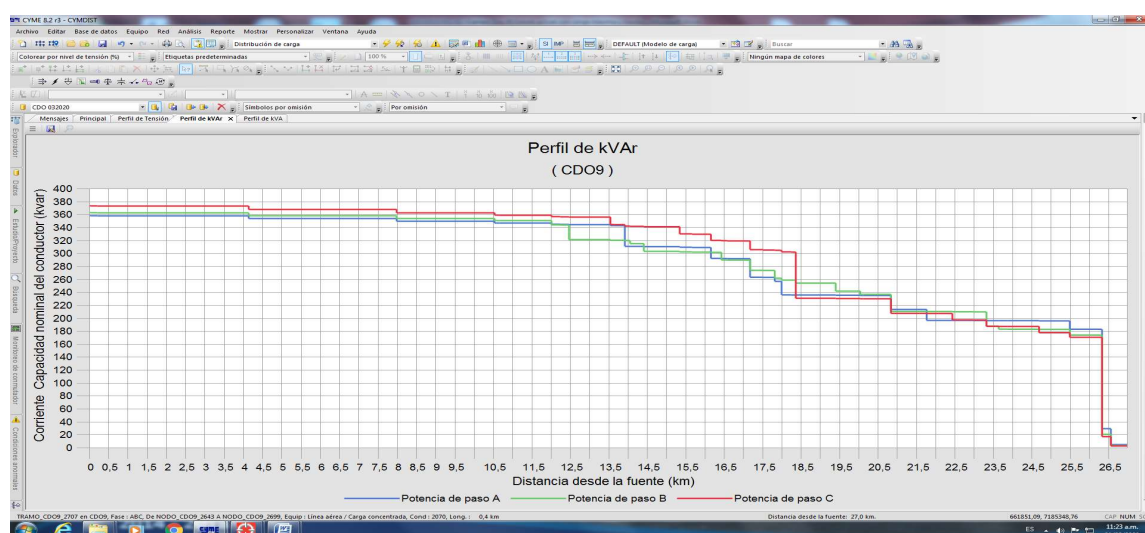


Figura 8.6.50: Estado actual del perfil kVar del alimentador CDO 09, carga máxima.

Fuente: Software Cymdist, ANDE

En la figura 8.6.50, se muestra el comportamiento de la potencia reactiva en kVar del alimentador CDO 09.

8.6.6.3. Reporte sumario de la carga y pérdidas

Alimentador: CDO 09								
	Carga total		Carga total		Pérdidas totales		Pérdidas totales	
RED	kVA	FP (%)	kW	FP (%)	kVA	FP (%)	kW	FP (%)
CDO9	2979,62	93,00	2770,90	93,00	181,60	75,71	137,48	75,71
Total	2979,62	93,00	2770,90	93,00	181,60	75,71	137,48	75,71

Tabla 8.6.20: Reporte sumario del alimentador CDO 09, según carga máxima

En la tabla 8.6.20, se observa un reporte sumario de cargas y pérdidas totales del alimentador CDO 09.

8.6.6.4. Desarrollo del estado con compensación del alimentador CDO 07

Continuado con el análisis del estado con compensación, para la demanda máxima, seguidamente plantearemos la forma de compensar las pérdidas de este alimentador en particular, para el cual procedimos a la “Ubicación óptima de Capacitores” del software Cymdist.

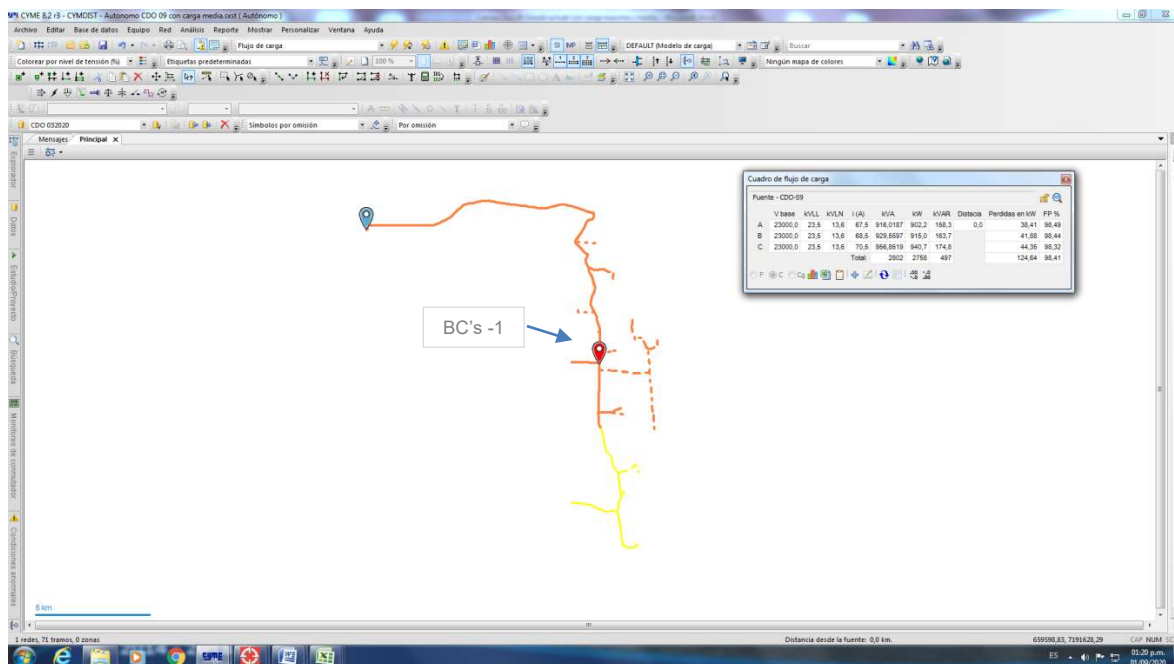


Figura 8.6.51: Representación del estado con compensación del alimentador CDO 09, carga máxima.
Fuente: Software Cymdist, ANDE

En la figura 8.6.51, se observa el arreglo del alimentador CDO 09, posterior a este análisis se detallan en la tabla 8.6.21, las características y ubicaciones óptimas de cada banco de capacitores:

Ubicación óptima de los Banco de Capacitores			
ítem	Capacidad kVAr/Fase	Tipo	Distancia de la fuente
BCs-1	200	Fijo	18,2 km

Tabla 8.6.21: Características y ubicación de los Bancos de capacitores.
Fuente: Elaboración propia

Cuadro de flujo de carga

Fuente - CDO-S9

	V base	KVLL	KV/LN	I (A)	KVA	KW	KVAR	Distacia	Perdidas en kW	FP %
A	23000,0	23,5	13,6	67,5	916,0187	902,2	158,3	0,0	38,41	98,49
B	23000,0	23,5	13,6	68,5	929,5597	915,0	163,7		41,88	98,44
C	23000,0	23,5	13,6	70,5	956,8519	940,7	174,8		44,35	98,32
Total:					2802	2758	497		124,64	98,41

Figura 8.6.52: Cuadro de flujo de carga del alimentador CDO 09, con compensación.

Fuente: Software Cymdist, ANDE.

Al ejecutar el software Cymdist y analizar los reportes entregados se pudo establecer la ubicación óptima de capacitores mostrada en la figura 8.6.51. En la tabla 8.6.21, se indica el banco de capacitores en kVAr que se debe instalar y el tramo donde se debe instalar. Según la figura 8.6.52, el Flujo de Carga obtenido después de realizar la compensación, donde se observa un nuevo valor del Factor de Potencia igual a 98,41, mayor al escenario anterior, por otra parte, el total de pérdidas en kW disminuyó respecto al escenario base.

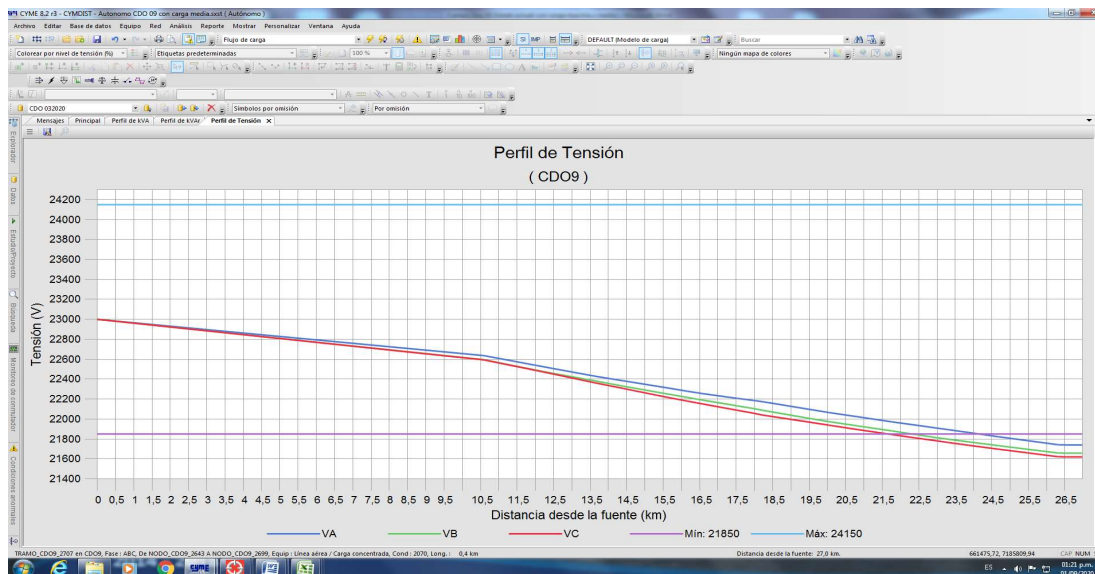


Figura 8.6.53: Representación del estado con compensación del alimentador CDO 09, carga máxima.

