



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**ESTUDIO DE COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA AUTOMATIZADA UTILIZANDO  
CONTROLADORES INTELIGENTES BASADOS EN MICROPROCESADORES EN LA RED  
DE DISTRIBUCIÓN DE 13.8 KV.**

**Antonio Angel Muñoz Vásquez**

Asesorado por el Ing. Gerson Armando Arredondo Pérez

Guatemala, abril de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DE COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA AUTOMATIZADA UTILIZANDO  
CONTROLADORES INTELIGENTES BASADOS EN MICROPROCESADORES EN LA RED  
DE DISTRIBUCIÓN DE 13.8 KV.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ANTONIO ANGEL MUÑOZ VÁSQUEZ**

ASESORADO POR EL ING. GERSON ARMANDO ARREDONDO PÉREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, ABRIL DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada.
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera.
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martinez.
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran.
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal.
VOCAL V	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente.
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez.

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco.
EXAMINADOR	Ing. Marvin Marino Hernández Fernández.
EXAMINADOR	Ing. Luis Manuel Pérez Archila.
EXAMINADOR	Ing. Jorge Gilberto González Padilla.
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López de López.

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ESTUDIO DE COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA AUTOMATIZADA UTILIZANDO CONTROLADORES INTELIGENTES BASADOS EN MICROPROCESADORES EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE 13.8 KV.**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha abril de 2018.

**Antonio Angel Muñoz Vásquez**

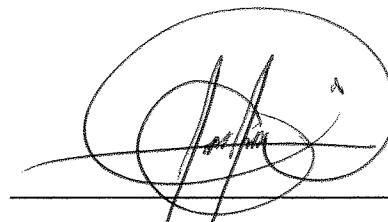
Guatemala, 16 de marzo de 2020.

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo  
Director Escuela Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Por este medio hago constar que he revisado y aprobado el trabajo de graduación del estudiante **ANTONIO ANGEL MUÑOZ VÁSQUEZ**, con carné **201313682** y **DPI 2383121350101**, el cual lleva como título: **"ESTUDIO DE COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA AUTOMATIZADA UTILIZANDO CONTROLADORES INTELIGENTES BASADOS EN MICROPROCESADORES EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE 13.8 KV"**.

En base a lo anterior, hago de su conocimiento esta información a efecto de continuar con el trámite respectivo para su aprobación, sin otro particular,

atentamente,



*Gerson Armando Arredondo Pérez  
Ingeniero Electricista  
Colegiado No. 14,032*

Gerson Armando Arredondo Pérez

Ingeniero Electricista

Colegiado 14,032

ASESOR



Ingeniero  
Armando Alonso Rivera Carrillo  
Director  
Escuela de Ingeniero Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería USAC

Ingeniero Rivera:

Por este medio, con base a lo indicado en el REGLAMENTO DE TRABAJOS DE GRADUACION vigente, tengo a bien proponer la aprobación del trabajo de graduación titulado:

**ESTUDIO DE COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA AUTOMATIZADA UTILIZANDO  
CONTROLADORES INTELIGENTES BASADOS EN MICROPROCESADORES EN LA RED  
DE DISTRIBUCIÓN DE 13.8 KV.**

del estudiante Antonio Angel Muñoz Vásquez, habiendo cumplido con los requisitos establecido en el referido reglamento.

Sin otro particular

Atentamente,  
ID Y ENSEÑAD A TODOS

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Fernando Moscoso Lira', written over a diagonal line.

Ingeniero Fernando Alfredo Moscoso Lira  
Coordinador Área de Potencia  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica.



**REF. EIME 81. 2021.**

**El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; ANTONIO ANGEL MUÑOZ VÁSQUEZ titulado; ESTUDIO DE COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA AUTOMATIZADA UTILIZANDO CONTROLADORES INTELIGENTES BASADOS EN MICROPROCESADORES EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE 13.8 KV. procede a la autorización del mismo.**

  
**Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo**

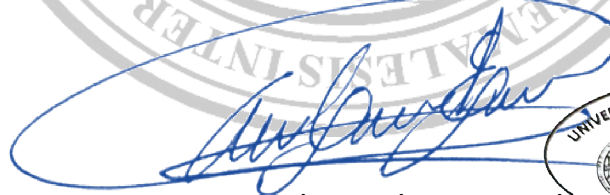


**GUATEMALA, 27 DE ABRIL 2,021.**

DTG. 189.2021.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **ESTUDIO DE COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA AUTOMATIZADA UTILIZANDO CONTROLADORES INTELIGENTES BASADOS EN MICROPROCESADORES EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE 13.8 KV.**, presentado por el estudiante universitario: **Antonio Angel Muñoz Vásquez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada  
Decana



Guatemala, abril de 2021.

AACE/asga



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por darme la oportunidad de culminar mi carrera.
<b>Mis padres</b>	Angel Antonio Muñoz Muralles y Juanita Muñoz.
<b>Mis hermanos</b>	Rogelio, Kythzia, Fatima Jurado, Crystal y Prisma Muñoz.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Mis padres</b>	Por su amor, apoyo incondicional y enseñanzas que me han guiado a culminar mis metas.
<b>Mis hermanos</b>	Por ser modelos a seguir y motivarme a lograr mis metas.
<b>Mis amigos de la Facultad</b>	Por el apoyo mutuo en nuestra formación académica.
<b>Ing. Gerson Arredondo</b>	Por su orientación y dedicación en la realización de este trabajo.
<b>Andrea Flores</b>	Por su apoyo y comprensión en la finalización de este trabajo.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XIII
GLOSARIO.....	XV
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS .....	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XXIII
1. POTENCIA EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN.....	25
1.1. Conceptos básicos de la potencia .....	25
1.1.1. Potencia activa.....	25
1.1.2. Potencia reactiva .....	26
1.1.2.1. Potencia reactiva inductiva.....	26
1.1.2.2. Potencia reactiva capacitiva.....	28
1.1.3. Potencia aparente.....	30
1.1.4. Factor de potencia .....	31
1.2. Consecuencias de bajo factor de potencia .....	32
1.2.1. Pérdidas por efecto Joule .....	32
1.2.2. Sobrecarga de generadores, transformadores y líneas de distribución .....	33
1.2.3. Sobre tensión por efecto Ferranti.....	33
1.3. Marco legal.....	34
1.3.1. Distribuidores.....	34
1.3.2. Usuarios.....	35
1.3.3. Ley general de electricidad .....	35
1.4. Compensación de potencia reactiva .....	37

1.4.1.	Corrección de factor de potencia .....	37
1.4.1.1.	Método directo .....	37
1.4.1.2.	Método indirecto .....	37
1.4.2.	Capacitores .....	38
1.4.3.	Método de cálculo de potencia de compensación ..	38
1.4.3.1.	Corriente alterna monofásica .....	39
1.4.3.2.	Corriente alterna trifásica .....	42
1.5.	Sistemas de control.....	44
1.5.1.	Controladores electromecánicos .....	44
1.5.2.	Microprocesadores .....	45
1.5.3.	Controladores basados en microprocesadores.....	46
1.5.4.	Protocolos de comunicación.....	46
1.6.	Normas de estandarización IEEE.....	48
1.6.1.	Norma IEEE 18-2012 .....	48
1.6.2.	Norma IEEE 1036-2010.....	49
1.6.2.1.	Conmutación de capacitores.....	50
2.	METODOLOGÍA PROPUESTA .....	51
2.1.	Recopilación de datos .....	51
2.2.	Análisis de compensación automatizada.....	52
2.3.	Análisis financiero .....	52
2.4.	Diagrama de flujo de la metodología .....	53
3.	ANÁLISIS DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN.....	55
3.1.	Antecedentes .....	55
3.1.1.	Registro histórico de demanda .....	56
3.2.	Condición actual de la red .....	58
3.2.1.	Pronóstico de la red de distribución .....	59
3.2.2.	Distribución horaria actual de la demanda .....	61

3.3.	Circuitos de análisis.....	68
3.4.	Sector industrial de análisis .....	69
3.4.1.	Capacidad del circuito 160 .....	70
3.4.2.	Características de carga del circuito 160 .....	72
3.4.3.	Tendencia de la demanda de potencia del circuito 160 .....	75
3.5.	Sector residencial y comercial de análisis.....	78
3.5.1.	Capacidad del circuito 246.....	79
3.5.2.	Características de carga del circuito 246 .....	80
3.5.3.	Tendencia de la demanda de potencia del circuito 246 .....	82
4.	COMPENSACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE POTENCIA REACTIVA.....	87
4.1.	Automatización por medio de controladores inteligentes .....	87
4.2.	Selección de capacitores .....	88
4.2.1.	Proceso de evaluación con Neplan .....	88
4.2.2.	Bancos de capacitores del circuito 160.....	94
4.2.3.	Ubicación de los bancos de capacitores del circuito 246 .....	97
4.3.	Compensación de potencia reactiva del circuito 160 .....	98
4.3.1.	Compensación automatizada del circuito 160 .....	99
4.3.1.1.	Algoritmo del circuito 160 .....	100
4.3.1.2.	Curvas de compensación automatizada del circuito 160 .....	105
4.3.2.	Compensación estática del circuito 160 .....	108
4.4.	Compensación de potencia reactiva del circuito 246 .....	109
4.4.1.	Compensación automatizada del circuito 246 .....	109
4.4.1.1.	Algoritmo del circuito 246 .....	110

4.4.1.2.	Curvas de la automatización del circuito 246 .....	115
4.4.2.	Compensación estática del circuito 246.....	117
5.	ANÁLISIS FINANCIERO DE COMPENSACIÓN REACTIVA .....	119
5.1.	Inversiones y equipo de compensación reactiva .....	119
5.1.1.	Equipo de bancos de capacitores.....	119
5.1.2.	Equipo de automatización .....	120
5.1.3.	Costos de instalación y mantenimiento.....	122
5.2.	Pliego tarifario .....	123
5.3.	Análisis financiero de la compensación reactiva del circuito 160.....	125
5.3.1.	Simulaciones de compensación reactiva del circuito 160 .....	125
5.3.1.1.	Premisas de simulación circuito 160..	129
5.3.1.2.	Resultados de simulación circuito 160 .....	131
5.3.2.	Análisis económico de la automatización del circuito 160 .....	132
5.3.3.	Análisis económico del circuito 160 con compensación estática .....	138
5.4.	Análisis financiero de la compensación reactiva del circuito 246.....	142
5.4.1.	Simulaciones de compensación reactiva del circuito 246 .....	142
5.4.1.1.	Premisas de simulación circuito 246..	145
5.4.1.2.	Resultados de simulación circuito 246 .....	146

5.4.2.	Análisis económico de la automatización del circuito 246 .....	148
5.4.3.	Análisis económico del circuito 246 con compensación estática.....	151
CONCLUSIONES.....		157
RECOMENDACIONES.....		159
BIBLIOGRAFÍA.....		161
APÉNDICES.....		163





## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Circuito puramente inductivo .....	27
2.	Forma de onda inductiva .....	28
3.	Circuito puramente capacitivo .....	29
4.	Forma de onda capacitivo .....	29
5.	Triángulo de potencias .....	30
6.	Triángulo de potencia inicial del sistema .....	39
7.	Triángulo de potencia con compensación .....	40
8.	Conexiones de capacitores en trifásico .....	42
9.	Valores mínimos de BIL .....	49
10.	Diagrama de flujo de la metodología .....	54
11.	Demanda histórica en la red de distribución .....	57
12.	Histórico y pronóstico de la demanda en la red de distribución .....	61
13.	Curva de demanda del departamento de Guatemala .....	63
14.	Curva de demanda del departamento de Escuintla .....	64
15.	Curva de demanda del departamento de Sacatepéquez .....	64
16.	Curva de demanda de EEGSA .....	65
17.	Curva de demanda reactiva de EEGSA .....	66
18.	Curva de factor de potencia de EEGSA .....	67
19.	Circuito 160 de Subestación Bárcenas .....	69
20.	Curva de demanda quincenal del circuito 160 .....	75
21.	Curva de demanda entre semana del circuito 160 .....	76
22.	Curva de demanda sábado del circuito 160 .....	76
23.	Curva de demanda domingo del circuito 160 .....	77

24.	Circuito 246 de subestación Naranjo .....	78
25.	Curva de demanda quincenal del circuito 246 .....	83
26.	Curva de demanda entre semana del circuito 246 .....	83
27.	Curva de demanda sábado del circuito 246 .....	84
28.	Curva de demanda domingo del circuito 246 .....	84
29.	Carga de proyecto .....	89
30.	Parámetros de evaluación .....	90
31.	Librería de capacitores .....	91
32.	Resumen de optimización.....	92
33.	Diagrama de flujo selección de capacitores .....	93
34.	Ubicación de compensación del circuito 160 .....	96
35.	Ubicación de compensación del circuito 246 .....	98
36.	Algoritmo del circuito 160 parte 1.....	102
37.	Algoritmo del circuito 160 parte 2.....	103
38.	Diagrama de flujo del circuito 160 .....	104
39.	Curva quincenal de la automatización del circuito 160.....	106
40.	Curva entre semana de la automatización del circuito 160 .....	106
41.	Curva sábado de la automatización del circuito 160 .....	107
42.	Curva domingo de la automatización del circuito 160 .....	107
43.	Curva quincenal de compensación estática del circuito 160 .....	108
44.	Algoritmo del circuito 246 parte 1.....	112
45.	Algoritmo del circuito 246 parte 2.....	113
46.	Diagrama de flujo del circuito 246 .....	114
47.	Curva quincenal de la automatización del circuito 246.....	115
48.	Curva entre semana de la automatización del circuito 246 .....	116
49.	Curva sábado de la automatización del circuito 246 .....	116
50.	Curva domingo de la automatización del circuito 246 .....	117
51.	Curva quincenal de compensación estática del circuito 246 .....	118
52.	Reconocimiento de bancos de capacitores.....	123

53.	Escenarios de demanda del circuito 160 .....	126
54.	Simulación del circuito 160 en Neplan.....	128
55.	Beneficio neto del circuito 160 automatizado .....	135
56.	Curva de demanda automatizada del circuito 160.....	137
57.	Beneficio neto del circuito 160 con compensación estática .....	139
58.	Curva de demanda con compensación estática del circuito 160 .....	141
59.	Escenarios de demanda del circuito 246 .....	142
60.	Simulación del circuito 246 en Neplan.....	144
61.	Beneficio neto del circuito 246 automatizado .....	149
62.	Curva de demanda automatizada del circuito 246.....	151
63.	Beneficio neto del circuito 246 con compensación estática .....	153
64.	Curva de demanda con compensación estática del circuito 246 .....	155

## TABLAS

I.	Demanda histórica en la red de distribución.....	57
II.	Histórico y pronóstico de la demanda en la red de distribución .....	60
III.	Distribución horaria de demanda por departamento en la red de distribución.....	62
IV.	Factor de carga y pérdida de los circuitos agrupados por departamento .....	63
V.	Circuitos con mayor demanda reactiva .....	68
VI.	Conductor primario del circuito 160 .....	70
VII.	Conductor secundario del circuito 160 .....	70
VIII.	Demanda del circuito 160 y subestación Bárcenas .....	71
IX.	Grandes usuarios del circuito 160 .....	73
X.	Sectores de vivienda del circuito 160 .....	74
XI.	Conductor primario del circuito 246 .....	79
XII.	Conductor secundario del circuito 246 .....	79

XIII.	Demanda del circuito 246 y subestación Naranja .....	80
XIV.	Grandes usuarios del circuito 246.....	81
XV.	Sectores de vivienda del circuito 246.....	81
XVI.	Librería de capacitores EEGSA .....	94
XVII.	Selección de capacitores del circuito 160 .....	95
XVIII.	Distribución de carga del circuito 246 .....	97
XIX.	Conjunto de capacitores del circuito 160 .....	99
XX.	Intervalos de compensación del circuito 160.....	99
XXI.	Intervalos de compensación automatizada del circuito 160 .....	100
XXII.	Variables del circuito 160.....	100
XXIII.	Conjunto de capacitores del circuito 246 .....	109
XXIV.	Intervalos de compensación del circuito 246.....	110
XXV.	Variables del circuito 246.....	111
XXVI.	Costo de bancos de capacitores.....	120
XXVII.	Costo de automatizar bancos de capacitores .....	121
XXVIII.	Costo de mano de obra .....	122
XXIX.	Costo de mantenimientos a equipos.....	122
XXX.	Cálculo de FRC .....	124
XXXI.	Cálculo de anualidades VAD .....	125
XXXII.	Escenario de compensación circuito 160.....	126
XXXIII.	Factores del circuito 160.....	127
XXXIV.	Premisas de demanda mínima del circuito 160.....	130
XXXV.	Premisas de demanda media del circuito 160.....	130
XXXVI.	Premisas de demanda máxima del circuito 160.....	130
XXXVII.	Resultados en Neplan con demanda mínima del circuito 160.....	131
XXXVIII.	Resultados en Neplan con demanda media del circuito 160.....	131
XXXIX.	Resultados en Neplan con demanda máxima del circuito 160 .....	131
XL.	Ingresos y costos del circuito 160 automatizada.....	134
XLI.	Resumen financiero del circuito 160 automatizado .....	134

XLII.	Demanda máxima del circuito 160 y subestación Bárcenas automatizado .....	136
XLIII.	Ingresos y costos del circuito 160 con compensación estática .....	138
XLIV.	Resumen financiero del circuito 160 con compensación estática .....	139
XLV.	Demanda mínima del circuito 160 y subestación Bárcenas con compensación estática.....	140
XLVI.	Escenario de compensación circuito 246 .....	143
XLVII.	Factores del circuito 246 .....	143
XLVIII.	Premisas de demanda mínima del circuito 246 .....	145
XLIX.	Premisas de demanda media del circuito 246 .....	146
L.	Premisas de demanda máxima del circuito 246 .....	146
LI.	Resultados en Neplan con demanda mínima del circuito 246 .....	147
LII.	Resultados en Neplan con demanda media del circuito 246 .....	147
LIII.	Resultados en Neplan con demanda máxima del circuito 246.....	147
LIV.	Ingresos y costos del circuito 246 automatizado .....	148
LV.	Resumen financiero del circuito 246 automatizado .....	149
LVI.	Demanda máxima del circuito 246 y subestación Naranjo automatizado .....	150
LVII.	Ingresos y costos del circuito 246 con compensación estática .....	152
LVIII.	Resumen financiero del circuito 246 con compensación estática .....	153
LIX.	Demanda mínima del circuito 246 y subestación Naranjo con compensación estática.....	154



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>A</b>	Amperios
<b>C</b>	Capacidad en faradios
<b>I</b>	Corriente
<b><math>\Phi</math></b>	Desplazamiento angular en grados
<b>f.p.</b>	Factor de potencia
<b>GWh</b>	Gigavatios hora
<b>Hz</b>	Hertz
<b>kW</b>	Kilovatios
<b>kV</b>	Kilovoltios
<b>kVAR</b>	Kilovoltios-amperios reactivos
<b>kVA</b>	Kilovoltios-amperios
<b>MW</b>	Megavatios
<b>MVAR</b>	Megavoltios-amperios reactivos
<b>MVA</b>	Megavoltios-amperios
<b>M</b>	Metros
<b>P</b>	Potencia activa
<b>S</b>	Potencia aparente
<b>Q</b>	Potencia reactiva
<b>Xc</b>	Reactancia capacitiva
<b>XL</b>	Reactancia inductiva
<b>R</b>	Resistencia
<b>t</b>	Tiempo
<b>W</b>	Vatios

<b>w</b>	Velocidad angular
<b>V<sub>F</sub></b>	Voltaje de fase
<b>V<sub>L</sub></b>	Voltaje de línea
<b>V</b>	Voltaje
<b>VAR</b>	Voltios-amperios reactivos
<b>VA</b>	Voltios-amperios



## GLOSARIO

<b>Automatización</b>	Aplicación de máquinas o de procedimientos automáticos en la realización de un proceso.
<b>Circuito</b>	Interconexión de componentes eléctricos que transportan corriente eléctrica a través de por lo menos una trayectoria cerrada.
<b>Corriente</b>	Flujo de carga eléctrica que recorre un material.
<b>Data</b>	Colección de datos orientada a un determinado ámbito.
<b>Demanda</b>	Intensidad de corriente, o potencia eléctrica, relativa a un intervalo tiempo específico, que absorbe su carga para funcionar.
<b>Distribuidora</b>	Empresa que se dedica a transportar energía eléctrica a los hogares y otros negocios.
<b>EEGSA</b>	Empresa Eléctrica de Guatemala S.A., distribuidora de Guatemala.

<b>Energía eléctrica</b>	Forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencia entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos cuando se pone en contacto por medio de un conductor eléctrico.
<b>Estático</b>	Que permanece en un mismo estado y no experimenta cambios.
<b>Factor de carga</b>	Carga promedio dividida por la carga máxima en un periodo de tiempo específico.
<b>Factor de pérdida</b>	Relación de la potencia media perdida para un periodo de tiempo especificado, a la perdida máxima o perdida a la carga máxima durante el mismo periodo.
<b>Grandes Usuarios</b>	Consumidor de energía cuya demanda de potencia excede de 100 kW.
<b>Neplan</b>	Herramienta software para analizar, planificar, optimizar y simular redes eléctricas.
<b>Red de distribución</b>	Parte del sistema de suministro eléctrico cuya función es el suministro de energía desde la subestación de distribución hasta los usuarios finales.

<b>SIGRE</b>	Sistemas de Información Gráfica, herramienta software para representar la red de distribución gráficamente.
<b>Simulación</b>	Proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema bajo nuevas condiciones.
<b>Subestación</b>	Instalación destinada a establecer niveles de tensión adecuados para la transmisión y distribución de la energía eléctrica.
<b>Voltaje</b>	Presión que una fuente de suministro de energía eléctrica o fuerza electromotriz ejerce sobre las cargas eléctricas o electrones en un circuito eléctrico cerrado.



## RESUMEN

En este estudio se evaluó la factibilidad de la compensación de potencia reactiva en distribución utilizando bancos de capacitores automatizados con controladores inteligentes basados en microprocesadores. Se evaluaron dos circuitos de EEGSA con distinto tipo de carga, los cuales son: el circuito 160 con carga industrial y el circuito 246 con carga residencial-comercial. Para demostrar el impacto de la automatización de los bancos de capacitores, en ambos circuitos se realizó un segundo análisis de compensación reactiva sin el uso de los controladores inteligentes.

Se estableció un conjunto de bancos de capacitores de diferentes capacidades con su total equivalente a la demanda máxima del circuito. Para cada circuito se determinó una serie de etapas de compensación de potencia reactiva de acuerdo con las distintas combinaciones posibles del conjunto. Se tomaron tres casos: caso base, caso con compensación automatizada y caso con compensación estática. En cada caso se simularon tres escenarios para visualizar la compensación en distintos puntos de interés de la demanda: mínima, media y máxima.

Al finalizar las simulaciones se obtuvo las pérdidas correspondientes a cada caso y escenario. Se realizó un análisis económico con métodos de VNA y TIR donde el ahorro de pérdidas generadas por la compensación reactiva se determina como beneficio monetario a la distribuidora.



# OBJETIVOS

## General

Estudiar el impacto de la utilización de controladores inteligentes en bancos de capacitores para la compensación automatizada de potencia reactiva en la red de distribución en tiempo real.

## Específicos

1. Analizar e interpretar el impacto que tiene la compensación automatizada sobre un circuito de carga residencial-comercial.
2. Analizar e interpretar el impacto que tiene la compensación automatizada sobre un circuito de carga industrial.
3. Establecer algoritmos para automatizar la compensación reactiva utilizando conjuntos de bancos de capacitores con distintos valores de capacidad.
4. Determinar la factibilidad que produce la utilización de controladores para automatizar bancos de capacitores en la red de distribución.





## INTRODUCCIÓN

La compensación de potencia reactiva tiene como objetivo disminuir la demanda de potencia reactiva de una red eléctrica. Por medio de la instalación de bancos de capacitores o condensadores se busca aumentar el porcentaje de la potencia activa respecto a la total. Idealmente, al compensar la potencia reactiva el factor de potencia debería aproximarse a uno.

Los circuitos de la red eléctrica de EEGSA tienen una demanda de potencia reactiva no uniforme que depende de varios factores; principalmente el tipo de carga conectado y su comportamiento en el transcurso del día. Actualmente, la red de EEGSA cuenta únicamente con compensación de potencia reactiva no automatizada, debido a esto en las horas del día donde los usuarios disminuyen su demanda de potencia reactiva se tiene una sobre compensación resultando en un bajo factor de potencia.

Con el fin de evitar compensación de potencia reactiva en situaciones donde no se amerite es necesario la utilización de dispositivos como controladores inteligentes basados en microprocesadores, los cuales pueden activar bancos de capacitores dependiendo de los niveles de potencia reactiva. Optimizando el factor de potencia y la potencia total del circuito continuamente en tiempo real se beneficia la distribuidora con el ahorro de pérdidas en las líneas distribución.



# 1. POTENCIA EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN

## 1.1. Conceptos básicos de la potencia

La potencia eléctrica es el ritmo con el cual la energía eléctrica es entregada o absorbida por un elemento en un circuito o instalación eléctrica. Cuando una corriente eléctrica fluye por cualquier circuito, puede convertir la energía eléctrica en diferentes tipos de energía para realizar una gran variedad de funciones, por ejemplo: una estufa eléctrica convierte la energía eléctrica en calor, un motor en energía mecánica, un foco en luz.

### 1.1.1. Potencia activa

La potencia eléctrica se divide en dos partes, la potencia activa y la potencia reactiva. La potencia activa representa la cantidad de energía eléctrica transformada para producir un trabajo útil, por ejemplo: cuando la energía eléctrica es convertida en luz, calor, movimiento o fuerza mecánica, entre otros. Comúnmente los dispositivos que demandan potencia activa son dispositivos resistivos. Algunos ejemplos de estos son los calentadores de agua, las lámparas incandescentes o las estufas eléctricas.

La fórmula de la potencia activa eléctrica monofásica es la siguiente:

$$P = V * I \cos \Phi$$

### **1.1.2. Potencia reactiva**

La potencia reactiva no produce un trabajo útil, ya que su valor medio es nulo. La potencia reactiva es necesaria para la creación de campos magnéticos, por lo que se presenta en instalaciones eléctricas que contengan inductores y condensadores; estos dispositivos almacenan energía en forma de campos magnéticos y campos eléctricos respectivamente.

La fórmula de la potencia reactiva eléctrica monofásica es la siguiente:

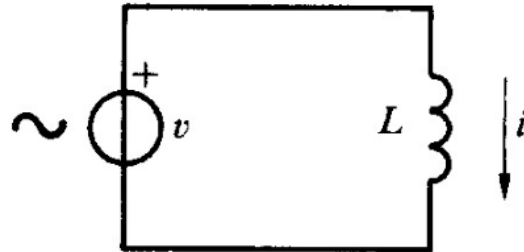
$$Q = V * I \text{ sen } \Phi$$

#### **1.1.2.1. Potencia reactiva inductiva**

La potencia reactiva no se genera ni se consume, a pesar de lo que sugiere el empleo de los términos 'potencia reactiva generada o potencia reactiva consumida'. En el caso de los circuitos lineales aparece únicamente cuando existen condensadores o bobinas. Es posible afirmar entonces que la potencia reactiva inductiva es aquella que se desarrolla en circuitos inductivos.

A modo de elaborar en estos conceptos, se propone considerar el caso idealizado de un circuito pasivo que contenga solamente un elemento inductivo, lo que implica que  $R=0$ ;  $X_C=0$ ; y  $X_L \neq 0$ . Éste se encuentra bajo el efecto de una tensión senoidal de la forma  $V(t) = V_{m\acute{a}x} * \text{sen}(wt)$ .

Figura 1. **Circuito puramente inductivo**

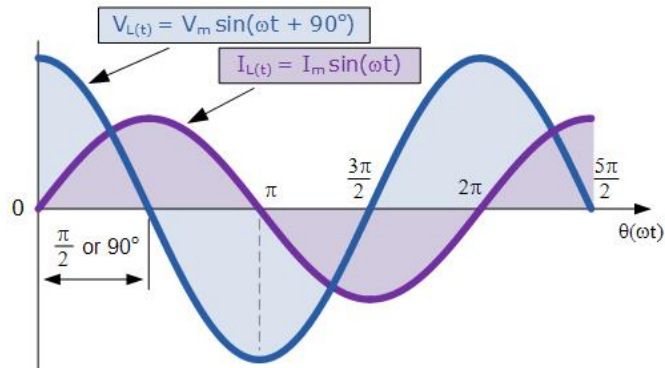


Fuente: Alservista. *Circuito puramente inductivo.*

<http://www.garkonda.altervista.org/joomla/elettronica/elettrotecnica/323-circuito-puramente-induttivo>. Consulta: diciembre de 2018.

Para este caso idealizado se asume además que la bobina no posee capacidad ni resistencia, por cual solo opone su reactancia inductiva a las fluctuaciones de la intensidad de circuito. De esta forma, al aplicar una tensión alterna a la bobina, la onda de la intensidad de corriente resultante producirá el ángulo máximo de desfase ( $90^\circ$ ). La onda característica de este circuito es de tipo senoidal, con una frecuencia que es el doble de la de la red, y con un eje de simetría que coincide con el eje de las abscisas; ello implica que las alternancias encierran tanto áreas positivas como negativas de igual valor. Por tanto, la resultante de la suma algebraica de las áreas positivas y negativas es una potencia nula. Ésta se explica en que el circuito toma energía de la red para generar el campo magnético en la bobina durante las alternancias positivas; en el caso opuesto de las alternancias negativas, el circuito devuelve la energía a la red, provocando la desaparición transitoria del campo magnético. Dicha energía que es sustraída y devuelta a la red no genera trabajo y se le conoce con el término 'energía oscilante', ésta corresponde a la potencia que va de 0 a  $\frac{V_{m\acute{a}x} \times I_{m\acute{a}x}}{2}$  en sentido positivo y negativo.

Figura 2. **Forma de onda inductiva**



Fuente: Tutoriales de electrónica básica. *AC Inductancia y reactancia inductiva en un circuito de corriente alterna*. <http://tutorialesdeelectronicaBasica.blogspot.com/2016/06/ac-inductancia-y-reactancia-inductiva.html>. Consulta: diciembre de 2018.

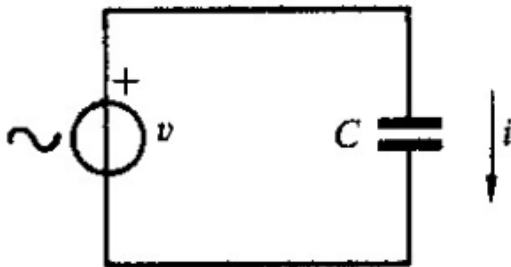
### 1.1.2.2. **Potencia reactiva capacitiva**

La potencia reactiva capacitiva es la que tiene lugar en un circuito capacitivo. Si se considera el caso idealizado de un circuito pasivo conteniendo un solo capacitor, es decir,  $R=0$ ;  $X_L=0$ ;  $X_C \neq 0$ , que se encuentra bajo la acción de una tensión senoidal de la forma  $V(t) = V_{m\acute{a}x} * \text{sen}(\omega t)$ ; dará como resultado una onda de corriente,  $I$ , que carga y descarga al capacitor, que se encuentra adelantada  $90^\circ$  respecto de la onda de tensión aplicada. Debido a ello, en este caso el valor de la potencia se presenta como una onda senoidal cuya amplitud oscila entre los valores  $0$  y  $\frac{V_{m\acute{a}x} \times I_{m\acute{a}x}}{2}$ , tanto en sentido positivo como negativo.

Al igual que en el caso de la Potencia reactiva inductiva, la alternancia de la onda encierra tanto áreas positivas como negativas, cuya suma algebraica es nula. Las áreas positivas representan los períodos en que las placas del

capacitor reciben la carga de la red; los períodos negativos son los momentos de descarga del capacitor y el regreso a la red de la energía recibida.

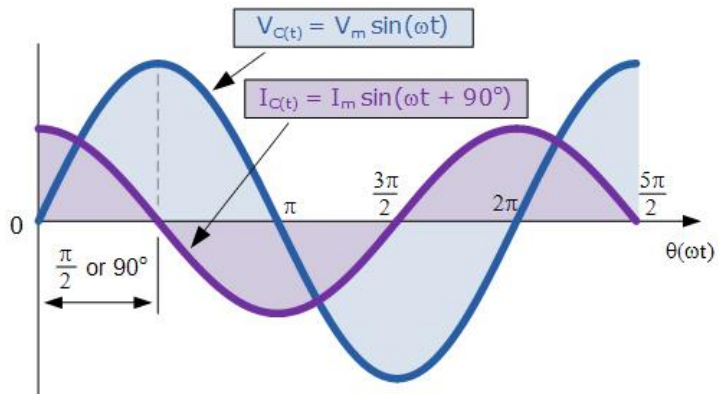
Figura 3. **Circuito puramente capacitivo**



Fuente: Alservista. *Circuito puramente capacitivo*.

<http://www.garkonda.altervista.org/joomla/electronica/elettrotecnica/336-circuito-puramente-capacitivo>. Consulta: diciembre de 2018.

Figura 4. **Forma de onda capacitivo**



Fuente: Tutoriales de electrónica básica. *AC de capacitancia y reactancia*.

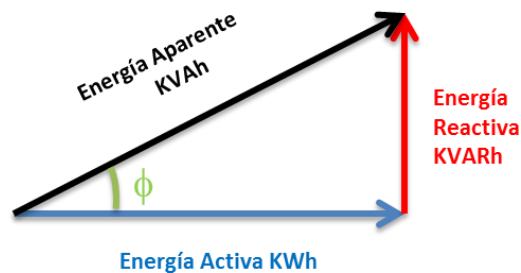
<http://tutorialesdeelectronica basica.blogspot.com/2016/06/ac-de-capacitancia-y-reactancia.html>.

Consulta: diciembre de 2018.

### 1.1.3. Potencia aparente

La potencia aparente es la suma vectorial de la potencia activa y reactiva, en otras palabras, es la potencia total que fluye en una instalación eléctrica. Se puede representar mediante la gráfica denominada triángulo de potencias:

Figura 5. Triángulo de potencias



Fuente: FAURE Beneito. *Triangulo de potencia*. [www.beneito-faure.com/2016/07/factor-de-potencia-pf/triangulodepotencias2-14/](http://www.beneito-faure.com/2016/07/factor-de-potencia-pf/triangulodepotencias2-14/). Consulta: diciembre de 2018.

Para un valor de tensión, la potencia aparente es proporcional a la intensidad que circula por el circuito eléctrico, se representa con la siguiente fórmula:

$$S = V * I$$



#### 1.1.4. Factor de potencia

El factor de potencia se define como la relación entre la potencia activa (P) y la potencia aparente (S), con el factor de potencia se puede determinar la eficiencia de una instalación eléctrica. El factor de potencia (f. p.) se puede representar con la siguiente formula:

$$f.p. = \frac{P}{S}$$

En una instalación eléctrica donde la potencia activa es igual a la potencia aparente se dice que el factor de potencia es igual a 1, dicha instalación consistiría en carga puramente resistiva y la totalidad de la potencia produce un trabajo útil. En instalaciones eléctricas con cargas puramente inductivas o capacitivas el factor de potencia es igual a 0. Entre más grande sea la potencia reactiva más bajo será el factor de potencia.

En la figura 5 se puede observar que siempre y cuando la potencia reactiva es distinta de 0, existe un desfase entre la potencia activa y la aparente. El coseno de este ángulo ( $\Phi$ ) también es conocido como el factor de potencia, pero no son exactamente lo mismo. Únicamente en cargas lineales se cumple lo siguiente:

$$\cos \Phi = \frac{P}{S}$$

## **1.2. Consecuencias de bajo factor de potencia**

Se ha establecido que la potencia reactiva no produce ningún trabajo útil pero además de esto nos trae una variedad de consecuencias negativas que puede llegar a impactar todo el sistema eléctrico, desde las generadoras hasta los propios usuarios.

### **1.2.1. Pérdidas por efecto Joule**

El efecto Joule es un fenómeno de carácter irreversible al cual se debe la transformación en calor de parte de la energía cinética de los electrones, producto del choque de éstos con los átomos del material por el que se mueven cuando en un conductor circula corriente eléctrica. Estos choques se deben al movimiento errático de los electrones en el cable y ocasionan una pérdida de energía cinética y un incremento de la temperatura en el cable. La cantidad de calor que se genera se calcula de acuerdo a lo indicado en la Ley de Joule: “el calor que desarrolla una corriente eléctrica al pasar por un conductor es directamente proporcional a la resistencia, al cuadrado de la intensidad de la corriente y el tiempo que dura la corriente”.

$$Q = I^2 * R * t$$

Tomando en cuenta que la potencia es el ritmo a la cual se transfiere energía, se puede representar la potencia perdida por el efecto joule con la siguiente formula:

$$P = I^2 * R$$

### **1.2.2. Sobrecarga de generadores, transformadores y líneas de distribución**

Cuando la potencia se mantiene constante, al reducirse el factor de potencia aumenta la potencia aparente, ello implica que, a fin de entregar una misma potencia activa, se debe dotar de mayor intensidad eficaz a la carga. Por tanto, un bajo factor de potencia puede llevar consigo consecuencias indeseables como la sobrecarga de cables de distribución o el calentamiento excesivo de los conductores, lo cual puede mermar la vida útil de los aislantes y el resto del equipo, entre otros. Lo correcto es mantener a un mínimo la potencia reactiva y sobredimensionar las líneas de distribución y los transformadores con el objetivo de poseer la capacidad suficiente para la generación de potencia aparente.

### **1.2.3. Sobre tensión por efecto Ferranti**

El efecto Ferranti consiste en la elevación del voltaje en el extremo final de una línea energizada a comparación del extremo de la fuente, esto ocurre cuando se tiene la línea en vacío o con una carga muy pequeña. El efecto se produce debido a la capacitancia distribuida en la línea, entre más larga sea la línea y mayor es el voltaje aplicada más pronunciado será este efecto.

Se puede observar claramente este efecto en los cables subterráneos y las líneas cortas por sus altas capacitancias. También es considera efecto Ferranti cuando se tiene un voltaje en carga mayor al de la línea en vacío, esto es ocasionado por tener cargas muy capacitivas.

### **1.3. Marco legal**

La Comisión Nacional de Energía Eléctrica o la Comisión, es un órgano técnico del Ministerio que tiene la función de regular y dirigir las actividades del sistema eléctrico y los agentes del mercado mayorista. Los agentes del mercado mayorista son los siguientes:

- Generadores
- Comercializadores
- Distribuidores
- Importadores
- Exportadores
- Transportistas

#### **1.3.1. Distribuidores**

El distribuidor es el propietario de instalaciones que cumplen la función de distribuir comercialmente energía eléctrica. Los distribuidores se conectan a la red de transporte suministrado por el Servicio de Transporte de Energía Eléctrica (STEE)

Un distribuidor que presta el servicio de distribución final suministra energía eléctrica a la población en condiciones de calidad de servicio y precios aprobados por la comisión. Un distribuidor puede prestar el servicio de transporte para un generador o gran usuario que se conecten a su red, pero no se considera un transportista. La distribuidora EEGSA entrega ambos servicios.

### **1.3.2. Usuarios**

Un usuario o consumidor se define como el titular de una instalación que recibe suministro de energía eléctrica.

Un usuario suministrado con servicio de distribución final con demanda menor a 100 kW está sujetos a las tarifas establecidos por la Comisión y se denomina como un usuario regulado.

Un Gran Usuario o usuario no regulado es un consumidor que tiene una demanda de potencia mayor a los 100 Kw y no está sujeto a regulación de precio. Estos usuarios pueden estar conectados a la red de distribución o la red de transporte por medio de la STEE.

### **1.3.3. Ley general de electricidad**

La Comisión emitió la Ley General de Electricidad y su Reglamento con el fin de normar el desarrollo del conjunto de actividades de generación, transporte, distribución y comercialización de electricidad.

El artículo 56, Normas de calidad del servicio de transporte, se establece que los prestadores del STEE (Generadores, Distribuidores y Grandes Usuarios) están sujetos a obligaciones para mantener la calidad del servicio de transporte o tendrán sanciones por incumplimiento. Estas obligaciones se detallan en las Normas Técnicas de Calidad del Servicio de Transporte y Sanciones (NTCSTS).

El artículo 23.2 de la NTCSTS indica que los Distribuidores y Grandes Usuarios deberán contar con el equipo necesario que permita el control de tensión y suministro de potencia reactiva, debiendo tener en sus puntos de conexión con el sistema de transporte un factor de potencia inductivo, a toda hora, de 0,90 o superior.

Igual que los Distribuidores y Grandes Usuarios, los usuarios de distribución final están sujetos a penalizaciones por el incumplimiento de normas de calidad establecidos por la Comisión como indica en el artículo 136 del Reglamento de la Ley. En las normas NTSD (Normas Técnicas del Servicio de Distribución) se establece en el artículo 49; un factor de potencia será considerado bajo si es menor de 0,85 para los usuarios con demandas hasta los 11 kW y menor de 0,9 para los usuarios con demandas arriba de los 11 kW.

Derivado de lo anterior, es importante para el usuario regulado mantener su factor de potencia en el rango establecido para evitar sanciones e indemnizaciones de parte de la Distribuidora. A los usuarios que tengan un bajo factor de potencia se le genera cargos adicionales en su facturación. Estos cargos se pueden calcular de las siguientes formas:

- Un cargo fijo por cada kW, más otro por cada kVAR.
- Un cierto cargo por cada kW con un factor de potencia determinado o más alto, con cargos adicionales por cada kVA en exceso, del requerido por un factor de potencia mínimo.
- Un cargo por kW de demanda, multiplicado por un factor que aumenta conforme disminuye el factor de potencia.

- Un cargo fijo por cada kVA pico.<sup>1</sup>

#### **1.4. Compensación de potencia reactiva**

Como se estableció anteriormente, los Distribuidores, Grandes Usuarios y usuarios de distribución final están obligados a mantener un buen factor de potencia, se han diseñado e ingeniado dispositivos y métodos para la disminución del bajo factor de potencia y sus consecuencias.

##### **1.4.1. Corrección de factor de potencia**

La corrección del factor de potencia se puede clasificar en dos categorías: método directo e indirecto.

###### **1.4.1.1. Método directo**

El método directo consiste en mejorar los mismos dispositivos que están provocando el bajo factor de potencia antes de recurrir a mejorar la línea de distribución. Un ejemplo sería la instalación de capacitores en paralelo a las lámparas fluorescentes para disminuir la potencia reactiva demandada por el dispositivo.

###### **1.4.1.2. Método indirecto**

El método indirecto busca compensar la demanda de potencia reactiva y no actuar sobre la propia causa como el método directo. La forma de compensarlas es insertar una potencia reactiva de carácter contraria a la

---

<sup>1</sup> ENRÍQUEZ HARPER, Gilberto. *Sistemas de transmisión y distribución de potencia eléctrica*. p. 134.

demandada por la red o usuario, con el fin de disminuir la potencia aparente y corriente entregada por la línea de distribución.

Este método se puede realizar con la utilización de dos compensadores distintos: síncronos y estáticos. Los síncronos pueden ser motores o generadores síncronos. Para el funcionamiento de estas máquinas se necesita de una corriente de excitación, si la maquina no recibe suficiente corriente de excitación se dice que está subexcitada y demanda energía reactiva, de forma contraria, la maquina esta sobreexcitada y entrega energía reactiva al sistema. Los estáticos más utilizados son los capacitores.

#### **1.4.2. Capacitores**

Un capacitor es un dispositivo compuesto de dos elementos conductores separados por un material aislante, encerrados por un contenedor, cuya finalidad es producir capacitancia en un circuito eléctrico. Por su parte, los bancos de capacitores son utilizados para corregir el factor de potencia de una carga o un conjunto de cargas que consumen potencia reactiva de manera fija. Por tanto, todos los capacitores que conforman un banco fijo están conectados a la red eléctrica de manera permanente; por tal razón, en caso de ser necesario reemplazar o dar mantenimiento a alguno de los componentes del banco se debe desconectar el banco completo.

#### **1.4.3. Método de cálculo de potencia de compensación**

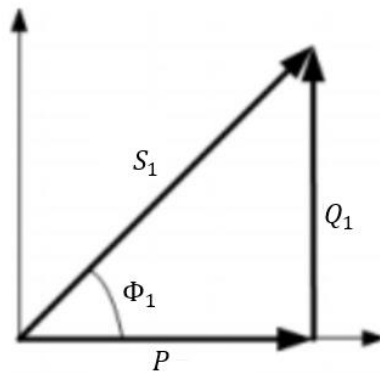
El cálculo de compensación es un método indirecto que utiliza bancos de capacitores y se basa en el triángulo de potencia, para lograr el factor de potencia deseado.



### 1.4.3.1. Corriente alterna monofásica

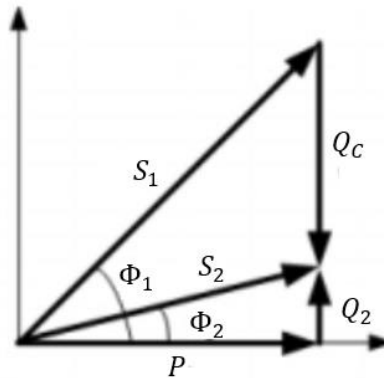
Cuando se tiene un sistema eléctrico monofásica que posee una potencia activa determinada ( $P$ ) y una potencia reactiva inicial ( $Q_1$ ) que brinda un factor de potencia bajo ( $\cos \Phi_1$ ). Se busca disminuir  $Q_1$  introduciendo una potencia reactiva negativa ( $Q_c$ ) por medio de un capacitor monofásico de cierta capacidad ( $C$ ), la diferencia de ambas potencias reactivas resulta con una potencia reactiva final ( $Q_2$ ) y el factor de potencia deseado ( $\cos \Phi_2$ ). Se puede apreciar el sistema inicial y final en las figuras 6 y 7.

Figura 6. Triángulo de potencia inicial del sistema



Fuente: Slideshare. *Factor de potencia*. <https://es.slideshare.net/yeinier/factor-potencia-8113735>. Consulta: diciembre de 2018.

Figura 7. **Triángulo de potencia con compensación**



Fuente: Slideshare. *Factor de potencia*. <https://es.slideshare.net/yeinier/factor-potencia-8113735>. Consulta: diciembre de 2018.

Por trigonometría, a partir del triángulo de potencias sabemos que la potencia aparente y reactiva se puede expresar de la siguiente manera:

$$S = \frac{P}{\cos \Phi}$$

$$Q = S \sin \Phi$$

Sustituyendo la potencia aparente en la fórmula de potencia reactiva se obtiene lo siguiente:

$$Q = \frac{P}{\cos \Phi} \sin \Phi$$

$$Q = P \tan \Phi$$

La potencia reactiva inicial es el producto entre la potencia activa y la tangente del ángulo inicial.

$$Q_1 = P \tan \Phi_1$$

De igual manera, la potencia reactiva final es el producto entre la potencia activa y la tangente del ángulo final.

$$Q_2 = P \tan \Phi_2$$

La potencia reactiva del capacitor se obtiene de la diferencia de la potencia reactiva inicial y la final.

$$Q_C = Pn (\tan \Phi_1 - \tan \Phi_2)$$

La potencia reactiva del capacitor se puede obtener con las siguientes formulas:

$$Q_C = \frac{V^2}{X_C}$$

$$Q_C = V^2 * \omega * C$$

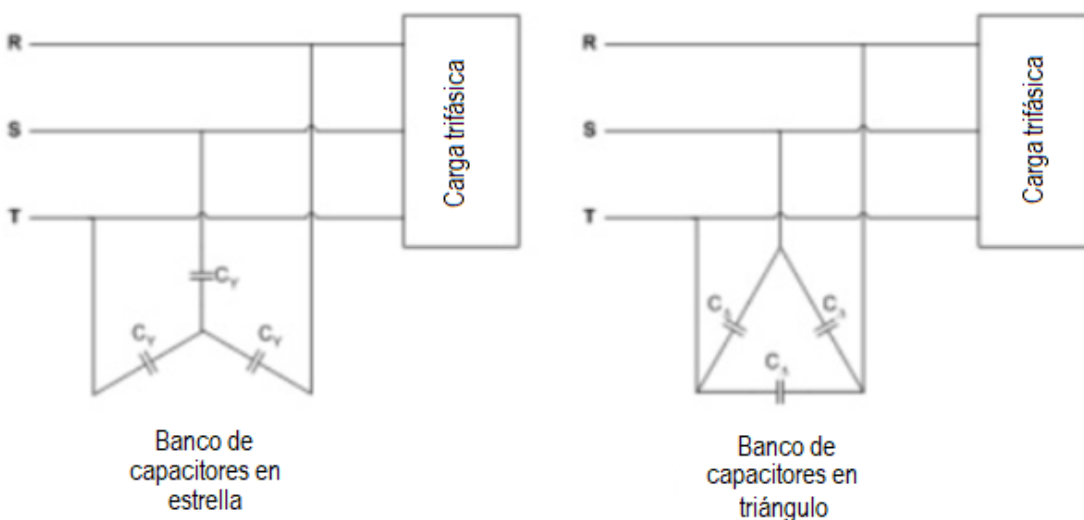
Despejando la capacitancia de la formula anterior y sustituyendo  $Q_C$  con la formula X, se obtiene la capacidad del capacitor necesario en el sistema para obtener el factor de potencia deseado.

$$C = \frac{P(\tan \Phi_1 - \tan \Phi_2)}{V^2 * \omega}$$

### 1.4.3.2. Corriente alterna trifásica

En un sistema eléctrico trifásica se utilizan bancos de capacitores para compensar la potencia reactiva, los cuales consisten en un arreglo de 3 capacitores que poseen la misma capacidad. Existen dos formas de conectar los bancos al sistema: configuración estrella o configuración delta. En la figura 8 se puede visualizar las diferentes conexiones.

Figura 8. Conexiones de capacitores en trifásico



Fuente: Slideshare. *Factor de potencia*. <https://es.slideshare.net/yeinier/factor-potencia-8113735>. Consulta: diciembre de 2018.

En la configuración estrella la relación de voltaje de línea y la de fase se rige de la siguiente manera:

$$V_L = \sqrt{3} * V_F$$

Sabiendo que el banco se forma de un arreglo de tres capacitores de la misma capacidad por lo tanto la potencia reactiva entregado es tres veces la de un capacitor individual.

$$Q_C = 3 \frac{V_F^2}{X_C} = 3V_F^2 * \omega * C_Y$$

$$Q_C = 3V_F^2 * \omega * C_Y = 3 \frac{V_L^2}{3} * \omega * C_Y = V_L^2 * \omega * C_Y$$

A base de la deducción anterior, la capacidad de los capacitores en el arreglo para la conexión estrella se obtiene de la siguiente manera:

$$C_Y = \frac{P(\tan \Phi_1 - \tan \Phi_2)}{V_L^2 * \omega}$$

En la configuración delta la relación de voltaje de línea y la de fase se rige de la siguiente manera:

$$V_L = V_F$$

Tomando en cuenta lo anterior, la potencia reactiva del banco es:

$$Q_C = 3 \frac{V_F^2}{X_C} = 3 \frac{V_L^2}{X_C} = 3V_L^2 * \omega * C_\Delta$$

La capacidad de los capacitores en el arreglo para la conexión delta se obtiene de la siguiente manera:

$$C_{\Delta} = \frac{P(\tan \Phi_1 - \tan \Phi_2)}{3V_L^2 * \omega}$$

Al comparar la capacidad en conexión estrella y delta se obtiene la siguiente relación:

$$C_Y = 3 * C_{\Delta}$$

## **1.5. Sistemas de control**

En una red donde la demanda de potencia reactiva tiene grandes variaciones, ocurre una de dos situaciones: el banco de capacitores fijo no entrega la potencia reactiva necesaria para compensar y obtener el factor de potencia deseado o entrega potencia reactiva arriba del valor necesario y sobrecompensa.

Por lo cual es necesario tener un sistema de control adecuado que pueda monitorear y accionar la conexión o desconexión de los bancos de capacitores manteniendo una compensación de reactiva óptima.

### **1.5.1. Controladores electromecánicos**

Un controlador electromecánico es un interruptor que opera con electricidad. Muchos controladores emplean un electroimán para operar mecánicamente un interruptor, pero pueden utilizarse otros principios operativos como, por ejemplo, los relés de estado sólido.

Un tipo de controlador electromecánico que puede soportar la alta cantidad de potencia requerida para controlar de manera directa un motor eléctrico u otras cargas es conocido como 'contactor'. Los relés de estado sólido manejan circuitos sin partes móviles, en cambio se valen de un aparato semiconductor para realizar la función del interruptor. Los relés con características operativas calibradas y en ocasiones múltiples bobinas operativas son empleados para proteger circuitos eléctricos de sobrecargas o caídas; en sistemas eléctricos modernos de potencia estas funciones son llevadas a cabo por instrumentos digitales llamados 'controladores protectores'.

### **1.5.2. Microprocesadores**

Un microprocesador, también llamado chip lógico, es un procesador de computadora dentro de un microchip. El microprocesador contiene todas, o al menos la mayor parte, de las funciones de la unidad central de procesamiento (CPU por sus siglas en inglés) y actúa como una especie de máquina que entra en movimiento al momento de encender la computadora. Un microprocesador se diseña para realizar operaciones lógicas y aritméticas que hacen uso de pequeños espacios que contienen números llamados registros. Las operaciones típicas de un microprocesador incluyen suma, resta, comparación entre dos números y extracción de números de un área hacia otra. Estas operaciones son el resultado de una serie de instrucciones que son parte del diseño del microprocesador.

### **1.5.3. Controladores basados en microprocesadores**

Un controlador basado en microprocesador es un dispositivo cuya función es obtener señales de entrada por medio de una interfaz para luego enviar señales de control a otros equipos con el fin de ejecutar alguna acción como la apertura o cierre de un interruptor. Las señales de entrada pueden ser obtenidas por medio de sensores de temperatura, movimiento, tensión y corriente entre otros. Estos dispositivos se conforman de un chip de microprocesador, memoria ROM, memoria RAM y de la interfaz del dispositivo.

El microprocesador contiene un software almacenado en la memoria ROM que se ejecuta continuamente siempre y cuando el controlador esté conectado a una fuente de poder. Este software define el comportamiento y características del controlador, su función consiste en realizar instrucciones definidas por el usuario, así como la lectura de información obtenida por los sensores, realizar comparaciones lógicas y operaciones aritméticas con los datos obtenidos. El usuario puede agregar nuevas instrucciones o modificar las existentes en cualquier momento mejorando su funcionalidad sin la necesidad de alterar el hardware.

### **1.5.4. Protocolos de comunicación**

Los protocolos de comunicación son descripciones formales de formatos y reglas de mensaje digitales. Son necesarias para intercambiar mensajes entre sistemas de computación y utilizados en el área de telecomunicaciones.



Los protocolos de comunicación cubren la autenticación, detección y corrección de errores y señalización. También describen la sintaxis, semántica y sincronización de comunicación análoga y digital. Los protocolos de comunicación son implementados en hardware y software. Existen miles de protocolos de comunicación utilizados en todas partes en comunicación análoga y digital. Las redes computacionales no podrían existir sin ellos.

Los dispositivos de comunicación deben coincidir con una serie de aspectos físicos de la data que se intercambiará antes de poder llevar a cabo una transmisión satisfactoria. Las reglas que definen la transmisión son llamadas protocolos.

Hay varias propiedades de una transmisión que pueden ser definidas por un protocolo. Las más comunes incluyen: tamaño del paquete, velocidad de la transmisión, tipos de corrección de errores, técnicas de sincronización, mapeo de direcciones, procesos de reconocimiento, control de flujo, controles de secuencia de paquetes, trazo de rutas, formateo de direcciones.

Entre los protocolos más populares se encuentran: Protocolo de Transferencia de Archivos (*File Transfer Protocol, FTP*), TCP/IP, Protocolo de Datagramas de Usuario (*User Datagram Protocol, UDP*), Protocolo de Transferencia de Hipertexto (*Hypertext Transfer Protocol, HTTP*), Protocolo de la Oficina Postal (*Post Office Protocol, POP3*), Protocolo de Acceso a Mensajería de Internet (*Internet Message Acces, IMAP*), Protocolo de Transferencia Simple de Correo (*Simple Mail Transfer Protocol, SMTP*).

## **1.6. Normas de estandarización IEEE**

La IEEE es una asociación de profesionales con especialidad en los campos de ingeniería Eléctrica y Electrónica donde se elaboran normas, recomendaciones y guías para fomentar el avance en diversos campos y el uso de estándares para establecer mejor compatibilidad entre productos y fabricantes. Sus siglas provienen de su nombre en inglés *Institute of Electrical and Electronic Engineers*.

### **1.6.1. Norma IEEE 18-2012**

La norma IEEE 18-2012 Estándar para capacitores de potencia en derivación, aplica a capacitores de potencia de 216 V o mayores, 2,5 kVAR o mayores, diseñados para conexión en paralelo a sistemas de corriente alterna de transmisión y distribución con una frecuencia nominal de 50 Hz o 60 Hz.

Esta norma especifica las condiciones de servicio, clasificación, capacidades, manufacturación y pruebas que debe cumplir los bancos de capacitores. Por ejemplo, a continuación, se presenta los valores mínimos de BIL de acuerdo al nivel de voltaje establecidos por la IEEE:

Figura 9. **Valores mínimos de BIL**

<b>Range of capacitor voltage ratings (terminal to terminal) V, rms</b>	<b>Minimum BIL (kV)</b>
216–1199	30 <sup>a</sup>
1200–5000	75 <sup>a</sup>
5001–15 000	95
15 001–20 000	125
20 001–25 000	150

Fuente: Std. *IEEE 18-2012 Standard for shunt power capacitors*. p. 7.

### **1.6.2. Norma IEEE 1036-2010**

La norma IEEE 1036-2010 Guía para la aplicación de capacitores de potencia en derivación, esta guía se aplica al uso de capacitores de potencia en derivación de 50 Hz y 60 Hz de 2 400 Vac y superiores. Incluye pautas para la aplicación, protección y clasificaciones de equipos para mejorar la seguridad y la fiabilidad en la utilización de capacitores de potencia en derivación.

### **1.6.2.1. Conmutación de capacitores**

Los capacitores conmutados o capacitores automatizados brindan mayor flexibilidad en el control del voltaje del sistema, el factor de potencia y las pérdidas en el sistema. Los capacitores conmutados generalmente se aplican con algún tipo de control de interruptor automático. El control detecta una condición particular, si la condición está dentro de un nivel preestablecido, el nivel de salida del control iniciará un cierre o señal de disparo a los interruptores que conectarán o desconectarán el banco de condensadores de la alimentación sistema. Los controles de capacitores automáticos típicos se enumeran a continuación con una descripción de por qué pueden ser elegido.

- Voltaje: la mejora o el control de la regulación de voltaje es una consideración importante.
- Corriente: la magnitud de corriente está directamente relacionada con la demanda VAR.
- VAR o controles de corriente reactiva: la demanda de VAR es una consideración importante.
- Interruptor horario: la demanda de VAR tiene un alto grado de regularidad con respecto al tiempo.
- Temperatura: el aumento en la demanda de VAR está estrechamente relacionado con el cambio de temperatura.

## **2. METODOLOGÍA PROPUESTA**

Para evaluar la factibilidad de la utilización de bancos de capacitores automatizados para la compensación de potencia reactiva en circuitos de distribución se propone la siguiente metodología de manera detallada:

### **2.1. Recopilación de datos**

- Selección de circuito: el circuito debe de tener una demanda o retorno de potencia reactiva.
- Descripción del circuito: se detalla toda la información relacionada al circuito, por ejemplo, cantidad de usuarios regulados, cantidad de grandes usuarios, características de carga, capacidad del circuito, capacidad del transformador de la subestación, entre otros.
- Registros de demanda: descargar las mediciones correspondientes al circuito del medidor instalado en la salida de la subestación.
- Construcción de gráficas: se toma una muestra de 15 días de los registros descargados y se grafica las curvas de demanda de potencia activa y reactiva.
- Tendencias de demanda: se analizan las curvas de las gráficas para determinar el comportamiento de demanda del circuito.

## **2.2. Análisis de compensación automatizada**

- Selección de capacitores: mediante el módulo Ubicación Óptimo de Capacitores de Neplan se seleccionan el número, tamaño y ubicación de los bancos de capacitores.
- Rangos de compensación: con el conjunto de capacitores seleccionados se establecen rangos de compensación de acuerdo con el nivel de demanda reactiva.
- Algoritmo de compensación: en base a los rangos de compensación se diseña la programación para los controladores inteligentes.
- Curvas de demanda con compensación: se grafica nuevamente las curvas de demanda, tomando en cuenta la potencia reactiva de los nuevos bancos de capacitores instalados en la red de distribución.

## **2.3. Análisis financiero**

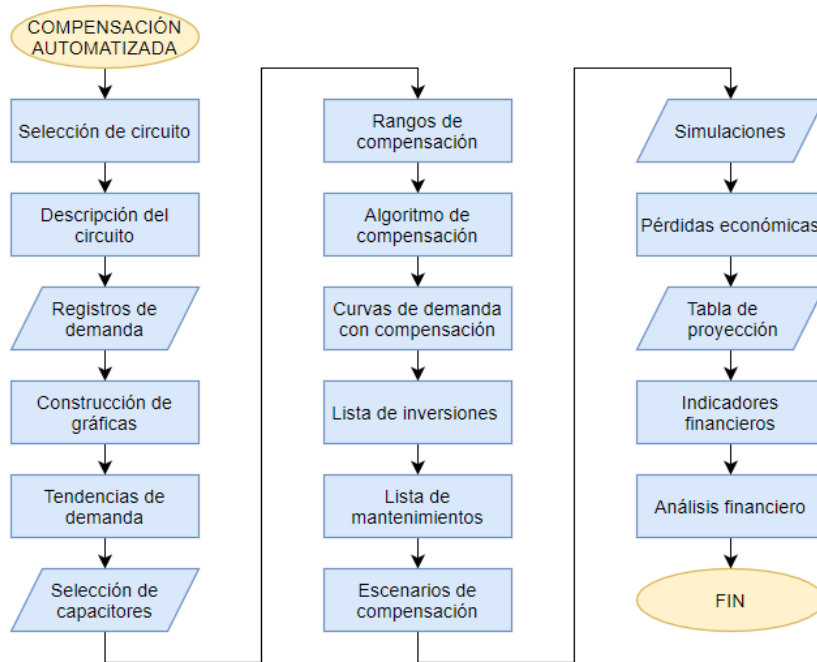
- Lista de inversiones: se detalla la lista de inversiones necesarias para llevar a cabo la compensación de reactiva.
- Lista de mantenimientos: se detalla los tipos de mantenimientos necesarios para los bancos de capacitores con automatización y sus costos.
- Escenarios de compensación: se determinan los escenarios de compensación para llevar a cabo las simulaciones.

- Simulaciones: se realizan simulaciones de la compensación de potencia reactiva mediante la instalación de bancos de capacitores automatizados en los circuitos en estudio, a fin de compensar la potencia reactiva y obtener los valores de ahorro de pérdidas de potencia.
- Pérdidas económicas: con las pérdidas de potencia obtenidas en las simulaciones se calcula el ahorro económico equivalente.
- Tabla de proyección: se proyectan los valores monetarios de inversiones, mantenimientos y pérdidas económicas en un plazo de 10 años.
- Indicadores financieros: se calculan los indicadores financieros de VNA, TIR y beneficio/costos.
- Análisis financiero: se analiza en base a los indicadores obtenidos para verificar si el proyecto es rentable para el distribuidor final.

#### **2.4. Diagrama de flujo de la metodología**

Tomando los pasos descritos anteriormente se presenta en la figura 10 la metodología a seguir en forma de un diagrama de flujo:

Figura 10. Diagrama de flujo de la metodología



Fuente: elaboración propia.



### **3. ANÁLISIS DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN**

#### **3.1. Antecedentes**

Hasta hace menos de dos décadas, las diversas incidencias en las deformaciones de la onda de tensión del sistema eléctrico (contaminación por armónicas), originadas por la creciente utilización de cargas con características de consumo no lineal en las redes de distribución se limitaba a la zona con demanda industrial.

En los últimos años, el rápido desarrollo de componentes electrónicos de potencia y el aumento de su confiabilidad han permitido que se incorporen masivamente a las industrias. Éstos, junto con las lámparas de descarga gaseosa de alto rendimiento lumínico en la ciudad, colaboran notablemente en el mejoramiento de la eficiencia de cada elemento particular, pero como contrapartida presentan características fuertemente no lineales.

Los sectores residencial, comercial y público no son ajenos a este fenómeno. La introducción cada vez más notable de equipos electrónicos de respuesta no lineal, presta también su colaboración a la contaminación armónica en la red eléctrica y por ende al mayor consumo de energía reactiva y al aumento de la poca eficacia del factor de potencia de los consumidores, lo cual es una medida de la influencia de éstos en el rendimiento de la red.

Las fuentes conmutadas para aparatos de televisión y audio, los equipos de computación, los balastos electrónicos sin filtros, los cargadores de baterías para centrales telefónicas, los variadores de velocidad de los motores eléctricos, o las fuentes no interrumpibles son sólo algunos de los ejemplos que se pueden mencionar. La contaminación armónica de las redes es frecuentemente, fuente de problemas de compatibilidad electromagnética con el equipamiento electrónico de regulación, medición, protección y control, lo cual implica un creciente aumento de la corriente por el conductor neutro en los sistemas trifásicos, más allá de lo que sugieren posibles desequilibrios de las cargas.

Por lo anterior, el incremento en el consumo de energía reactiva y por ende el desmejoramiento del factor de potencia de los consumidores, es una consecuencia no deseada para la eficiente operación de la red.

### **3.1.1. Registro histórico de demanda**

En los últimos años Empresa Eléctrica ha ejecutado un plan de compensación de energía reactiva en la red de distribución, por medio de la instalación de bancos de capacitores fijos en distintos puntos de la red.

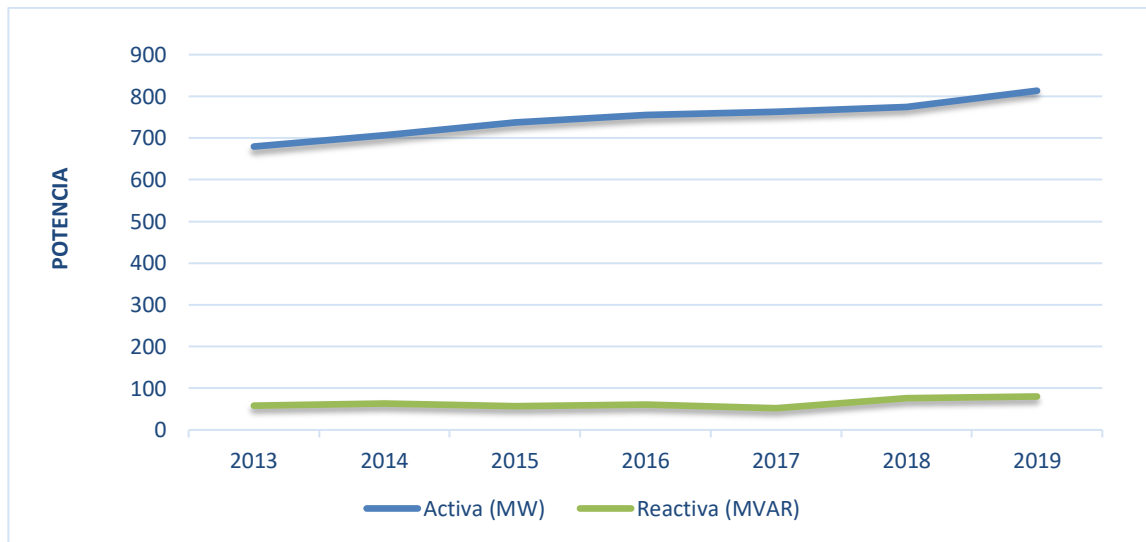
En la tabla I y la figura 11, muestra el comportamiento histórico de la demanda máxima en los últimos cinco años. Como es de esperarse, la demanda de potencia activa ha presentado un incremento constante y la demanda de potencia reactiva ha decrecido, situación favorecida por el plan de compensación ejecutado.

Tabla I. **Demanda histórica en la red de distribución**

Fecha	AÑO	POTENCIA		FP		GWh
		MW	MVAR	MIN	MAX	
11-dic	2013	679,62	58,35	0,9901	1,0000	12,67
25-nov	2014	706,88	63,70	0,9835	1,0000	13,01
16-dic	2015	737,17	56,68	0,9840	1,0000	13,75
06-dic	2016	755,63	60,33	0,9832	1,0000	14,94
04-abr	2017	762,45	52,03	0,9799	1,0000	14,69
25-abr	2018	774,61	76,63	0,9866	1,0000	15,10
24-jul	2019	813,49	80,15	0,9881	1,0000	15,77

Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Demanda histórica en la red de distribución**



Fuente: elaboración propia.

### **3.2. Condición actual de la red**

Empresa Eléctrica de Guatemala, S.A. presta el servicio de energía eléctrica a más de 1 173 347 usuarios, ubicados en los departamentos del área central del país, Escuintla, Sacatepéquez y Guatemala. Para cumplir su objetivo, la red de distribución de Empresa Eléctrica está compuesta por aproximadamente 54 049 unidades de transformación y 7 860 kilómetros de línea, en la red primaria, así como 84 743 luminarias y 8 212 kilómetros de línea, en la red secundaria, todo esto agrupado en 196 circuitos, que en el 2019 suministraron una potencia máxima de 813,4 MW en hora de demanda máxima y de 80,15 MVAR en horas de demanda media. Cabe mencionar que cada uno de estos circuitos están alimentados por 74 subestaciones propiedad de la empresa Transportista – TRELEC SA.

La red de Empresa Eléctrica presenta un factor de potencia promedio de 0,99, lo cual asegura el cumplimiento de la normativa vigente respecto al servicio de distribución, la cual determina a empresas distribuidoras a presentar de forma continua un factor de potencia mayor a 0,95, más sin embargo, considerando que el ritmo anual del crecimiento de la demanda (de los usuarios ya existentes) y de expansión de la red (nuevos usuarios) inciden directamente en el consumo de energía reactiva, se debe considerar periódicamente sistemas de compensación.

Por lo anterior, la compensación de la energía reactiva, en la red de distribución de Empresa Eléctrica, es con el fin de optimizar la operación de las instalaciones y equipos eléctricos y por ende la reducción de costos económicos de energía. Para ello, se determina la componente de potencia activa y reactiva suministrada de la red de distribución, lo cual permite conocer el factor de potencia en las horas de demanda mínima, media y máxima, lo cual es un indicador del correcto aprovechamiento de la energía. Por otro lado, se analiza la conveniencia técnica y económica de realizar la compensación de energía en distintos puntos óptimos de la red de distribución, determinado por estudios de flujo de carga correspondientes.

### **3.2.1. Pronóstico de la red de distribución**

Un análisis del registro histórico de la demanda en el área servicio de Empresa Eléctrica, refleja que, en los últimos años, se ha presentado un crecimiento de la demanda en el orden del 2,9 %, debido principalmente al crecimiento poblacional y a la actividad comercial del área.

Lo anterior ha significado, que en el último año (2019), la demanda total soportada por la red de distribución de EEGSA fuera del orden de los 813,4 MW en horas de demanda máxima y de 80,15 MVAR en horas de demanda media, lo cual significo pérdidas máximas del orden de los 9,7 MW, que representa el 1,19 % de pérdidas en media tensión. Cabe mencionar, que dicha demanda representa el 64,05 % de la capacidad instalada en transformación (69/13,8 kV).

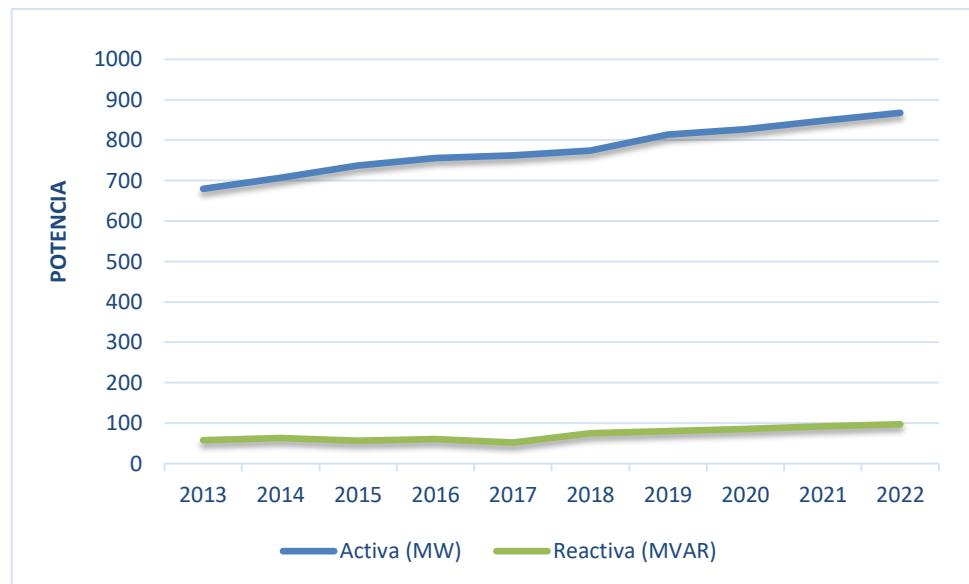
Considerando el ritmo de crecimiento experimentado en el periodo histórico en el área mencionada, se puede describir cuantitativa y gráficamente el pronóstico de la demanda, tal como se muestra en la tabla II y en la figura 12. Esto indica que en el año 2022 la demanda máxima de la red podría estar arriba de los 867,63 MW y los 97,19 MVAR.

Tabla II. **Histórico y pronóstico de la demanda en la red de distribución**

<b>FECHA</b>	<b>AÑO</b>	<b>MW</b>	<b>MVAR</b>
11-dic	2013	679,62	58,35
25-nov	2014	706,88	63,70
16-dic	2015	737,17	56,68
06-dic	2016	755,63	60,33
04-abr	2017	762,45	52,03
25-abr	2018	774,61	74,47
24-jul	2019	813,49	80,15
Pronóstico	2020	827,46	85,83
Pronóstico	2021	847,54	91,51
Pronóstico	2022	867,63	97,19

Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Histórico y pronóstico de la demanda en la red de distribución**



Fuente: elaboración propia.

### 3.2.2. **Distribución horaria actual de la demanda**

Un aspecto fundamental por saber en el análisis de la demanda es la forma de las curvas de demanda de la red por horario. En este sentido, la tabla III y las figuras 13, 14, 15 y 16 muestran la distribución agrupada de la demanda de los circuitos que pertenecen a cada uno de los tres departamentos de cobertura.

Se toman los datos del día de máxima demanda registrado por ser el día más crítico donde podemos observar el mayor creciente de potencia reactiva en la red de EEGSA. De acuerdo con el histórico de la tabla I, este día corresponde al 24 de julio de 2019. Con estas curvas se puede observar que la demanda activa y reactiva no es un valor constante durante el día, sino que varía con respecto a la hora. Por lo tanto, una compensación de capacitores estáticos no tendrá el mismo efecto durante todo el día.

**Tabla III. Distribución horaria de demanda por departamento en la red de distribución**

FECHA	HORA	GUATEMALA			ESCUINTLA			SACATEPÉQUEZ			EEGSA		
		MW	MVAR	f.p.	MW	MVAR	f.p.	MW	MVAR	f.p.	MW	MVAR	f.p.
24-jul	00:00	379,39	-48,55	0,9919	71,10	-2,95	0,9991	24,82	-2,55	0,9948	475,31	-54,07	0,9936
24-jul	01:00	348,67	-53,30	0,9885	67,89	-3,73	0,9985	22,86	-2,83	0,9924	439,42	-59,86	0,9908
24-jul	02:00	333,13	-57,37	0,9855	66,33	-4,35	0,9979	22,19	-2,90	0,9916	421,65	-64,62	0,9885
24-jul	03:00	328,97	-58,37	0,9846	65,67	-4,76	0,9974	21,87	-3,12	0,9900	416,51	-66,23	0,9876
24-jul	04:00	337,28	-58,95	0,9851	66,90	-4,69	0,9976	23,65	-2,61	0,9939	427,83	-66,25	0,9882
24-jul	05:00	395,85	-55,94	0,9902	69,33	-4,86	0,9976	26,45	-2,47	0,9957	491,63	-63,27	0,9918
24-jul	06:00	454,74	-43,84	0,9954	70,40	-3,14	0,9990	31,21	-3,66	0,9932	556,35	-50,64	0,9959
24-jul	07:00	489,57	-23,28	0,9989	75,62	-0,97	0,9999	34,13	-2,59	0,9971	599,32	-26,84	0,9990
24-jul	08:00	549,00	13,35	0,9997	82,80	3,92	0,9989	35,57	-0,47	0,9999	668,38	16,80	0,9997
24-jul	09:00	603,44	42,05	0,9976	89,75	7,22	0,9968	37,34	1,19	0,9995	730,53	50,47	0,9976
24-jul	10:00	626,71	56,02	0,9960	92,54	8,58	0,9957	38,62	2,32	0,9982	757,87	66,92	0,9961
24-jul	11:00	642,25	64,39	0,9950	95,50	11,25	0,9931	39,96	3,04	0,9971	777,70	78,66	0,9949
24-jul	12:00	652,20	66,56	0,9948	95,63	10,55	0,9940	40,43	3,04	0,9972	788,25	80,15	0,9949
24-jul	13:00	641,68	56,66	0,9961	91,91	9,50	0,9947	38,68	1,90	0,9988	772,27	68,07	0,9961
24-jul	14:00	634,68	54,06	0,9964	91,56	9,06	0,9951	38,71	1,88	0,9988	764,95	64,99	0,9964
24-jul	15:00	643,75	59,70	0,9957	91,53	9,44	0,9947	38,63	1,81	0,9989	773,91	70,95	0,9958
24-jul	16:00	629,34	55,37	0,9962	90,50	7,09	0,9969	38,72	1,72	0,9990	758,56	64,18	0,9964
24-jul	17:00	604,69	39,92	0,9978	89,74	5,09	0,9984	39,42	0,93	0,9997	733,83	45,93	0,9980
24-jul	18:00	597,94	14,11	0,9997	90,05	2,65	0,9996	41,33	0,11	1,0000	729,32	16,86	0,9997
24-jul	19:00	664,97	0,06	1,0000	99,41	1,63	0,9999	49,10	1,81	0,9993	813,49	3,52	1,0000
24-jul	20:00	650,65	-7,09	0,9999	98,40	1,61	0,9999	47,29	0,75	0,9999	796,34	-4,72	1,0000
24-jul	21:00	603,75	-17,55	0,9996	93,92	0,58	1,0000	43,98	0,19	1,0000	741,66	-16,78	0,9997
24-jul	22:00	535,94	-29,26	0,9985	85,41	-1,30	0,9999	37,86	-0,81	0,9998	659,21	-31,37	0,9989
24-jul	23:00	448,55	-39,16	0,9962	75,45	-2,74	0,9993	30,31	-1,80	0,9982	554,32	-43,70	0,9969

Fuente: elaboración propia.