Fuente: Software Cymdist, ANDE

En la figura 8.6.53, se observa el perfil de tensión del alimentador CDO 09 con compensación y demuestra una eficacia producida en la ubicación óptima del banco, lograndose una mejora en la caída de tensión de las tres fases.

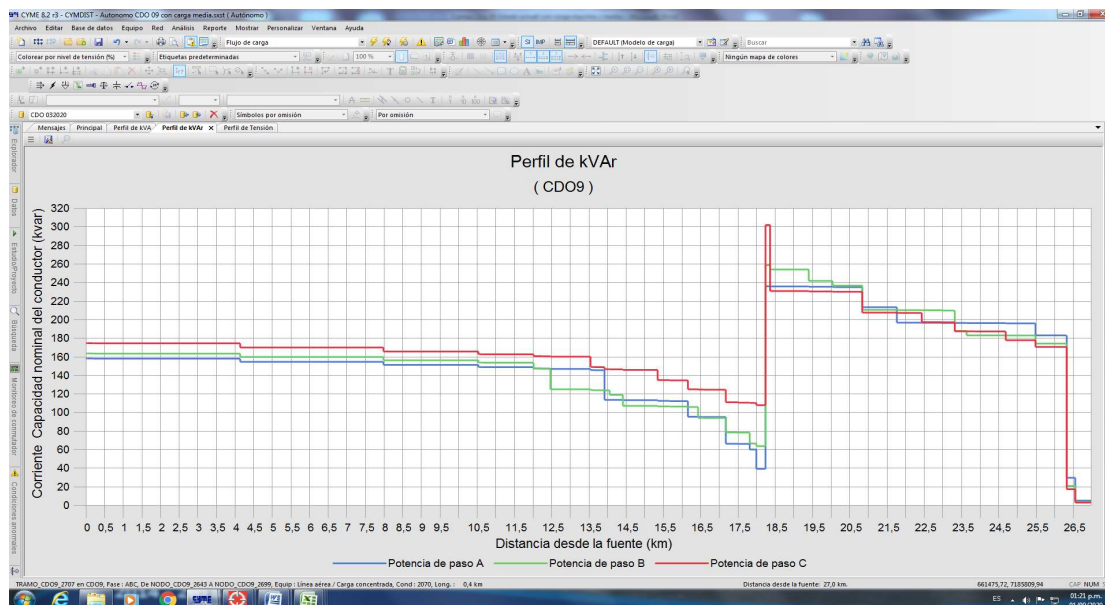


Figura 8.6.54: Estado con compensación del perfil kVar del alimentador CDO 09, según carga máxima.
Fuente: Software Cymdist, ANDE

En la figura 8.6.54, se muestra el comportamiento de la potencia reactiva en kVar del alimentador CDO 09 con compensación.

8.6.6.5. Reporte sumario de la carga y pérdidas

Alimentador: CDO 09								
	Carga total		Carga total		Pérdidas totales		Pérdidas totales	
RED	kVA	FP (%)	kW	FP (%)	kVA	FP (%)	kW	FP (%)
CDO9	2802,41	98,42	2758,01	98,42	164,24	75,89	124,64	75,89
Total	2802,41	98,42	2758,01	98,42	164,24	75,89	124,64	75,89

Tabla 8.6.22: Reporte sumario del alimentador CDO 09, carga máxima, con compensación

En la tabla 8.6.22, se observa un reporte sumario de las cargas y pérdidas totales del alimentador CDO 09 con compensación.

8.6.7. Estudio del alimentador CDO 10

8.6.7.1. Análisis demanda del alimentador CDO 10

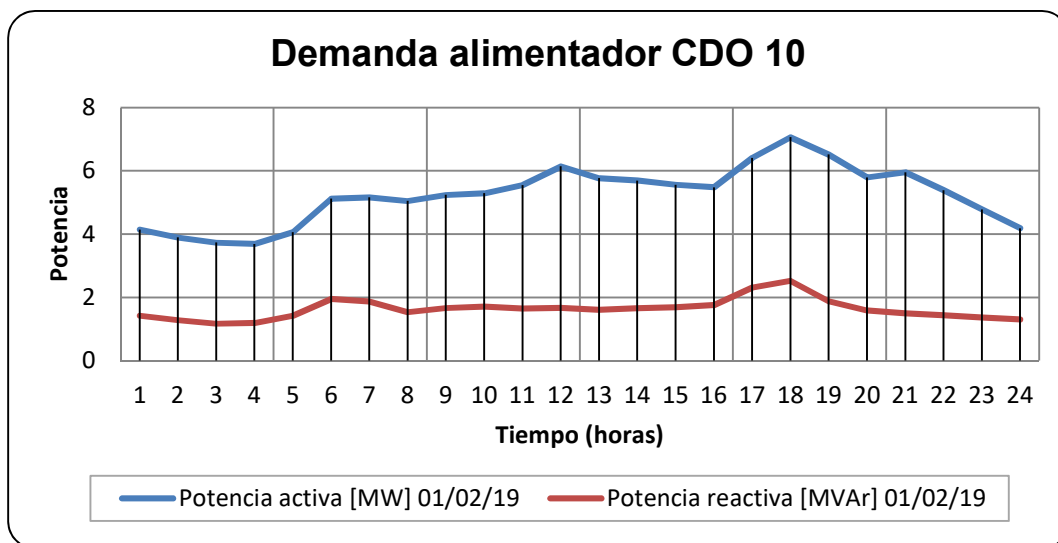


Figura 8.6.55: Demanda de alimentador CDO 10.
Fuente: Multimedidores ION 7330. ES-CDO, ANDE.

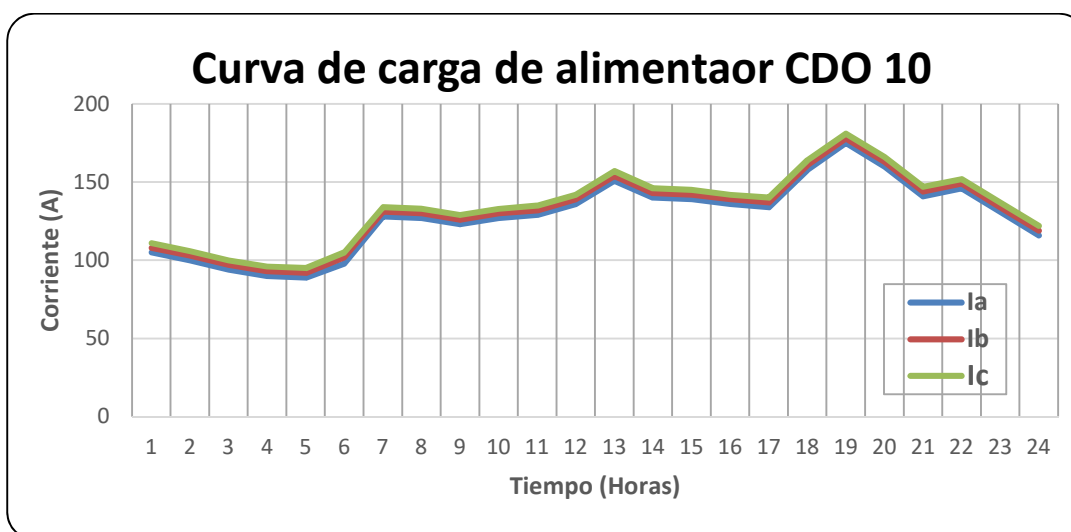


Figura 8.6.56: Curvas de la corriente por fase del alimentador CDO 10.
Fuente: Multimedidores ION 7330. ES-CDO, ANDE.

En la figura 8.6.56, se muestra el comportamiento de las curvas de la corriente por fase del alimentador CDO 10, el cual presenta una demanda máxima.

Para el caso de la demanda máxima, que es comprendido entre las 17 y 21 horas, en épocas más calurosas del año, verano, encontrándose en el horario de punta de carga, por lo que se deduce que es a consecuencia de una demanda de origen residencial.

8.6.7.2. Desarrollo del estado actual del alimentador CDO 10

En el análisis del estado actual, se procede a distribuye el Flujo Carga para poder analizar el circuito en condiciones de demanda máxima.

De esta forma, para el análisis de la Distribución de Carga máxima, se cargó los datos extraídos de la figura 8.6.56, curvas de la corriente por fase y factor de potencia, las mismas se aprecian en la tabla siguiente.

Fases	Corriente (A)	Fp (%)
A	181	94
B	178	94
C	175	94

Tabla 8.6.23: Demanda máxima por fase del alimentador CDO 10.

Una vez introducido estos datos en el software Cymdist, se inicia el análisis, a fin de verificar los resultados de la Distribución de Carga, dicho proceso se aprecia en el apéndice C.2.7.

Seguidamente detallaremos el proceso mencionado con anterioridad en este caso, del estado actual planteado.