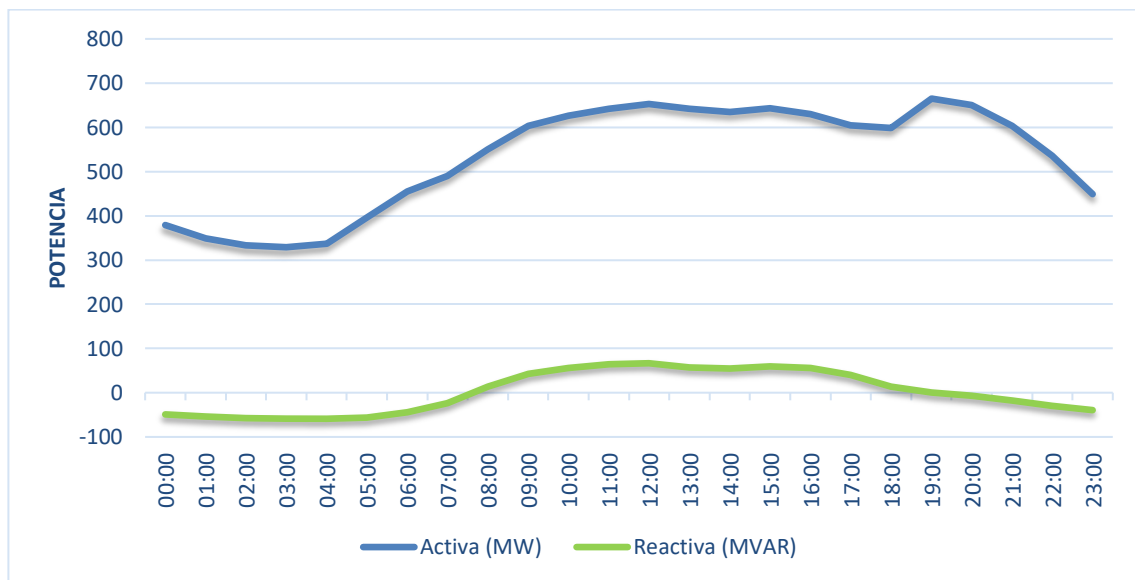


Tabla IV. **Factor de carga y pérdida de los circuitos agrupados por departamento**

Departamento	F. Carga	F. Pérdida
Sacatepéquez	72 %	57,3 %
Escuintla	84 %	74,8 %
Guatemala	80 %	69,1 %
EEGSA	80 %	69,0 %

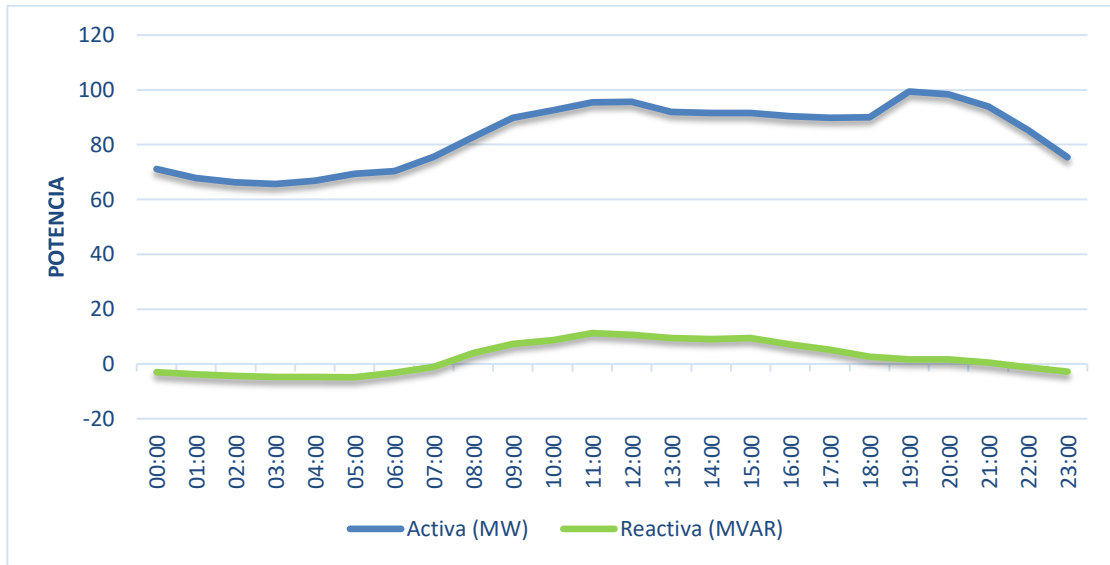
Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Curva de demanda del departamento de Guatemala**



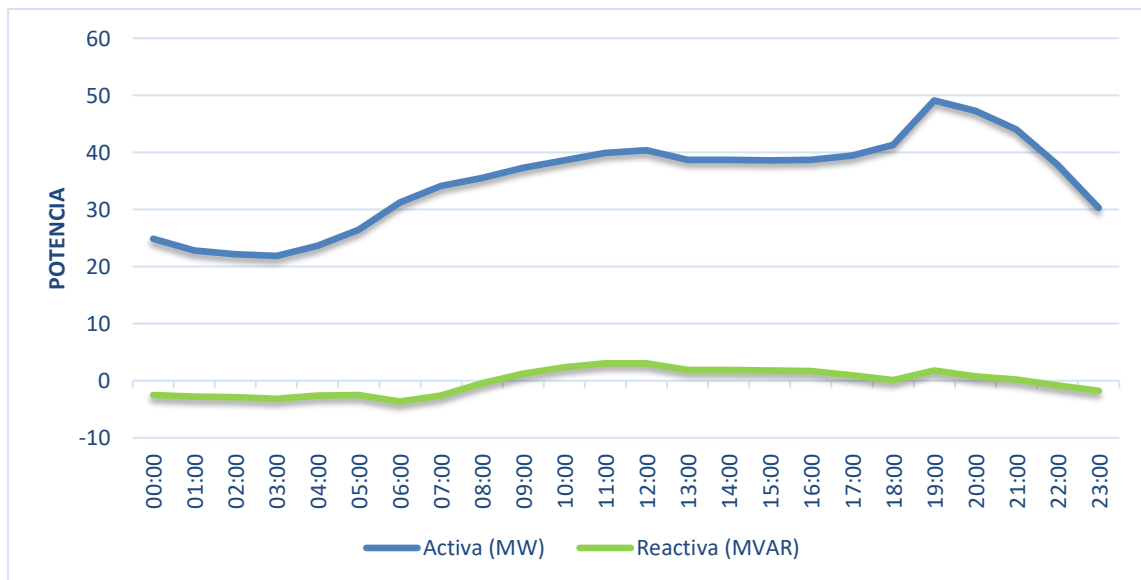
Fuente: elaboración propia.

Figura 14. Curva de demanda del departamento de Escuintla



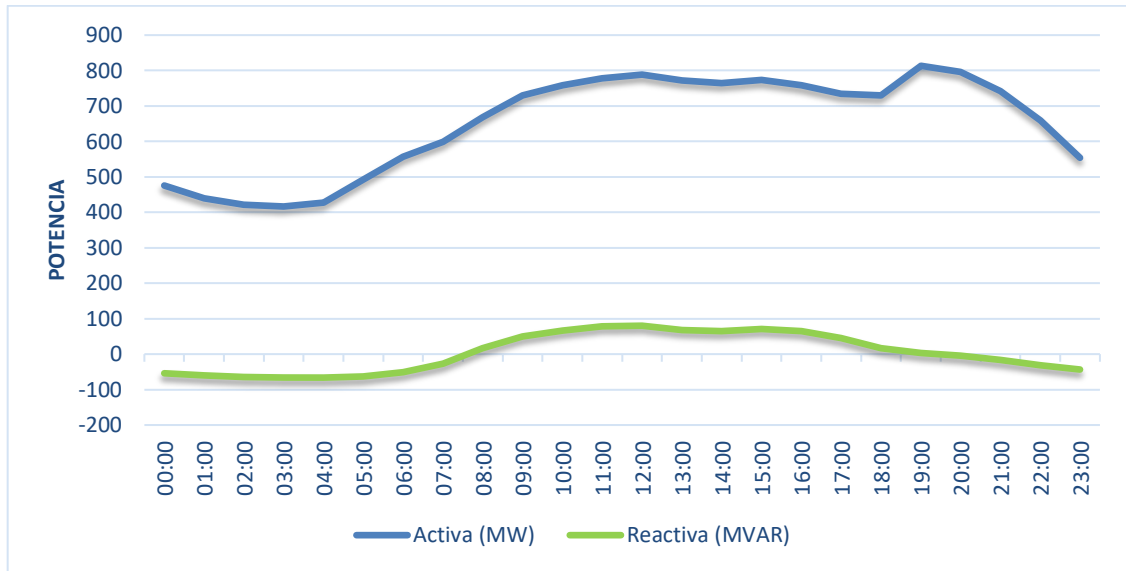
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Curva de demanda del departamento de Sacatepéquez



Fuente: elaboración propia.

Figura 16. Curva de demanda de EEGSA

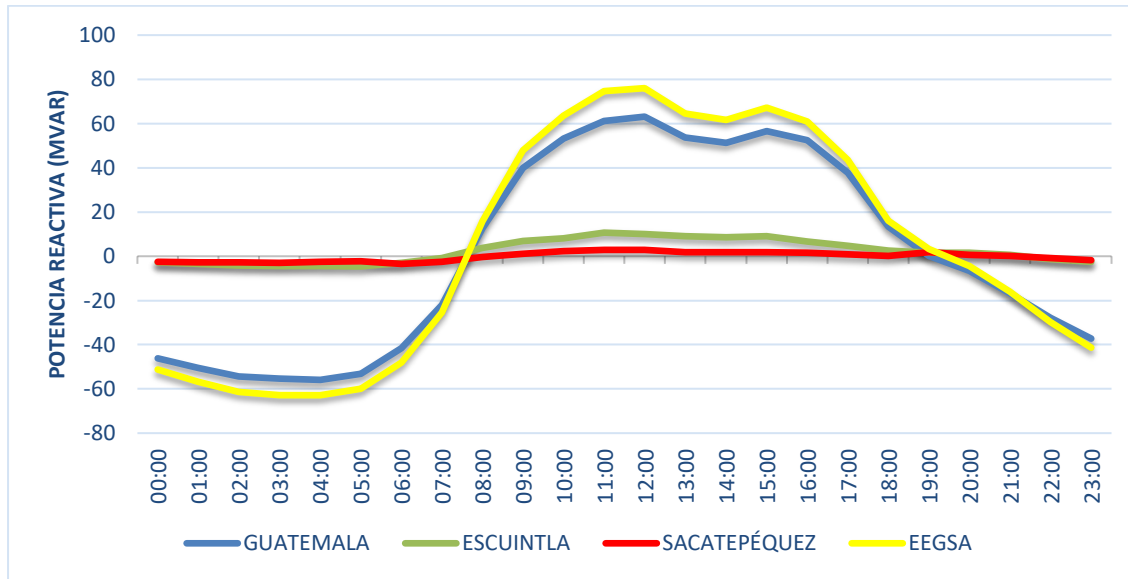


Fuente: elaboración propia.

El análisis de las curvas permite observar que para el caso del departamento de Sacatepéquez el valor máximo es a las 19:00 horas, lo cual indica la fuerte participación de la carga residencial y de alumbrado, con un factor de carga de 0,72 en el área.

En el caso de los departamentos de Escuintla y Guatemala, además del pico presentado en horas de demanda máxima, se presenta un valor alto en horas de demanda media, lo cual indica la alta participación de consumo comercial e industrial, lo cual es natural y contribuye a tener un factor de carga de 0,84 y 0,80 respectivamente.

Figura 17. **Curva de demanda reactiva de EEGSA**

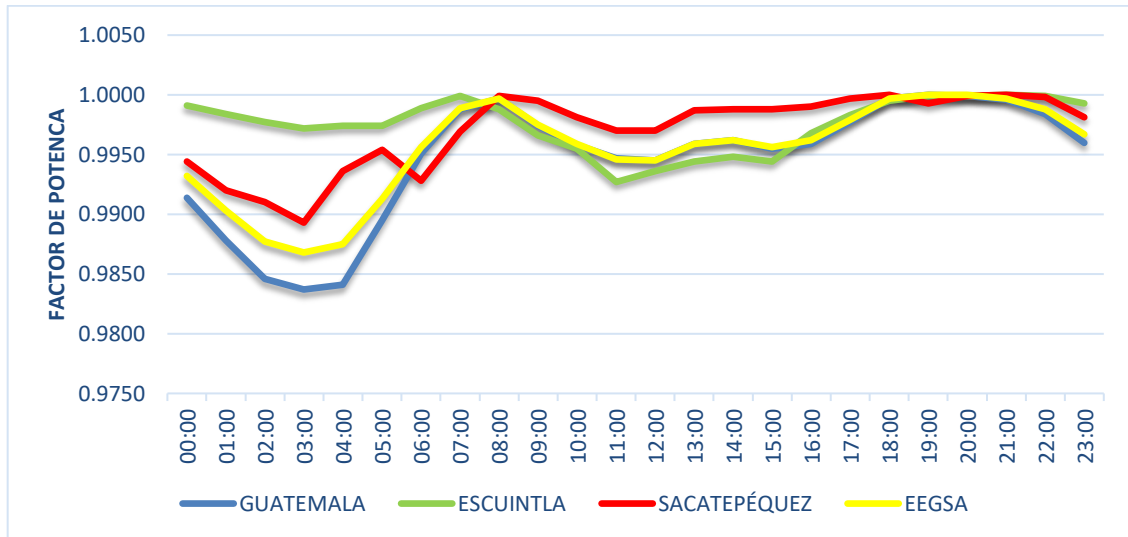


Fuente: elaboración propia.

En la figura 17 se observa que la curva de EEGSA es similar a la curva del departamento de Guatemala, indicando que la demanda de EEGSA se compone principalmente del departamento de Guatemala, ambos con un factor de carga de 0,80.

Enfocándose en las curvas anteriormente mencionadas, se puede observar que dentro del horario de 08:00 a 19:00 horas existe una alta demanda de potencia reactiva y dentro del horario de 19:00 a 08:00 horas existe un retorno de potencia de similar magnitud a la demanda. Esto coincide con los horarios laborales de los usuarios con carga de tipo comercial o industrial. En las horas fuera de producción se obtiene un retorno de potencia debido a los capacitores fijos instalados en la red, los cuales se utilizan para disminuir la demanda de potencia reactiva en horas de producción.

Figura 18. Curva de factor de potencia de EEGSA



Fuente: elaboración propia.

En el caso del departamento de Guatemala, Escuintla y la red de EEGSA, el factor de potencia tiene su disminución más pronunciada en las horas de la madrugada, coincidiendo con las horas donde se registra un retorno excesivo de potencia reactiva en la red.

Con lo establecido en la sección 1.2 se puede determinar que EEGSA no tendrá penalizaciones económicas por parte de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica al tener el factor de potencia dentro de las tolerancias establecidas, pero si implica pérdidas económicas debido a que al tener mayor demanda reactiva aumenta las pérdidas por efecto joule.

### 3.3. Circuitos de análisis

Para el presente estudio se analizarán dos circuitos que pertenecen a la red de EEGSA, los cuales se encuentran entre los 20 circuitos con mayor demanda de potencia reactiva. Con el fin de ampliar el análisis de compensación automatizada en la red, se eligen los circuitos de mayor demanda reactiva con distinto tipo de carga, uno donde predomina la carga de tipo industrial y otro circuito con carga de tipo comercial - residencial.

Tabla V. **Circuitos con mayor demanda reactiva**

No.	Circuito	MW	MVAR	TIPO CARGA
1	160	8,44	4,17	Industrial
2	189	9,31	3,83	Industrial
3	509	5,80	2,59	Circuito exclusivo
4	159	7,84	2,06	Industrial
5	191	8,19	2,00	Industrial
6	115	10,15	1,88	Industrial
7	61	12,06	1,76	Industrial
8	198	5,14	1,69	Industrial
9	118	10,76	1,58	Industrial
10	120	8,90	1,56	Industrial
11	188	8,86	1,40	Industrial
12	23	4,89	1,23	Industrial
13	255	9,00	1,23	Industrial
14	193	6,89	1,08	Industrial
15	101	8,15	1,03	Industrial
16	246	4,50	0,99	Comercial
17	123	7,83	0,98	Industrial
18	145	4,01	0,98	Comercial
19	98	8,11	0,96	Comercial
20	95	4,79	0,92	Industrial

Fuente: elaboración propia.

### 3.4. Sector industrial de análisis

Para el análisis del sector industrial se ha tomada el circuito 160, el cual le suministra energía eléctrica a más de 4 215 usuarios ubicados principalmente en la zona 4 del municipio de Villa Nueva, Guatemala. Está compuesta por aproximadamente 309 unidades de transformación, 651 luminarias, así como 31 grandes usuarios.

Figura 19. Circuito 160 de subestación Bárcenas



Fuente: SIGRE. *Circuito 160*. Consulta: noviembre de 2019.

### 3.4.1. Capacidad del circuito 160

El circuito es alimentado por la subestación Bárcenas, este cuenta con un transformador de potencia con capacidad de 15/28 MVA, el cual alimenta un total de 4 circuitos de distribución, y se conforma por aproximadamente 25,6 kilómetros de línea, en la red primaria y 25,4 kilómetros de línea, en la red secundaria.

Tabla VI. **Conductor primario del circuito 160**

<b>CALIBRE FASE</b>	<b>TIPO</b>	<b>NEUTRO</b>	<b>CAPACIDAD (MVA)</b>	<b>LONGITUD (M)</b>
556,5	AAC	1/0 ACSR	14,30	479,81
447,0	ACSR	4/0 ACSR	13,39	1 027,69
336,4	AAC	1/0 ACSR	10,42	2 831,48
4/0	AAC	1/0 ACSR	7,78	1 367,84
1/0	AL URD (Sub.)	1/0 ACSR	3,15	2 208,30
1/0	ACSR	1/0 ACSR	1,57	9 533,28
2	ACSR	2 ACSR	1,19	8 177,42

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Conductor secundario del circuito 160**

<b>Aéreo (M)</b>		<b>Subterráneo (M)</b>	<b>Total</b>
<b>Abierto</b>	<b>Entorchado</b>		
8 873,64	13 842,58	2 719,73	25 435,95

Fuente: elaboración propia.



La tabla VI detalla los diferentes conductores que conforma la red primaria junto con sus capacidades, EEGSA impone la política de utilizar solamente el 85 % de la capacidad que indica el fabricante en caso de una contingencia y evitar pérdidas, este porcentaje ya es tomado en cuenta en la tabla VI. Los ramales principales del circuito utilizan conductores de calibre AAC 336,4 MCM para arriba, lo que indica que el circuito principal tiene una capacidad máxima de 10,42 MVA.

La subestación Bárcenas utiliza reguladores de voltaje en la salida de los circuitos para mantener un voltaje estable, estos tienen una capacidad de 8,77 MVA, siendo este valor menor que la capacidad del conductor principal AAC 336,4 MCM, se determina que la capacidad máxima lo impone los reguladores.

Tabla VIII. **Demanda del circuito 160 y subestación Bárcenas**

ELEMENTO	CAPACIDAD (MVA)	DEMANDA MÁXIMA			F.P.	% de Carga
		MVA	MW	MVAR		
Transformador Bárcenas	15/28	27,45	26,52	7,07	0,966	98,02 %
Circuito 160	8,77	9,41	8,44	4,17	0,897	107,34 %

Fuente: elaboración propia.

En la tabla VIII se observa que el circuito 160 sobrepasa su capacidad por un 7,34 % y el transformador de la subestación Bárcenas llegando al 100 % de su capacidad, esta condición no es favorable debido a que disminuye la vida útil de los equipos y aumenta las pérdidas.

### **3.4.2. Características de carga del circuito 160**

Un sector industrial se define como un área donde la mayoría de los usuarios se categorizan como grandes usuarios de tipo industria, debido a que poseen una alta demanda de energía. La mayoría de estos grandes usuarios utilizan equipos que demandan cantidades grandes de potencia reactiva en sus procesos de manufacturación, principalmente lo que son motores y hornos eléctricos.

El circuito 160 ubicado principalmente entre el kilómetro 17 y 19 de la carretera al Pacífico, el cual está conformado por un conjunto de distintas industrias, dentro de los cuales se puede mencionar la compañía farmacéutica Unipharm, S.A., la distribuidora de alimentos Anisa, S.A., la proveedora de gas Zeta Gas, S.A., en la tabla IX se detalla a los 31 grandes usuarios del circuito.

Tabla IX. **Grandes usuarios del circuito 160**

#	GRANDES USUARIOS
1	Molsa Guatemala, S.A.
2	Inversiones Cinematográficas de Guatemala, S.A.
3	Pollo Campero, S.A.
4	Franquicasa, S.A.
5	Operadora de Tiendas, S.A.
6	Unex, S.A.
7	Distribuidora de Alimentos Anisa, S.A.
8	Pharmplast, S.A.
9	Unipharm, S.A.
10	Platiproducos Emlor, S.A.
11	Inversiones Grupo Los Caños, S.A.
12	J.H. Trading, S.A.
13	Inmobiliaria Santa Lugarda, S.A.
14	Construplaza, S.A.
15	Cartones de Villa Nueva, S.A.
16	Mega Servises and Logistics, S.A.
17	Induplastic, S.A.
18	Inmobiliaria Doña Clara, S.A.
19	Industria de Hamburguesas S.A.
20	Los Alpes, S.A.
21	Incopa, S.A.
22	Zeta Gas, S.A.
23	World Serigrafia, S.A.
24	Juan Niemann & Cia. Ltda.
25	Multiblocks, S.A.
26	Renta Thermo, S.A.
27	Grupo Jeriel, S.A.
28	Hashim & Aparicio Fund. Ind. S.A.
29	Zeta Gas, S.A.
30	Centro Comercial Santa Clara
31	Polimeros y Fibras de Centro America, S.A

Fuente: elaboración propia.

Además de los grandes usuarios de la tabla IX, el circuito 160 les proporciona energía a las colonias y residenciales detallados en la tabla X. Estos conforman un pequeño porcentaje de la demanda total del circuito.

Tabla X. **Sectores de vivienda del circuito 160**

<b>TIPO</b>	<b>NOMBRE</b>
Colonia	Granjas Italia
Colonia	Jardines de Seina
Colonia	Jardines de Tivoli
Colonia	Jardines de Verona
Colonia	Linda Vista
Colonia	Modelo I
Colonia	Modelo II
Colonia	Santa Isabel I
Colonia	Santa Isabel II
Colonia	Santa Monica
Colonia	Vista al Valle
Colonia	Vista Bella I
Colonia	Vista Bella II
Comunidad	Bárcenas
Condominio	Altos de Sonora
Condominio	Altos de Verona
Residenciales	Campo Bello
Residenciales	Prados de Sonora
Residenciales	Valles de Sonora I
Residenciales	Valles de Sonora II
Residenciales	Valles de Sonora III
Residenciales	Valles de Sonora IV
Residenciales	Villa Ofelia
Residenciales	Vistas de la Colina

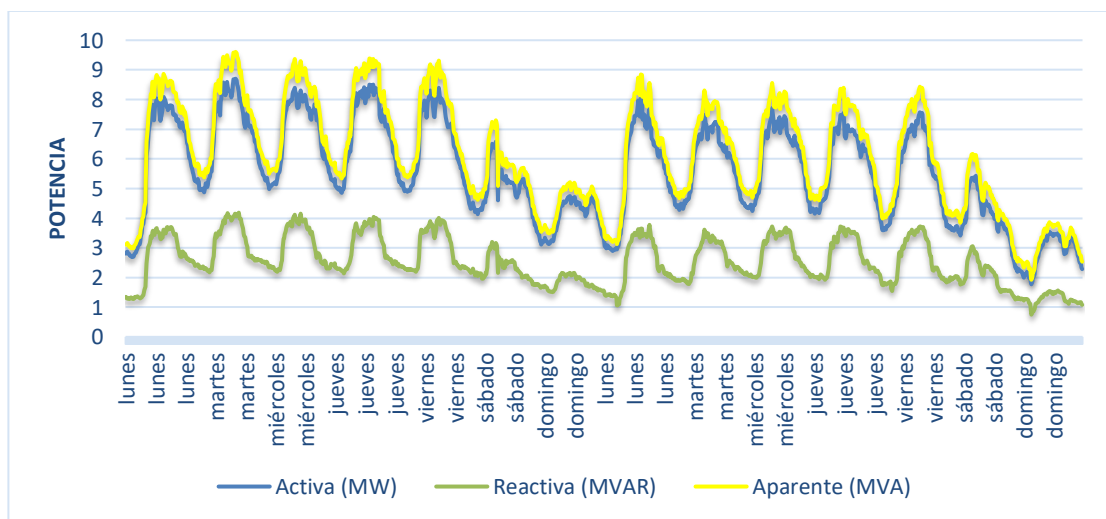
Fuente: elaboración propia.

### 3.4.3. Tendencia de la demanda de potencia del circuito 160

Para observar cómo se comporta la demanda del circuito 160 durante la semana y fin de semana se obtienen las mediciones de potencia en la salida del circuito en la subestación Bárcenas. Se toma una muestra de 15 días comprendidas entre el lunes 11 al domingo 24 de noviembre del 2019 con el fin de analizar el comportamiento actual del circuito.

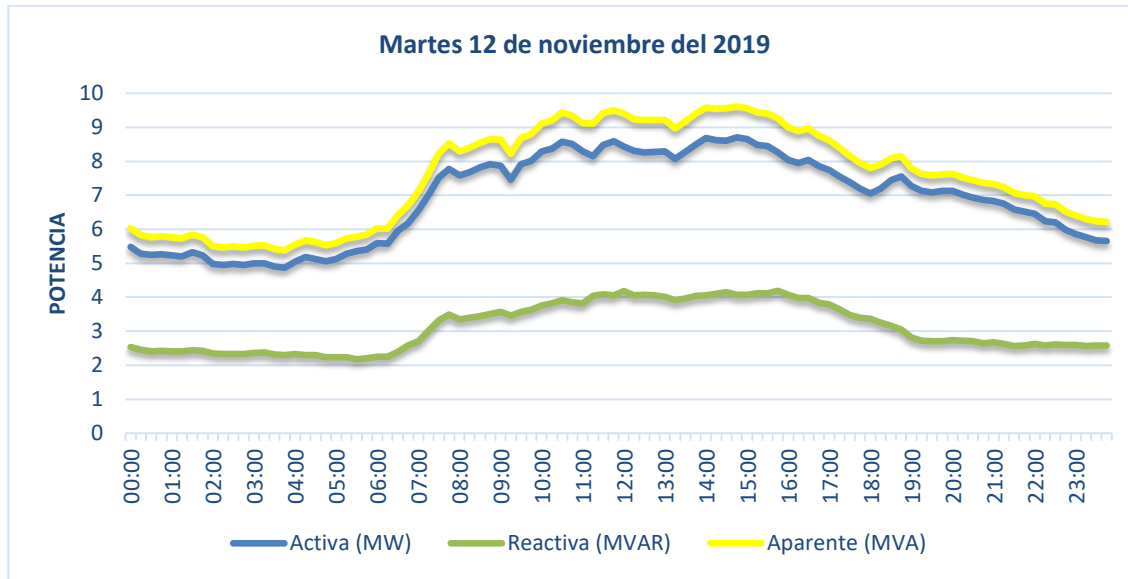
En la gráfica de la figura 20 se muestra la curva de demanda de potencia del circuito 160 en un periodo de dos semanas, en donde se puede observar una demanda no uniforme. De lunes a viernes existe un comportamiento repetitivo, el cual presenta un aumento de demanda durante el horario laboral y una disminución al finalizar el día, mientras que los fines de semana presentan su propia tendencia de menor demanda los cuales se pueden observar más a detalle en las figuras 21, 22 y 23.

Figura 20. Curva de demanda quincenal del circuito 160



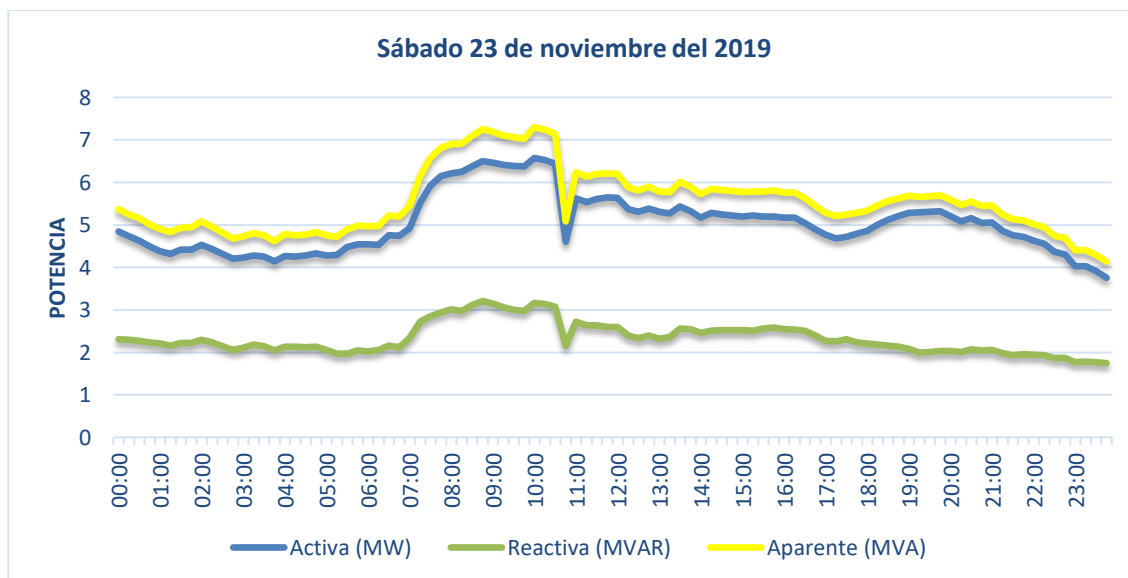
Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Curva de demanda entre semana del circuito 160**



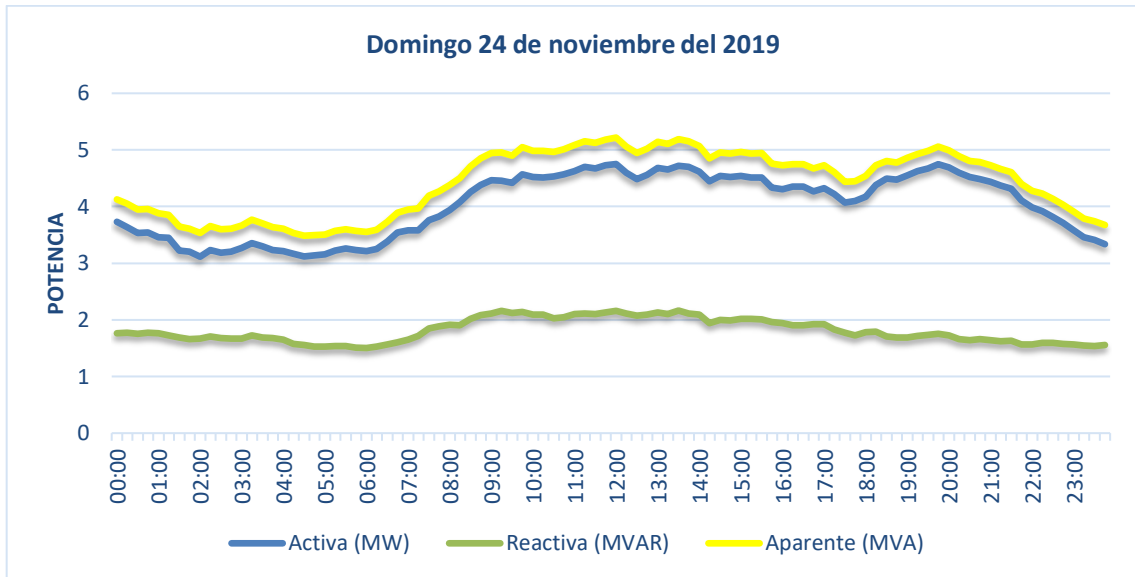
Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Curva de demanda sábado del circuito 160**



Fuente: elaboración propia.

Figura 23. Curva de demanda domingo del circuito 160



Fuente: elaboración propia.

En la figura 21 se observa que entre las 00:00 y 06:00 horas se mantiene una demanda semi-estable, a partir de las 06:15 horas comienza el aumento de demanda llegando a su máximo valor a las 15:00 horas, donde ya comienza su disminución hasta las 23:45.

En la figura 22 se observa una tendencia variable en comparación a un día entre semana, notando un aumento de demanda entre las 06:45 y 10:45 horas, coincidiendo con el horario laboral de mediodía del sábado.

Mientras que en la figura 23 solamente existe una disminución de demanda entre las 02:00 y 06:00 horas, lo cual se asemeja a una curva típica de carga tipo residencial.

### 3.5. Sector residencial y comercial de análisis

Para el análisis del sector residencial y comercial se ha tomada el circuito 246, el cual le suministra energía eléctrica a más de 2 469 usuarios ubicados en la zona 4 del municipio de Mixco, Guatemala. Está compuesta por aproximadamente 317 unidades de transformación, 562 luminarias, así como 18 grandes usuarios.

Figura 24. Circuito 246 de Subestación Naranja



Fuente: SIGRE. *Circuito 246*. Consulta: noviembre de 2019.



### 3.5.1. Capacidad del circuito 246

El circuito es alimentado por la subestación Naranja, este cuenta con un transformador de potencia con capacidad de 10/14 MVA, el cual alimenta un total de 2 circuitos de distribución, y se conforma por aproximadamente 28,8 kilómetros de línea, en la red primaria y 28,6 kilómetros de línea, en la red secundaria.

Tabla XI. **Conductor primario del circuito 246**

<b>CALIBRE FASE</b>	<b>TIPO</b>	<b>NEUTRO</b>	<b>CAPACIDAD (MVA)</b>	<b>LONGITUD (M)</b>
556,5	AAC	4/0 ACSR	14,30	5 341,2
336,4	AAC	1/0 ACSR	10,42	1 365,19
4/0	AAC	1/0 ACSR	7,78	961,72
1/0	AL URD (Sub.)	1/0 ACSR	3,15	16 240,67
1/0	ACSR	1/0 ACSR	1,57	4 969,73

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Conductor secundario del circuito 246**

<b>Aéreo (M)</b>		<b>Subterráneo (M)</b>	<b>Total</b>
<b>Abierto</b>	<b>Entorchado</b>		
44,6	10 962,4	17 651,4	28 658,5

Fuente: elaboración propia.

El circuito 246 les suministra energía a sectores residenciales, la mayoría del conductor que conforma el circuito es de tipo subterránea, al igual que la red secundaria. Pero los ramales principales del circuito siempre utilizan conductor aéreo de calibre AAC 336,4 MCM y AAC 556,5 MCM.

La subestación Naranja, al igual que la subestación Bárcenas, utiliza reguladores de voltaje en la salida de los circuitos, con la misma capacidad de los reguladores mencionados en la sección 2.3.1., de 8,77 MVA.

Tabla XIII. **Demanda del circuito 246 y subestación Naranja**

ELEMENTO	CAPACIDAD (MVA)	DEMANDA MÁXIMA			F.P.	% de Carga
		MVA	MW	MVAR		
Transformador Naranja	10/14	8,20	8,15	0,90	0,994	58,59 %
Circuito 246	8,77	4,61	4,50	0,99	0,977	52,56 %

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XIII se observa que el circuito 246 y el transformador de la subestación Naranja utilizan aproximadamente el 53 % y 60 % respectivamente de su capacidad, lo cual da lugar para el crecimiento de la red y potencia garantizada de respaldo en caso de contingencias en la red.

### 3.5.2. Características de carga del circuito 246

Un sector residencial y comercial se define como un área donde la mayoría de los usuarios se categorizan como viviendas y pequeños comercios. La mayoría de estos usuarios tienen una pequeña demanda de potencia en comparación a las industrias.

El circuito 246 abarca Condado Naranja y Centro Comercial Naranja Mall, los cuales están conformados de condominios y pequeños comercios; por ejemplo: Dunkin' Donuts, McDonald's y Pollo Campero. En la tabla XIV se detallan los grandes usuarios de tipo comercial y en la tabla XV se detalla las colonias y condominios del circuito.

Tabla XIV. **Grandes usuarios del circuito 246**

#	GRANDES USUARIOS
1	Franquicasa, S.A.
2	Servicios de Ti, S.A.
3	Operadora de Tiendas, S.A.
4	Pollo Campero, S.A.
5	Shore To Shore Cia. Ltda.
6	Codimobil, S.A.
7	Corporacion Anayet, S.A.
8	Administradora Plaza Kalu, S.A.
9	Inmobiliaria Costa Messa, S.A.
10	Industria de Hamburguesas, S.A.
11	Administradora de Crece, S.A.
12	Cantata, S.A.
13	Interdonas de Guatemala, S.A.
14	Asoc. Cong. Hnitas Ancianas Desamparadas
15	Centrotro Agustino Para la Formación
16	Multividrios, S.A.
17	Rio Azul, S.A.
18	La Paneria, S.A.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Sectores de vivienda del circuito 246**

TIPO	NOMBRE
Colonia	El Milagro
Colonia	El Naranjo
Colonia	Jardines de Tulam Zu
Condado	Naranjo
Condominio	El Pedregal
Condominio	San Agustin
Condominio	San Basilio
Condominio	San Daniel
Condominio	San Esteban
Condominio	San Fermin
Condominio	Santa Cristina
Finca	El Naranjo
Zona	4 de Mixco

Fuente: elaboración propia.

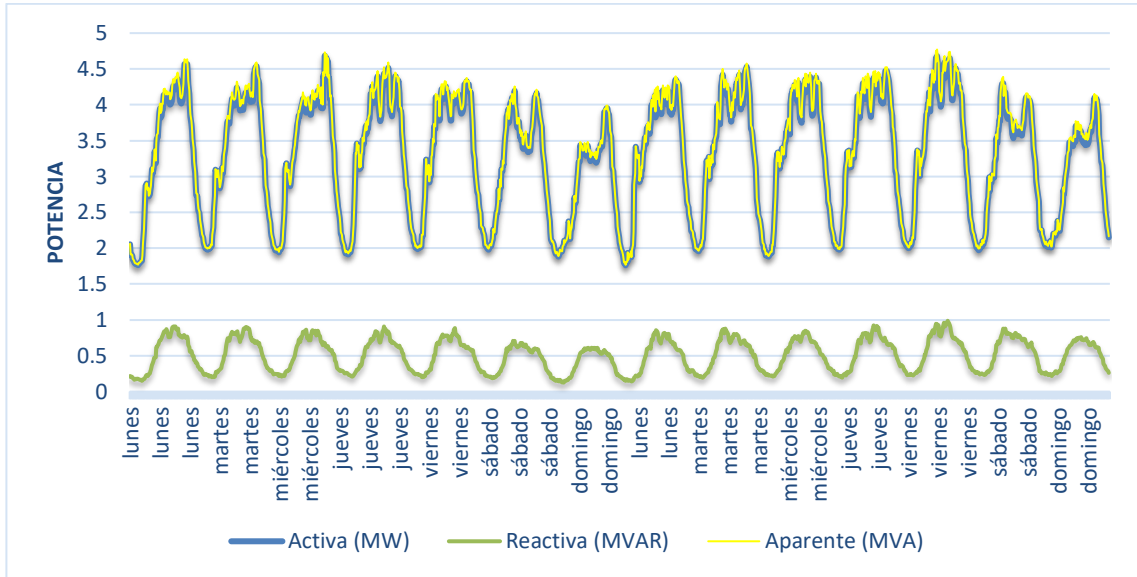
### **3.5.3. Tendencia de la demanda de potencia del circuito 246**

Para observar cómo se comporta la demanda del circuito 246 durante la semana y fin de semana se obtienen las mediciones de potencia en la salida del circuito en la subestación Naranjo. Se toma una muestra de 15 días comprendidas entre el lunes 11 al domingo 24 de noviembre del 2019 con el fin de analizar el comportamiento actual del circuito.

En la gráfica de la figura 25 se muestra la curva de demanda de potencia del circuito 246 en un periodo de dos semanas, se puede observar un comportamiento similar todos los días de la semana, enfatizando que la demanda máxima es menor los fines de semana.

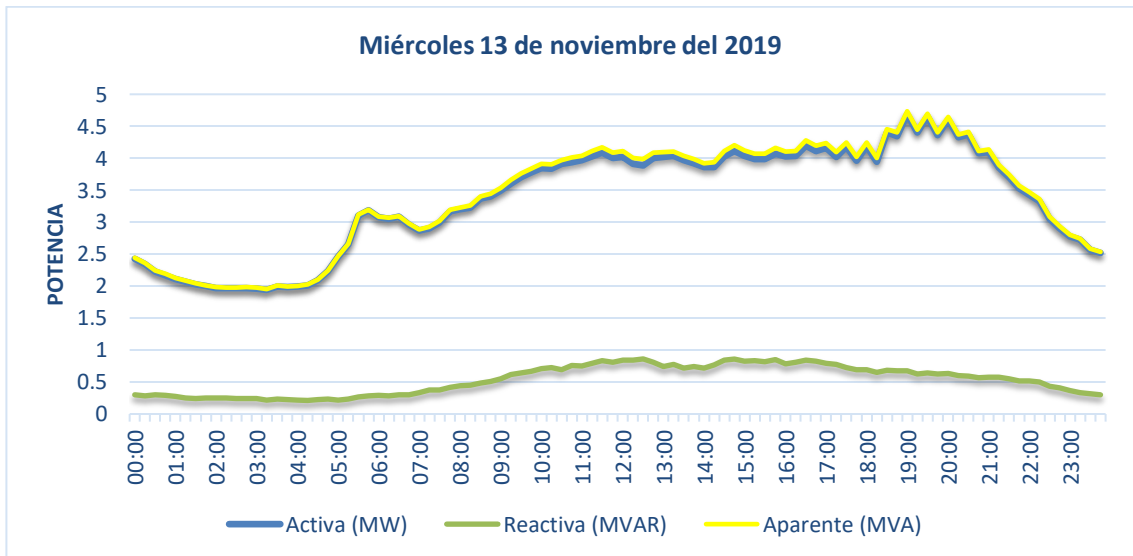
En el circuito 246 la potencia aparente y activa poseen un desfase casi nulo debido a que la potencia reactiva no es de gran valor a diferencia del desfase apreciable en el circuito 160 (ver figura 20). En las figuras 26, 27 y 28 se analizará detalladamente las curvas diarias entre semana y fin de semana.

Figura 25. **Curva de demanda quincenal del circuito 246**



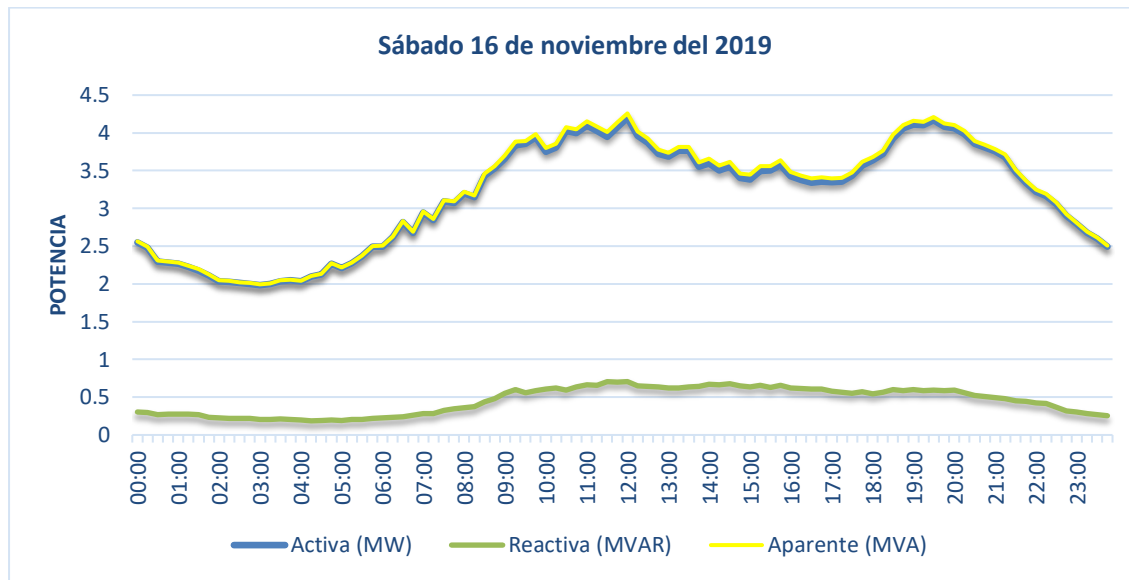
Fuente: elaboración propia

Figura 26. **Curva de demanda entre semana del circuito 246**



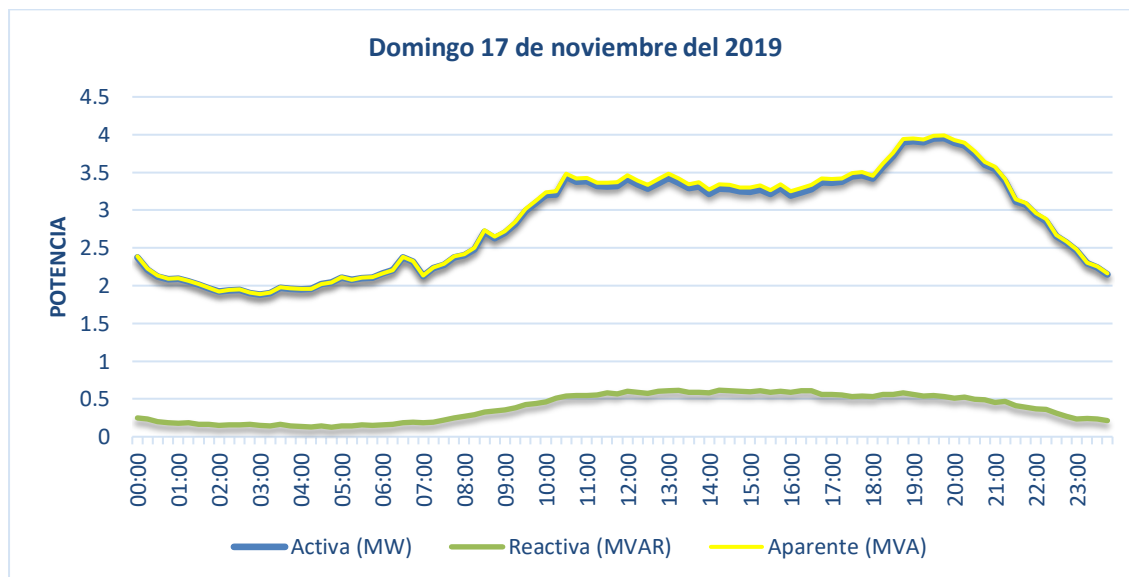
Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Curva de demanda sábado del circuito 246**



Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Curva de demanda domingo del circuito 246**



Fuente: elaboración propia.

Se observa que las curvas de potencia activa y reactiva poseen un comportamiento diferente. En la figura 26 se observa que con la potencia activa entre las 23:00 y 05:00 horas existe una demanda menor y el resto del día se tiene una demanda mayor pero no uniforme, esto debido a que los comercios permanecen cerrados y las viviendas no consumen energía en la madrugada. La potencia reactiva presenta una demanda uniforme con un aumento de demanda entre las 07:00 y 23:30 horas.

En las figuras 27 y 28 se observa una tendencia similar de potencia activa a un día entre semana, con excepción que los días sábados se presenta un valle de demanda entre las 13:00 y 18:00 horas y los días domingo un pico de demanda entre las 18:30 y 21:30 horas. Mientras que las curvas de potencia reactiva en fin de semana solo difieren en magnitud con los días entre semana.





## **4. COMPENSACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE POTENCIA REACTIVA**

### **4.1. Automatización por medio de controladores inteligentes**

Cada banco de capacitores automatizado cuenta con un controlador inteligente basado en microprocesadores, como se estableció en el capítulo 1, este dispositivo permite establecer condiciones específicas para el accionamiento del equipo por medio de algoritmos establecidos a través de software.

Un algoritmo es una serie de pasos que ayuda alcanzar una meta. El objetivo de los siguientes algoritmos es reducir la potencia reactiva en circuitos de demanda no uniforme utilizando combinaciones de capacitores en la red de distribución.

El controlador estará monitoreando continuamente el voltaje, corriente y factor de potencia, con los cuales se pueden utilizar para obtener la potencia reactiva en tiempo real. El valor de la potencia reactiva será el que decidirá el accionamiento de los interruptores para la compensación en la red de distribución.

En los dos circuitos se hace un análisis de compensación donde no se toma en cuenta el recurso de automatizar los bancos de capacitores, esto para poder realizar una comparación entre la compensación reactiva estática y la automatizada.

## **4.2. Selección de capacitores**

La selección de los bancos de capacitores a utilizar en cada circuito se hace por medio del módulo Ubicación Óptimo de Capacitores en el programa Neplan. El propósito de este módulo es identificar ubicaciones claves en los alimentadores primarios radiales de una red de distribución, donde la colocación de banco de capacitores minimiza las pérdidas de MW.

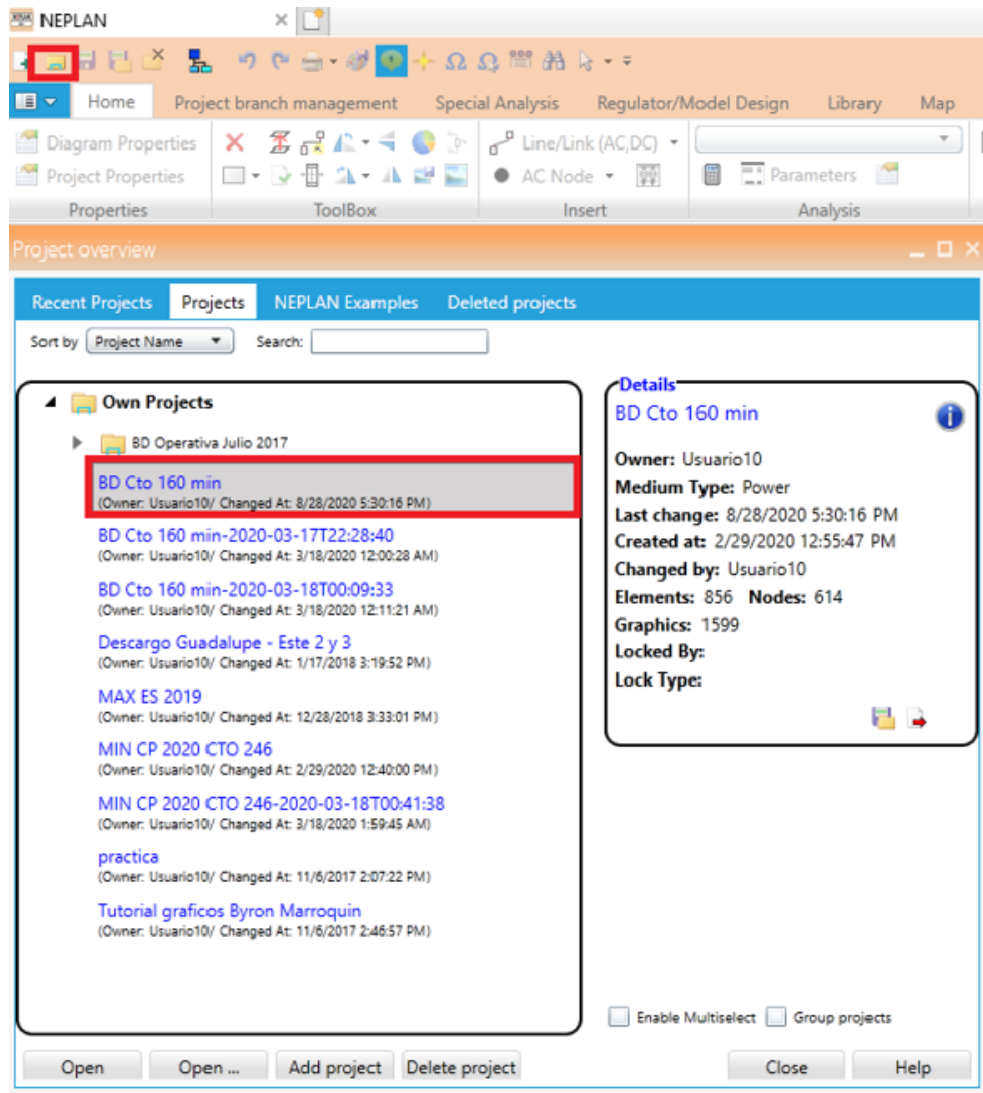
Para la instalación de cada banco de capacitores debe considerar lo siguiente:

- El nodo del alimentador seleccionado donde debe ubicarse cada capacitor.
- El tamaño de cada capacitor en MVAR.

### **4.2.1. Proceso de evaluación con Neplan**

Para la utilización del módulo de Ubicación Óptimo de Capacitores se debe cargar el proyecto que contiene los datos del circuito a evaluar; el alimentador, nodos, cargas, líneas de distribución y perfiles de carga.

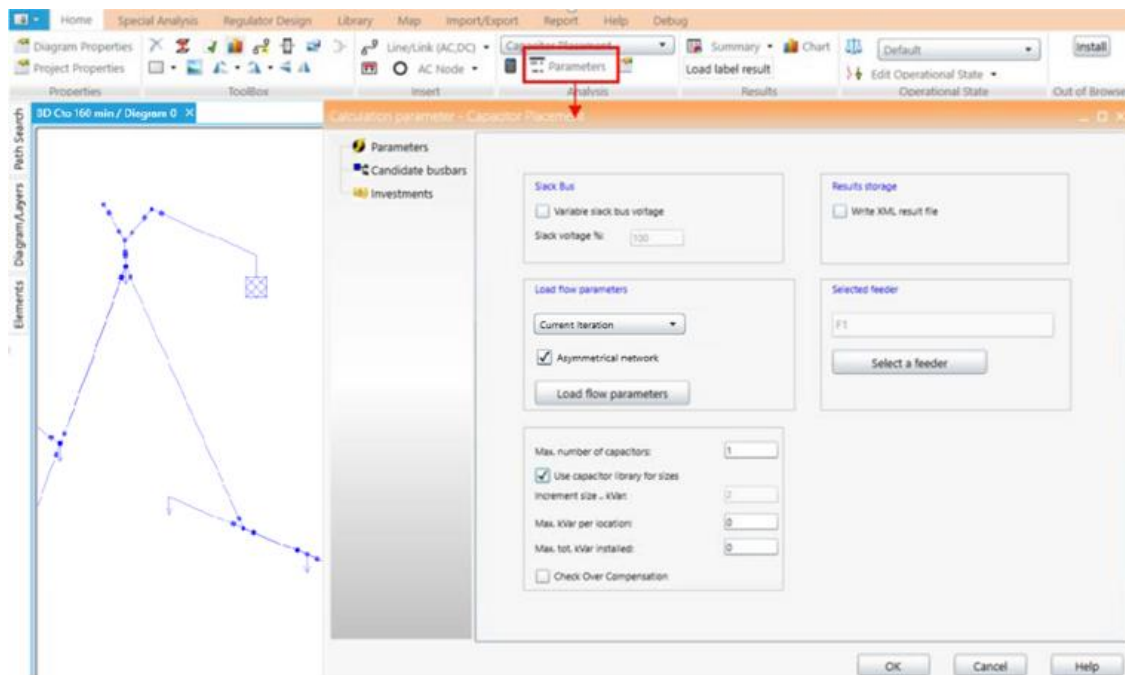
Figura 29. Carga de proyecto



Fuente: NEPLAN. Carga de circuito. Consulta: 10 de agosto de 2020.

Al tener cargado el proyecto, se debe configurar los parámetros para la simulación de ubicación de capacitores. Dentro de estos parámetros se puede definir si el sistema es asimétrico, el número máximo de capacitores, kVAR máximo por capacitor, kVAR máximo instalado en el circuito, entre otros.

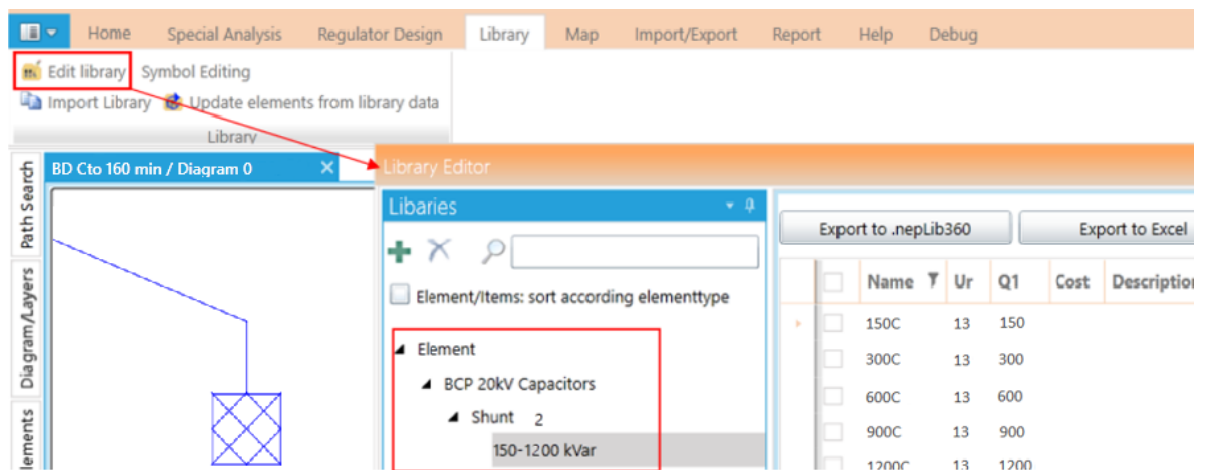
Figura 30. **Parámetros de evaluación**



Fuente: NEPLAN. *Parámetros de simulación*. Consulta: 10 de agosto de 2020.

Dentro de los parámetros existe la opción de seleccionar el tamaño de capacitores desde una librería importada, si el voltaje nominal de los capacitores de la librería no es el mismo voltaje nominal de los nodos, Neplan no seleccionará los capacitores de la librería.

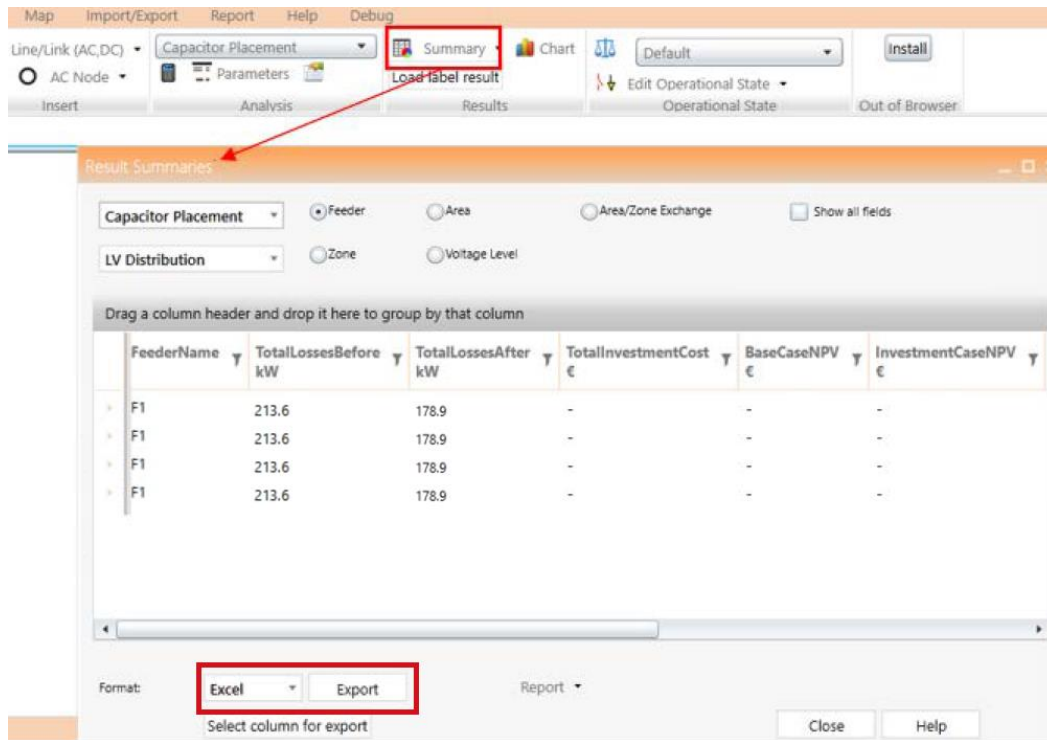
Figura 31. **Librería de capacitores**



Fuente: NEPLAN. *Librería de capacitores*. Consulta: 10 de agosto de 2020.

Al oprimir la opción de calcular se comienza a correr la optimización, al finalizar se pueden visualizar los resultados de los cálculos al elegir la opción de resumen. El resumen muestra la cantidad de bancos que se sugiere utilizar, el tamaño de los capacitores y los nodos que se deben conectar. Esta información se puede exportar en formato Excel.

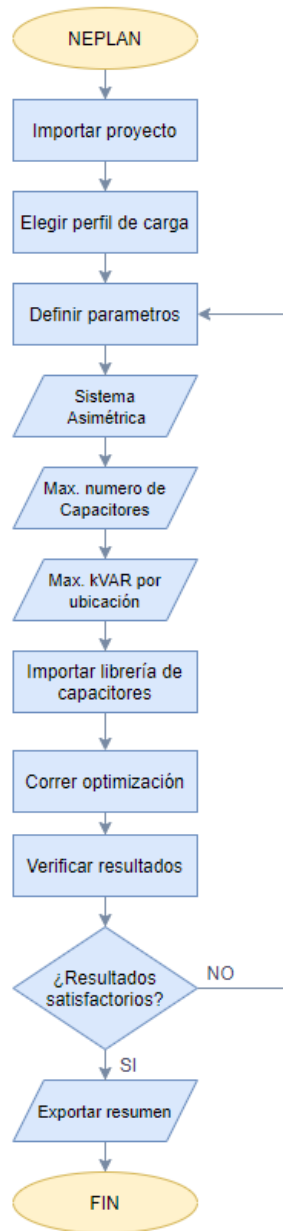
Figura 32. Resumen de optimización



Fuente: NEPLAN. *Resumen de optimización*. Consulta: 10 de agosto de 2020.

En la figura 33 se presenta un flujograma que representa los pasos a seguir para evaluar la selección de capacitores óptimos en un circuito de distribución.

Figura 33. Diagrama de flujo selección de capacitores



Fuente: elaboración propia, empleando Draw.io.

#### 4.2.2. Bancos de capacitores del circuito 160

Para establecer los puntos donde se instalarán los bancos de capacitores en el circuito 160 corre el módulo Ubicación Óptimo de Capacitores en Neplan. Se importa la base de datos del circuito y para el perfil de carga se elige la demanda máxima. Los parámetros seleccionados son:

- Sistema asimétrico
- Sin límite de número de capacitores
- Límite de 1 200 kVAR por ubicación

El límite de 1 200 kVAR por ubicación se determina de acuerdo al capacitor más grande disponible en la librería de capacitores importados, los cuales, EEGSA utiliza como de mayor capacidad.

Tabla XVI. Librería de capacitores EEGSA

No.	Nombre	Tensión (kV)	Capacidad (kVAR)
1	150C	13,2	150
2	300C	13,2	300
3	600C	13,2	600
4	900C	13,2	900
5	1200C	13,2	1 200

Fuente: elaboración propia

En la tabla XVII se detalla los resultados de la optimización en Neplan, obtenido un total de 4 capacitores a utilizar en el circuito 160. Con los nodos proporcionados por el corrimiento, se determinan los números de postes correspondientes y la corriente que circula por el nodo.



Tabla XVII. **Selección de capacitores del circuito 160**

<b>NO.</b>	<b>Capacidad (MVA)</b>	<b>Nodo</b>	<b>Poste</b>	<b>I 1 (A)</b>	<b>I 2 (A)</b>	<b>I 3 (A)</b>
1	1 200	9253859	359613	127,589	118,42	116,15
2	1 200	9253680	422104	214,18	224,748	226,77
3	600	8794973	359889	227,69	285,32	284,38
4	1 200	8794624	601815	387,38	387,78	385,15

Fuente: elaboración propia

En la figura 34 se visualiza la ubicación de los distintos bancos de capacitores en el circuito 160.

Figura 34. **Ubicación de compensación del circuito 160**



Fuente: SIGRE. *Circuito 160*. Consulta: 8 de diciembre de 2019.

### 4.2.3. Ubicación de los bancos de capacitores del circuito 246

Para establecer los puntos donde se instalarán los bancos de capacitores en el circuito 246 corre el módulo Ubicación Óptimo de Capacitores en Neplan. Se importa la base de datos del circuito y para el perfil de carga se elige la demanda máxima. Los parámetros seleccionados son:

- Sistema asimétrico
- Sin límite de número de capacitores
- Límite de 1 200 kVAR por ubicación

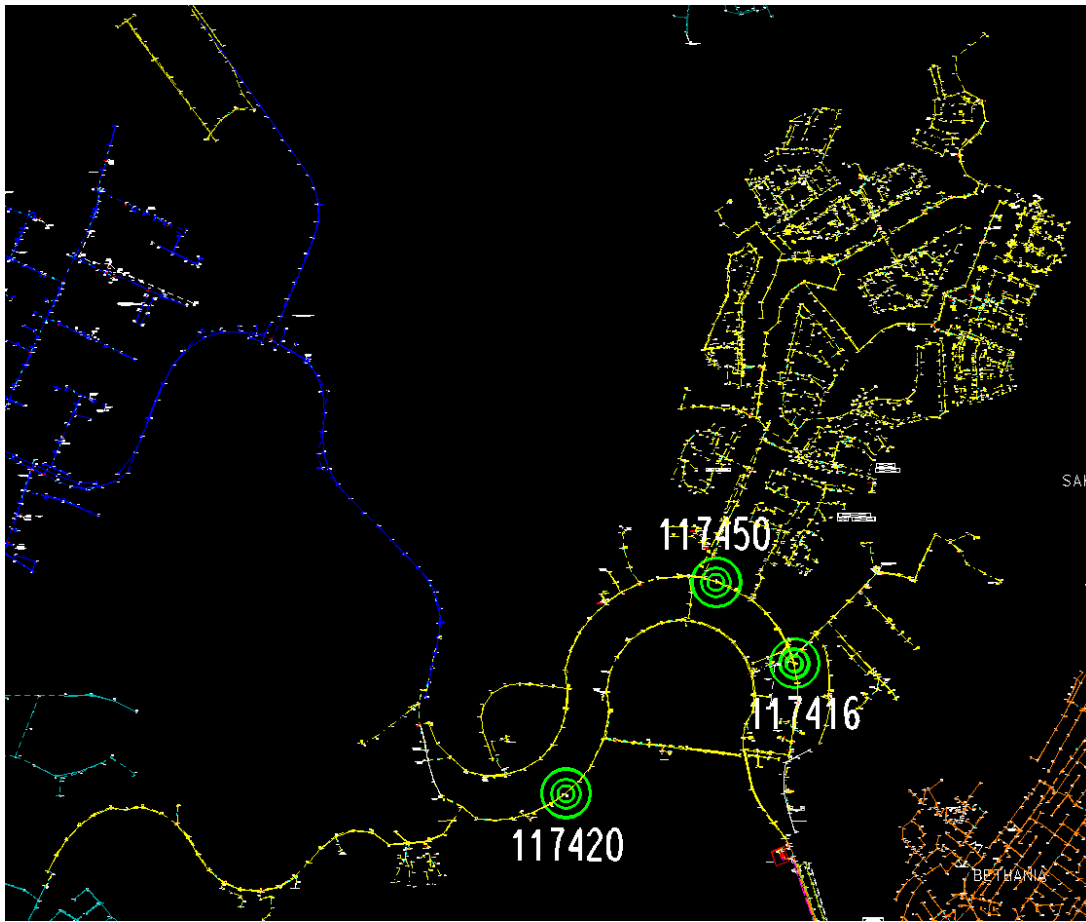
En la tabla XVIII se detalla los resultados de la optimización en Neplan, obtenido un total de 3 capacitores a utilizar en el circuito 246. Con los nodos proporcionados por el corrimiento, se determinan los números de postes correspondientes y la corriente que circula por el nodo.

Tabla XVIII. **Distribución de carga del circuito 246**

NO.	Capacidad (MVA)	Nodo	Poste	I 1 (A)	I 2 (A)	I 3 (A)
1	0,06	13201540	117450	145,28	119,28	139,65
2	0,30	13201560	117416	186,36	185,24	184,54
3	0,15	13200817	117420	27,19	28,77	30,04

Fuente: elaboración propia.

Figura 35. **Ubicación de compensación del circuito 246**



Fuente: SIGRE. *Circuito 246*. Consulta: 8 de diciembre de 2019.

#### **4.3. Compensación de potencia reactiva del circuito 160**

El conjunto de 4 bancos de capacitores de distintos valores se utiliza para ambos escenarios de compensación, la suma del conjunto equivale a la demanda máxima del circuito, este siendo de 4,2 MVAR.

Tabla XIX. **Conjunto de capacitores del circuito 160**

No.	Capacidad (MVAR)
1	0,6
2	1,2
3	1,2
4	1,2

Fuente: elaboración propia.

#### 4.3.1. **Compensación automatizada del circuito 160**

Para la automatización de la potencia reactiva del circuito 160 se observa que la demanda mínima promedio del circuito es aproximadamente de 1,2 MVAR por lo cual se puede utilizar un banco de capacitores estática del mismo valor. Los demás bancos de capacitores serán automatizados siendo un total de 3 bancos automatizados. Los controladores se accionarán de acuerdo con los rangos establecidos de tal manera que se tenga un incremento de 0,60 MVAR como se puede visualizar en la tabla XX.

Tabla XX. **Intervalos de compensación del circuito 160**

Rango (MVAR)	ESTÁTICO	AUTOMATIZADOS			TOTAL (MVAR)
	1,2 MVAR	0,6 MVAR	1,2 MVAR	1,2 MVAR	
<=1,5	X	0	0	0	1,2
1,5 - 2,1	X	X	0	0	1,8
2,1 - 2,7	X	0	X	0	2,4
2,7 - 3,3	X	X	X	0	3,0
3,3 - 3,9	X	0	X	X	3,6
>=3,9	X	X	X	X	4,2

Fuente: elaboración propia.

Debido a la existencia de un banco de capacitores estática en el conjunto de compensación, para el proceso de automatización se ajustan los rangos de la tabla XX restando el valor del banco de capacitores estática a la demanda de potencia reactiva de los intervalos.

Tabla XXI. **Intervalos de compensación automatizada del circuito 160**

Rango (MVAR)	AUTOMATIZADOS			TOTAL (MVAR)
	0,6 MVAR	1,2 MVAR	1,2 MVAR	
<=0,3	0	0	0	0,0
0,3 – 0,9	X	0	0	0,6
0,9 - 1,5	0	X	0	1,2
1,5 - 2,1	X	X	0	1,8
2,1 - 2,7	0	X	X	2,4
>=2,7	X	X	X	3,0

Fuente: elaboración propia.

#### 4.3.1.1. Algoritmo del circuito 160

En el algoritmo para automatizar el circuito 160 se declaran las siguientes variables:

Tabla XXII. **Variables del circuito 160**

No.	VARIABLE	DESCRIPCIÓN
1	R	Potencia reactiva obtenida del controlador
2	R2	Potencia reactiva generada en el circuito
3	E	Etapas de compensación
4	C1	Banco de capacitores de 0,6 MVAR
5	C2	Banco de capacitores de 1,2 MVAR
6	C3	Banco de capacitores de 1,2 MVAR

Fuente: elaboración propia.

La variable identificada como “R” es la que almacenará el valor de la potencia reactiva monitoreado en tiempo real por el controlador, este valor representa la potencia reactiva total incluyendo la compensación de los bancos de capacitores que se encuentran en línea en ese momento.

La variable “R2” representa la potencia reactiva generada por la carga del circuito la cual debe ser compensada así determinando la etapa de compensación correspondiente, se obtiene de la suma del valor de potencia reactiva almacenada en “R” más el valor de potencia reactiva que aporta el conjunto de compensación de la etapa actual.

Se utiliza una variable “E” que representa en qué etapa de compensación se encuentra el proceso de automatización, cada una representando una de las combinaciones de bancos de capacitores encendidos de acuerdo a los intervalos de la tabla XXI.

A los bancos de capacitores automatizados se le asignaron variables de carácter binario donde 1 representa el banco de capacitores en línea y 0 cuando está fuera de línea. Cada variable representa un banco de capacitores de un valor establecido.

El algoritmo comenzará obteniendo el valor de la potencia reactiva “R” del controlador y la etapa en la cual se encuentra la variable “E”. Seguidamente el proceso pasará por una serie de filtros de acuerdo a la etapa identificada donde se obtendrá el valor de “R2” sumando la variable “R” más el valor de potencia reactiva compensada correspondiente a la etapa “E”.

El valor “R2” pasará por medio de varias decisiones, cada una de ellas posee una condición la cual establece un rango que debe cumplir la variable. Cuando “R2” cumple una de las condiciones se accionarán los bancos de capacitores determinado por la tabla XXI, cambiando su valor de 0 a 1 o viceversa además de registrar en “E” la etapa correspondiente. De lo contrario se pasará a la siguiente decisión hasta que una de las condiciones se cumpla. El algoritmo se evaluará indefinidamente por medio de un ciclo.

Figura 36. Algoritmo del circuito 160 parte 1

```

1  Algoritmo Circuito_160
2      R<-0
3      R2<-0
4      C1<-0
5      C2<-0
6      C3<-0
7      E<-0
8
9      Repetir
10     Leer R
11     Si E=0 Entonces
12         R2=R
13     SiNo
14         Si E=1 Entonces
15             R2=R+0.6
16         SiNo
17             Si E=2 Entonces
18                 R2=R+1.2
19             SiNo
20                 Si E=3 Entonces
21                     R2=R+1.8
22                 SiNo
23                     Si E=4 Entonces
24                         R2=R+2.4
25                     SiNo
26                         Si E=5 Entonces
27                             R2=R+3
28                         SiNo
29                             Escribir "Error"
30                         Fin Si
31                     Fin Si
32                 Fin Si
33             Fin Si
34         Fin Si
35     Fin Si
36

```

Fuente: elaboración propia, empleando PSeInt v20200501.



Figura 37. Algoritmo del circuito 160 parte 2

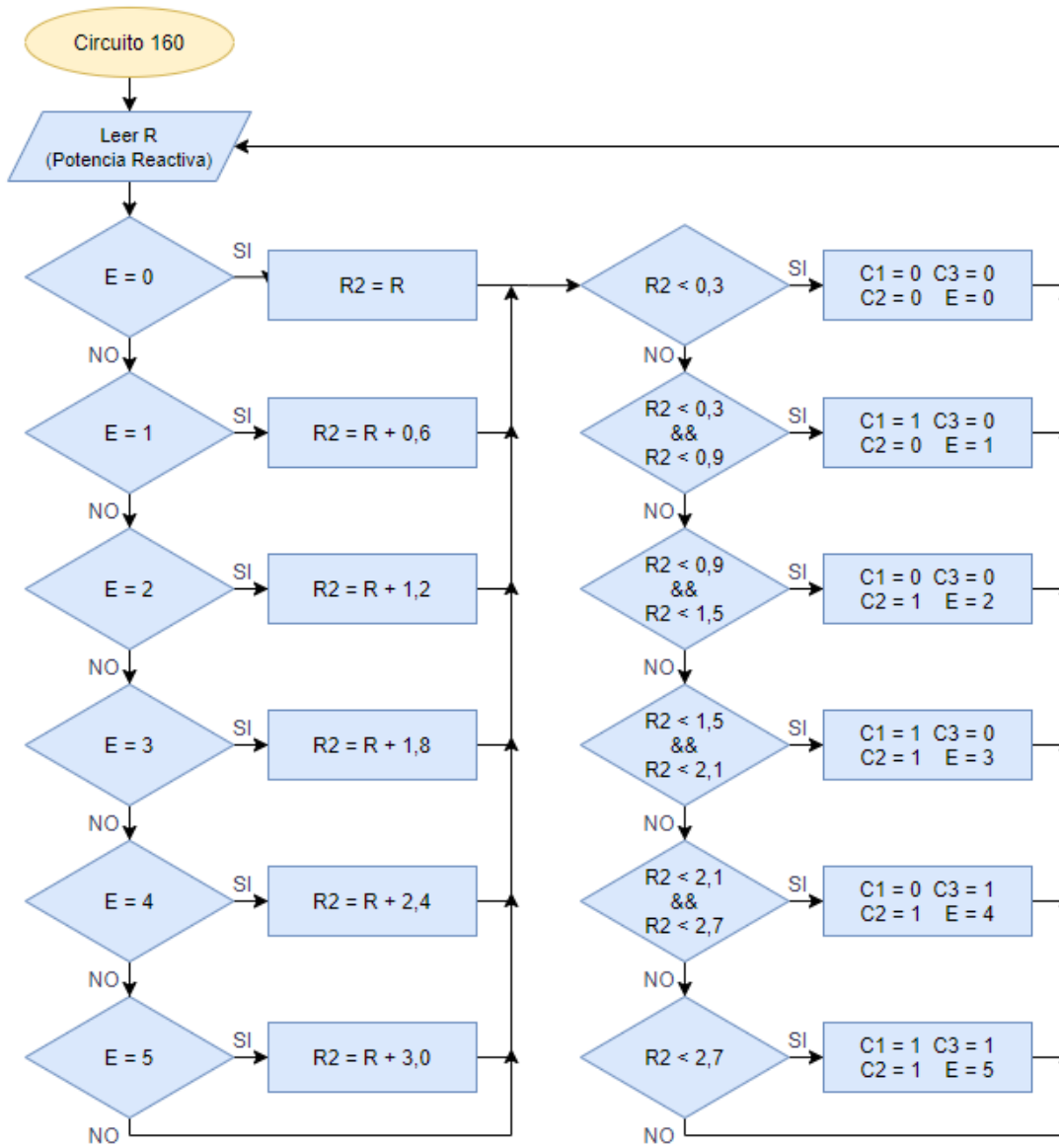
```

36
37     Si R2<0.3 Entonces
38         C1<-0
39         C2<-0
40         C3<-0
41         E<-0
42     SiNo
43         Si R2>=0.3 && R2<0.9 Entonces
44             C1<-1
45             C2<-0
46             C3<-0
47             E<-1
48         SiNo
49             Si R2>=0.9 && R2<1.5 Entonces
50                 C1<-0
51                 C2<-1
52                 C3<-0
53                 E<-2
54             SiNo
55                 Si R2>=1.5 && R2<2.1 Entonces
56                     C1<-1
57                     C2<-1
58                     C3<-0
59                     E<-3
60                 SiNo
61                     Si R2>=2.1 && R2<2.7 Entonces
62                         C1<-0
63                         C2<-1
64                         C3<-1
65                         E<-4
66                     SiNo
67                         Si R2>=2.7 Entonces
68                             C1<-1
69                             C2<-1
70                             C3<-1
71                             E<-5
72                         SiNo
73                             Escribir "Error"
74                         Fin Si
75                     Fin Si
76                 Fin Si
77             Fin Si
78         Fin Si
79     Fin Si
80     Hasta Que R>=100
81 FinAlgoritmo

```

Fuente: elaboración propia, empleando PSeInt v20200501.