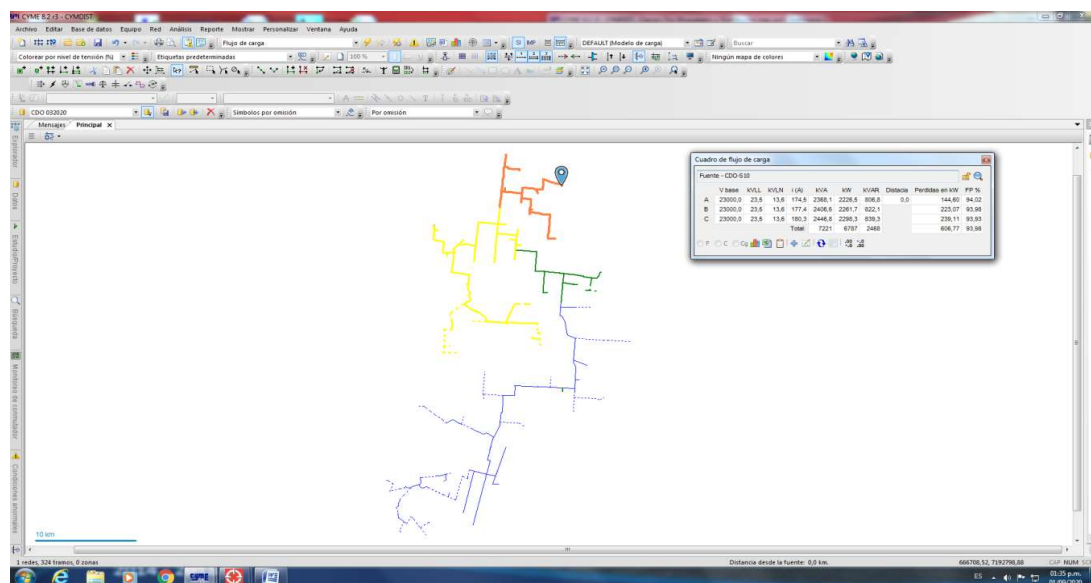
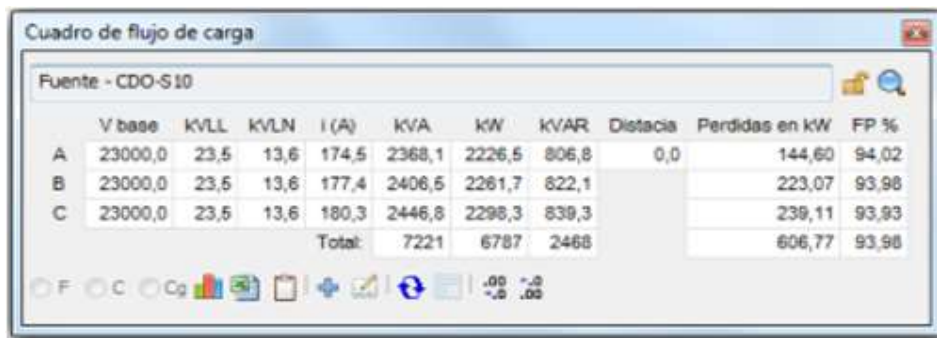


Figura 8.6.57: Estado actual del alimentador CDO 10 con carga máxima
Fuente: Software Cymdist, ANDE

Los resultados de este escenario analizado se observan en la figura 8.6.57, así también el trazado del CDO 10, se tiene tensiones dentro del umbral establecido por la empresa, el cual es de $\pm 5\%$, este rango, se utilizó como base para este y

los demás análisis. También en dicha figura se evidencia los valores de salida del alimentador.



	V base	KVLL	KVLN	I (A)	KVA	KW	KVAR	Distancia	Perdidas en kW	FP %
A	23000,0	23,5	13,6	174,5	2368,1	2226,5	806,8	0,0	144,60	94,02
B	23000,0	23,5	13,6	177,4	2406,5	2261,7	822,1		223,07	93,98
C	23000,0	23,5	13,6	180,3	2446,8	2298,3	839,3		239,11	93,93
Total:					7221	6787	2468		606,77	93,98

Figura 8.6.58: Cuadro de flujo de carga máxima del alimentador CDO 10, estado actual.

Fuente: Software Cymdist, ANDE

Uno de los principales resultados arrojados por el software son los que se pueden ver en la figura 8.6.58, seleccionado la fuente, se tiene su consumo total, este es de 6.787 kW, además siguiendo el mismo resultado se tiene pérdidas por explotación igual a 606,77 kW y como este escenario aún no tiene modificaciones, el factor de potencia corresponde al cargado, se carga también el valor de la tensión de la fuente igual a 23,5 kV, estos parámetros se tuvieron en cuenta para los escenarios siguientes en donde se busca compensar el factor de potencia.

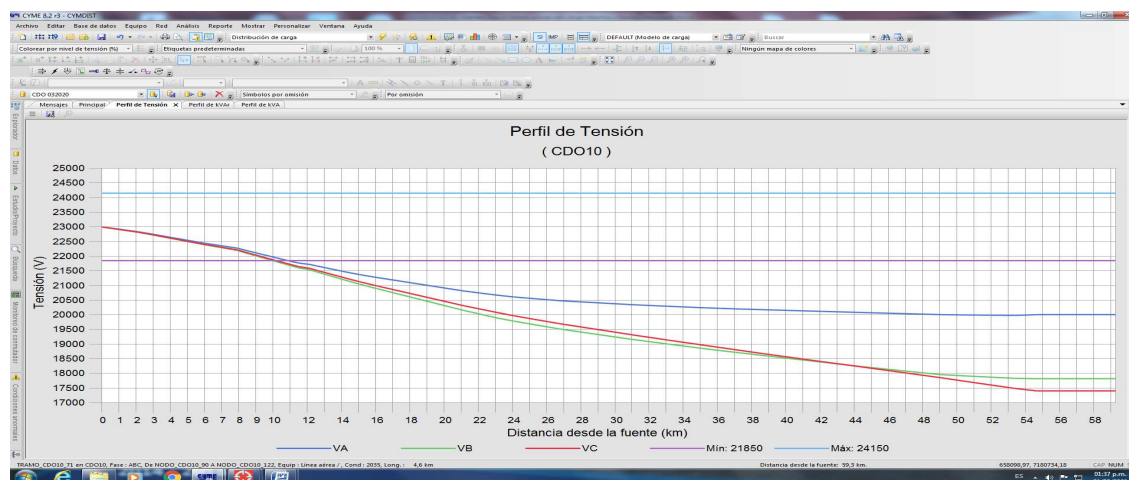


Figura 8.6.59: Estado actual de Perfil de tensión con carga máxima

Fuente: Software Cymdist, ANDE

En la figura 8.6.59, puede observarse el perfil de tensión, en este escenario base del alimentador CDO 10, donde existe una caída de tensión de las tres fases, a consecuencia de su extensión y cuya tensión de referencia es de $\pm 5\%$

establecida por la Administración Nacional de Electricidad - ANDE y son los siguientes:

- Tensión Mínima: 21.850 Voltios
- Tensión Máxima: 24.150 Voltios

También, cabe mencionar referente a la figura 8.6.59, debido a que no cuenta con ningún equipo de regulador de tensión, sin embargo por el desequilibrio de los niveles de tensión y por propiedades de la extensión del alimentador, los valores de tensión salen del rango inferior

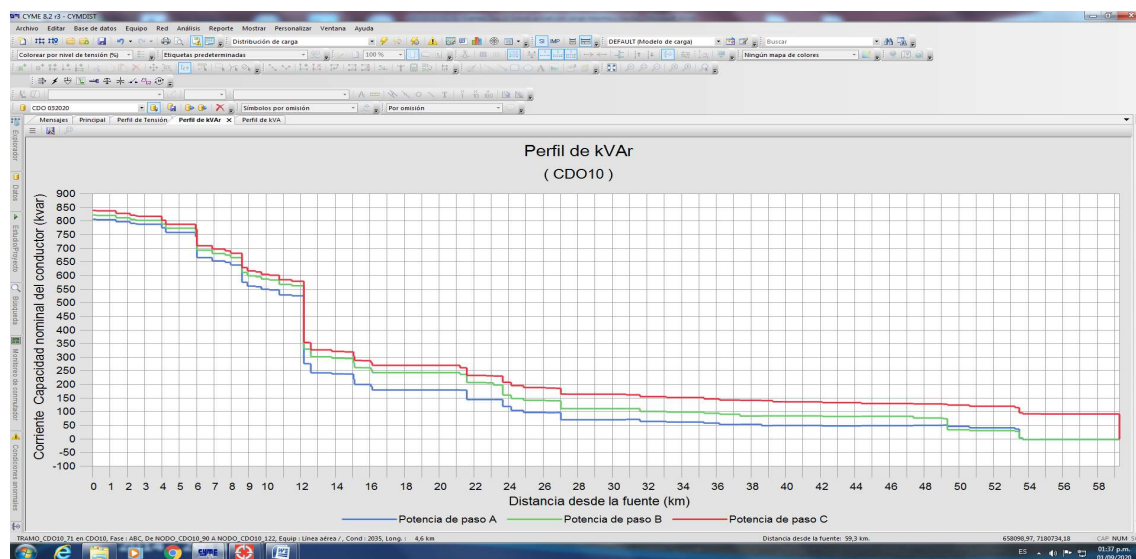


Figura 8.6.60: Estado actual del perfil kVar del alimentador CDO 10, según carga máxima.

Fuente: Software Cymdist, ANDE

En la figura 8.6.60, se muestra el comportamiento de la potencia reactiva en kVar del alimentador CDO 10.

8.6.7.3. Reporte sumario de la carga y pérdidas

Alimentador: CDO 10								
	Carga total		Carga total		Pérdidas totales		Pérdidas totales	
RED	kVA	FP (%)	kW	FP (%)	kVA	FP (%)	kW	FP (%)
CDO10	7221,42	93,98	6786,51	93,98	744,37	81,52	606,77	81,52
Total	7221,42	93,98	6786,51	93,98	744,37	81,52	606,77	81,52

Tabla 8.6.24: Reporte sumario del alimentador CDO 10, carga máxima

En la tabla 8.6.24, se observa un reporte sumario de cargas y pérdidas totales del alimentador CDO 10.

8.6.7.4. Desarrollo del estado con compensación del alimentador CDO 10

Continuado con el análisis del estado con compensación, para la demanda máxima, seguidamente plantearemos la forma de compensar las pérdidas de este alimentador en particular, para el cual procedimos a la “Ubicación óptima de Capacitores” del software Cymdist.