Figura 38. Diagrama de flujo del circuito 160



Fuente: elaboración propia, empleando Draw.io.

#### **4.3.1.2. Curvas de compensación automatizada del circuito 160**

En las figuras 39, 40, 41 y 42 se muestra la potencia reactiva del circuito 160 y la potencia reactiva del mismo circuito aplicando la automatización de los bancos de capacitores.

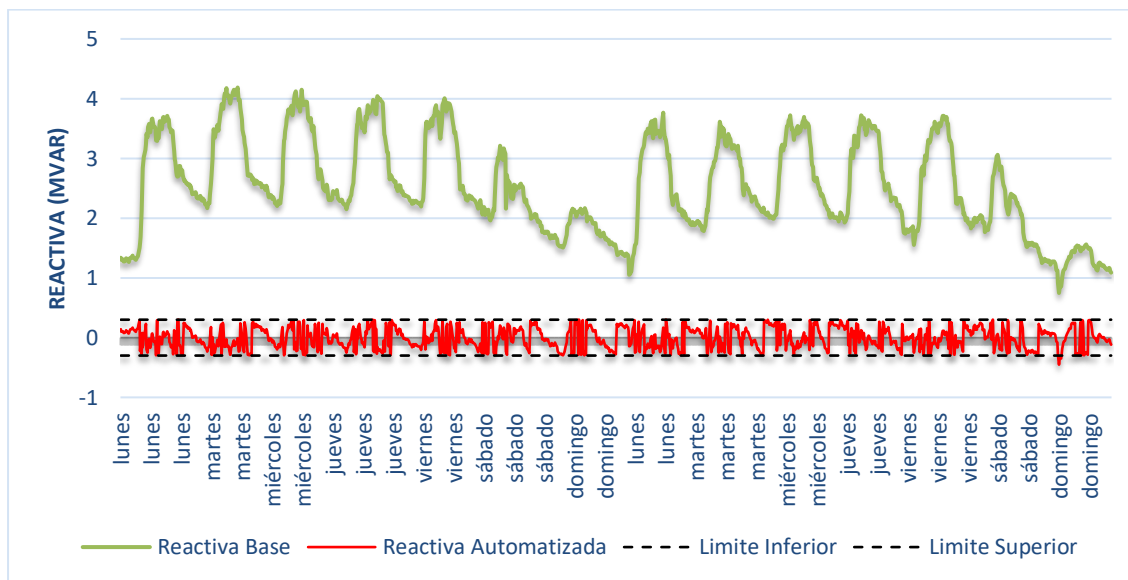
Se puede observar que la potencia reactiva automatizada disminuyó considerablemente, posee un límite superior de 0,3 MVAR y un límite inferior de -0,3 MVAR obteniendo una amplitud de 0,6 MVAR centrada en 0.

Estos límites siempre se conversan mientras la potencia reactiva se mantenga entre 1,2 MVAR y 4,2 MVAR, fuera de este rango la curva de potencia reactiva automatizada superará estos límites como se puede observar en el segundo domingo de la figura 39.

En la figura 41 se muestra que los límites se respetan a pesar de que existe un cambio drástico de demanda como por ejemplo entre las 10:30 y 11:00 horas.

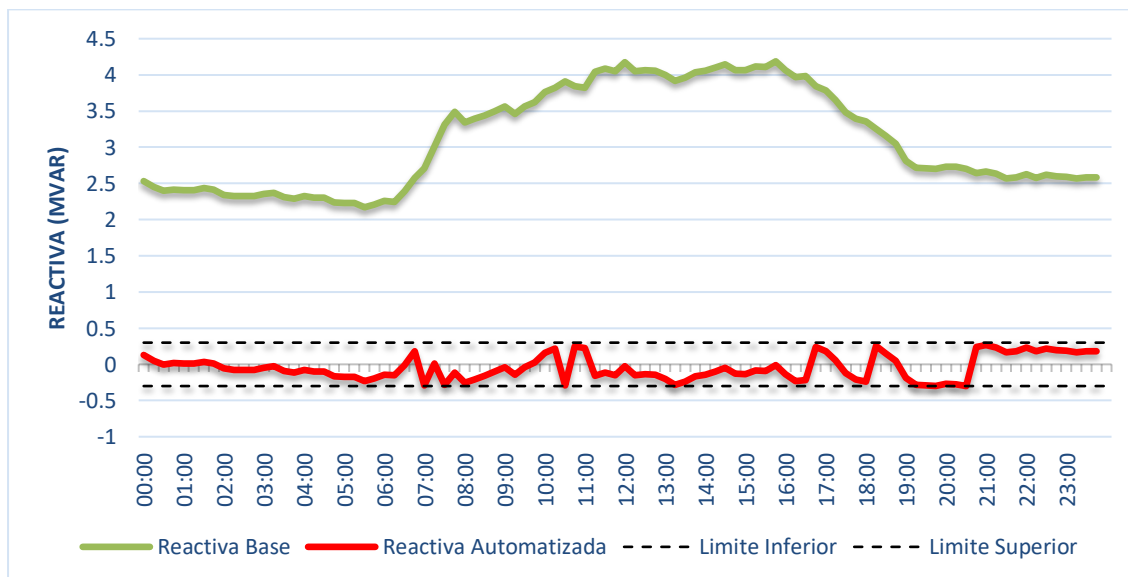
En todas las vistas presentadas la curva de potencia reactiva automatizada conserva el mismo comportamiento durante toda la semana, oscilando dentro de los límites cercanos a 0, compensando la potencia reactiva en su mayoría.

Figura 39. **Curva quincenal de la automatización del circuito 160**



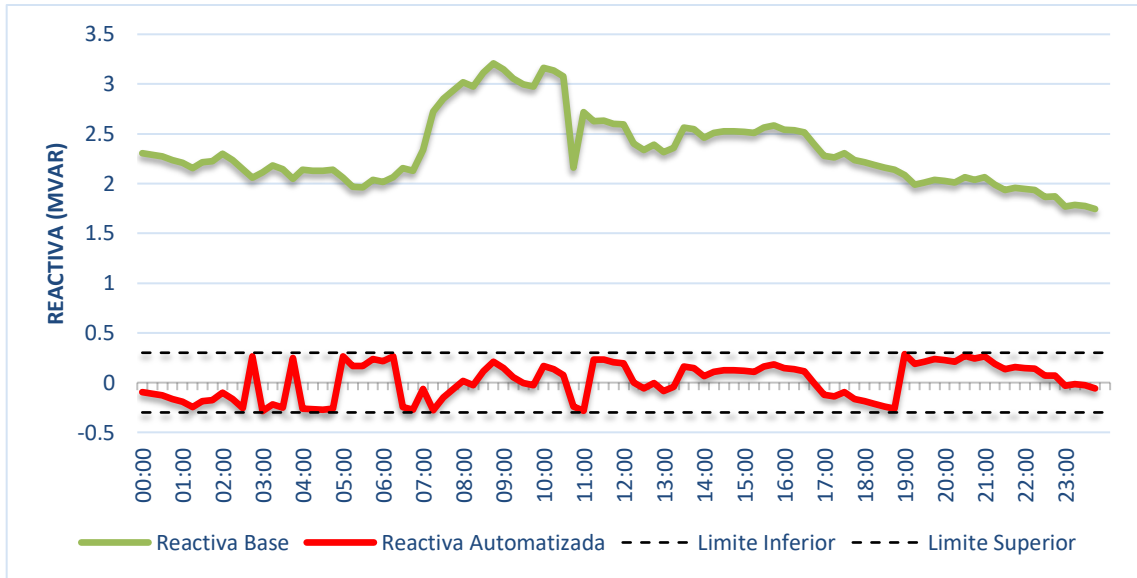
Fuente: elaboración propia.

Figura 40. **Curva entre semana de la automatización del circuito 160**



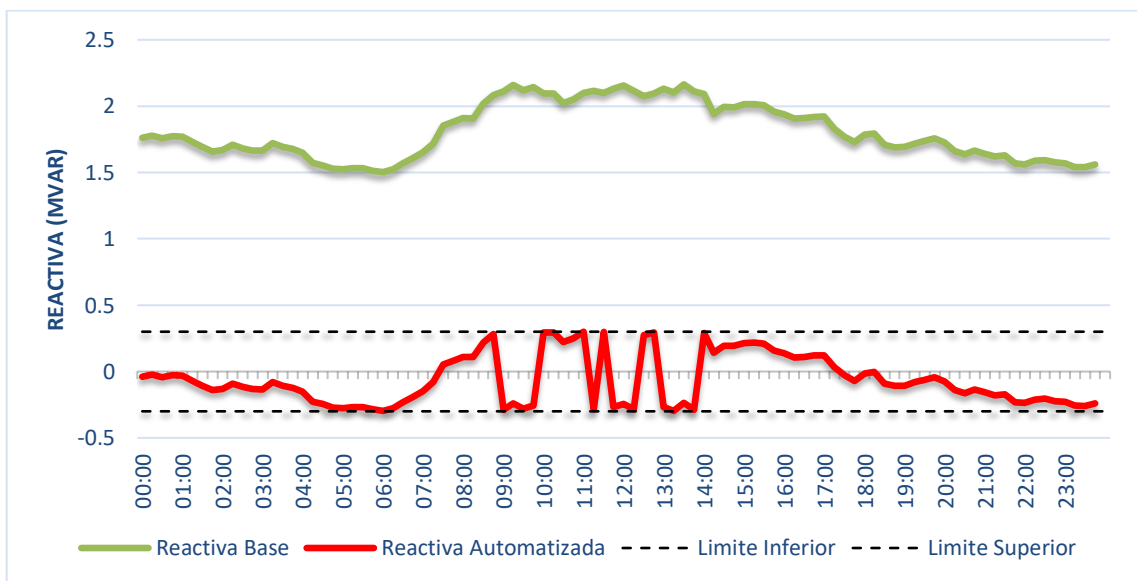
Fuente: elaboración propia.

Figura 41. Curva sábado de la automatización del circuito 160



Fuente: elaboración propia.

Figura 42. Curva domingo de la automatización del circuito 160



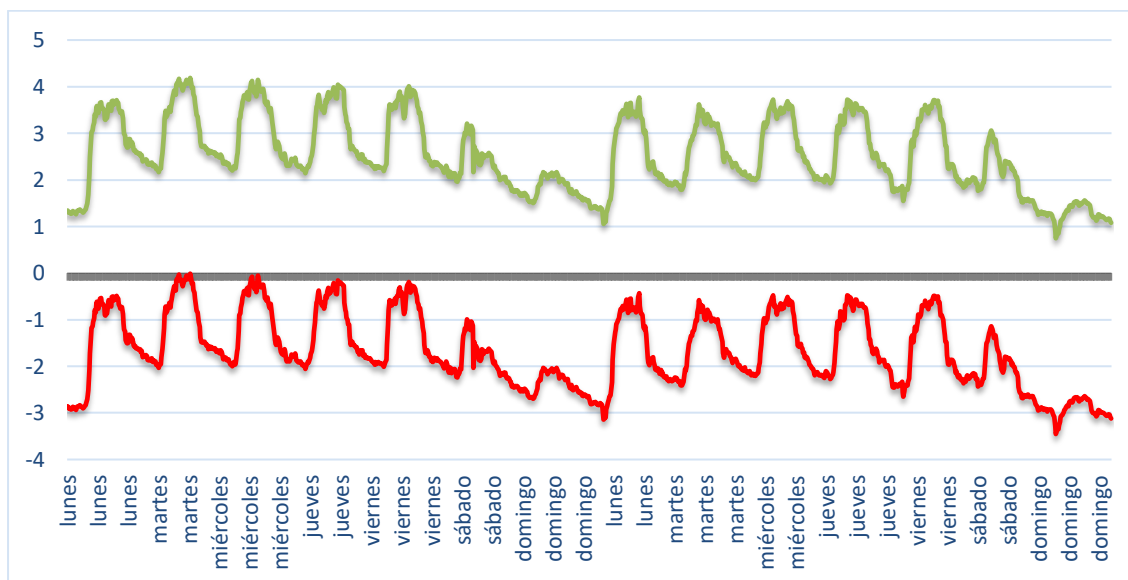
Fuente: elaboración propia.

### 4.3.2. Compensación estática del circuito 160

Realizando el análisis de compensación de potencia reactiva en el circuito 160 sin el uso de controladores inteligentes para automatizar el proceso se observa que el comportamiento de la curva de demanda no se altera. Simplemente sufre un desplazamiento de 4,2 MVAR en el eje de potencia reactiva de acuerdo al valor de potencia reactiva compensada por el conjunto de los bancos de capacitores establecidos en la tabla XIX.

Dado que la suma de potencia reactiva de los bancos de capacitores equivale a la demanda máxima, se puede observar en la figura 43 que toda demanda menor a la máxima se convierte en retorno de potencia reactiva para el circuito 160. Donde los puntos de menor demanda se vuelven los picos de retorno máximo, obteniendo un retorno máximo de -3,5 MVAR.

Figura 43. Curva quincenal de compensación estática del circuito 160



Fuente: elaboración propia.

#### **4.4. Compensación de potencia reactiva del circuito 246**

El conjunto de 3 bancos de capacitores de distintos valores se utiliza para ambos escenarios de compensación, la suma del conjunto equivale a la demanda máxima del circuito, este siendo de 1,1 MVAR.

Tabla XXIII. **Conjunto de capacitores del circuito 246**

<b>No.</b>	<b>CAPACIDAD (MVAR)</b>
1	0,15
2	0,30
3	0,60

Fuente: elaboración propia.

##### **4.4.1. Compensación automatizada del circuito 246**

Para la automatización de la potencia reactiva del circuito 246 no se cuenta con un banco de capacitores estática debido a que el valor mínimo de potencia reactiva es cercano a cero por ende los 3 bancos de capacitores serán automatizados. Los controladores se accionarán de acuerdo a los rangos establecidos de tal manera que se tenga un incremento de 0,15 MVAR como se puede visualizar en la tabla XXIV.

Tabla XXIV. **Intervalos de compensación del circuito 246**

Rango (MVAR)	AUTOMATIZADOS			TOTAL (MVAR)
	0,15 MVAR	0,30 MVAR	0,60 MVAR	
$\leq 0,075$	0	0	0	0,00
0,075 - 0,225	X	0	0	0,15
0,225 - 0,375	0	X	0	0,30
0,375 - 0,525	X	X	0	0,45
0,525 - 0,675	0	0	X	0,60
0,675 - 0,825	X	0	X	0,75
0,825 - 0,975	0	X	X	0,90
$\geq 0,975$	X	X	X	1,05

Fuente: elaboración propia

#### 4.4.1.1. Algoritmo del circuito 246

Para automatizar el circuito 246 se aplica el mismo algoritmo utilizado en el análisis del circuito 160 de la sección 4.3.1.1, sustituyendo el conjunto de bancos de capacitores y sus variables correspondientes representadas en la tabla XXV.

En este algoritmo se cuenta con más etapas de compensación debido a que el conjunto de bancos de capacitores utilizados es de 3 valores distintos comparado con el análisis del circuito 160 donde solo se cuenta con 3 bancos de capacitores de 2 valores distintos.



Tabla XXV. **Variables del circuito 246**

<b>No.</b>	<b>VARIABLE</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
1	R	Potencia reactiva obtenida del controlador
2	R2	Potencia reactiva generada en el circuito
3	E	Etapa de compensación
4	C1	Banco de capacitores de 0,15 MVAR
5	C2	Banco de capacitores de 0,30 MVAR
6	C3	Banco de capacitores de 0,60 MVAR

Fuente: elaboración propia.

El algoritmo y diagrama de flujo realizado para la compensación de potencia reactiva automatizada se puede visualizar en las figuras presentadas a continuación:

Figura 44. Algoritmo del circuito 246 parte 1

```
1  Algoritmo CTO_246
2      R<-0
3      R2<-0
4      C1<-0
5      C2<-0
6      C3<-0
7      Etapa<-0
8
9      Repetir
10     Leer R
11     Si Etapa=0 Entonces
12         R2=R
13     SiNo
14         Si Etapa=1 Entonces
15             R2=R+0.15
16         SiNo
17             Si Etapa=2 Entonces
18                 R2=R+0.30
19             SiNo
20                 Si Etapa=3 Entonces
21                     R2=R+0.45
22                 SiNo
23                     Si Etapa=4 Entonces
24                         R2=R+0.60
25                     SiNo
26                         Si Etapa=5 Entonces
27                             R2=R+0.75
28                         SiNo
29                             Si Etapa=6 Entonces
30                                 R2=R+0.90
31                             SiNo
32                                 Si Etapa=7 Entonces
33                                     R2=R+1.05
34                                 SiNo
35                                     Escribir "Error"
36                                 Fin Si
37                             Fin Si
38                         Fin Si
39                     Fin Si
40                 Fin Si
41             Fin Si
42         Fin Si
43     Fin Si
44
```

Fuente: elaboración propia, empleando PSeInt v20200501.

Figura 45. Algoritmo del circuito 246 parte 2

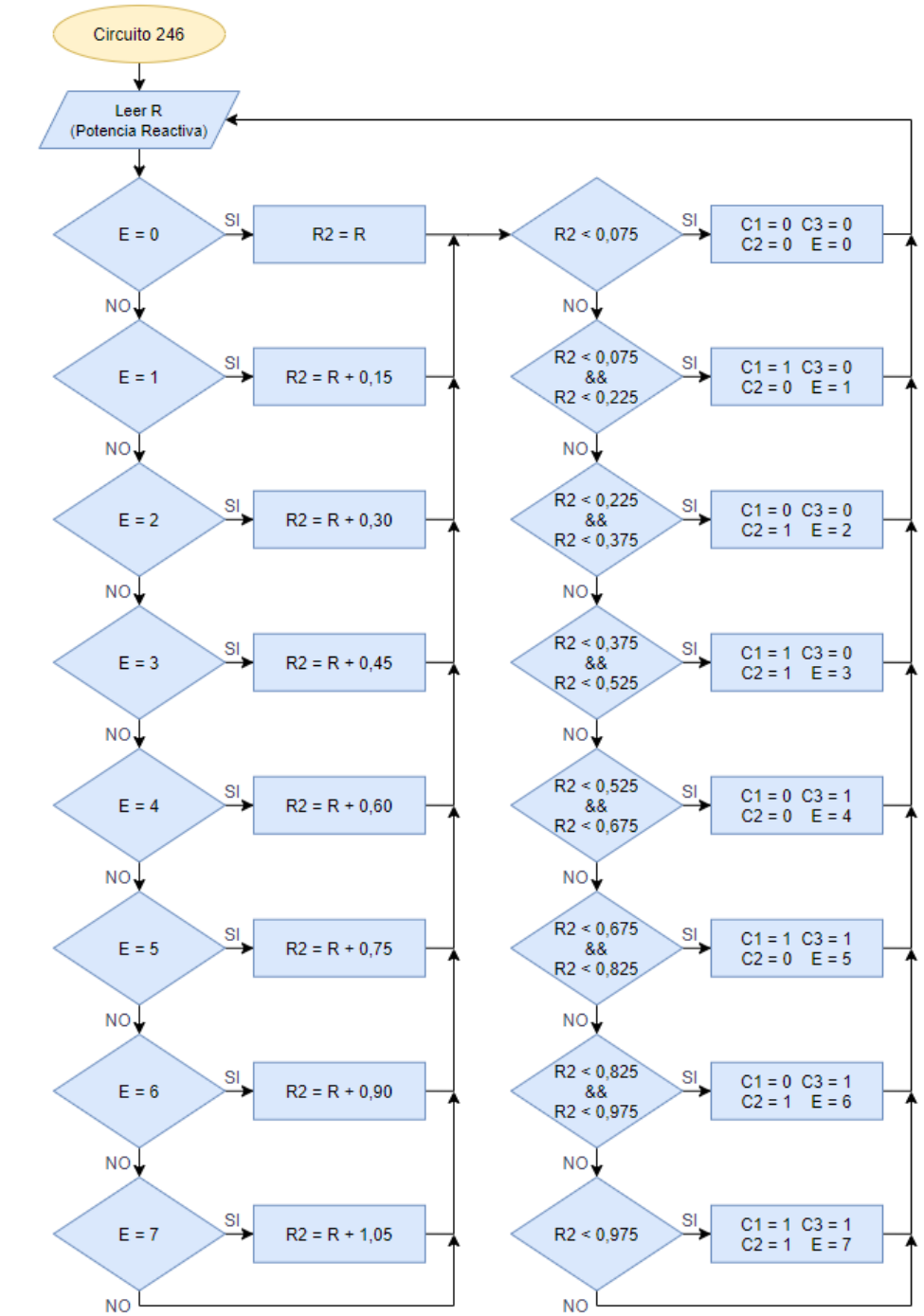
```

44
45     Si R2<0.075 Entonces
46         C1<-0
47         C2<-0
48         C3<-0
49         Etapa<-0
50     SiNo
51         Si R2>=0.075 && R2<0.225 Entonces
52             C1<-1
53             C2<-0
54             C3<-0
55             Etapa<-1
56         SiNo
57             Si R2>=0.225 && R2<0.375 Entonces
58                 C1<-0
59                 C2<-1
60                 C3<-0
61                 Etapa<-2
62             SiNo
63                 Si R2>=0.375 && R2<0.525 Entonces
64                     C1<-1
65                     C2<-1
66                     C3<-0
67                     Etapa<-3
68                 SiNo
69                     Si R2>=0.525 && R2<0.675 Entonces
70                         C1<-0
71                         C2<-0
72                         C3<-1
73                         Etapa<-4
74                     SiNo
75                         Si R2>=0.675 && R2<0.825 Entonces
76                             C1<-1
77                             C2<-0
78                             C3<-1
79                             Etapa<-5
80                         SiNo
81                             Si e>=0.825 && R2<0.975 Entonces
82                                 C1<-0
83                                 C2<-1
84                                 C3<-1
85                                 Etapa<-6
86                             SiNo
87                                 Si R>=0.975 Entonces
88                                     C1<-1
89                                     C2<-1
90                                     C3<-1
91                                     Etapa<-7
92                                 SiNo
93                                     Escribir "Error"
94                                 Fin Si
95                             Fin Si
96                         Fin Si
97                     Fin Si
98                 Fin Si
99             Fin Si
100         Fin Si
101     Fin Si
102     Hasta Que R>=100
103 FinAlgoritmo

```

Fuente: elaboración propia, empleando PSeInt v20200501.

Figura 46. Diagrama de flujo del circuito 246



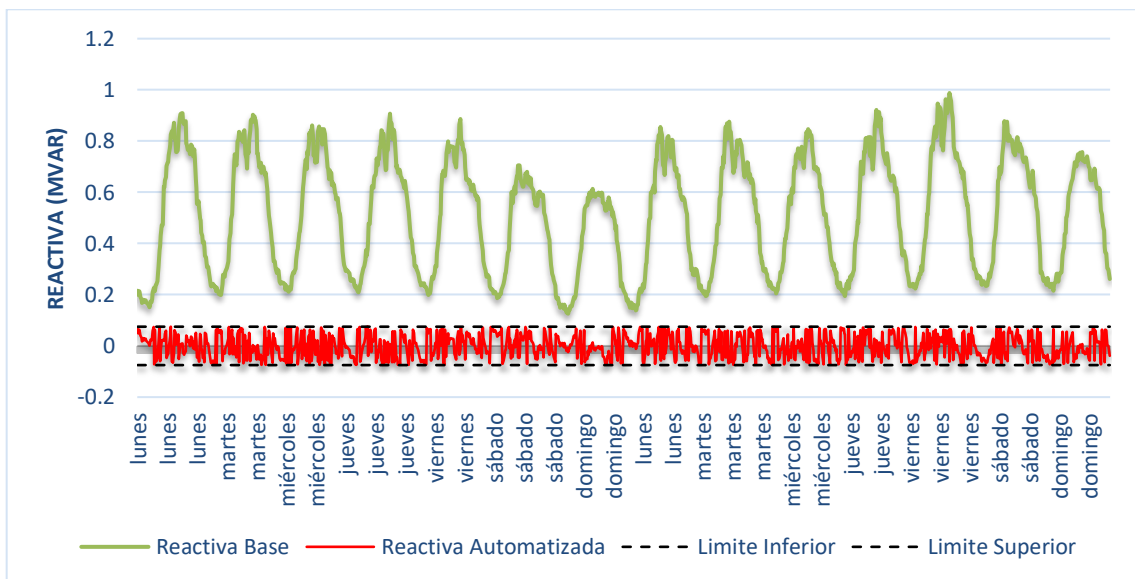
Fuente: elaboración propia, empleando Draw.io.

#### 4.4.1.2. Curvas de la automatización del circuito 246

En las curvas de potencia reactiva del circuito 246 se obtiene los límites superiores e inferiores con valores de 0,075 MVAR y -0,075 MVAR respectivamente. La amplitud cuenta con un valor de 0,15 MVAR centrada en 0.

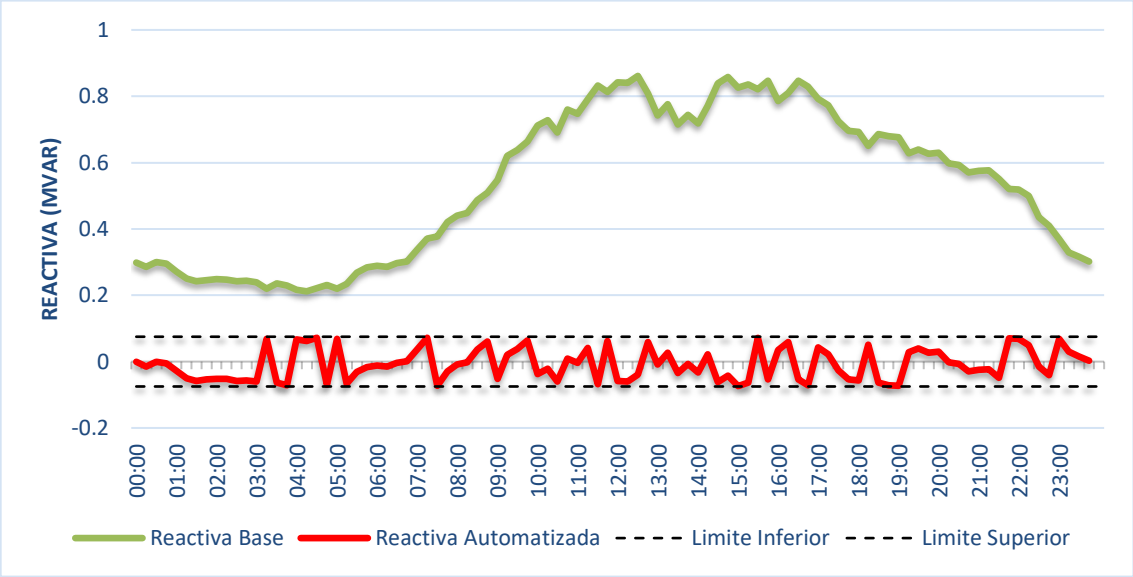
Los límites de potencia reactiva donde actúa la automatización del circuito 246 tiene un rango de 0 MVAR a 1,05 MVAR. Debido a que el límite inferior de accionamiento es de 0 MVAR, la curva de potencia reactiva automatizada no superará el límite inferior a menos que se tenga un retorno de potencia reactiva en el circuito.

Figura 47. Curva quincenal de la automatización del circuito 246



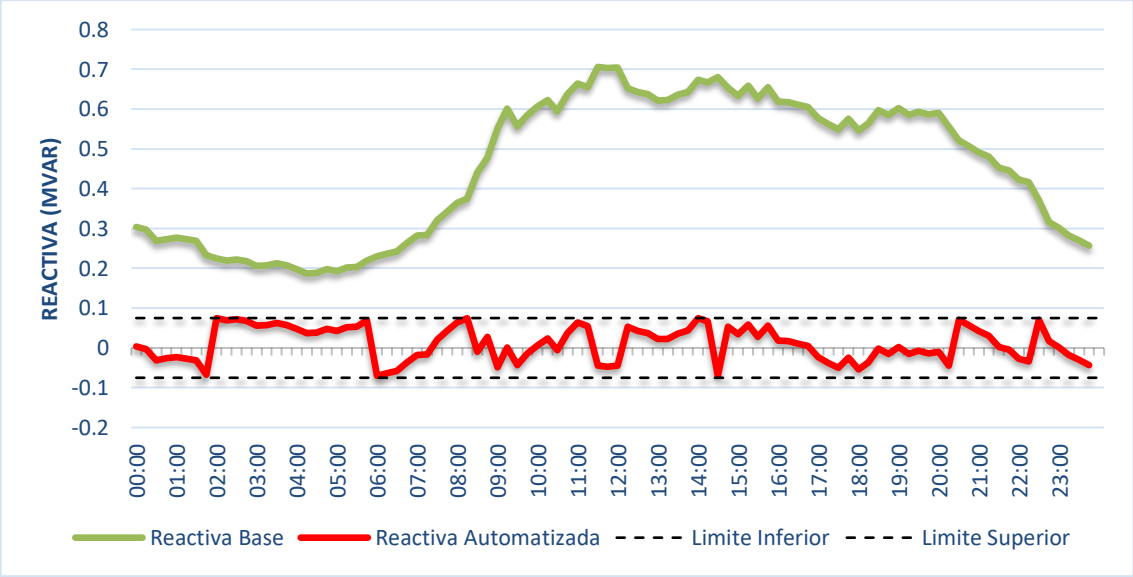
Fuente: elaboración propia.

Figura 48. Curva entre semana de la automatización del circuito 246



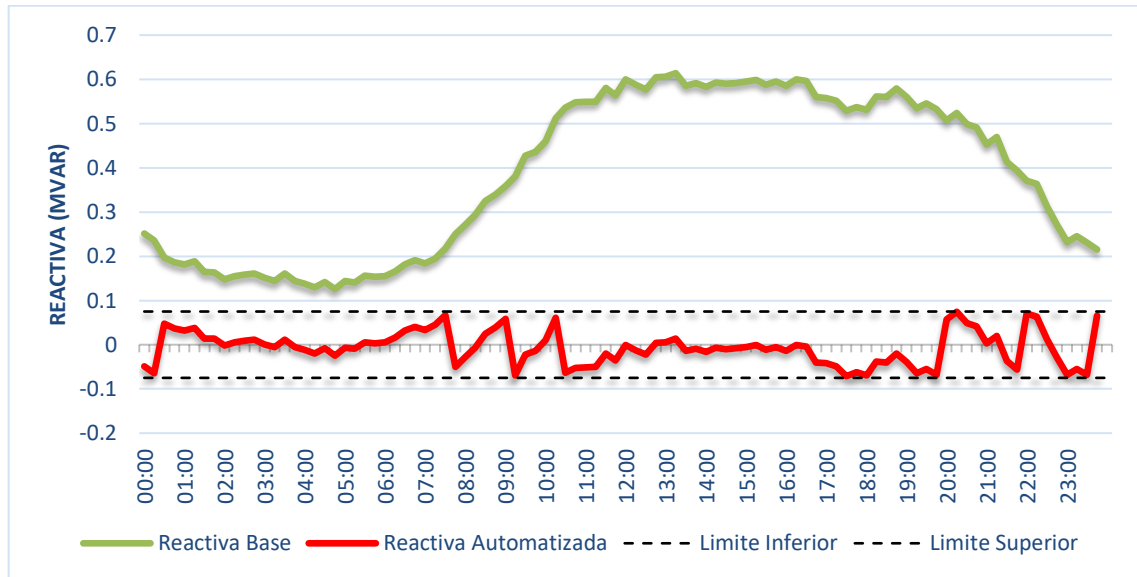
Fuente: elaboración propia.

Figura 49. Curva sábado de la automatización del circuito 246



Fuente: elaboración propia.

Figura 50. Curva domingo de la automatización del circuito 246



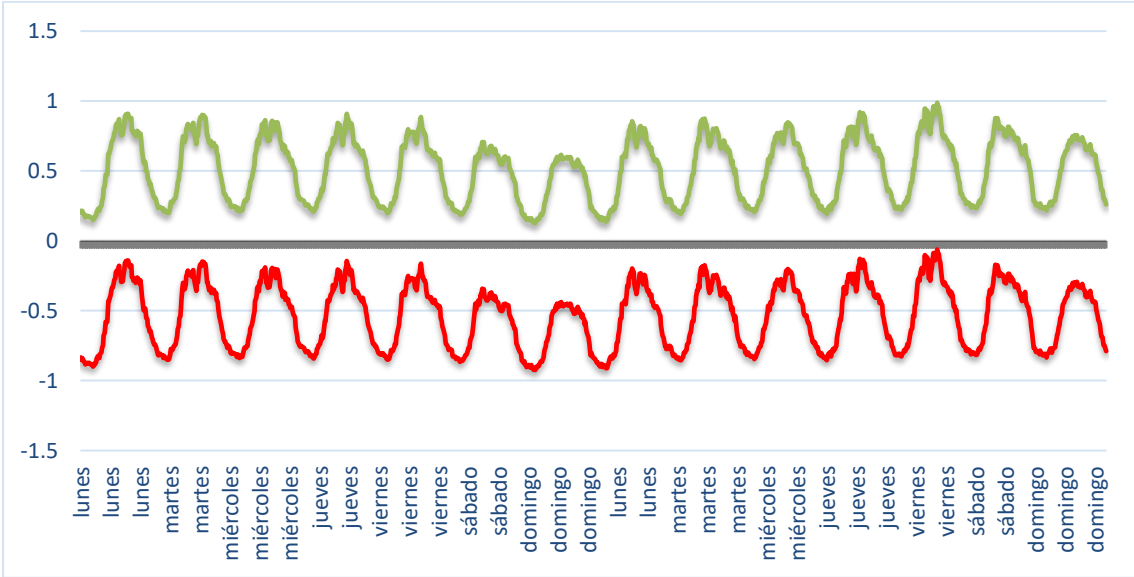
Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.2. Compensación estática del circuito 246

Siguiendo el mismo análisis de compensación de potencia reactiva sin automatización de la sección 4.3.2 aplicado en el circuito 246, se observa que la curva de demanda sigue sin alterar su comportamiento.

Además, sufre un desplazamiento en el eje de potencia reactiva de 1,1 MVAR equivalente al valor total de potencia reactiva compensada por el conjunto de los bancos de capacitores establecidos en la tabla XXIII. Se obtiene un retorno máximo de potencia reactiva de -0,92 MVAR.

Figura 51. Curva quincenal de compensación estática del circuito 246



Fuente: elaboración propia.



## **5. ANÁLISIS FINANCIERO DE COMPENSACIÓN REACTIVA**

### **5.1. Inversiones y equipo de compensación reactiva**

La inversión tiene como objetivo el desembolso de dinero u otros recursos con el fin de obtener ganancias las cuales están determinadas por el tiempo de inversión que se realiza.

#### **5.1.1. Equipo de bancos de capacitores**

Para el estudio de compensación de potencia reactiva se contemplaron bancos de capacitores de distintas capacidades; estos bancos se conforman de distintos capacitores de acuerdo a la capacidad requerida del conjunto con doble bushing, 7,62 kV, 60 Hz, 95 kV BIL, temperatura de operación entre -10 grados C y +40 grados C, líquido dieléctrico non-PCB, equipado con una resistencia interna de descarga para reducir el voltaje a 50 Voltios o menos, 5 minutos después de su desconexión, tanque de acero inoxidable herméticamente sellado con un acabado de pintura color gris cielo, placa de características de acero inoxidable, cada bushing con conector de ranura paralela para acomodar conductores desde el No. 8 AWG al No. 1 AWG. En la tabla XXIV se detallan los costos de los bancos de capacitores según capacidad.

Tabla XXVI. **Costo de bancos de capacitores**

<b>CAPACIDAD (MVAR)</b>	<b>COSTO</b>
0,15	Q 23 307,18
0,30	Q 31 824,00
0,60	Q 44 680,90
0,90	Q 56 217,10
1,20	Q 70 005,00

Fuente: elaboración propia.

### **5.1.2. Equipo de automatización**

El relevador Beckwith Electric M-6283A es un control universal de banco de capacitores tipo poste para automatización, monitoreo y protección remota. Ofrece operación automática por voltaje, VARs, corriente, tiempo (estacional) o temperatura con sobrescritura de voltaje programable. Posee detección completa de voltajes y corrientes trifásicas, así como el registro avanzado de datos y registros de perfil de carga.

Además, cuenta con las siguientes características de automatización y comunicación:

- Puerto USB en panel frontal para programación local y transferencia de datos.
- Opciones flexibles de comunicación para redes cableados o inalámbricas con dos puertos seriales independientes (232, 485, Fibra o Bluetooth).

- Implementación completa DNP con soporte para lectura/escritura de valores digitales y analógicos, transferencias de archivo, multi-transmisión, respuesta no solicitada, monitoreo y control remoto.

En la tabla XXVII se detalla el costo del equipo utilizado para automatizar un banco de capacitores:

Tabla XXVII. **Costo de automatizar bancos de capacitores**

NO.	EQUIPO	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	TOTAL
1	Relevador Beckwith Electric M-6283A	1	Q 13 442,82	Q 13 442,82
2	Radio SD4	1	Q 9 179,08	Q 9 179,08
3	Fuente 24 VDC para motor seco	1	Q 3 284,43	Q 3 284,43
4	Supresor de voltaje	1	Q 319,00	Q 319,00
5	Pararrayos para telecomunicaciones	1	Q 1 122,98	Q 1 122,98
6	Cable tipo TSJ 3x14	25	Q 7,09	Q 177,25
7	Transformador de potencial 63.5:1	1	Q 4 039,63	Q 4 039,63
8	Abrazadera doble 6" a 8"	4	Q 33,60	Q 134,40
9	Cable cobre s/forro #4 AWG	10	Q 11,99	Q 119,90
10	Grapa universal rosca P/Cable 1/0 AWG	1	Q 1,74	Q 1,74
11	Cortacircuitos 100 Amp. p/15 kV	1	Q 234,55	Q 234,55
12	Fusible T/ "T" 6 Amp.	1	Q 10,86	Q 10,86
13	Estribo de 1/0 a 336	1	Q 57,40	Q 57,40
14	Tirante 1/4	10	Q 2,70	Q 27,00
15	Grapa para Bandith	4	Q 1,74	Q 6,96
16	Bandith	5	Q 0,66	Q 3,30
17	Varilla de tierra	1	Q 90,30	Q 90,30
18	Regla con canal	1	Q 30,17	Q 30,17
19	Conector universal cable #4 AWG	4	Q 12,00	Q 48,00
20	Pararrayos 10 kV T/Dist P/Línea	1	Q 9,90	Q 9,90
21	Otros, tomacorriente, terminales, cordones AC	1	Q 178,57	Q 178,57
			<b>TOTAL</b>	<b>Q 32 518,24</b>

Fuente: elaboración propia.

### 5.1.3. Costos de instalación y mantenimiento

En la tabla XXVIII se detalla el costo de mano de obra para la instalación y automatización de los bancos de capacitores:

Tabla XXVIII. Costo de mano de obra

ACTIVIDAD	COSTO
Mano de obra instalar banco de capacitores	Q 994,97
Mano de obra automatizar banco de capacitores	Q 7 436,48

Fuente: elaboración propia

Para asegurar la vida útil del equipo se propone realizar inspección y mantenimientos preventivos al equipo instalados los cuales se detallan en la siguiente tabla:

Tabla XXIX. Costo de mantenimientos a equipos

ACTIVIDAD	COSTO
Inspección, pruebas y mantenimiento preventivo a bancos de capacitores	Q 1 660,63
Mantenimiento preventivo a automatismo de bancos de capacitores	Q 2 013,00

Fuente: elaboración propia.

## 5.2. Pliego tarifario

Dentro de las funciones de La Comisión está definir las tarifas de transmisión y distribución. Las tarifas se conforman de componentes de adquisición de potencia y energía junto con los componentes de costos eficientes de distribución “VAD” (Valor Agregado de Distribución).

Todos los distribuidores deberán calcular el VAD mediante un estudio encargado a una firma precalificada por la Comisión, esta deberá ser realizada cada 5 años. El VAD es el valor monetario que recibe el distribuidor para poder operar e invertir en una red eficiente.

Dentro del estudio EVAD realizado en el año 2018 de EEGSA, la comisión reconoció la instalación de 7 bancos de capacitores hasta el año 2023. En la figura 52 se detalla las capacidades y el costo reconocido de banco de capacitor.

Figura 52. Reconocimiento de bancos de capacitores

Código optimización	Zona	Tipo	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Costo UCC [USD/ud]
			Ago 2018-Jul 2019	Ago 2019-Jul 2020	Ago 2020-Jul 2021	Ago 2021-Jul 2022	Ago 2022-Jul 2023	
BCAP-3F-300 kVA	R	BC	1	1	1	1	1	10,849
BCAP-3F-600 kVA	R	BC	1	1	1	1	1	12,778
BCAP-3F-900 kVA	R	BC	1	1	1	1	1	21,750
BCAP-3F-300 kVA	D	BC	1	1	1	1	1	10,849
BCAP-3F-600 kVA	D	BC	1	1	1	1	1	12,778
BCAP-3F-900 kVA	D	BC	2	2	2	2	2	21,750
<b>TOTALES</b>			<b>7</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	

Fuente: EEGSA EVAD 2018. *Crecimiento equipos MT*. Consulta: septiembre de 2020.

Para obtener la anualidad de ingreso del VAD de los bancos de capacitores reconocidos por la comisión, se calcula el Factor de Recuperación de Capital “FRC”. Utilizando un periodo de amortización igual a los años de vida útil ponderada por el Costo de Reposición.

Tabla XXX. **Cálculo de FRC**

<b>Factor</b>	<b>Banco de Capacitores</b>
Ta = To (años)	15
r (%)	7,00 %
g (%)	25,00 %
<b>FRC</b>	<b>0,16</b>

Fuente: elaboración propia.

$$FRC = \frac{1}{T_o} + \frac{r * \frac{T_a}{T_o}}{2 * (1 - g)}$$

Donde:

FRC: Factor de Recuperación de Capital.

$T_o$ : Vida Útil Promedio ponderada por el Costo de Reposición de los activos.

$r$ : Tasa de Actualización aprobada por la CNEE.

$T_a$ : Periodo de amortización ( =  $T_o$  ).

$F_p$ : Alícuota del Impuesto Sobre la Renta.

Tabla XXXI. Cálculo de anualidades VAD

EQUIPO	COSTO TOTAL (USD)	FRC (%)	Vida Util (Años)	Anualidad (USD)	Anualidad (Q)
C300	\$ 10 849,00	0,16	15	\$ 1 735,84	Q 13 539,55
C600	\$ 12 778,00	0,16	15	\$ 2 044,48	Q 15 946,94
C900	\$ 21 750,00	0,16	15	\$ 3 480,00	Q 27 144,00

Fuente: elaboración propia.

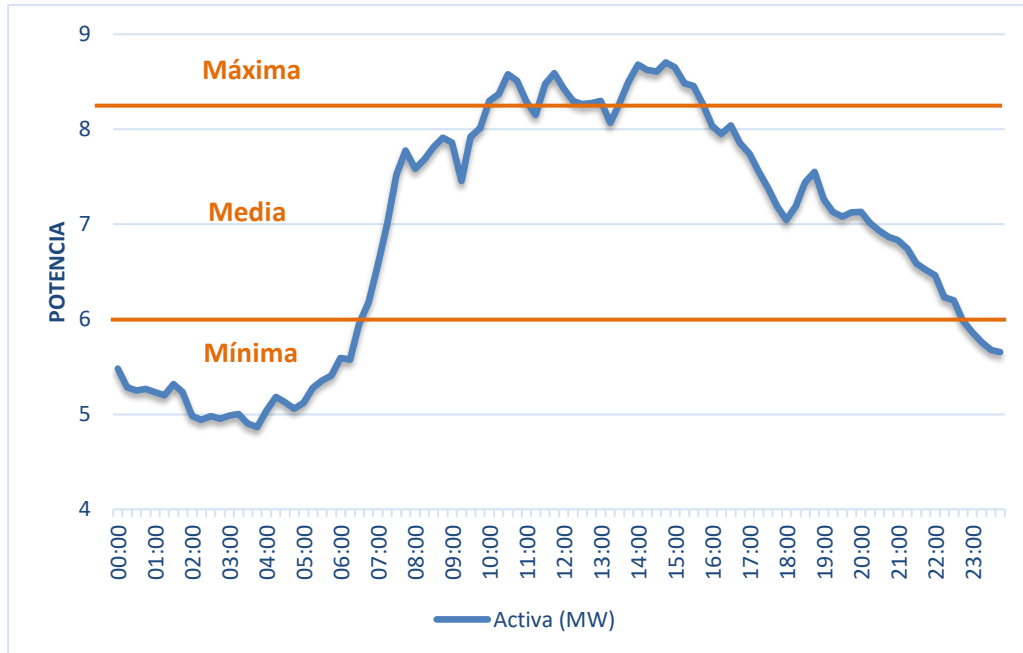
### 5.3. Análisis financiero de la compensación reactiva del circuito 160

Se realiza el análisis de compensación reactiva utilizando la data del día de mayor demanda registrado por ser el día más crítico donde podemos observar el mayor creciente de potencia relativa en el circuito.

#### 5.3.1. Simulaciones de compensación reactiva del circuito 160

Para simular las pérdidas de potencia del circuito se establecen tres escenarios de demanda que representarán puntos claves de compensación, cada escenario tomará un rango de demanda que está compuesto por determinadas horas del día.

Figura 53. Escenarios de demanda del circuito 160



Fuente: elaboración propia.

Los tres escenarios que se determinaron fueron demanda mínima, media y máxima tal como se muestran en la figura 53. Los puntos clave de compensación y la cantidad de horas que representarán se detallan en la tabla XXXII.

Tabla XXXII. Escenario de compensación circuito 160

ESCENARIO	DEMANDA (MW)	DEMANDA (MVAR)	HORAS
Minima	4,987	2,356	7,5
Media	7,260	2,812	11,5
Maxima	8,437	4,176	5,0

Fuente: elaboración propia.



Utilizando la demanda del día más crítico de pérdidas se determina el factor de carga del circuito para posteriormente obtener el factor de pérdidas.

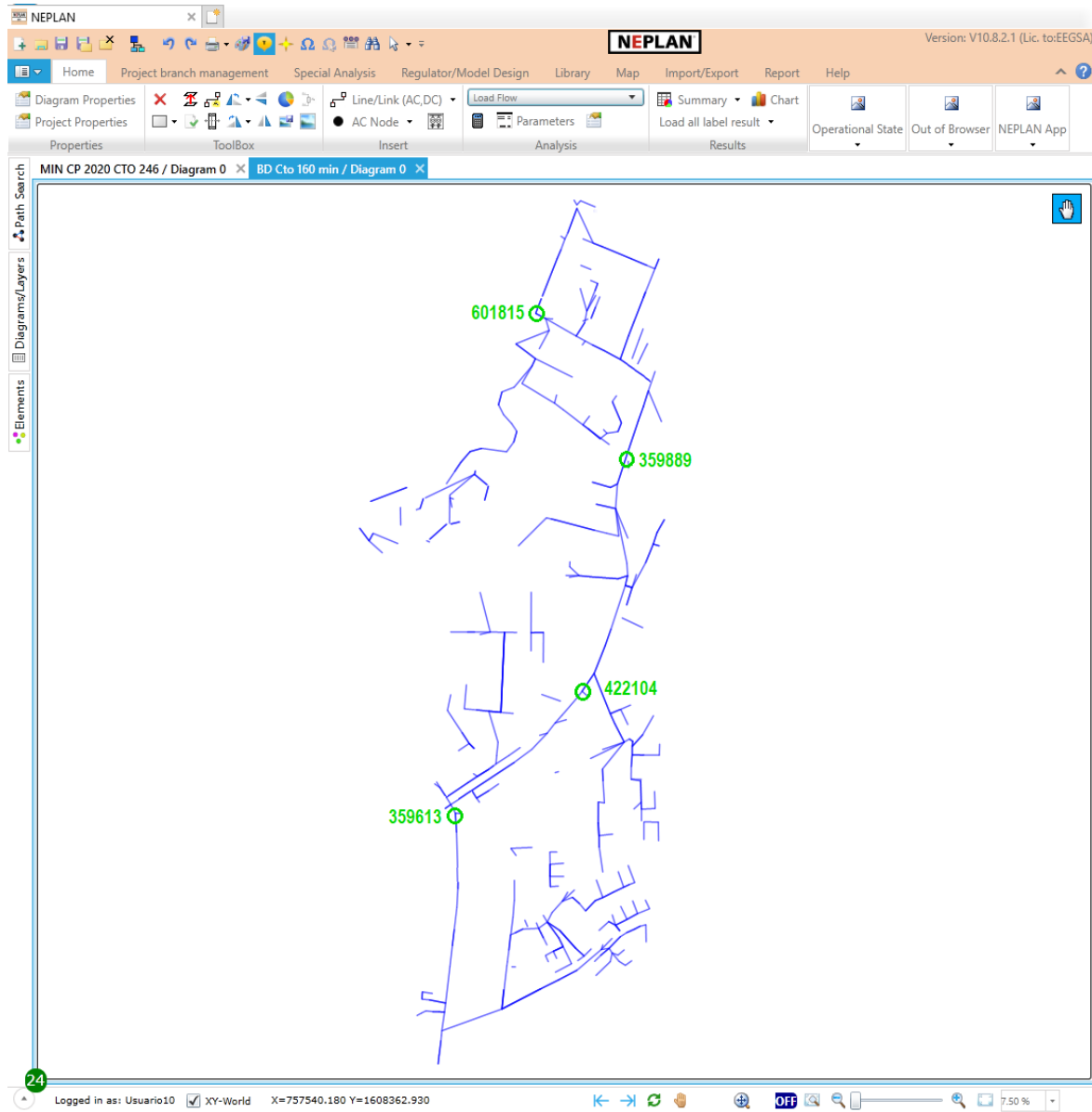
Tabla XXXIII. **Factores del circuito 160**

Factor de carga	0,79
Factor de Perdida	0,68

Fuente: elaboración propia.

Al simulador Neplan se importa todos los elementos del circuito 160 incluyendo sus cargas de distribución y tres escenarios de compensación. Además, se agregan los bancos de capacitores con los valores y ubicaciones determinadas en el capítulo 4.

Figura 54. Simulación del circuito 160 en Neplan



Fuente: elaboración propia, empleando Neplan.

Para cada escenario se simuló los flujos de carga para los siguientes casos:

- Caso base: Se toma en cuenta únicamente la potencia activa y reactiva que aporta la carga conectada al circuito, no se incluyen los bancos de capacitores.
- Caso automatizado: Se activan los bancos de capacitores correspondientes al nivel de potencia reactiva de cada escenario de acuerdo con los rangos establecidos en el capítulo 4.
- Caso estático: Se activan todos los bancos de capacitores para los tres escenarios de compensación.

#### **5.3.1.1. Premisas de simulación circuito 160**

Tomando en cuenta los casos y escenarios expuestos anteriormente, se corren las simulaciones bajo las siguientes premisas generales:

- Se utiliza un sistema con frecuencia de 60 Hz.
- Se simula como un sistema asimétrico debido a que el circuito alimenta cargas trifásicas, bifásicas y monofásicas desbalanceadas.

En las tablas XXXIV, XXXV y XXXVI se establecen las premisas para cada simulación de acuerdo con las demandas de carga y la compensación correspondiente establecido en el capítulo 4, tabla XX.

Tabla XXXIV. Premisas de demanda mínima del circuito 160

DEMANDA MÍNIMA	DEMANDA ACTIVA (kW)	DEMANDA REACTIVA (kVAR)	COMPENSACIÓN REACTIVA (kVAR)	1 200 kVAR	AUTOMÁTICOS		
					600 kVAR	1 200 kVAR	1 200 kVAR
Caso base	4 987,10	2 356,90	0,00	NO	NO	NO	NO
Caso automatizado	4 987,10	2 356,90	2 400,00	SI	NO	SI	NO
Caso estático	4 987,10	2 356,90	4 200,00	SI	SI	SI	SI

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. Premisas de demanda media del circuito 160

DEMANDA MEDIA	DEMANDA ACTIVA (kW)	DEMANDA REACTIVA (kVAR)	COMPENSACIÓN REACTIVA (kVAR)	1 200 kVAR	AUTOMÁTICOS		
					600 kVAR	1 200 kVAR	1 200 kVAR
Caso base	7 260,20	2 812,40	0,00	NO	NO	NO	NO
Caso automatizado	7 260,20	2 812,40	3 000,00	SI	SI	SI	NO
Caso estático	7 260,20	2 812,40	4 200,00	SI	SI	SI	SI

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. Premisas de demanda máxima del circuito 160

DEMANDA MÁXIMA	DEMANDA ACTIVA (kW)	DEMANDA REACTIVA (kVAR)	COMPENSACIÓN REACTIVA (kVAR)	1 200 kVAR	AUTOMÁTICOS		
					600 kVAR	1 200 kVAR	1 200 kVAR
Caso base	8 437,20	4 176,60	0,00	NO	NO	NO	NO
Caso automatizado	8 437,20	4 176,60	4 200,00	SI	SI	SI	SI
Caso estático	8 437,20	4 176,60	4 200,00	SI	SI	SI	SI

Fuente: elaboración propia.

### 5.3.1.2. Resultados de simulación circuito 160

En las tablas XXXVII, XXXVIII y XXXIX se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones de compensación reactiva en el circuito 160.

Tabla XXXVII. **Resultados en Neplan con demanda mínima del circuito 160**

DEMANDA MÍNIMA	PLOAD (kW)	QLOAD (kVAR)	PGEN (kW)	QGEN (kVAR)	PLOSSES (kW)	QLOSSES (kVAR)
Caso base	4 987,10	2 356,90	5 054,30	2 492,90	67,30	136,00
Caso automatizado	4 987,10	2 356,90	5 043,40	108,50	56,40	111,60
Caso estático	4 987,10	2 356,90	5 049,10	-1 698,10	64,80	125,30

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Resultados en Neplan con demanda media del circuito 160**

DEMANDA MEDIA	PLOAD (kW)	QLOAD (kVAR)	PGEN (kW)	QGEN (kVAR)	PLOSSES (kW)	QLOSSES (kVAR)
Caso base	7 260,20	2 812,40	7 398,70	3 093,60	138,40	281,20
Caso automatizado	7 260,20	2 812,40	7 380,60	130,20	120,40	241,30
Caso estático	7 260,20	2 812,40	7 393,40	-1 072,60	133,20	264,10

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. **Resultados en Neplan con demanda máxima del circuito 160**

DEMANDA MÁXIMA	PLOAD (kW)	QLOAD (kVAR)	PGEN (kW)	QGEN (kVAR)	PLOSSES (kVAR)	QLOSSES (kVAR)
Caso base	8 437,20	4 176,60	8 650,80	4 598,70	213,60	422,10
Caso automatizado	8 437,20	4 176,60	8 616,10	440,20	178,90	345,70
Caso estático	8 437,20	4 176,60	8 616,10	440,20	178,90	345,70

Fuente: elaboración propia.

### 5.3.2. Análisis económico de la automatización del circuito 160

El objetivo principal de compensar la potencia reactiva es disminuir la corriente del circuito, al disminuir la corriente disminuirán las pérdidas en calor por el efecto joule en la red de distribución. Estas pérdidas representan un gasto económico a la distribuidora con lo cual se puede establecer que reducir las pérdidas equivale a un beneficio económico.

Para obtener la cantidad monetaria que equivale a las pérdidas de potencia de un circuito, en el lapso determinado, se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_p = P_j * t * C_p * F_p$$

Donde:

$Q_p$  : Valor monetario equivalente a las pérdidas de un tiempo determinado

$P_j$  : Pérdidas en calor por el efecto joule

$t$  : Tiempo en horas

$C_p$  : Constante que representa el costo de pérdidas igual a 1,15 kW/h

$F_p$  : Factor de pérdidas

El cálculo monetario de pérdidas deberá realizarse para los tres escenarios de compensación, donde las pérdidas por efecto joule se obtendrán de la diferencia entre las pérdidas de potencia activa de los casos bases y los casos automatizados de las tablas XXXVII, XXXVIII y XXXIX.

Los tiempos que se utilizarán para cada escenario serán los valores detallados en la tabla XXXII los cuales serán multiplicados por los días del año. El factor de pérdidas del circuito 160 se indica en la tabla XXXIII, tomando en cuenta todo lo anterior se obtiene el ahorro monetario que tendrá la distribuidora por emplear la compensación de potencia reactiva.

Para analizar la viabilidad del proyecto se hace una proyección a 15 años, se toma como ingresos anuales el ahorro económico resultante por la reducción de pérdidas más el reconocimiento del VAD dentro del Pliego Tarifario, el cual consiste en un banco de capacitores reconocido de 900 MVAR. Los costos anuales corresponden al valor de los mantenimientos preventivos a los bancos de capacitores y automatismos. La inversión inicial es el costo de instalación y el valor los todos equipos.

En la tabla XL se detalla los ingresos, costos y beneficio neto por año. Para la proyección a futuro se toma en cuenta el crecimiento de carga, inflación de la moneda y una tasa de descuentos que se detalla a continuación:

- Tasa de crecimiento del circuito = 2 %
- Tasa de crecimiento de mantenimientos = 3 %
- Tasa de descuentos = 9,93 %

Tabla XL. **Ingresos y costos del circuito 160 automatizada**

AÑO	PERDIDAS EN MIN (kW)	PERDIDAS EN MED (kW)	PERDIDAS EN MAX (kW)	AHORRO PÉRDIDAS Q/AÑO	PLIEGO TARIFARIO Q/AÑO	COSTOS Q/AÑO	BENEFICIO NETO Q/AÑO
2020							-Q378,539.94
2021	10.90	18.00	34.70	Q131,940.02	Q27,144.00	Q12,681.52	Q146,402.50
2022	11.34	18.73	36.10	Q137,270.39	Q27,144.00	Q13,453.82	Q150,960.57
2023	11.80	19.48	37.56	Q142,816.12	Q27,144.00	Q14,273.16	Q155,686.96
2024	12.28	20.27	39.08	Q148,585.89	Q27,144.00	Q15,142.40	Q160,587.49
2025	12.77	21.09	40.66	Q154,588.76	Q27,144.00	Q16,064.57	Q165,668.19
2026	13.29	21.94	42.30	Q160,834.15	Q27,144.00	Q17,042.90	Q170,935.24
2027	13.82	22.83	44.01	Q167,331.84	Q27,144.00	Q18,080.82	Q176,395.03
2028	14.38	23.75	45.79	Q174,092.05	Q27,144.00	Q19,181.94	Q182,054.11
2029	14.96	24.71	47.64	Q181,125.37	Q27,144.00	Q20,350.12	Q187,919.25
2030	15.57	25.71	49.56	Q188,442.83	Q27,144.00	Q21,589.44	Q193,997.40
2031	16.20	26.75	51.56	Q196,055.93	Q27,144.00	Q22,904.24	Q200,295.69
2032	16.85	27.83	53.65	Q203,976.58	Q27,144.00	Q24,299.10	Q206,821.48
2033	17.53	28.95	55.81	Q212,217.24	Q27,144.00	Q25,778.92	Q213,582.32
2034	18.24	30.12	58.07	Q220,790.82	Q27,144.00	Q27,348.86	Q220,585.96
2035	18.98	31.34	60.41	Q229,710.76	Q27,144.00	Q29,014.40	Q227,840.36

Fuente: elaboración propia.

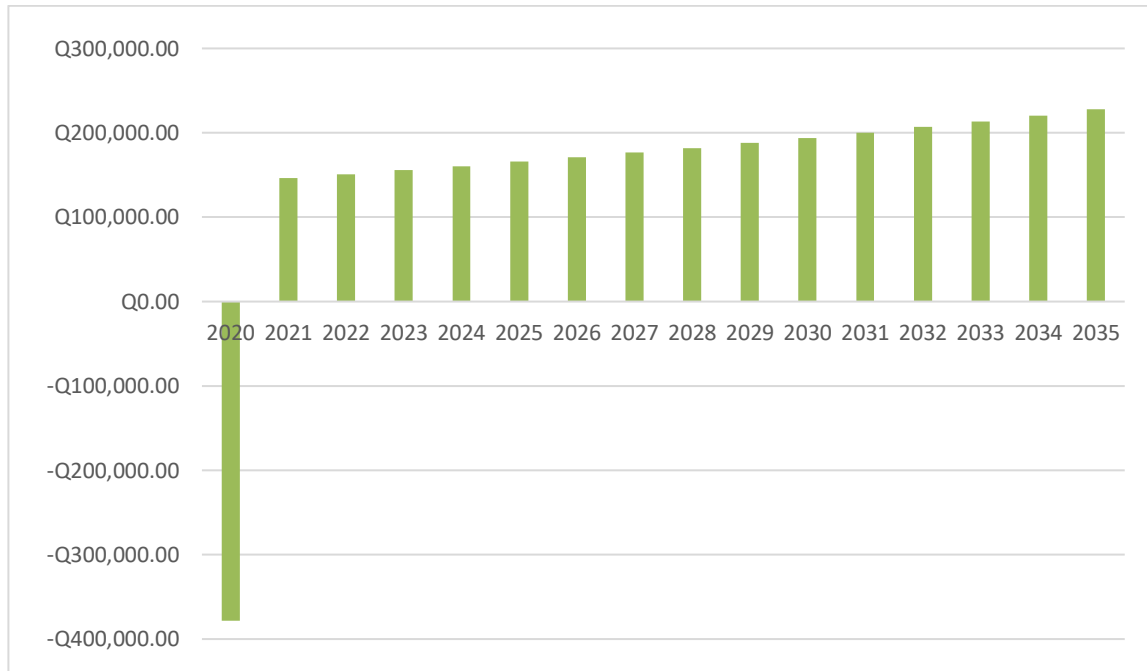
Tabla XLI. **Resumen financiero del circuito 160 automatizado**

<b>RESUMEN FINANCIERO</b>	
VNA NETO	Q 1 002 736,26
VNA BENEFICIO	Q 1 523 421,01
VNA COSTO	- Q 142 144,81
TIR	41 %
B/C	10,72

Fuente: elaboración propia.



Figura 55. **Beneficio neto del circuito 160 automatizado**



Fuente: elaboración propia.

El valor neto actual (VNA) es un método para evaluar una inversión que consiste en actualizar los ingresos y costos de un proyecto para determinar la viabilidad de esa inversión. Para ello se trae todos los flujos de caja al momento presente descontándolos a un tipo de interés determinado. Para determinar la rentabilidad de un proyecto utilizando el VNA se toman los siguientes criterios:

- VNA > 0: El proyecto genera mayores ingresos
- VNA = 0: El proyecto no genera ganancias ni pérdidas
- VNA < 0: El proyecto genera mayores pérdidas

La Tasa interna de retorno (TIR) es otra medida para evaluar la rentabilidad de una inversión. Es el porcentaje de beneficio o pérdida que ofrece un proyecto evaluando los ingresos y egresos del futuro. Para determinar la rentabilidad de un proyecto utilizando la TIR se toman los siguientes criterios:

- TIR > Tasa de descuento: El proyecto genera mayores ingresos
- TIR = Tasa de descuento: El proyecto no genera ganancias ni pérdidas
- TIR < Tasa de descuento: El proyecto genera mayores pérdidas

De acuerdo con los dos métodos anteriores se determina que el proyecto es rentable tomando en cuenta los criterios mencionados, ya que se obtiene un VNA igual a Q 1 002 736,26 y un TIR de 41 % se deduce que el proyecto genera ingresos mayores a los costos anuales y la inversión inicial.

También se observa que el proyecto es de rentabilidad alta debido a que se recupera la inversión inicial en tres años, teniendo en cuenta que la inversión inicial es de Q 378 539,94 por los cuatro bancos de capacitores de alta capacidad y los tres automatismos. De ultimo se observa un beneficio/costo favorable de 10,72 debido a que los ingresos del proyecto superan diez veces los costos anuales.

Tabla XLII. **Demanda máxima del circuito 160 y subestación Bárcenas automatizado**

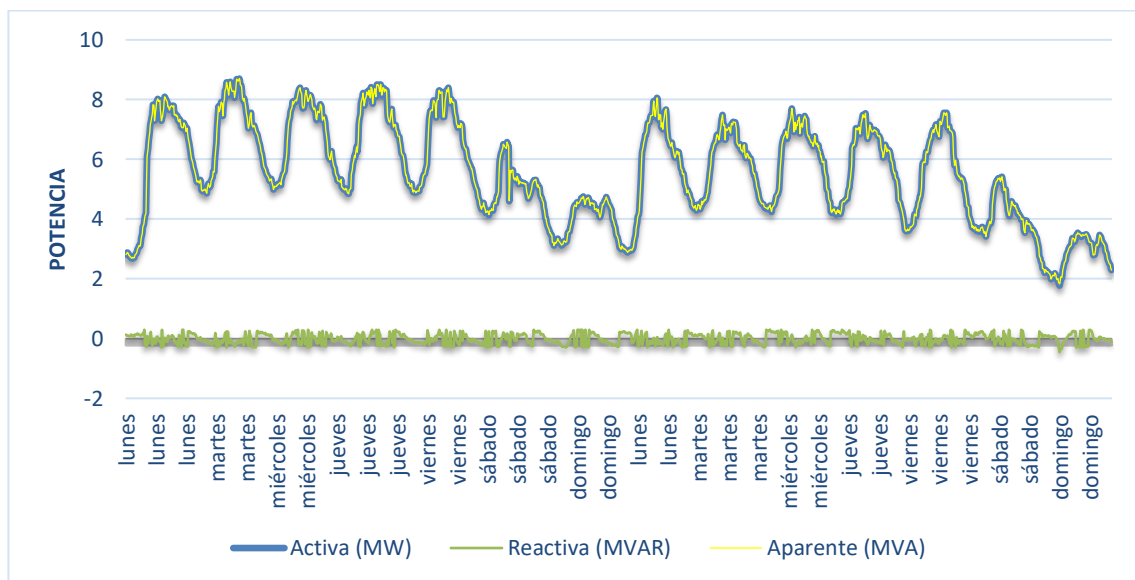
ELEMENTO	CAPACIDAD (MVA)	DEMANDA MÁXIMA			F.P.	% de Carga
		MVA	MW	MVA R		
Transformador Bárcenas	15/28	26,72	26,51	3,34	0,966	98,02 %
Circuito 160	8,77	8,44	8,43	0,44	0,999	96,23 %

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XLII se observa los nuevos valores obtenidos de demanda máxima del circuito 160 y la subestación Bárcenas junto con la compensación de potencia reactiva automatizada. Se obtiene un aumento del factor de potencia siendo cercano a 1 y una disminución en el porcentaje de carga alargando la vida útil de los equipos.

En la siguiente figura se puede observar la potencia activa y potencia aparente con un comportamiento idéntico y una potencia reactiva casi nula.

Figura 56. **Curva de demanda automatizada del circuito 160**



Fuente: elaboración propia.

### 5.3.3. Análisis económico del circuito 160 con compensación estática

Para el análisis del circuito 160 con compensación reactiva no automatizada se sigue el procedimiento utilizado en la sección 5.3.2 con la diferencia que todos los bancos de capacitores propuestos serán conectados fijamente.

Las pérdidas que se utilizan en los cálculos monetarios será la diferencia entre las pérdidas de potencia activa de los casos bases y los casos estáticos para cada escenario de las tablas XXXVII, XXXVIII y XXXIX. Los tiempos que se utilizarán para cada escenario serán los valores detallados en la tabla XXXII y el factor de pérdidas de la tabla XXXIII.

Tabla XLIII. Ingresos y costos del circuito 160 con compensación estática

AÑO	PERDIDAS EN MIN (kW)	PERDIDAS EN MED (kW)	PERDIDAS EN MAX (kW)	AHORRO PÉRDIDAS Q/AÑO	PLIEGO TARIFARIO Q/AÑO	COSTOS Q/AÑO	BENEFICIO NETO Q/AÑO
2020							-Q258,675.78
2021	2.50	5.20	34.70	Q71,942.63	Q27,144.00	Q6,642.52	Q92,444.11
2022	2.60	5.41	36.10	Q74,849.11	Q27,144.00	Q7,047.05	Q94,946.06
2023	2.71	5.63	37.56	Q77,873.02	Q27,144.00	Q7,476.21	Q97,540.80
2024	2.82	5.86	39.08	Q81,019.09	Q27,144.00	Q7,931.52	Q100,231.57
2025	2.93	6.09	40.66	Q84,292.26	Q27,144.00	Q8,414.55	Q103,021.71
2026	3.05	6.34	42.30	Q87,697.67	Q27,144.00	Q8,926.99	Q105,914.67
2027	3.17	6.59	44.01	Q91,240.65	Q27,144.00	Q9,470.65	Q108,914.01
2028	3.30	6.86	45.79	Q94,926.77	Q27,144.00	Q10,047.41	Q112,023.37
2029	3.43	7.14	47.64	Q98,761.82	Q27,144.00	Q10,659.29	Q115,246.52
2030	3.57	7.43	49.56	Q102,751.79	Q27,144.00	Q11,308.45	Q118,587.35
2031	3.71	7.73	51.56	Q106,902.97	Q27,144.00	Q11,997.13	Q122,049.84
2032	3.86	8.04	53.65	Q111,221.85	Q27,144.00	Q12,727.76	Q125,638.09
2033	4.02	8.36	55.81	Q115,715.21	Q27,144.00	Q13,502.88	Q129,356.33
2034	4.18	8.70	58.07	Q120,390.10	Q27,144.00	Q14,325.20	Q133,208.90
2035	4.35	9.05	60.41	Q125,253.86	Q27,144.00	Q15,197.61	Q137,200.26

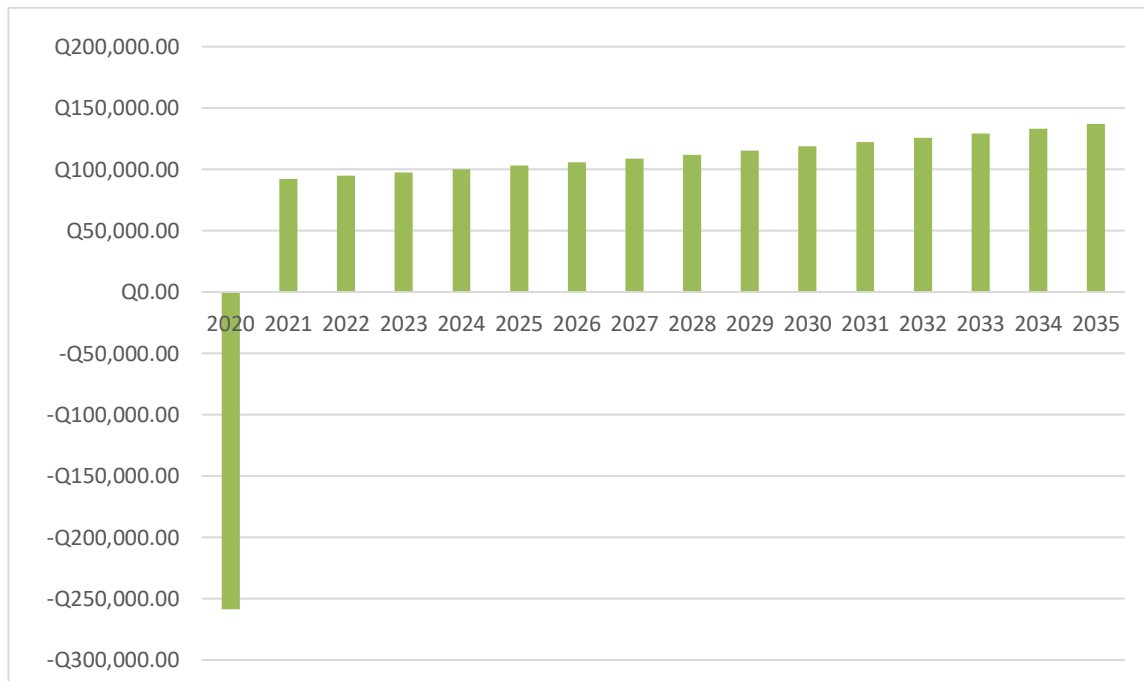
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIV. **Resumen financiero del circuito 160 con compensación estática**

<b>RESUMEN FINANCIERO</b>	
VNA NETO	Q 595 127,87
VNA BENEFICIO	Q 928 258,43
VNA COSTO	- Q 74 454,75
TIR	38 %
B/C	12,47

Fuente: elaboración propia.

Figura 57. **Beneficio neto del circuito 160 con compensación estática**



Fuente: elaboración propia.

Al consultar las tablas XLIII y XLIV se determina que el proyecto de compensación sin tomar en cuenta los equipos de automatización sigue siendo rentable. Se obtiene un VNA igual a Q 595 127,87 y un TIR de 38 %, basándonos en los criterios ubicados en la sección 5.3.2 se observa que se generan ingresos que superan los costos anuales y la inversión inicial.

Al no invertir en equipos de automatización disminuye la inversión inicial y los costos, debido a que no se gasta en servicios de mantenimientos anuales a los automatismos. Como resultado las pérdidas que se ahorran en los escenarios de demanda media y mínima se reducen y por consecuencia el ahorro monetario obtenido por la compensación es menor.

Se mantiene la relación beneficio/costo mayor a 10 debido a que tanto beneficios como costos disminuyen al no tener la automatización de los bancos de capacitores.

**Tabla XLV. Demanda mínima del circuito 160 y subestación Bárcenas con compensación estática**

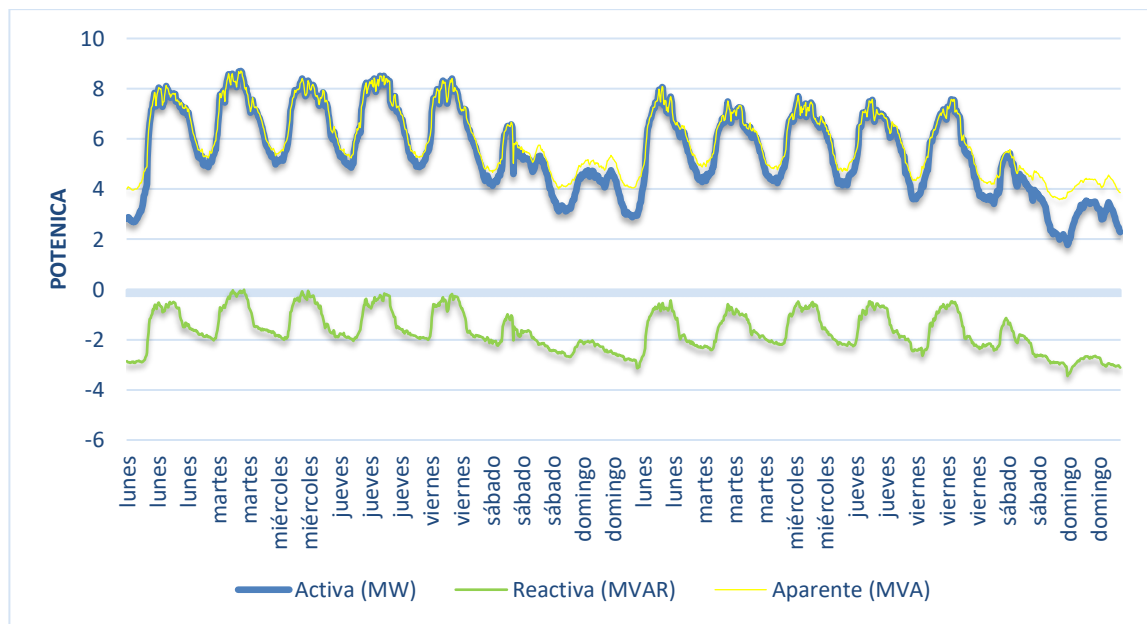
ELEMENTO	CAPACIDAD (MVA)	DEMANDA MÍNIMA			F.P.	% de Carga
		MVA	MW	MVA R		
Transformador Bárcenas	15/28	23,07	23,07	1,20	0,998	85,50 %
Circuito 160	8,77	5,27	4,99	-1,70	0,947	60,11 %

Fuente: elaboración propia.

Debido a que en el escenario de demanda máxima la compensación automatizada es igual a la compensación estática, en la tabla XLV se detalla la demanda de la subestación y circuito utilizando el escenario de demanda mínima, con el fin de exponer una disminución del factor de potencia en el circuito 160 causada por la potencia reactiva de retorno al tener la compensación máxima cuando no es necesaria.

En la siguiente grafica se puede observar que la potencia aparente se desfasa con la potencia activa en las horas donde se tiene potencia reactiva excedente.

Figura 58. **Curva de demanda con compensación estática del circuito 160**



Fuente: elaboración propia.

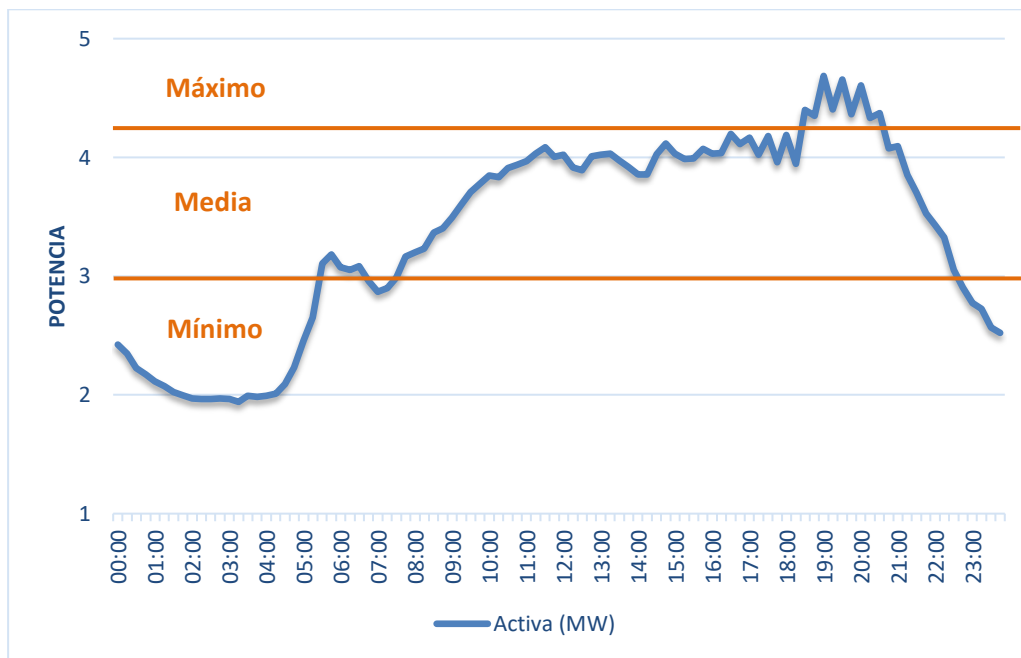
## 5.4. Análisis financiero de la compensación reactiva del circuito 246

Se realiza el método de análisis de compensación reactiva utilizado en la sección 5.3 aplicado al circuito 246, utilizando la data del día de mayor demanda registrado por ser el día más crítico donde podemos observar el mayor creciente de potencia reactiva en el circuito.