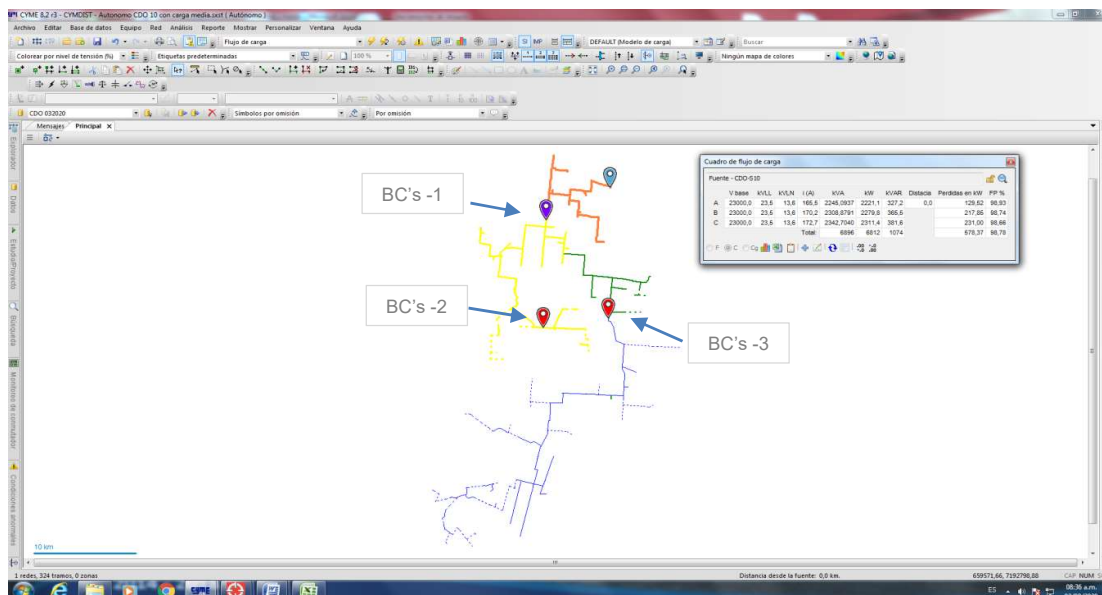


Figura 8.6.61: Representación del estado con compensación del alimentador CDO 10, carga máxima.

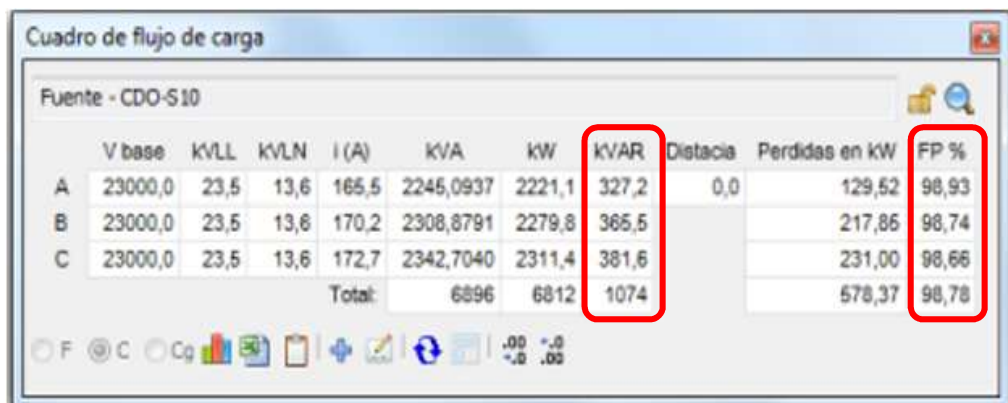
Fuente: Software Cymdist, ANDE

En la figura 8.6.61, se observa el arreglo del alimentador CDO 10, posterior a este análisis se detallan en la tabla 8.6.25, las características y ubicaciones óptimas de cada banco de capacitores:

Ubicación óptima de los Banco de Capacitores			
ítem	Capacidad kVAr/Fase	Tipo	Distancia de la fuente
BCs-1	300	Automático	11,5 km
BCs-2	100	Fijo	30,4 km
BCs-3	100	Fijo	27,4 km

Tabla 8.6.25: Características y ubicación de los Bancos de capacitores.

Fuente: Elaboración propia



	V base	KVLL	KVLN	I (A)	KVA	KW	KVAR	Distancia	Perdidas en kW	FP %
A	23000,0	23,5	13,6	165,5	2245,0937	2221,1	327,2	0,0	129,52	98,93
B	23000,0	23,5	13,6	170,2	2308,8791	2279,8	365,5		217,86	98,74
C	23000,0	23,5	13,6	172,7	2342,7040	2311,4	381,6		231,00	98,66
Total:					6896	6812	1074		578,37	98,78

Figura 8.6.62: Cuadro de flujo de carga del alimentador CDO 10, estado con compensación.
Fuente: Software Cymdist, ANDE.

Al ejecutar el software Cymdist y analizar los reportes entregados se pudo establecer la ubicación óptima de capacitores mostrada en la figura 8.6.61. En la tabla 8.6.25, se indica el banco de capacitores en kVAr que se debe instalar y el tramo donde se debe instalar. En la figura 8.6.62, se muestra el Flujo de Carga obtenido después de realizar la compensación, donde se observa un nuevo valor del Factor de Potencia igual a 98,78, mayor al escenario anterior, por otra parte, el total de pérdidas en kW disminuyó respecto al escenario base.

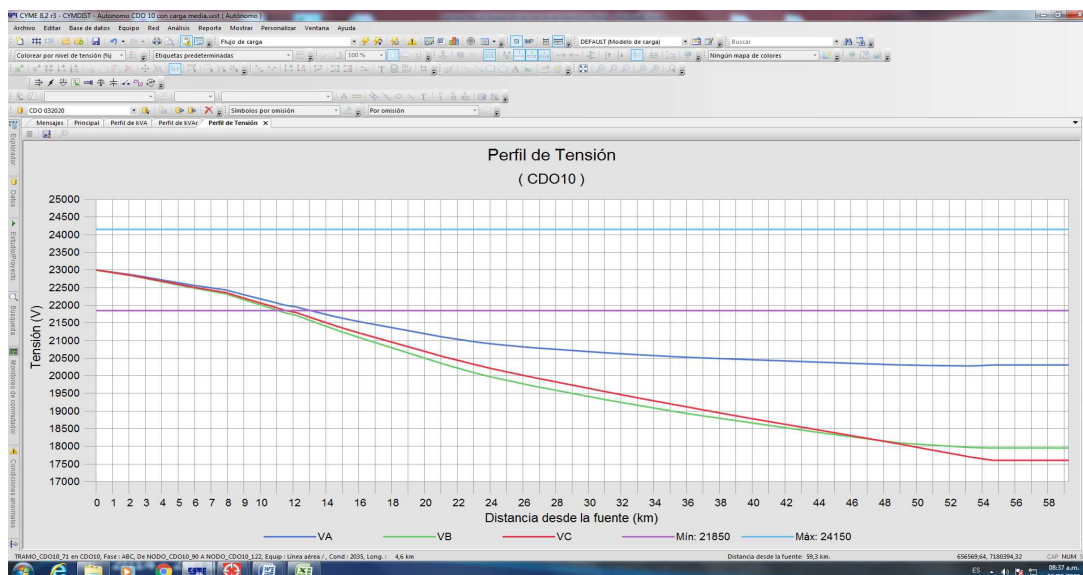


Figura 8.6.63: Representación del estado con compensación del alimentador CDO 10, carga máxima.
Fuente: Software Cymdist, ANDE

En la figura 8.6.63, se observa el perfil de tensión del alimentador CDO 10 con compensación y demuestra una eficacia producida en la ubicación óptima de los bancos, lograndose una mejora en la caída de tensión de las tres fases.

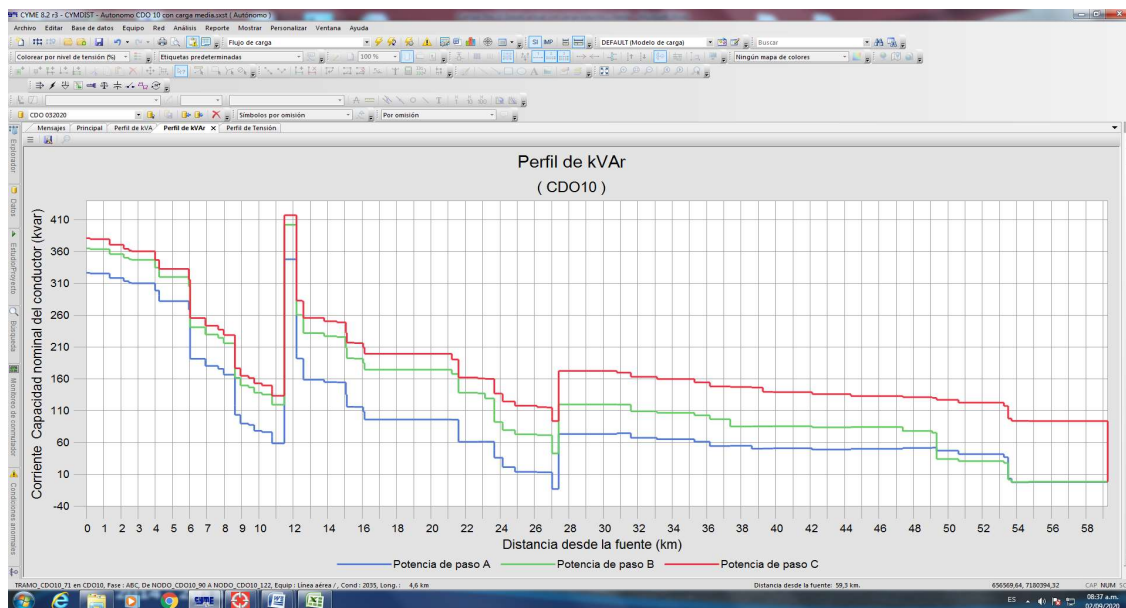


Figura 8.6.64: Estado con compensación del perfil kVar del alimentador CDO 10, carga máxima.

Fuente: Software Cymdist, ANDE

En la figura 8.6.64, se muestra el comportamiento de la potencia reactiva en kVar del alimentador CDO 10 con compensación.