### 5.4.1. Simulaciones de compensación reactiva del circuito 246

En la figura 60 y la tabla XLVI se detallan los tres escenarios de demanda que se utilizarán para la simulación de flujos de carga para el circuito 246.

Figura 59. Escenarios de demanda del circuito 246



Fuente: elaboración propia.



Tabla XLVI. **Escenario de compensación circuito 246**

<b>ESCENARIO</b>	<b>DEMANDA (MW)</b>	<b>DEMANDA (MVAR)</b>	<b>HORAS</b>
Minima	1,960	0,240	7
Media	4,413	0,632	13
Maxima	4,042	0,988	4

Fuente: elaboración propia.

Utilizando la demanda del día más crítico de pérdidas se determina el factor de carga del circuito para posteriormente obtener el factor de pérdidas.

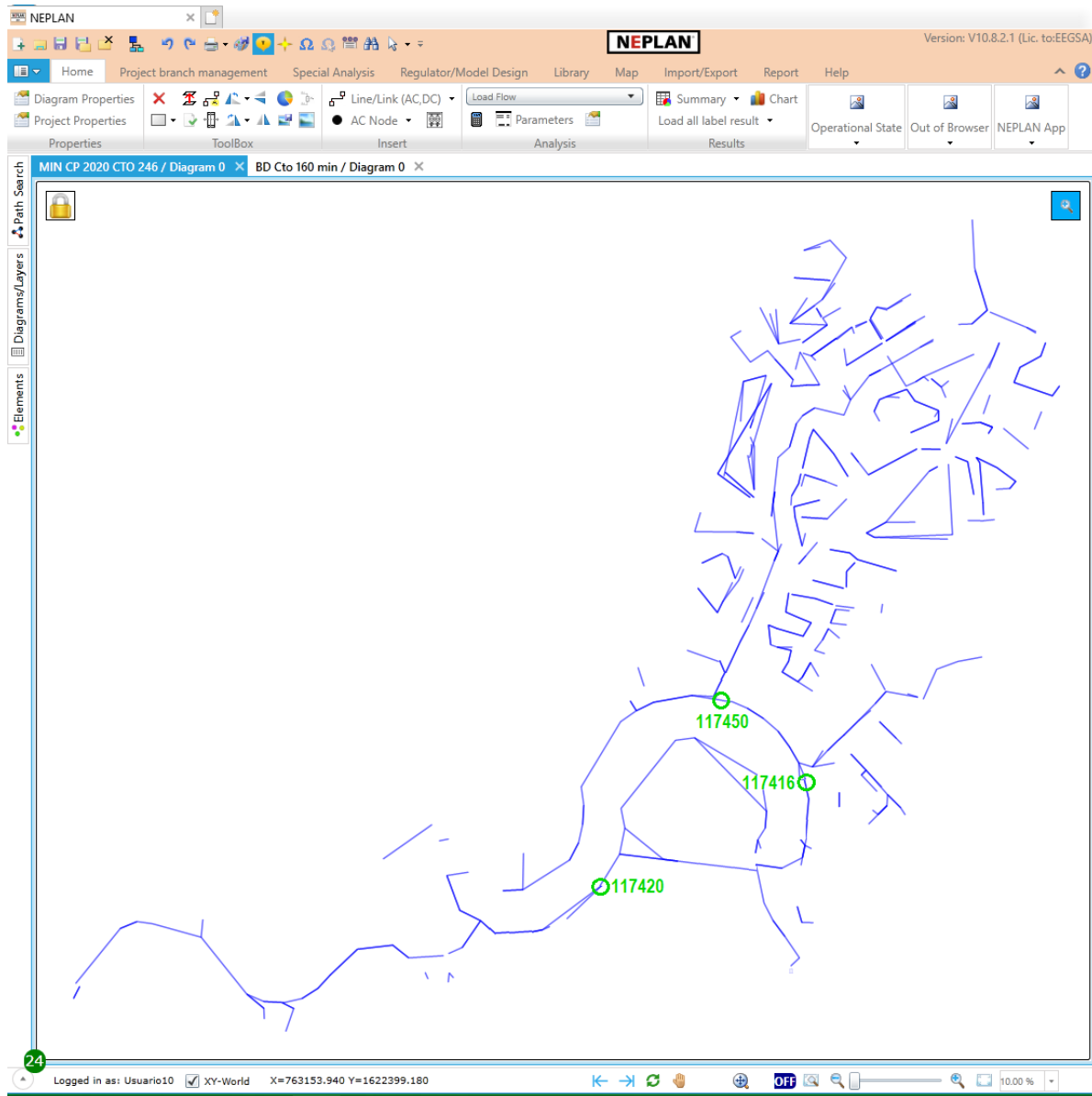
Tabla XLVII. **Factores del circuito 246**

Factor de carga	0,79
Factor de perdidas	0,68

Fuente: elaboración propia.

Al simulador Neplan se importa todos los elementos del circuito 246 incluyendo sus cargas de distribución y tres escenarios de compensación. Además, se agregan los bancos de capacitores con los valores y ubicaciones determinadas en el capítulo 4.

Figura 60. Simulación del circuito 246 en Neplan



Fuente: elaboración propia, empleando Neplan.

#### 5.4.1.1. Premisas de simulación circuito 246

Tomando en cuenta los casos y escenarios expuestos en la sección 5.3.1, se corren las simulaciones bajo las siguientes premisas generales:

- Se utiliza un sistema con frecuencia de 60 Hz.
- Se simula como un sistema asimétrico debido a que el circuito alimenta cargas trifásicas, bifásicas y monofásicas desbalanceadas.

En las tablas XLVIII, XLIX y L se establecen las premisas para cada simulación de acuerdo a las demandas de carga y la compensación correspondiente establecido en el capítulo 4, tabla XXIV.

Tabla XLVIII. Premisas de demanda mínima del circuito 246

DEMANDA MÍNIMA	DEMANDA ACTIVA (kW)	DEMANDA REACTIVA (kVAR)	COMPENSACIÓN REACTIVA (kVAR)	AUTOMÁTICOS		
				150 kVAR	300 kVAR	600 kVAR
Caso base	1 960,60	240,80	0,00	NO	NO	NO
Caso automatizado	1 960,60	240,80	300,00	NO	SI	NO
Caso estático	1 960,60	240,80	1 050,00	SI	SI	SI

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIX. Premisas de demanda media del circuito 246

DEMANDA MEDIA	DEMANDA ACTIVA (kW)	DEMANDA REACTIVA (kVAR)	COMPENSACIÓN REACTIVA (kVAR)	AUTOMÁTICOS		
				150 kVAR	300 kVAR	600 kVAR
Caso base	4 413,40	631,70	0,00	NO	NO	NO
Caso automatizado	4 413,40	631,70	600,00	NO	NO	SI
Caso estático	4 413,40	631,70	1 050,00	SI	SI	SI

Fuente: elaboración propia.

Tabla L. Premisas de demanda máxima del circuito 246

DEMANDA MÁXIMA	DEMANDA ACTIVA (kW)	DEMANDA REACTIVA (kVAR)	COMPENSACIÓN REACTIVA (kVAR)	AUTOMÁTICOS		
				150 kVAR	300 kVAR	600 kVAR
Caso base	4 041,80	987,60	0,00	NO	NO	NO
Caso automatizado	4 041,80	987,60	1 050,00	SI	SI	SI
Caso estático	4 041,80	987,60	1 050,00	SI	SI	SI

Fuente: elaboración propia.

#### 5.4.1.2. Resultados de simulación circuito 246

En las tablas LI, LII y LIII se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones de compensación reactiva en el circuito 246.

Tabla LI. **Resultados en Neplan con demanda mínima del circuito 246**

<b>DEMANDA MÍNIMA</b>	<b>PLOAD (kW)</b>	<b>QLOAD (kW)</b>	<b>PGEN (kW)</b>	<b>QGEN (kW)</b>	<b>PLOSSES (kW)</b>	<b>QLOSSES (kW)</b>
Caso base	1 960,60	240,80	1 964,70	249,70	4,10	8,90
Caso automatizado	1 960,60	240,80	1 963,70	- 49,90	3,10	6,80
Caso estático	1 960,60	240,80	1 965,00	- 799,80	4,50	9,90

Fuente: elaboración propia.

Tabla LII. **Resultados en Neplan con demanda media del circuito 246**

<b>DEMANDA MEDIA</b>	<b>PLOAD (kW)</b>	<b>QLOAD (kW)</b>	<b>PGEN (kW)</b>	<b>QGEN (kW)</b>	<b>PLOSSES (kW)</b>	<b>QLOSSES (kW)</b>
Caso base	4 413,40	631,70	4 435,50	678,80	22,10	47,10
Caso automatizado	4 413,40	631,70	4 430,80	81,40	17,40	38,40
Caso estático	4 413,40	631,70	4 433,60	- 367,60	20,20	43,60

Fuente: elaboración propia.

Tabla LIII. **Resultados en Neplan con demanda máxima del circuito 246**

<b>DEMANDA MÁXIMA</b>	<b>PLOAD (kW)</b>	<b>QLOAD (kW)</b>	<b>PGEN (kW)</b>	<b>QGEN (kW)</b>	<b>PLOSSES (kW)</b>	<b>QLOSSES (kW)</b>
Caso base	4 041,80	987,60	4 067,70	1 041,90	25,90	54,30
Caso automatizado	4 041,80	987,60	4 058,40	- 21,10	16,50	36,50
Caso estático	4 041,80	987,60	4 058,40	- 21,10	16,50	36,50

Fuente: elaboración propia.

#### 5.4.2. Análisis económico de la automatización del circuito 246

Se realiza el análisis económico de la sección 5.3.2 aplicado al circuito 246. Las pérdidas que se utilizan en los cálculos monetarios será la diferencia entre las pérdidas de potencia activa de los casos bases y los casos automatizados para cada escenario de las tablas LI, LII y LIII. Los tiempos que se utilizarán para cada escenario serán los valores detallados en la tabla XLVI y el factor de pérdidas de la tabla XLVII. El ingreso por el Pliego Tarifario consiste en la suma de las anualidades de dos bancos de capacitores reconocidos, de 600 MVAR y de 900 MVAR.

Tabla LIV. Ingresos y costos del circuito 246 automatizado

AÑO	PERDIDAS EN MIN (kW)	PERDIDAS EN MED (kW)	PERDIDAS EN MAX (kW)	AHORRO PÉRDIDAS Q/AÑO	PLIEGO TARIFARIO Q/AÑO	COSTOS Q/AÑO	BENEFICIO NETO Q/AÑO
2020							-Q222,661.15
2021	1.00	4.70	9.40	Q25,733.19	Q29,486.49	Q11,020.89	Q44,198.79
2022	1.04	4.89	9.78	Q26,772.81	Q29,486.49	Q11,692.06	Q44,567.24
2023	1.08	5.09	10.17	Q27,854.44	Q29,486.49	Q12,404.11	Q44,936.82
2024	1.13	5.29	10.59	Q28,979.76	Q29,486.49	Q13,159.52	Q45,306.73
2025	1.17	5.51	11.01	Q30,150.54	Q29,486.49	Q13,960.93	Q45,676.09
2026	1.22	5.73	11.46	Q31,368.62	Q29,486.49	Q14,811.15	Q46,043.95
2027	1.27	5.96	11.92	Q32,635.91	Q29,486.49	Q15,713.15	Q46,409.25
2028	1.32	6.20	12.40	Q33,954.40	Q29,486.49	Q16,670.08	Q46,770.81
2029	1.37	6.45	12.90	Q35,326.16	Q29,486.49	Q17,685.29	Q47,127.36
2030	1.43	6.71	13.43	Q36,753.34	Q29,486.49	Q18,762.33	Q47,477.50
2031	1.49	6.98	13.97	Q38,238.17	Q29,486.49	Q19,904.95	Q47,819.71
2032	1.55	7.27	14.53	Q39,782.99	Q29,486.49	Q21,117.16	Q48,152.32
2033	1.61	7.56	15.12	Q41,390.23	Q29,486.49	Q22,403.20	Q48,473.52
2034	1.67	7.87	15.73	Q43,062.39	Q29,486.49	Q23,767.56	Q48,781.33
2035	1.74	8.18	16.37	Q44,802.11	Q29,486.49	Q25,215.00	Q49,073.60

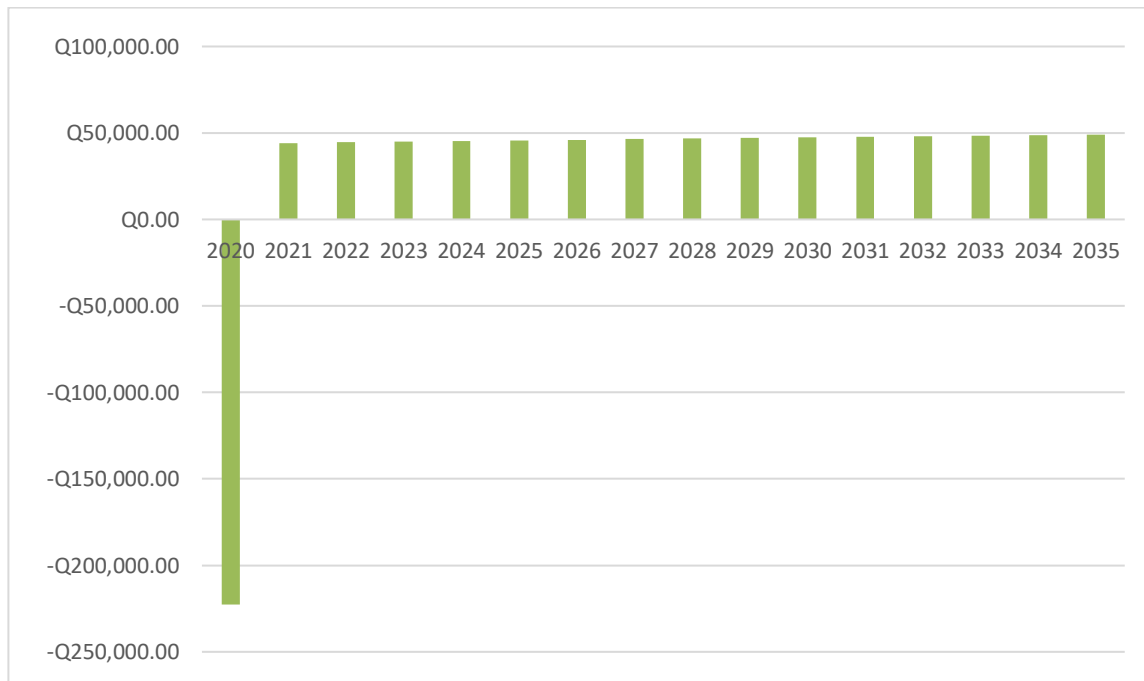
Fuente: elaboración propia.

Tabla LV. **Resumen financiero del circuito 246 automatizado**

<b>RESUMEN FINANCIERO</b>	
VNA NETO	Q 142 197,18
VNA BENEFICIO	Q 488 389,45
VNA COSTO	- Q 123 531,11
TIR	19 %
B/C	3,95

Fuente: elaboración propia.

Figura 61. **Beneficio neto del circuito 246 automatizado**



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a los criterios de los métodos de VNA y TIR, se observa que el proyecto de compensación automatizada es rentable. Obteniendo un VNA igual a Q 142 197,18 y un TIR de 19 % se deduce que se recupera la inversión realizada en cuatro años.

**Tabla LVI. Demanda máxima del circuito 246 y subestación Naranjo automatizado**

ELEMENTO	CAPACIDAD (MVA)	DEMANDA MÁXIMA			F.P.	% de Carga
		MVA	MW	MVAR		
Transformador Naranjo	10/14	7,70	7,69	-0,11	0,999	54,95 %
Circuito 246	8,77	4,04	4,03	-0,02	0,999	46,09 %

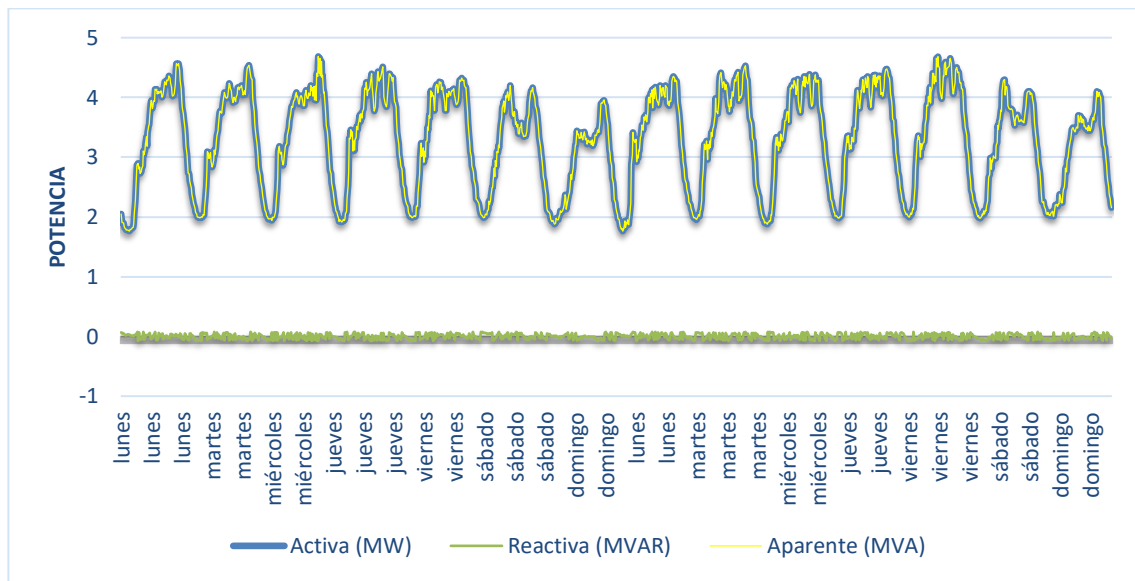
Fuente: elaboración propia.

En la tabla LVI se observa los nuevos valores obtenidos de demanda máxima del circuito 246 y la subestación Naranjo junto con la compensación de potencia reactiva automatizada. Se obtiene un aumento del factor de potencia siendo casi 1 y una disminución en el porcentaje de carga alargando la vida útil de los equipos.



En la siguiente figura se puede observar la potencia activa y potencia aparente con un comportamiento idéntico y una potencia reactiva casi nula.

Figura 62. **Curva de demanda automatizada del circuito 246**



Fuente: elaboración propia.

### 5.4.3. **Análisis económico del circuito 246 con compensación estática**

Para el análisis del circuito 246 con compensación reactiva no automatizada se sigue el procedimiento utilizado en la sección 5.4.2 con la diferencia que todos los bancos de capacitores propuestos serán conectados fijamente.

Las pérdidas que se utilizan en los cálculos monetarios será la diferencia entre las pérdidas de potencia activa de los casos bases y los casos estáticos para cada escenario de las tablas LI, LII y LIII. Los tiempos que se utilizarán para cada escenario serán los valores detallados en la tabla XLVI y el factor de pérdidas de la tabla XLVII.

**Tabla LVII. Ingresos y costos del circuito 246 con compensación estática**

AÑO	PERDIDAS EN MIN (kW)	PERDIDAS EN MED (kW)	PERDIDAS EN MAX (kW)	AHORRO PÉRDIDAS Q/AÑO	PLIEGO TARIFARIO Q/AÑO	COSTOS Q/AÑO	BENEFICIO NETO Q/AÑO
2020							-Q102,796.99
2021	-0.40	1.90	9.40	Q14,485.57	Q29,486.49	Q4,981.89	Q38,990.17
2022	-0.42	1.98	9.78	Q15,070.79	Q29,486.49	Q5,285.29	Q39,271.99
2023	-0.43	2.06	10.17	Q15,679.65	Q29,486.49	Q5,607.16	Q39,558.98
2024	-0.45	2.14	10.59	Q16,313.11	Q29,486.49	Q5,948.64	Q39,850.96
2025	-0.47	2.23	11.01	Q16,972.16	Q29,486.49	Q6,310.91	Q40,147.74
2026	-0.49	2.32	11.46	Q17,657.83	Q29,486.49	Q6,695.24	Q40,449.08
2027	-0.51	2.41	11.92	Q18,371.21	Q29,486.49	Q7,102.98	Q40,754.71
2028	-0.53	2.51	12.40	Q19,113.41	Q29,486.49	Q7,535.56	Q41,064.34
2029	-0.55	2.61	12.90	Q19,885.59	Q29,486.49	Q7,994.47	Q41,377.61
2030	-0.57	2.71	13.43	Q20,688.96	Q29,486.49	Q8,481.33	Q41,694.12
2031	-0.59	2.82	13.97	Q21,524.80	Q29,486.49	Q8,997.85	Q42,013.44
2032	-0.62	2.94	14.53	Q22,394.40	Q29,486.49	Q9,545.82	Q42,335.07
2033	-0.64	3.06	15.12	Q23,299.13	Q29,486.49	Q10,127.16	Q42,658.47
2034	-0.67	3.18	15.73	Q24,240.42	Q29,486.49	Q10,743.90	Q42,983.01
2035	-0.70	3.31	16.37	Q25,219.73	Q29,486.49	Q11,398.20	Q43,308.02

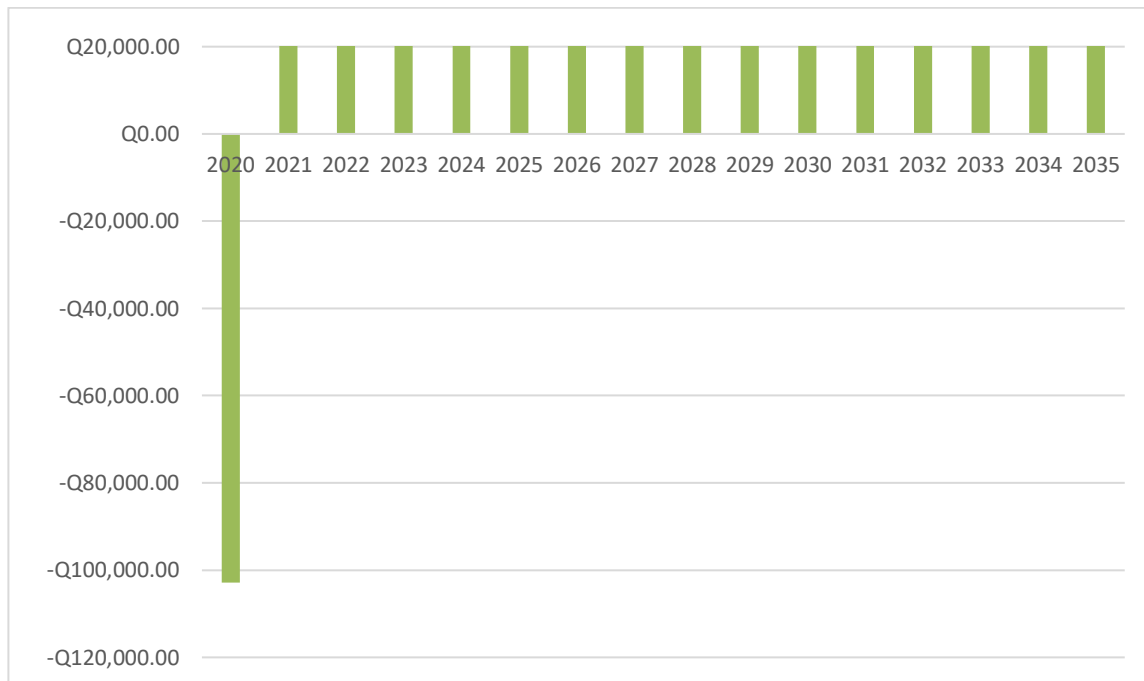
Fuente: elaboración propia.

Tabla LVIII. **Resumen financiero del circuito 246 con compensación estática**

<b>RESUMEN FINANCIERO</b>	
VNA NETO	Q 218 177,13
VNA BENEFICIO	Q 376 815,20
VNA COSTO	- Q 55 841,08
TIR	38 %
B/C	6,75

Fuente: elaboración propia.

Figura 63. **Beneficio neto del circuito 246 con compensación estática**



Fuente: elaboración propia.

Al consultar las tablas LVII y LVIII se determina que el proyecto de compensación sin tomar en cuenta los equipos de automatización es de mayor rentabilidad, debido a que la inversión es menor y el ahorro de pérdidas no presenta gran diferencia. Se obtiene un VNA igual a Q 218 177,13 y un TIR de 38 % donde se observa que el TIR es del mismo valor que el proyecto de compensación estática sobre el circuito 160.

Obteniendo un beneficio económico similar al proyecto del circuito 160, pero con una inversión inicial menor, la compensación estática resulta más atractiva. Cabe resaltar que en el escenario de demanda mínima las pérdidas de potencia son de valor negativo debido a que la potencia reactiva proporcionada por la compensación supera a la potencia reactiva del caso base. Derivado de lo anterior, las pérdidas de potencia en demanda mínima son mayores con la compensación reactiva convirtiendo el beneficio en costo.

**Tabla LIX. Demanda mínima del circuito 246 y subestación Naranjo con compensación estática**

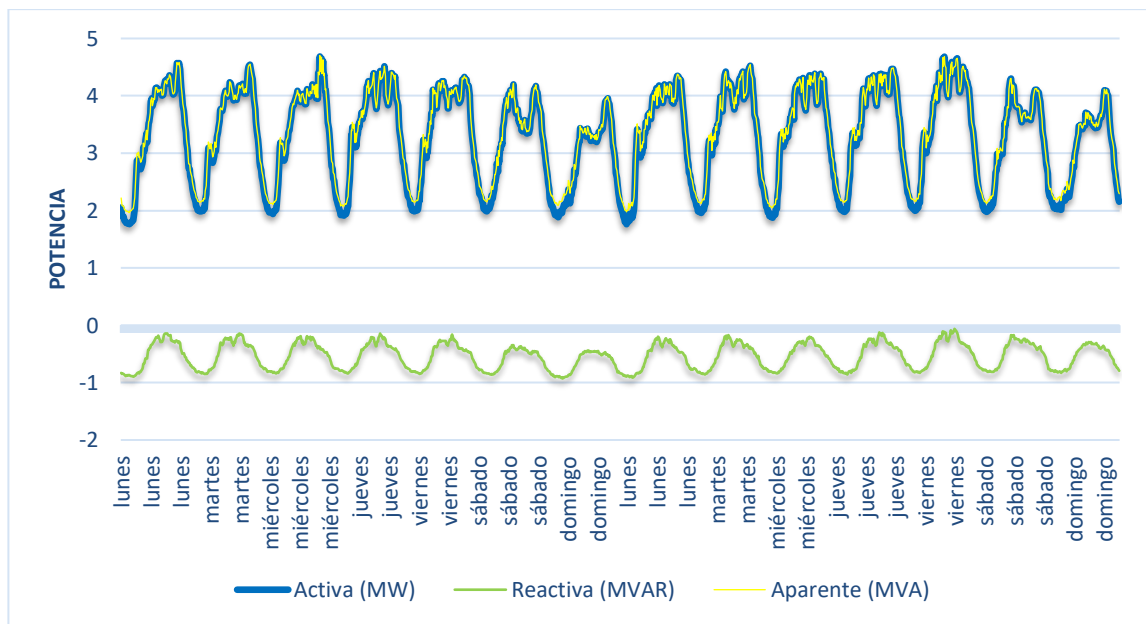
ELEMENTO	CAPACIDAD (MVA)	DEMANDA MÍNIMA			F.P.	% de Carga
		MVA	MW	MVAR		
Transformador Naranjo	10/14	5,68	5,61	-0,89	0,987	40,57 %
Circuito 246	8,77	2,12	1,96	-0,80	0,926	24,14 %

Fuente: elaboración propia.

Debido a que en el escenario de demanda máxima la compensación automatizada es igual a la compensación estática, en la tabla LIX se detalla la demanda de la subestación y circuito utilizando el escenario de demanda mínima, se puede observar un factor de potencia menor causada por la potencia reactiva de retorno al tener la compensación máxima cuando no es necesaria.

En la siguiente grafica se puede observar que la potencia aparente se desfasa con la potencia activa en las horas donde se tiene potencia reactiva excedente.

Figura 64. **Curva de demanda con compensación estática del circuito 246**



Fuente: elaboración propia.



## CONCLUSIONES

1. Debido al crecimiento constante de la demanda de acuerdo a la población, el uso de controladores inteligentes mejora la eficiencia de la red de distribución manteniendo el factor de potencia cercano a uno, así bajando el porcentaje de utilización de los circuitos y subestaciones para poder suministrar a más usuarios.
2. El reconocimiento de los bancos de capacitores dentro del pliego tarifario incrementa la viabilidad de los proyectos de compensación para el distribuidor al recuperar parte de la inversión durante la vida útil del equipo.
3. La utilización de controladores inteligentes en bancos de capacitores para la compensación automatizada de potencia reactiva es beneficioso en niveles altos de demanda de potencia reactiva en la red.
4. Como las pérdidas de potencia representan un gasto económico para el distribuidor, el impacto que tiene la compensación automatizada sobre un circuito de carga industrial es alto debido a que el retorno grande potencia reactiva al utilizar compensación estática en horarios no laborales representa grandes pérdidas de potencia en la red.

5. El beneficio económico de automatizar la compensación reactiva en circuitos de carga industrial es mayor a la compensación estática debido a la disminución de ahorro en pérdidas en horarios fuera de la demanda máxima.
  
6. El impacto que tiene la compensación automatizada sobre un circuito de carga residencial-comercial es bajo debido al alto costo de adquirir e instalar los controladores inteligentes y el poco ahorro que se obtiene.



## RECOMENDACIONES

1. Se demuestra que la utilización de controladores inteligentes para automatizar la compensación de potencia reactiva es beneficioso para el distribuidor dependiendo del nivel de potencia reactiva, por lo tanto, debe ser considerada el uso de compensación estática en conjunto de la automatizada para maximizar el beneficio al distribuidor.
2. Realizar un estudio para determinar el límite de potencia reactiva donde el uso de controladores inteligentes presenta mayor retorno económico para la distribuidora a comparación de la compensación puramente estática.
3. Debido al alto costo de utilizar los controladores inteligentes, es de interés buscar alternativas más económicas para la compensación de potencia reactiva en circuitos de carga residencial-comercial.
4. Utilizar el estudio propuesto en los circuitos de carga industrial con altos niveles de demanda reactiva para obtener una red de mayor eficiencia.
5. Realizar un estudio para determinar los efectos sobre la tensión que provocan el uso de controladores inteligentes para la compensación de potencia reactiva automatizada.



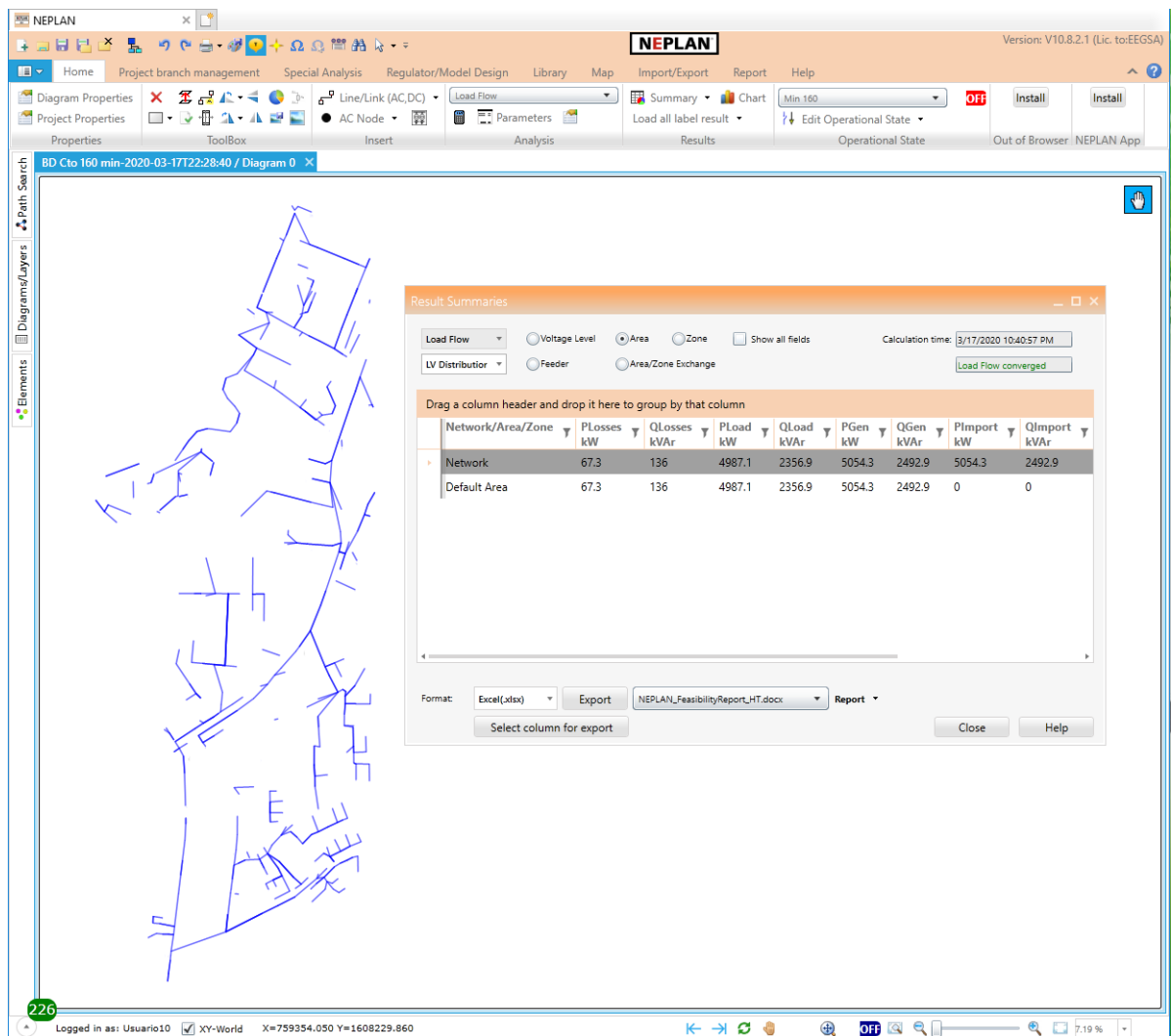
## BIBLIOGRAFÍA

1. BECKWITH ELECTRIC CO.INC. *Controlador M-6283A*. [en línea]. <<http://www.beckwithelectric.com/products/m-6283a.html>>. [Consulta: 10 noviembre 2019].
2. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *Ley general de electricidad*, Guatemala: CNEE, 1999.104 p.
3. \_\_\_\_\_. *Normas técnicas del servicio de distribución -NTSD- resolución CNEE No. 09-99*, Guatemala: CNEE, 1999. 114 p.
4. ENRÍQUEZ HARPER, Gilberto. *Sistemas de transmisión y distribución de potencia eléctrica*. México: LIMUSA, 2005. 632 p.
5. GARCIA ÁLVAREZ, José. *Potencia eléctrica*. [en línea]. <[http://www.asifunciona.com/electrotecnia/ke\\_potencia/ke\\_potencia\\_elect\\_1.htm](http://www.asifunciona.com/electrotecnia/ke_potencia/ke_potencia_elect_1.htm)>. [ Consulta: 9 octubre 2019].
6. GRAINGER, John; STEVENSON JR., William. *Análisis de sistemas de potencia*. México: McGRAW-HILL, 1996. 574 p.
7. Institute of Electrical and Electronics Engineers. *Standar for shunt power capacitors, Std 18*. New York: IEEE 2002. 27 p.
8. \_\_\_\_\_. *Guide for application of shunt power capacitors, Std 1036*. New York: IEEE 2010. 85 p.

9. RTR ENERGIA. *Compensación de energía reactiva*. [en línea].  
<[http://www.rtrenergia.es/downloads/reactiva\\_2012.pdf](http://www.rtrenergia.es/downloads/reactiva_2012.pdf)>.  
[Consulta: 8 de octubre 2019].
  
10. UNIVERSIDAD DEL ATLÁNTICO. *Corrección del factor de potencia y control de la demanda*. [en línea].  
<<http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Tecnologias/factor.pdf>>  
[ Consulta: 8 octubre 2019].