8.6.7.5. Reporte sumario de la carga y pérdidas

Alimentador: CDO 10								
	Carga total		Carga total		Pérdidas totales		Pérdidas totales	
RED	kVA	FP (%)	kW	FP (%)	kVA	FP (%)	kW	FP (%)
CDO10	6896,49	98,78	6812,32	98,78	705,73	81,95	578,37	81,95
Total	6896,49	98,78	6812,32	98,78	705,73	81,95	578,37	81,95

Tabla 8.6.26: Reporte sumario del alimentador CDO 10, carga máxima con compensación

En la tabla 8.6.26, se observa un reporte sumario de cargas y pérdidas totales del alimentador CDO 10 con compensación.

8.7. DEMANDA MÁXIMA SIMULTÁNEA

8.7.1. Demanda máxima simultánea sin compensación

Demanda máxima simultanea de los alimentadores de la ES-CDO							
Alimentadores	kVA	kW	kVAr	I _A	I _B	I _C	FP
CDO-03	12.737	11.592	5.278	341	264	335	0,91
CDO-04	11.844	11.133	4.043	283	282	308	0,94
CDO-05	5.969	5.491	2.341	151	147	142	0,92
CDO-07	13.621	12.660	5.025	318	342	344	0,93
CDO-08	3.063	2.849	1.125	71	90	65	0,93
CDO-09	2.980	2.771	1.096	72	73	75	0,93
CDO-10	7.221	6.787	2.468	175	178	181	0,94

Tabla 8.7.1: Demanda máxima simultanea sin compensación de los alimentadores de la ES-CDO.

Fuente: Multimedidores ION 7330. ES-CDO, ANDE

8.7.2. Demanda máxima simultánea con compensación

Demanda máxima simultanea de los alimentadores de la ES-CDO							
Alimentadores	kVA	kW	kVAr	I _A	I _B	I _C	FP
CDO-03	10.768	10.426	2.692	341	264	335	0,96
CDO-04	11.133	11.039	1.447	265	264	290	0,99
CDO-05	5.608	5.607	130	137	136	140	0,99
CDO-07	12.797	12.566	2.395	239	267	260	0,98
CDO-08	000	000	000	00	00	00	0,00
CDO-09	2.802	2.758	497	68	69	71	0,98
CDO-10	6.896	6.812	1.074	165	170	172	0,98

Tabla 8.7.2: Demanda máxima simultánea con compensación de los alimentadores de la ES-CDO.

Fuente: Multimedidores ION 7330. ES-CDO, ANDE

8.8. SELECCIÓN DE LOS ALIMENTADORES A COMPENSAR

RED	BC's - FIJO			BC's - AUTOMÁTICO		
	Cant.	kVAr/Fase	km	Cant.	kVAr/Fase	km
CDO 03		100			100	
	2	200	45,6-80,5		200	
		300		1	300	38,5
CDO 04	Cant.	kVAr/Fase	km	Cant.	kVAr/Fase	km
		100			100	
	3	200	12,2-20-20,5		200	
		300		1	300	6,9
CDO 05	Cant.	kVAr/Fase	km	Cant.	kVAr/Fase	km
		100			100	
	2	200	28,2-44,7		200	
		300		1	300	14,2
CDO 07	Cant.	kVAr/Fase	km	Cant.	kVAr/Fase	km
		100			100	
	2	200	9,9-13,3		200	
		300		1	300	6,2
CDO 09	Cant.	kVAr/Fase	km	Cant.	kVAr/Fase	km
		100			100	
	1	200	18,2		200	
		300			300	
CDO 10	Cant.	kVAr/Fase	km	Cant.	kVAr/Fase	km
	2	100	30,4-27,4		100	
		200			200	
		300			300	11,5

Tabla 8.8.1: Resultados de la selección de las Capacidades y ubicación óptima de los BC's.

Fuente: Flujo de potencia, programa Cymdist.

Los resultados obtenidos para la selección de la capacidad y ubicación óptima de los bancos de capacitores durante la demanda máxima, son presentados en la tabla 8.8.1.

8.9. VALORACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA

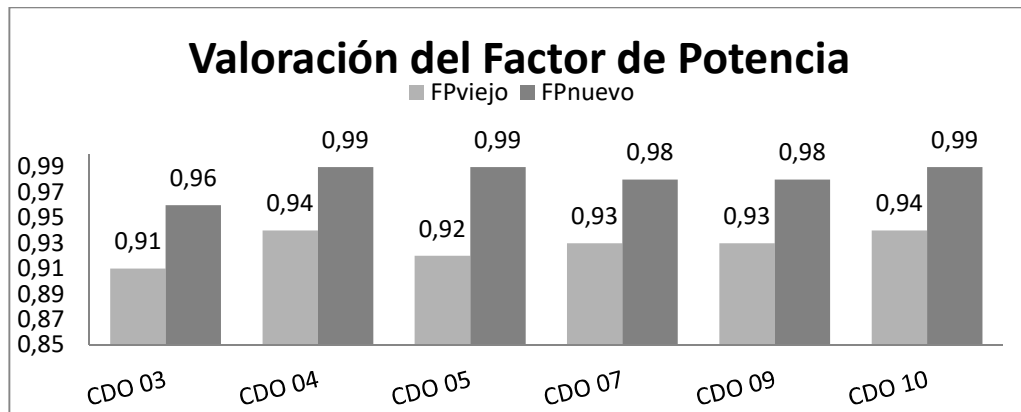


Figura 8.9.1: Valoración del factor de potencia de los alimentadores de ES-CDO.
Fuente: Software Cymdist, ANDE

En la figura 8.9.1, se muestra el resumen de los beneficios en términos de factor de potencia de los alimentadores de 23 kV de a ES-CDO.

8.10. PÉRDIDAS EN KW

ES-CDO	Estado sin compensación	Estado con Compensación	Beneficios
Alimentador	Pérdidas en kW	Pérdidas en kW	Ahorro en kW
CDO-03	3924,01	3003,18	920,83
CDO-04	919,51	822,11	97,40
CDO-05	384,09	366,70	17,39
CDO-07	864,62	770,20	94,42
CDO-08	0,00	0,00	0,00
CDO-09	137,48	124,64	12,84
CDO-10	606,77	578,37	28,40

Tabla 8.10.1: Pérdidas en los alimentadores de distribución de la ES-CDO.
Fuente: Flujo de potencia, programa Cymdist.

En la tabla 8.10.1, se muestra los resultados de las pérdidas en kW de cada alimentador obtenidos mediante software Cymdist, el cual utilizaremos para hallar el valor de la Energía de Pérdidas y el Costos de las mismas, siendo la ecuación 2.8 y 2.9, expresada anteriormente en el punto 2.3.7.

A continuación, detallaremos los Costos de las Pérdidas de cada alimentador de ES-CDO.

8.11. COSTO ANUAL DE LAS PERDIDAS DE LOS ALIMENTADORES CORRESPONDIENTES A LA ES-CDO, (ESTADO ACTUAL).

Costo anual de las pérdidas del sistema	kW	kW-h/año	\$/año
Pérdidas en las líneas de Campo Dos 03	3.924,01	16.207.748,22	507.302,52
Pérdidas en las líneas de Campo Dos 04	919,51	3.797.948,16	118.875,78
Pérdidas en las líneas de Campo Dos 05	384,09	1.586.447,03	49.655,79
Pérdidas en las líneas de Campo Dos 07	864,62	3.571.230,26	111.779,51
Pérdidas en las líneas de Campo Dos 08	0,00	0,00	0,00
Pérdidas en las líneas de Campo Dos 09	137,48	567.848,00	17.773,64
Pérdidas en las líneas de Campo Dos 10	606,77	2.506.205,48	78.444,23
Pérdidas totales	6.836,48	28.237.427,15	883.831,47

Tabla 8.11.1: Pérdidas en los alimentadores de distribución, sin compensación.
Fuente: Flujo de potencia, programa Cymdist.

8.12. COSTO ANUAL DE LA PERDIDAS DE LOS ALIMENTADORES CORRESPONDIENTES A LA ES-CDO, (CON COMPENSACION).

Costo anual de las pérdidas del sistema	kW	kW-h/año	\$/año
Pérdidas en las líneas de Campo Dos 03	3.003,18	12.404.347,92	388.256,09
Pérdidas en las líneas de Campo Dos 04	822,11	3.395.646,77	106.283,74
Pérdidas en las líneas de Campo Dos 05	366,70	1.514.619,30	47.407,58
Pérdidas en las líneas de Campo Dos 07	770,20	3.181.237,48	99.572,73
Pérdidas en las líneas de Campo Dos 08	0,00	0,00	0,00
Pérdidas en las líneas de Campo Dos 09	124,64	514.813,61	16.113,67
Pérdidas en las líneas de Campo Dos 10	578,37	2.388.902,00	74.772,63
Pérdidas totales	5.665,20	23.399.567,07	732.406,45

Tabla 8.12.1: Pérdidas en los alimentadores de distribución, Con compensación.
Fuente: Flujo de potencia, programa Cymdist.

8.13. REDUCCIÓN DEL COSTO TOTAL ANUAL DE LAS PERDIDAS DE LOS ALIMENTADORES CORRESPONDIENTES A LA ES-CDO.

Costo anual de las pérdidas del sistema	kW	kW-h/año	\$/año
Pérdidas en las líneas de Campo Dos 03	920,83	3.803.400,29	119.046,43
Pérdidas en las líneas de Campo Dos 04	97,40	402.301,39	12.592,03
Pérdidas en las líneas de Campo Dos 05	17,39	71.827,73	2.248,21
Pérdidas en las líneas de Campo Dos 07	94,42	389.992,78	12.206,77
Pérdidas en las líneas de Campo Dos 08	0,00	0,00	0,00
Pérdidas en las líneas de Campo Dos 09	12,84	53.034,39	1.659,98
Pérdidas en las líneas de Campo Dos 10	28,40	117.303,49	3.671,60
Pérdidas totales	1.171,28	4.837.860,08	151.425,02

Tabla 8.13.1: Reducción del costo total de las pérdidas de los alimentadores
correspondientes a la ES-CDO.
Fuente: Flujo de potencia, programa Cymdist.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En comparación a la medida de compensación utilizada en la actualidad, cual es la de compensación concentrada en la Estación, se ha visto que, con la compensación distribuida, se pudo mejorar en mayor y mejor medida el perfil de reactivos ya que los alimentadores de 23 kV emergentes de la ES-CDO, no cuenta con equipos de compensación conectados sobre el mismos. Además de otro beneficio de la compensación distribuida, se logra disminuir la corriente y se mejora los niveles de tensión de la carga.

Por otro lado, durante el proceso de análisis del alimentador CDO 08, al realizar la simulación de un mejoramiento de perfil de reactivos, el mismo arrojó mínimas perdidas, perfil de tensión dentro no muy diferente a la situación previa y dentro del umbral permisible, por lo que no hubo necesidad de realizar la compensación con este alimentador.

Para la compensación distribuida el valor del TIR y el VPN cumple con los criterios establecidos en la evaluación económica mediante el método costo-beneficio, esto demuestra la viabilidad económica de este proyecto.

VI. CONCLUSIONES

Finalmente, el presente trabajo, se concluye que la mejor alternativa técnica y económica para compensar la energía reactiva en el sistema de distribución dependiente a la ES-CDO de la ANDE, es la de instalar bancos de capacitores en los alimentadores de distribución por el método de “Compensación Distribuida”.

Al mejorar el factor de potencia en los alimentadores de distribución, se logra reducir las pérdidas, principalmente por efecto joule presente en los mismos, esto tiene como beneficio liberar una cierta capacidad de potencia aparente del sistema. Además de otro beneficio de la compensación distribuida, se logra disminuir la corriente y se mejora los niveles de tensión de la carga. Según simulaciones de flujo de carga y los resultados expuestos el capítulo 8. Esto concluye el uso eficiente del transformador de potencia y equipos, aumentando de esta manera la vida útil de los mismos.

El resultado de la evaluación técnica y económica evidencia buena viabilidad donde se obtuvo resultados positivos con el método de Costo-Beneficio.

VII. RECOMENDACIONES

Se recomienda la instalación del banco de capacitores en los puntos asignados en el proyecto.

Asimismo, es recomendable no ubicar los banco de capacitores en un punto muy cercano, aguas abajo de un banco de RT's, porque el valor de la corriente reactiva capacitiva, en algunos casos podría superar al valor de la corriente de paso en el RT's, que puede acontecer ya sea por apertura del circuito en las cercanías de estos equipos (aguas abajo), o por la ubicación de los mismos en tramos con cargas relativamente bajas, dando como resultado neto un flujo inverso visto por el RT's, lo que podría ocasionar problemas en el control del equipo RT's.

Evitar también la instalación de banco de capacitores fijos y automáticos muy próximos entre sí, en esas condiciones, la resistencia del tramo del alimentador entre esos puntos puede no ser suficiente para amortiguar adecuadamente las sobretensiones que se presentan cuando los capacitores inician su operación en el sistema.

Por otro lado, en caso de disponer solamente de Banco de Capacitores Fijos para el diseño de la compensación reactiva, los mismos pueden dimensionarse para suministrar la potencia reactiva requerida para una demanda media.

Finalmente, se recomienda no instalar Banco de Capacitores con capacidad mayor a 600 kVAr (200 kVAr por fase), en un punto determinado, debido la sobretensión que puede sobrevenir.

VIII. APÉNDICE

APÉNDICE A: RESUMEN EJECUTIVO

APÉNDICE A.1: RESUMEN DE LISTA DE MATERIALES

ítem	Descripción	Unidad	Cantidad
1	Compensador Dinámico de 900 kVAr	Unid.	5
2	Estructura para Compensador Dinámico de 900 KVAR	Unid.	10
3	Banco de Capacitores de 300 kVAr (Fijo)	Unid.	3
4	Estructura para Banco de 300 KVAR	Unid.	4
5	Banco de Capacitores de 600 kVAr (Fijo)	Unid.	9
6	Estructura para Banco Fijo de 600 KVAR	Unid.	10
7	Seccionador Fusible Monofásico tipo p/ LDMT 70mm2	Unid.	48
8	Columna 12/500	Unid.	27

Tabla 8.13.1: Resumen de lista de materiales

APÉNDICE A.2: LISTA COMPLETA DE MATERIALES

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD
1	ABRAZADERA P/POSTE DE H°A° AH-A-ER	un	1
2	ABRAZADERA P/POSTE DE H°A° AH-A-CR	un	1
3	ARANDELA LISA CUADRADA AcGa 5/8" AC 5	un	4
4	BULON CAB HEXA AcGa 1/2"x 4.1/2"	un	2
5	BULON DE 5/8" x 6"	un	2
6	BULON CAB HEXA AcGa 5/8" x 7"	un	1
7	BANDA DE ACERO INOXIDABLE DE 5/8" 1R=30 m	ml	5
8	CABLE DESNUDO Aa. DE 35 mm2	un	12
9	CABLE DE ACERO RECUBIERTO DE COBRE 70 mm2	ml	18
10	CRUCETA DE MADERA LAPACHO DE 3"x4"x2", 4m MT	un	1
11	DESCARGADOR DE SOBRETENSION 23 kV MT	un	3
12	ELEMENTO FUSIBLE MT 8A SF Aéreo cab fija	un	3
13	ESTRIBO P/PRENSA LV 70 mm2	un	3
14	BANCO DE CAPACITORES MONOF 300 kVAr M.T.	un	1
15	HEBILLA P/BANDA DE ACERO INOXID. DE 5/8"	un	5
16	JABALINA Ac RECUB. Cu. 3/4" x 3m	un	3
17	MANO FRANCESA P/ POSTE H°A° MF2 M.T.	un	2
18	PRENSA LINEA VIVA HASTA 13/150-8/70 mm2	un	3
19	SECCION FUS UNIP INTEMP AER EXPU MT 100A	un	3
20	TERMINAL A COMPRESION AL P/CABLE 35 mm2	un	6

Tabla 8.13.2: Banco de capacitores 300 kVAr - M.T

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD
1	ABRAZADERA P/POSTE DE H°A° AH-A-ER	un	1
2	ABRAZADERA P/POSTE DE H°A° AH-A-CR	un	1
3	ARANDELA LISA CUADRADA AcGa 5/8" AC 5	un	12
4	BULON CAB HEXA AcGa 1/2"x 4.1/2"	un	2
5	BULON DE 5/8" x 6"	un	2
6	BULON CAB HEXA AcGa 5/8" x 7"	un	1
7	CABLE DESNUDO Aa. DE 35 mm ²	ml	12
8	CABLE DESNUDO Cu DURO DE 25 mm ²	ml	18
9	CRUCETA DE MADERA LAPACHO DE 3"x4"x2", 4m MT	un	2
10	DESCARGADOR DE SOBRETENSION 23 kV MT	un	6
11	CONJUNTO ESTRIBO CONECTOR P/LV DE 35 mm ²	un	6
12	BANCO DE CAPACITORES MONOF 600 kVAr M.T.	un	1
13	JABALINA Ac RECUB. Cu. 3/4" x 3m	un	6
14	MAT. PTMT t/AC jab3/4" CABLE Cu DESN. 25 mm ²	un	2
15	MANO FRANCESA P/ POSTE H°A° MF2 M.T.	un	4
16	PRENSA LINEA VIVA HASTA 13/150-8/70 mm ²	un	6
17	SECCIONADOR CUCHILLA UNIP. 23 Kv 400 Amperios	un	6
18	TERMINAL A COMPRESOR AL P/CABLE 35 mm ²	un	6

Tabla 8.13.3: Banco de capacitores 600 kVAr - M.T

APÉNDICE B: INGENIERÍA DE DISEÑO

APÉNDICE B.1: CARGA HORARIA TÍPICA DE LA ES-CDO.

DEMANDA TOTAL DE LA ES-CDO		
Horas	P. activa [MW]	P. reactiva [MVar]
1	27,68	9,22
2	26,36	9,00
3	26,03	8,66
4	25,68	8,76
5	26,94	9,38
6	27,54	9,82
7	26,96	9,92
8	28,13	10,09
9	28,61	10,45
10	29,60	10,72
11	34,01	11,47
12	30,41	9,89
13	30,09	9,64
14	30,53	9,54
15	28,96	9,21
16	28,87	9,44
17	30,09	10,25
18	29,42	9,74
19	28,04	9,41
20	29,94	9,62
21	31,91	10,30
22	29,14	9,23
23	29,08	9,47
24	26,98	9,13

Tabla 8.13.4: Demanda de la ES-CDO, P. activa (MW) y P. reactiva (MVar).
Fuente: Multimeditores ION 7330. ES-CDO, ANDE

APÉNDICE B.2: CARGA HORARIA TIPICA DE LOS ALIMENTADORES DE LA ES-CDO

B.2.1. Alimentador CDO 03

Corrientes simultanea, Amperios [A]			
Horas	Ia	Ib	Ic
1	231	186	211
2	216	172	201
3	213	168	198
4	202	159	191
5	206	163	192
6	222	175	203
7	241	181	214
8	240	185	222
9	246	186	225
10	242	184	222
11	282	207	258
12	296	223	275
13	247	196	233
14	261	210	250
15	245	194	236
16	235	186	227
17	237	185	218
18	244	186	226
19	248	197	227
20	272	218	250
21	341	264	335
22	321	251	298
23	279	223	252
24	245	189	222

Tabla 8.13.5: Corriente por fase del alimentador CDO 03.

B.2.2. Alimentador CDO 04

DEMANDA		
Horas	P. activa [MW]	P. reactiva [MVar]
1	7,88	2,43
2	7,73	2,32
3	7,60	2,40
4	7,50	2,45
5	7,74	2,67
6	8,34	2,83
7	8,13	2,95
8	9,69	3,34
9	10,16	3,63
10	10,09	3,69
11	10,82	3,97
12	11,22	4,08
13	10,67	3,77
14	11,17	4,01
15	10,99	3,91
16	11,02	4,17
17	11,41	4,33
18	10,81	3,99
19	9,94	3,36
20	9,69	3,19
21	9,78	2,89
22	9,48	2,81
23	9,00	2,73
24	8,25	2,53

Tabla 8.13.6: Carga horaria típica del alimentador CDO 04.

Corriente Simultanea, Amperios [A]			
Horas	Ia	Ib	Ic
1	188	177	209
2	184	176	207
3	182	174	203
4	180	171	200
5	188	180	205
6	203	195	222
7	202	195	214
8	239	236	258
9	254	252	272
10	253	248	269
11	266	266	289
12	277	273	297
13	262	258	284
14	277	274	303
15	272	268	297
16	272	270	297
17	283	282	308
18	267	266	288
19	242	237	258
20	235	228	253
21	237	224	258
22	228	214	251
23	215	204	239
24	194	185	220

Tabla 8.13.7: Corriente por Fase del alimentador CDO 04.

B.2.3. Alimentador CDO 05

DEMANDA		
Horas	P. activa [MW]	P. reactiva [MVar]
1	1,995	0,962
2	1,888	0,975
3	1,852	0,935
4	2,056	0,990
5	3,238	1,614
6	3,473	1,686
7	3,189	1,415
8	3,099	1,207
9	2,839	1,092
10	3,014	1,109
11	3,462	1,611
12	3,365	1,221
13	3,341	1,187
14	3,244	1,136
15	3,146	1,101
16	3,789	1,355
17	5,068	2,135
18	4,597	1,748
19	3,430	1,377
20	2,881	1,261
21	2,575	1,102
22	2,412	1,065
23	2,2907	1,065
24	2,084	1,026

Tabla 8.13.8: Corriente por fase del alimentador CDO 05.

Corrientes Simultanea CBO 05			
Horas	Ia	Ib	Ic
1	62	61	61
2	58	60	58
3	58	57	55
4	55	55	54
5	56	55	55
6	86	86	84
7	99	98	95
8	92	91	88
9	90	89	86
10	89	88	87
11	88	86	87
12	107	105	101
13	103	100	98
14	105	102	100
15	100	97	94
16	96	94	92
17	111	108	105
18	151	147	142
19	141	137	134
20	117	116	114
21	102	98	99
22	84	92	81
23	75	72	72
24	67	65	66

Tabla 8.13.9: Corriente por fase del alimentador CDO 05.

B.2.4. Alimentador CDO 07

DEMANDA		
Horas	P. activa [MW]	P. reactiva [MVar]
1	11,235	4,138
2	10,840	4,010
3	10,642	3,798
4	10,256	3,780
5	10,004	3,685
6	9,822	3,606
7	9,403	3,712
8	9,971	3,848
9	10,489	4,284
10	10,654	4,277
11	11,469	4,440
12	11,614	4,512
13	11,038	4,135
14	12,597	4,969
15	12,950	5,172
16	12,300	5,013
17	11,763	4,930
18	10,843	4,460
19	10,310	4,139
20	10,177	4,104
21	11,507	4,352
22	11,628	4,334
23	11,494	4,225
24	11,115	4,189

Tabla 8.13.10: Carga horaria típica del alimentador CDO 07.

Corrientes simultanea [A]			
Horas	Ia	Ib	Ic
1	263	295	287
2	256	286	279
3	253	282	274
4	244	272	265
5	237	265	257
6	235	262	253
7	225	251	244
8	243	269	265
9	254	281	276
10	258	284	279
11	279	306	302
12	282	311	306
13	267	293	288
14	311	337	336
15	318	342	344
16	300	325	326
17	288	311	311
18	266	291	287
19	252	277	273
20	246	273	266
21	275	310	300
22	277	310	305
23	270	306	297
24	262	294	285

Tabla 8.13.11: Corriente por fase del alimentador CDO 07.

B.2.5. Alimentador CDO 08

DEMANDA		
Horas	P. activa [MW]	P. reactiva [MVar]
1	6,67	7,67
2	6,56	8,56
3	6,30	9,30
4	6,09	10,09
5	6,26	11,26
6	6,38	12,38
7	5,15	12,15
8	5,11	13,11
9	5,16	14,16
10	5,87	15,87
11	6,66	17,66
12	6,68	18,68
13	6,45	19,45
14	6,70	20,70
15	6,13	21,13
16	5,92	21,92
17	5,59	22,59
18	5,51	23,51
19	5,67	24,67
20	7,57	27,57
21	8,12	29,12
22	7,83	29,83
23	7,25	30,25
24	6,94	30,94

Tabla 8.13.12: Carga horaria típica del alimentador CDO 08.

Corrientes simultanea [A]			
Horas	Ia	Ib	Ic
1	59	73	56
2	63	76	59
3	60	74	57
4	54	70	51
5	55	68	51
6	48	63	46
7	50	65	46
8	56	74	50
9	67	88	60
10	68	88	64
11	65	84	60
12	59	77	55
13	60	76	55
14	56	73	52
15	54	70	50
16	53	69	49
17	52	68	49
18	56	74	53
19	56	69	53
20	54	66	50
21	51	65	47
22	55	69	52
23	55	72	54
24	59	73	56

Tabla 8.13.13: Corriente por fase del alimentador CDO 08.

B.2.6 Alimentador CDO 09

DEMANDA		
Horas	P. activa [MW]	P. reactiva [MVar]
1	6,85	7,85
2	6,52	8,52
3	6,32	9,32
4	6,14	10,14
5	5,93	10,93
6	6,35	12,35
7	6,11	13,11
8	6,26	14,26
9	6,27	15,27
10	6,16	16,16
11	6,64	17,64
12	6,67	18,67
13	6,46	19,46
14	6,83	20,83
15	6,49	21,49
16	6,59	22,59
17	6,32	23,32
18	6,06	24,06
19	6,40	25,40
20	6,77	26,77
21	7,52	28,52
22	7,38	29,38
23	6,85	29,85
24	6,39	30,39

Tabla 8.13.14: Carga horaria típica del alimentador CDO 09.

Corrientes simultanea [A]			
Horas	Ia	Ib	Ic
1	57	59	61
2	55	57	59
3	55	57	59
4	56	58	60
5	55	57	59
6	54	56	58
7	56	58	60
8	58	60	62
9	60	62	64
10	58	60	62
11	56	58	60
12	55	57	59
13	56	58	60
14	57	59	61
15	58	60	62
16	59	61	63
17	60	62	64
18	61	63	65
19	67	69	71
20	72	73	75
21	67	68	70
22	60	62	64
23	59	61	63
24	58	60	62

Tabla 8.13.15: Corriente por fase del alimentador CDO 09.

B.2.7 Alimentador CDO 10

Corrientes simultanea [A]			
Horas	Ia	Ib	Ic
1	105	108	111
2	100	103	106
3	94	97	100
4	90	93	96
5	89	92	95
6	98	102	105
7	128	131	134
8	127	130	133
9	123	126	129
10	127	130	133
11	129	132	135
12	136	139	142
13	151	154	157
14	140	143	146
15	139	142	145
16	136	139	142
17	134	137	140
18	158	161	164
19	175	178	181
20	160	163	166
21	141	144	147
22	146	149	152
23	131	134	137
24	116	119	122

Tabla 8.13.16: Corriente por fase del alimentador CDO 10.

APÉNDICE C: EVALUACIÓN ECONÓMICA

APÉNDICE C.1: COSTO DE MANTENIMIENTO

Descripción	Cantidad	Unidad	P. Unitario	P. Total
Fusible	30	Unidad	100.000	3.000.000
Viáticos Personal Técnico (20 días)	5	Personal	12.000.000	60.000.000
Viáticos Personal Fiscalizador (5 días)	1	Personal	3.000.000	3.000.000
Transporte 1(Grúa)	600	Litros	6.000	3.600.000
Transporte2	400	Litros	7.000	2.800.000
			Total Gs	72.400.000
			Total USD	11.677

Tabla 8.13.17: Detalles del costo de mantenimiento anual

Descripción	Cantidad	Unidad	P. Unitario	P. Total
Fusible	3	Unidad	100.000	300.000
Viáticos Personal Técnico (2 días)	5	Personal	1.200.000	6.000.000
Viáticos Personal Fiscalizador (1 días)	1	Personal	600.000	600.000
Transporte 1(Grúa)	100	Litros	6.000	600.000
Transporte2	40	Litros	7.000	280.000
Equipo BCs	1	un.	20.000.000	20.000.000
			Total Gs	27.780.000
			Total USD	4.481

Tabla 8.13.18: Detalles del costo de reposición

APÉNDICE C.2: ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN DE CARGA

C.2.1. Alimentador CDO 03

C.2.1.1. Carga máxima

	A	B	C	Total
Conectado	341,0	262,0	335,0	
	91,0	91,0	91,0	
Datos aguas abajo	3860,67	5691,0	4488,0	14039,67

Análisis de la distribución de carga máxima del alimentador CDO 03

Fuente: Software Cymdist, ANDE

C.2.2. Alimentador CDO 04

C.2.2.1. Carga máxima

	A	B	C	Total
Conectado	283,0	282,0	308,0	
	94,0	94,0	94,0	
Datos aguas abajo	5747,5	6212,5	7267,5	19227,5

Análisis de la distribución de carga máxima del alimentador CDO 04

Fuente: Software Cymdist, ANDE

C.2.3. Alimentador CDO 05

C.2.3.1. Carga máxima

Modelo de carga: DEFAULT

Redes y medidores: Alimentador (CDO1, CDO10, CDO2, CDO3, CDO4, CDO5, CDO6, CDO7, CDO8, CDO9)

Método de distribución: kVA conectados

Parámetros de flujo de carga: DEFAULT

Demanda: Alimentador: CDO5

☒ Conectado ☐ Total

A-FP: A (151, 92), B (147, 92), C (142, 92)

Datos aguas abajo:

A	B	C	Total
3403,0	3869,67	4584,67	11857,33

kVA conectados: [dropdown]

Factores... Ejecutar Aceptar Cancelar

Análisis de la distribución de carga máxima del alimentador CDO 05
Fuente: Software Cyndist, ANDE

C.2.4. Alimentador CDO 07

C.2.4.1. Carga máxima

Modelo de carga: DEFAULT

Redes y medidores: Alimentador (CDO1, CDO10, CDO2, CDO3, CDO4, CDO5, CDO6, CDO7, CDO8, CDO9)

Método de distribución: kVA conectados

Parámetros de flujo de carga: DEFAULT

Demanda: Alimentador: CDO7

☒ Conectado ☐ Total

A-FP: A (318, 93), B (342, 93), C (344, 93)

Datos aguas abajo:

A	B	C	Total
3490,83	3500,83	3485,83	10477,5

kVA conectados: [dropdown]

Factores... Ejecutar Aceptar Cancelar

Análisis de la distribución de carga máxima del alimentador CDO 07
Fuente: Software Cyndist, ANDE

C.2.5. Alimentador CDO 08

C.2.5.1. Carga máxima

	A	B	C	Total
Conectado	71	90	65	93
Datos aguas abajo	3392,0	4657,0	4073,67	12122,67

Análisis de la distribución de carga máxima del alimentador CDO 08.
Fuente: Software Cyndist, ANDE

C.2.6. Alimentador CDO 09

C.2.6.1. Carga máxima

	A	B	C	Total
Conectado	72	73	75	93
Datos aguas abajo	453,5	558,5	688,5	1700,5

Análisis de la distribución de carga máxima del alimentador CDO 09
Fuente: Software Cyndist, ANDE

C.2.7. Alimentador CDO 10

C.2.7.1. Carga máxima

Modelo de carga: DEFAULT

Redes y medidores:

- Alimentador
 - CDO1
 - CDO10**
 - CDO2
 - CDO3
 - CDO4
 - CDO5
 - CDO6
 - CDO7
 - CDO8
 - CDO9

Método de distribución: kVA conectados

Parámetros de flujo de carga: DEFAULT

Demanda:

Alimentador: CDO10

☒ Conectado ☐ Total

A-FP: A-FP

	A	B	C
A	175	94	
B	178	94	
C	181	0,0	

Datos aguas abajo:

	A	B	C	Total
kVA conectados	2198,33	2778,33	2956,33	7933,0

Factores...

Guardar Ejecutar Aceptar Cancelar

Análisis de la distribución de carga máxima del alimentador CDO 10, estado actual

Fuente: Software Cymdist, ANDE

APÉNDICE C.3: COSTOS DE INSTALACION

C.3.1. Alimentador CDO 03

Costo de Instalación CDO 03			
Descripción	Cantidad	P. Unitario (USD)	P. Total (USD)
Compensador Dinámico de 900 kVAr	1	70.380	70.380
Banco de Capacitores de 600 kVAr (Fijo)	2	3.292	6.584
Mano de Obra	4	570	2.281
Columna 12/500	5	366	1.830
Imprevisto			7.696
		Total (USD)	88.772

Tabla 8.13.19: Detalles del costo de instalación CDO 03.

C.3.2. Alimentador CDO 04

Costo de Instalación CDO 4			
Descripción	Cantidad	P. Unitario (USD)	P. Total (USD)
Compensador Dinámico de 900 kVAr	1	70.380	70.380
Banco de Capacitores de 600 kVAr (Fijo)	3	3.292	9.877
Mano de Obra	4	570	2.281
Columna 12/500	6	366	2.196
Imprevisto			8.026
		Total (USD)	92.759

Tabla 8.13.20: Detalles del costo de instalación CDO 04

C.3.3. Alimentador CDO 05

Costo de Instalación CDO 5			
Descripción	Cantidad	P. Unitario (USD)	P. Total (USD)
Compensador Dinámico de 900 kVAr	1	70.380	70.380
Banco de Capacitores de 300 kVAr (Fijo)	1	2.291	2.291
Banco de Capacitores de 600 kVAr (Fijo)	1	3.259	3.259
Mano de Obra	4	570	2.281
Columna 12/500	5	366	1.830
Imprevisto			7.593
		Total (USD)	87.634

Tabla 8.13.21: Detalles del costo de instalación CDO 05

C.3.4. Alimentador CDO 07

Costo de Instalación CDO 7			
Descripción	Cantidad	P. Unitario (USD)	P. Total (USD)
Compensador dinámico de 900 kVAr	1	70.380	70.380
Banco de Capacitores de 600 kVAr (Fijo)	2	3.292	6.584
Mano de Obra	4	570	2.281
Columna 12/500	5	366	1.830
Imprevisto			7.696
		Total (USD)	88.772

Tabla 8.13.22: Detalles del costo de instalación CDO 07.

C.3.5. Alimentador CDO 09

Costo de Instalación CDO 9			
Descripción	Cantidad	P. Unitario (USD)	P. Total (USD)
Banco de Capacitores de 600 kVAr (Fijo)	1	3.292	3.292
Mano de Obra	4	570	2.281
Columna 12/500	1	366	366
Imprevisto			329
		Total (USD)	6.269

Tabla 8.13.23: Detalles del costo de instalación CDO 09

C.3.6. Alimentador CDO 10

Costo de Instalación CDO 10			
Descripción	Cantidad	P. Unitario (USD)	P. Total (USD)
Compensador Dinamico de 900 kVAr	1	70.380	70.380
Banco de Capacitores de 300 kVAr (Fijo)	2	2.291	4.582
Mano de Obra	4	570	2.281
Columna 12/500	5	366	1.830
Imprevisto			7.496
		Total (USD)	86.569

Tabla 8.13.24: Detalles del costo de instalación CDO 10

IX. ANEXO

DETALLES DE LOS EQUIPOS INSTALADOS



Figura 8.13.1: Compensador dinámico de 300 kVar/fase



Figura 8.13.2: Montaje del compensador dinámico de 300 kVar/fase



Figura 8.13.3: Vista general del compensador dinámico de 300 kVAr/fase



Figura 8.13.4: Vista general de un banco de capacitores de 600 kVAr



Figura 8.13.5: Vista general de un banco de capacitores de 300 kVAr

X. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Enrique Gomez Morales, "Compensacion de Potencia Reactiva" , Instituto Politécnico Nacional., Mexico, D.F., Octubre 2009.
- [2] HIDALGO, Giovanny y Paguay, Reduccion de Perdidas de Energia Electrica en los alimentadores mediante Compensacion Reactiva, Ecuador-Quito, 2009.
- [3] WWW.factor_de_potencia.ppt, Julio 2002.
- [4] Loya, Fredy Santiago Llumiquinga, Diseño de un banco de condensadores para la corrección del factor de potencia de la empresa BAnchisfood S.A (Proyecto final de grado), Quito, 2012.
- [5] EDMINISTER Joseph y NAHVI, Mahmood, Circuitos Electricos, Tercera ed., Madrid-España p271: McGraw-Hill, 1997.
- [6] Juan Antonio Yebra Moron, Sistemas Electricos de Distribucion, Primera ed., Mexico: Reverte, 2009.
- [7] Morón, Ing. Juan Antonio Yebra, Compensación de Potencia Reactiva en Sistema Eléctricos, Primera ed., México: McGraw-Hill, 1986.
- [8] Ramasamy Natarajan, Power System Capacitors., T. & F. Group., Ed., Taylor & Francis Group, 2005..
- [9] Jesus Fraile Mora, Circuitos Electricos, Primera ed., G. N. Editores, Ed., Madrid: Pearson, 2012.
- [10] S.A., Elecond Capacitores, «Capacitores de media tension.».
- [11] Souza, Flavio Luciano A., Servicios de Electricidad S.A. Sergio T. Sobral - Cid Ney F..
- [12] Capacitores, Inepar, Capacitores de potencia (División de Compensación Reactiva).
- [13] Erazo, Alfredo Maldonado, "Energizacion de un Banco de Capacitores en una Subestacion,", Quito, 1987.
- [14] Burke., James J., IEEE Guide For Application of Shunt Power Capacitors,

Nueva York, 30 de septiembre de 2010.

- [15] Thomas & Betts, , Power and High Voltage Group, Camilo Delgado y Harry Hirz, 2011.
- [16] PIERCE, joslyn Hi - Voltage Corp - FISHER, POWEFLEX - Instrucción manual 4400 and 4500 series - AutoCap Adaptive Capacitor Controller and SmartSet Aplication Software, 1996.
- [17] Schneider Electric, Guia de Diseño de Instalaciones Electricas 08..
- [18] Arias, Jaime W. Chavez, Comparacion tecnica economica de alternativas de compensacion reactiva concentrada y distribuida en sistemas de distribucion, Proyecto Final de Grado., 2014.
- [19] Flavio Luciano A. Souza (Servicios de Electricid S.A.) Sergio T. Sobral - Cid Ney F. Ramos(IESA S.A), Control de Potencia Reactiva Integrando Sistemas de Distribucion y de Trasmision, Biblioteca ANDE..
- [20] Galo Roberto Albuja Jaramillo, Ubicacion Optima de Capacitores en Redes primarias de Distribucion utilizando Algoritmos Geneticos Considerando Demanda Variable, Proyecto Final de Grado., Quito, 2011.
- [21] CYME, Tutorial CYMDIST, Software para sistemas electricos de potencia..
- [22] Revision of IEEE Std 18-1992, IEEE Standard for Shunt Power, New York, USA, 2002.