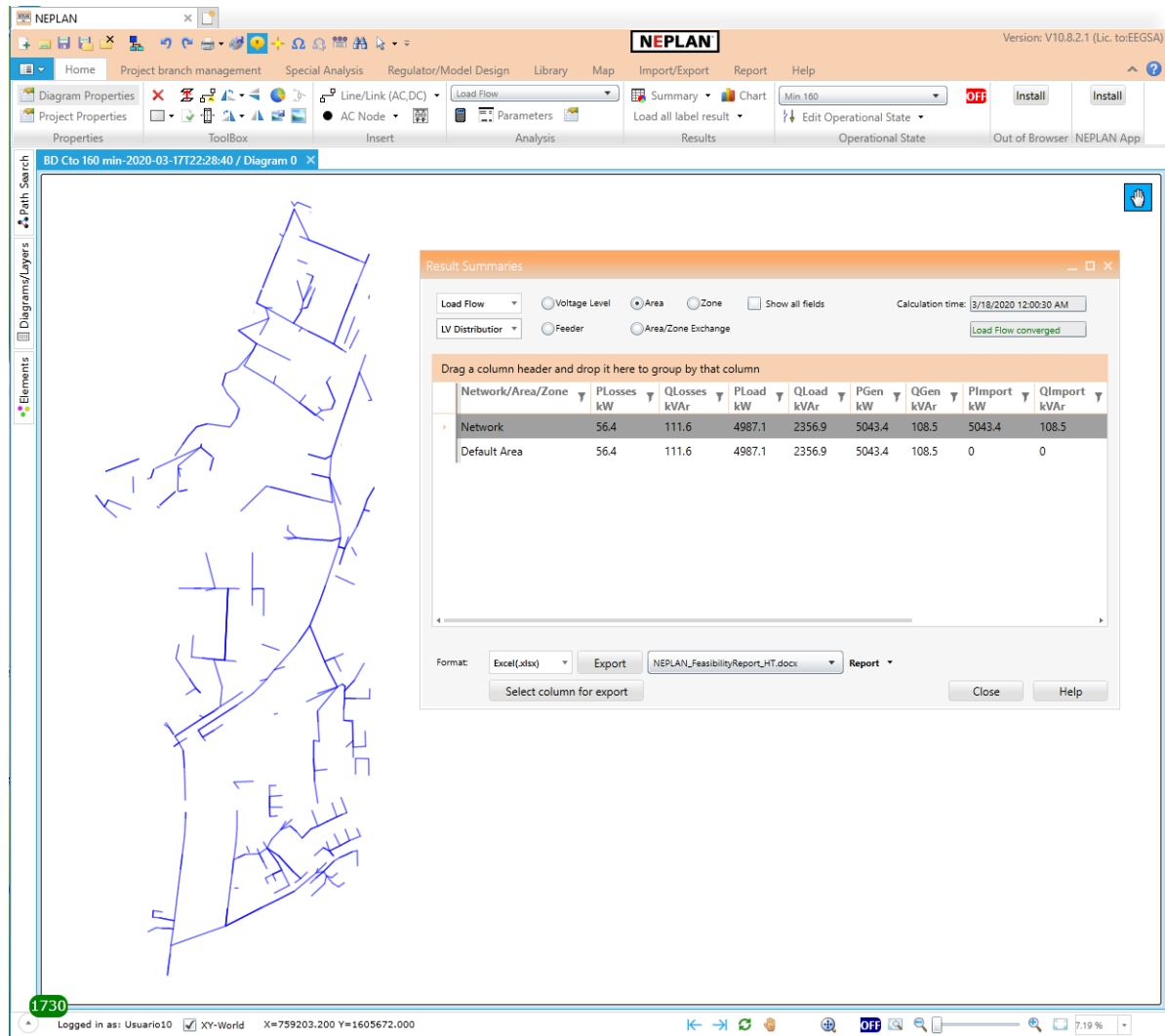
# APÉNDICES

## Apéndice 1. Flujo de carga en demanda mínima con caso base del circuito 160



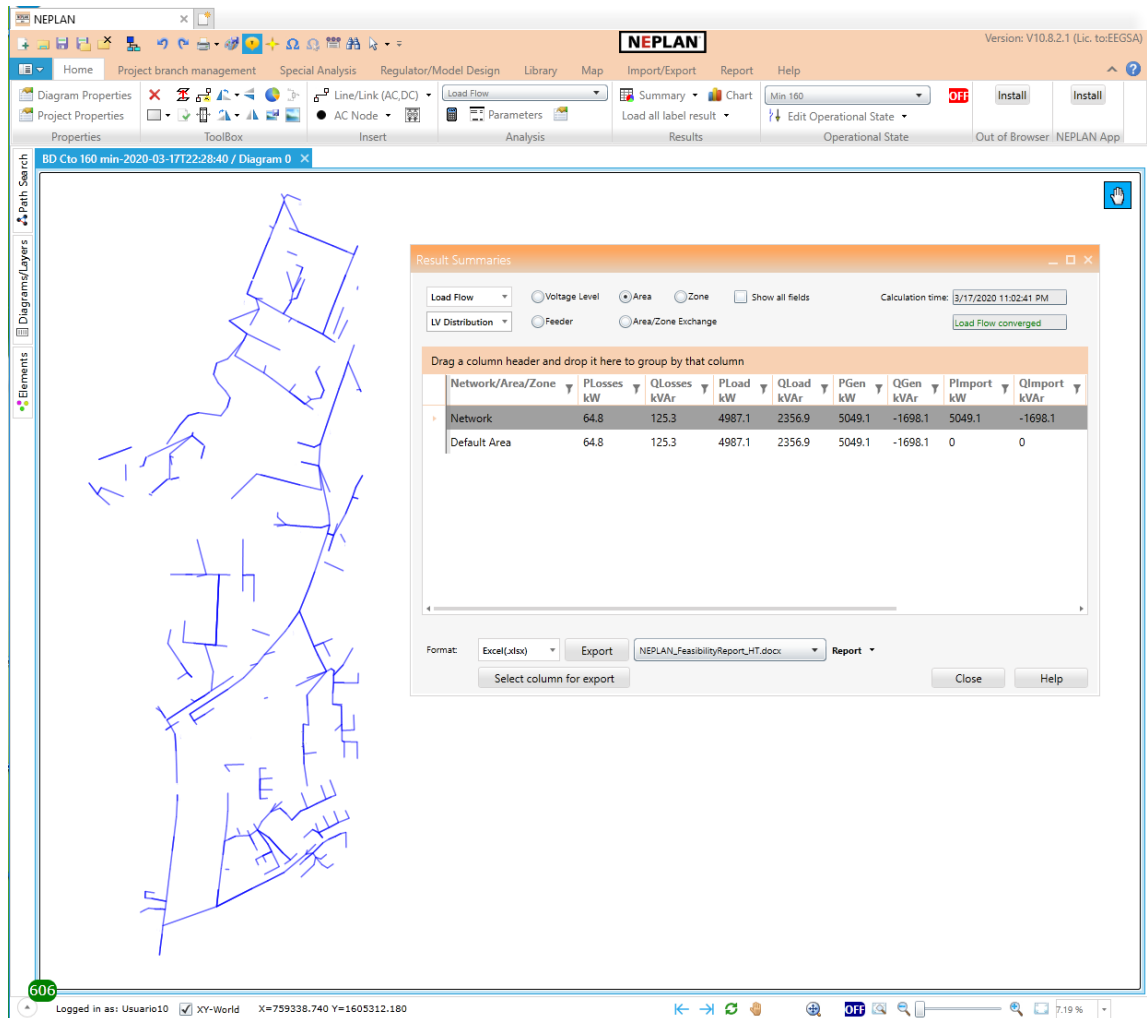
Fuente: elaboración propia, empleando Neplan.

## Apéndice 2. Flujo de carga en demanda mínima con caso automatizado del circuito 160



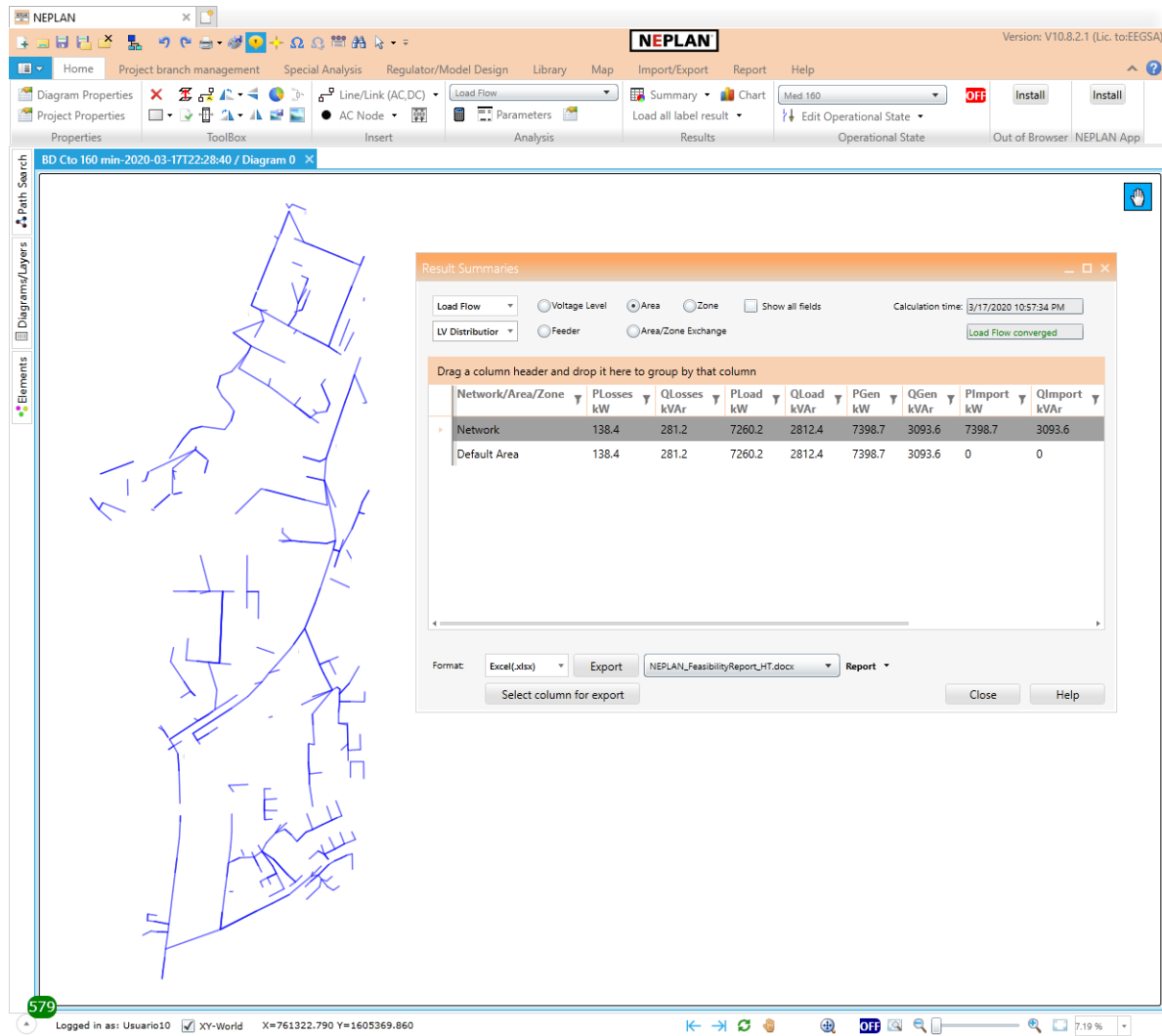
Fuente: elaboración propia, empleando Neplan.

### Apéndice 3. Flujo de carga en demanda mínima con caso estático del circuito 160



Fuente: elaboración propia, empleando Neplan.

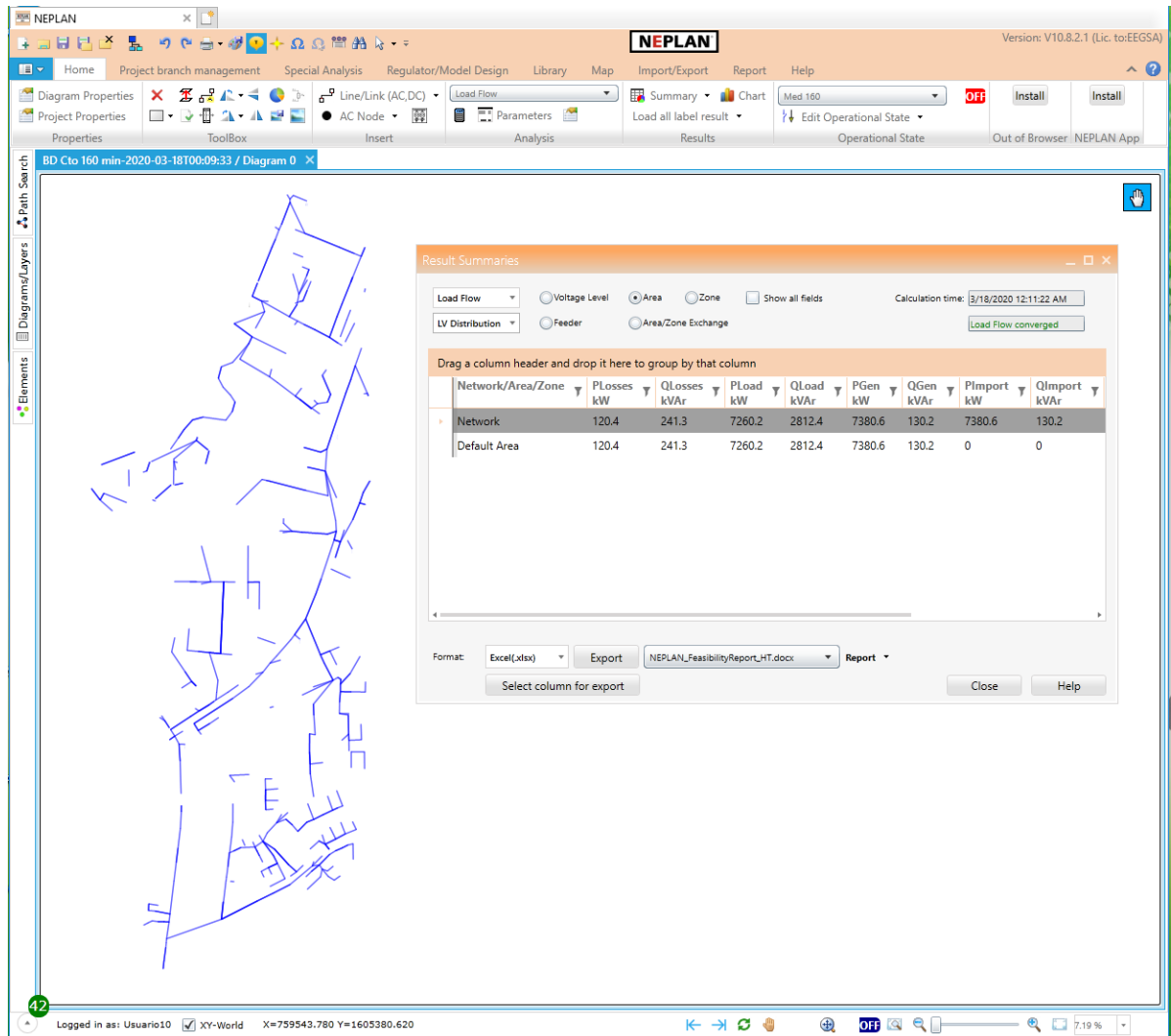
## Apéndice 4. Flujo de carga en demanda media con caso base del circuito 160



Fuente: elaboración propia, empleando Neplan.

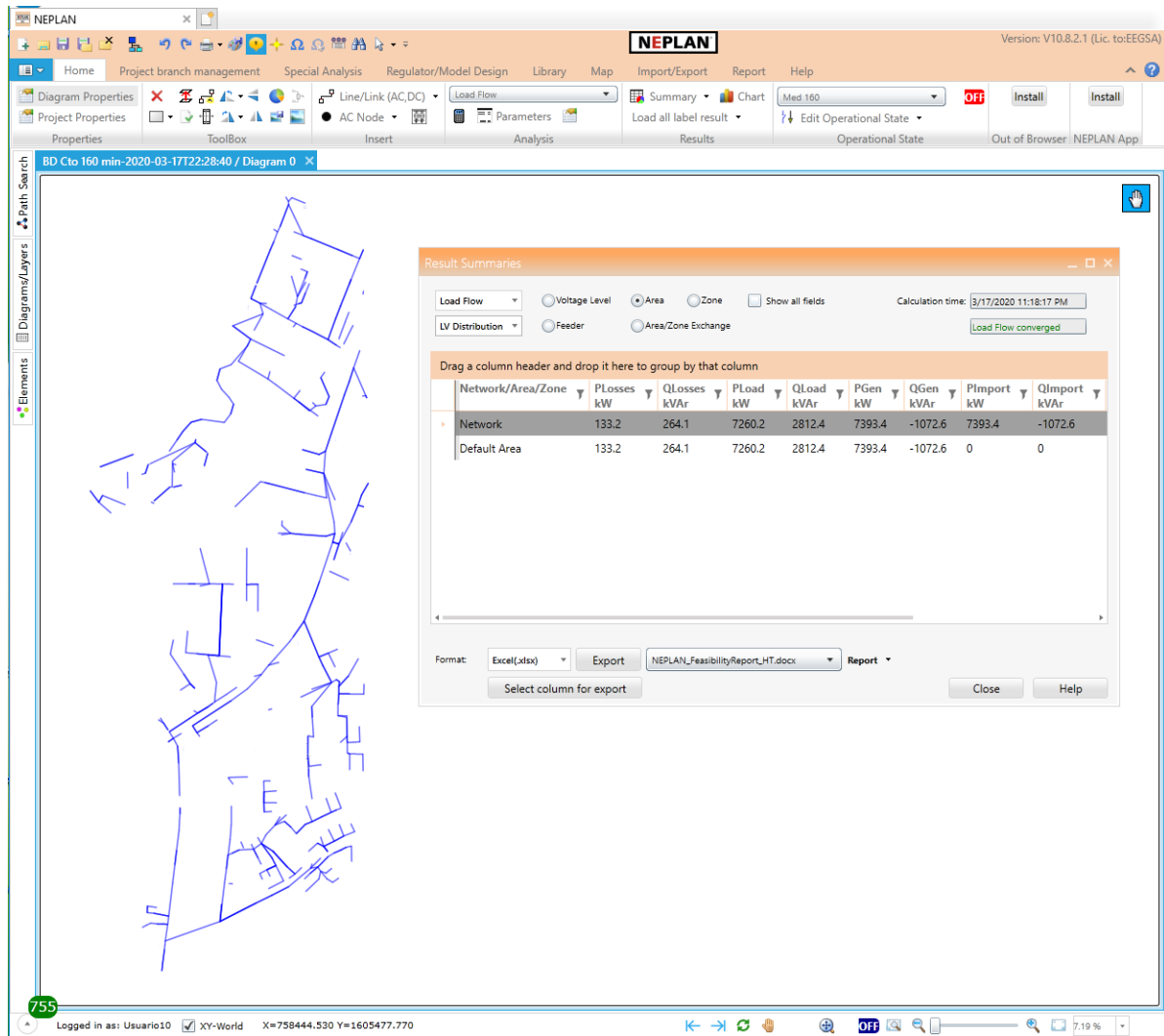


## Apéndice 5. Flujo de carga en demanda media con caso automatizado del circuito 160



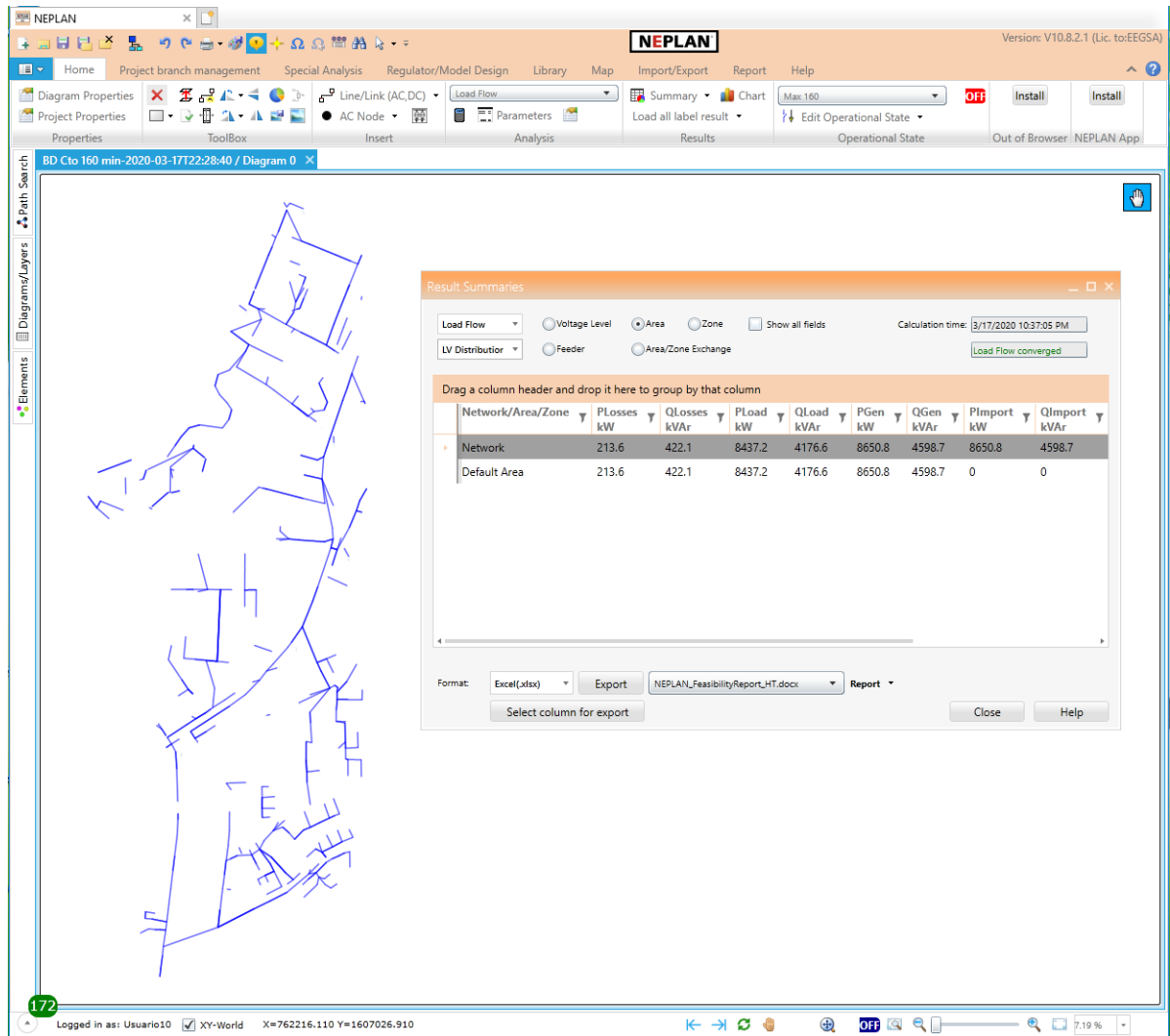
Fuente: elaboración propia, empleando Neplan.

## Apéndice 6. Flujo de carga en demanda media con caso estático del circuito 160



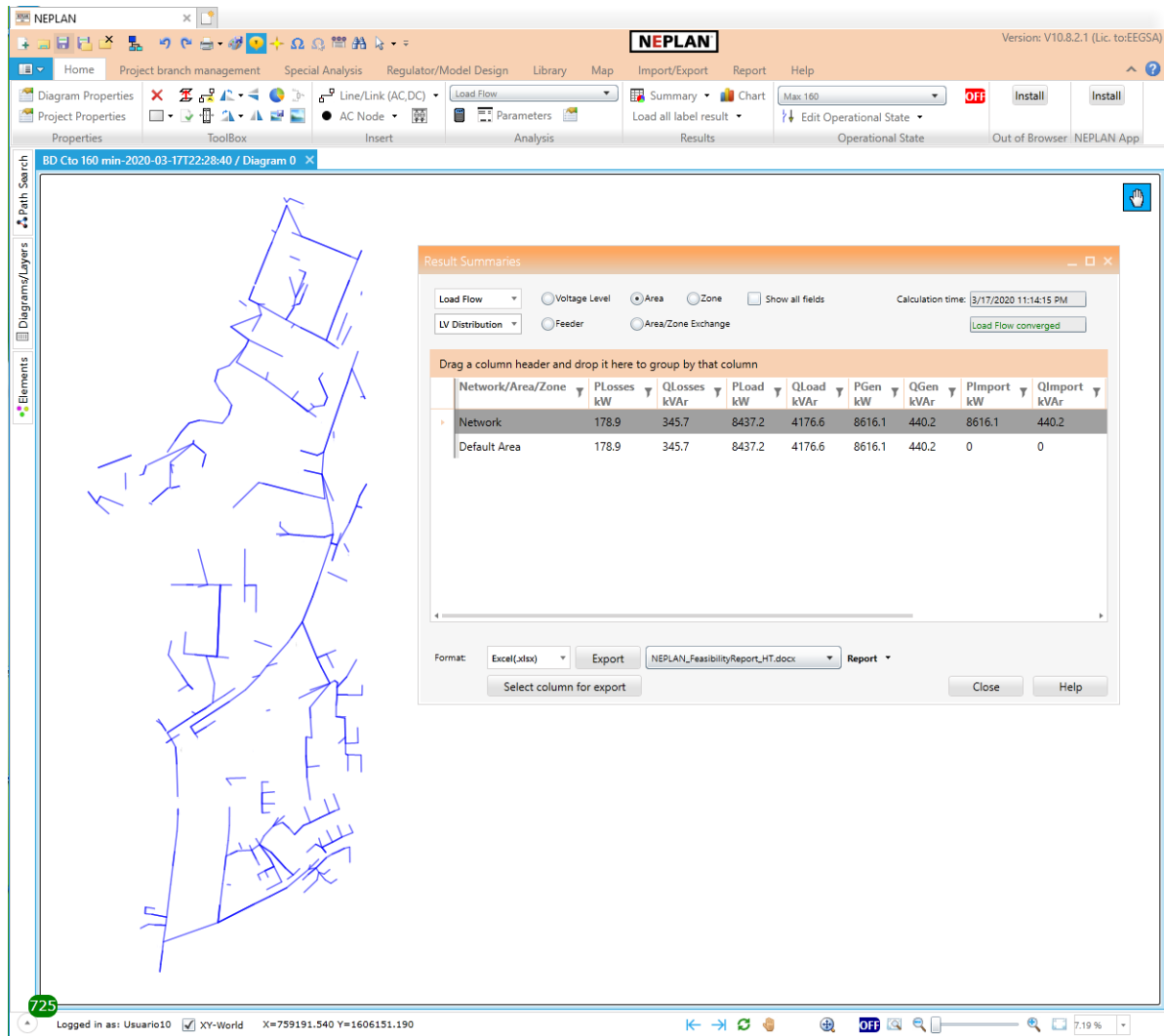
Fuente: elaboración propia, empleando Neplan.

## Apéndice 7. Flujo de carga en demanda máxima con caso base del circuito 160



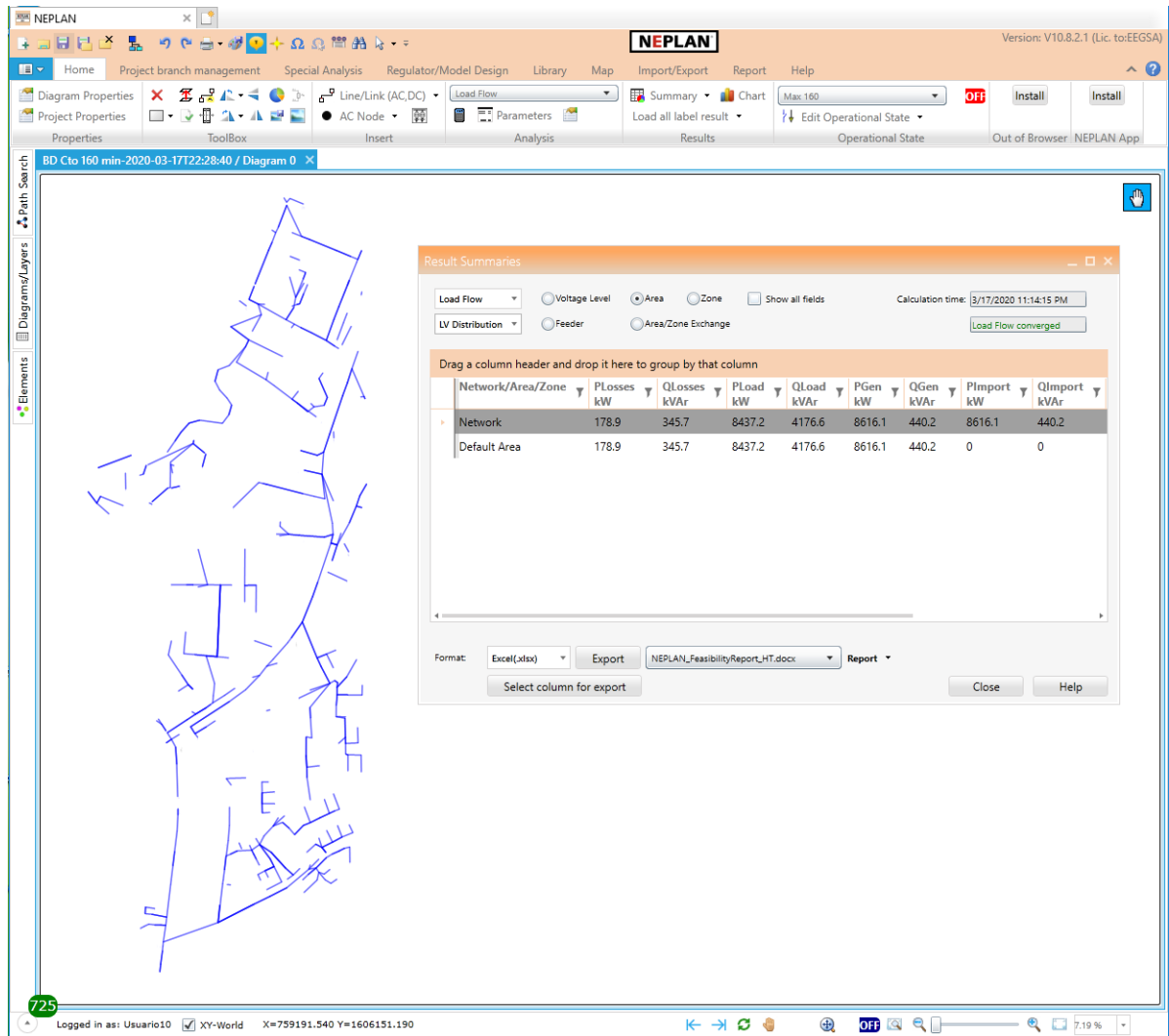
Fuente: elaboración propia, empleando Neplan.

## Apéndice 8. Flujo de carga en demanda máxima con caso automatizado del circuito 160



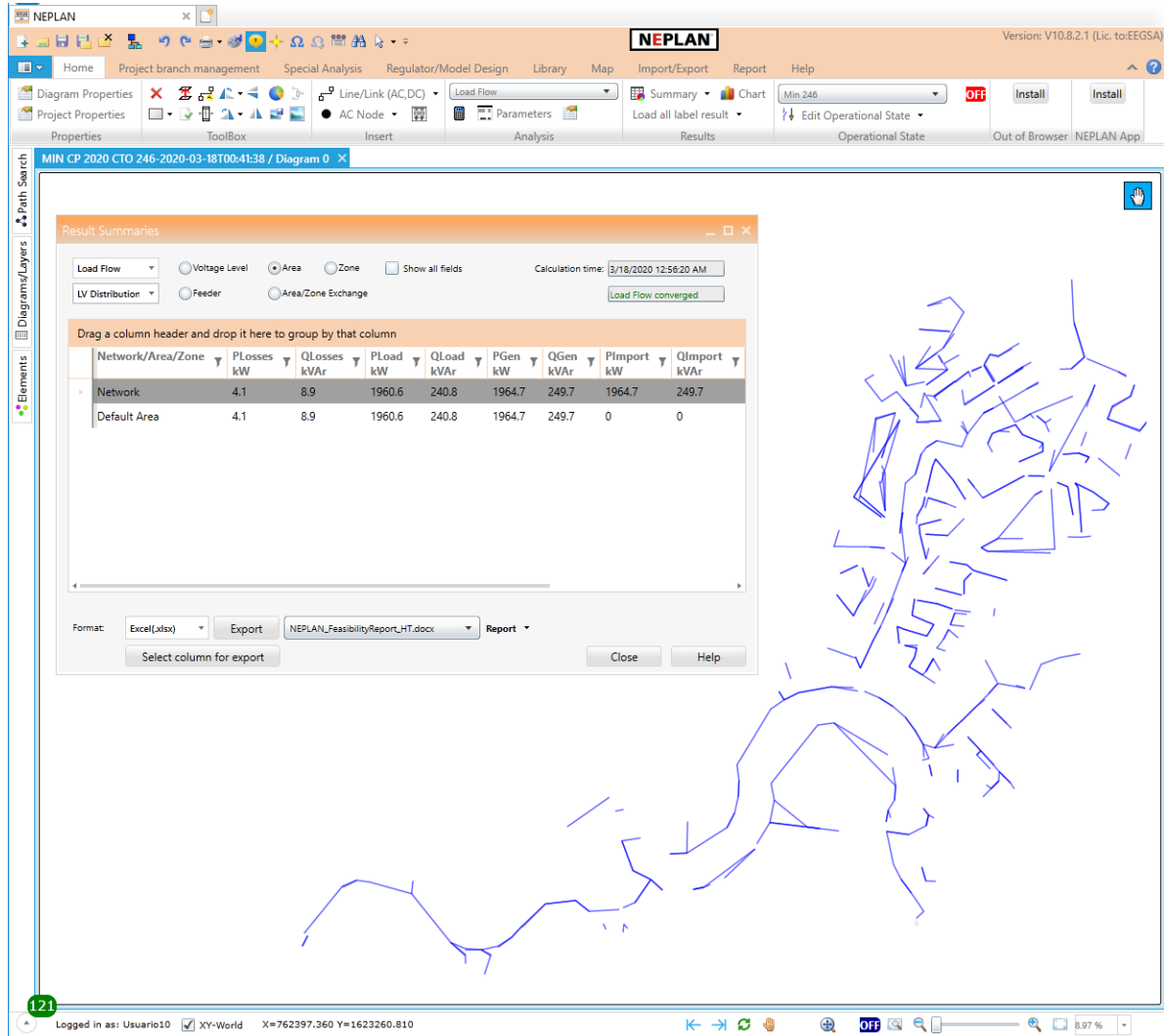
Fuente: elaboración propia, empleando Neplan.

## Apéndice 9. Flujo de carga en demanda máxima con caso estático del circuito 160



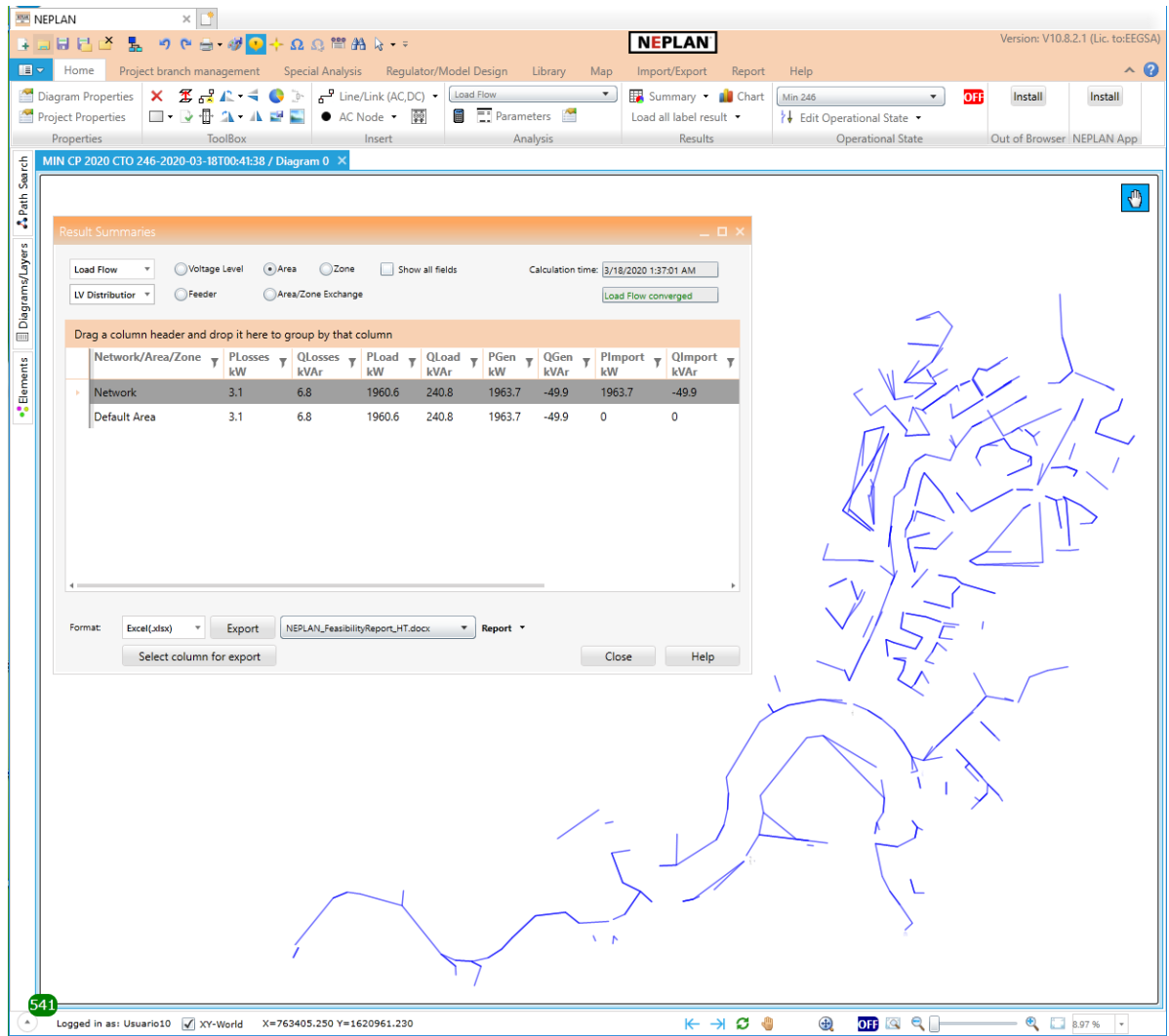
Fuente: elaboración propia, empleando Neplan.

## Apéndice 10. Flujo de carga en demanda mínima con caso base del circuito 246



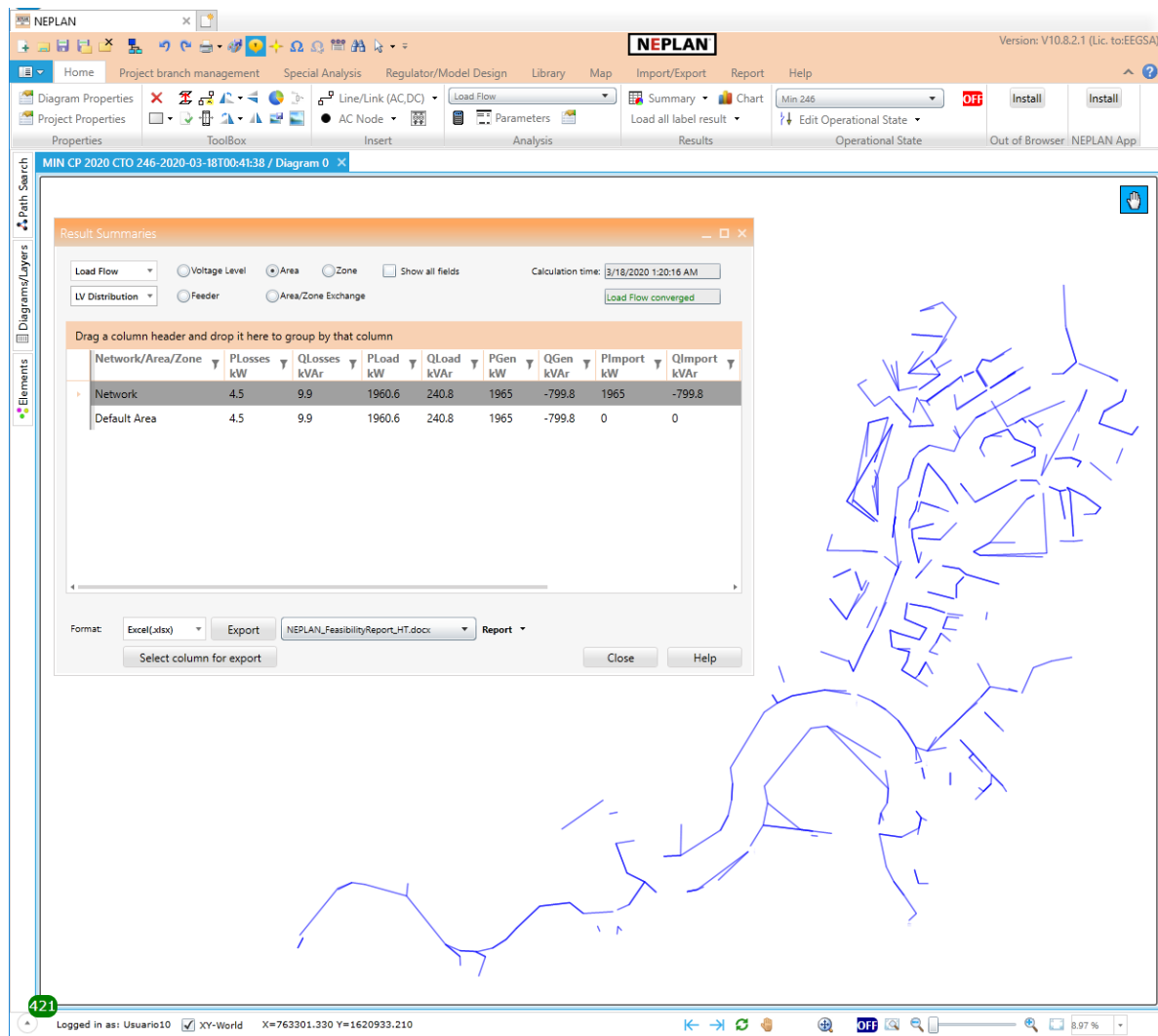
Fuente: elaboración propia, empleando Neplan.

## Apéndice 11. Flujo de carga en demanda mínima con caso automatizado del circuito 246



Fuente: elaboración propia, empleando Neplan.

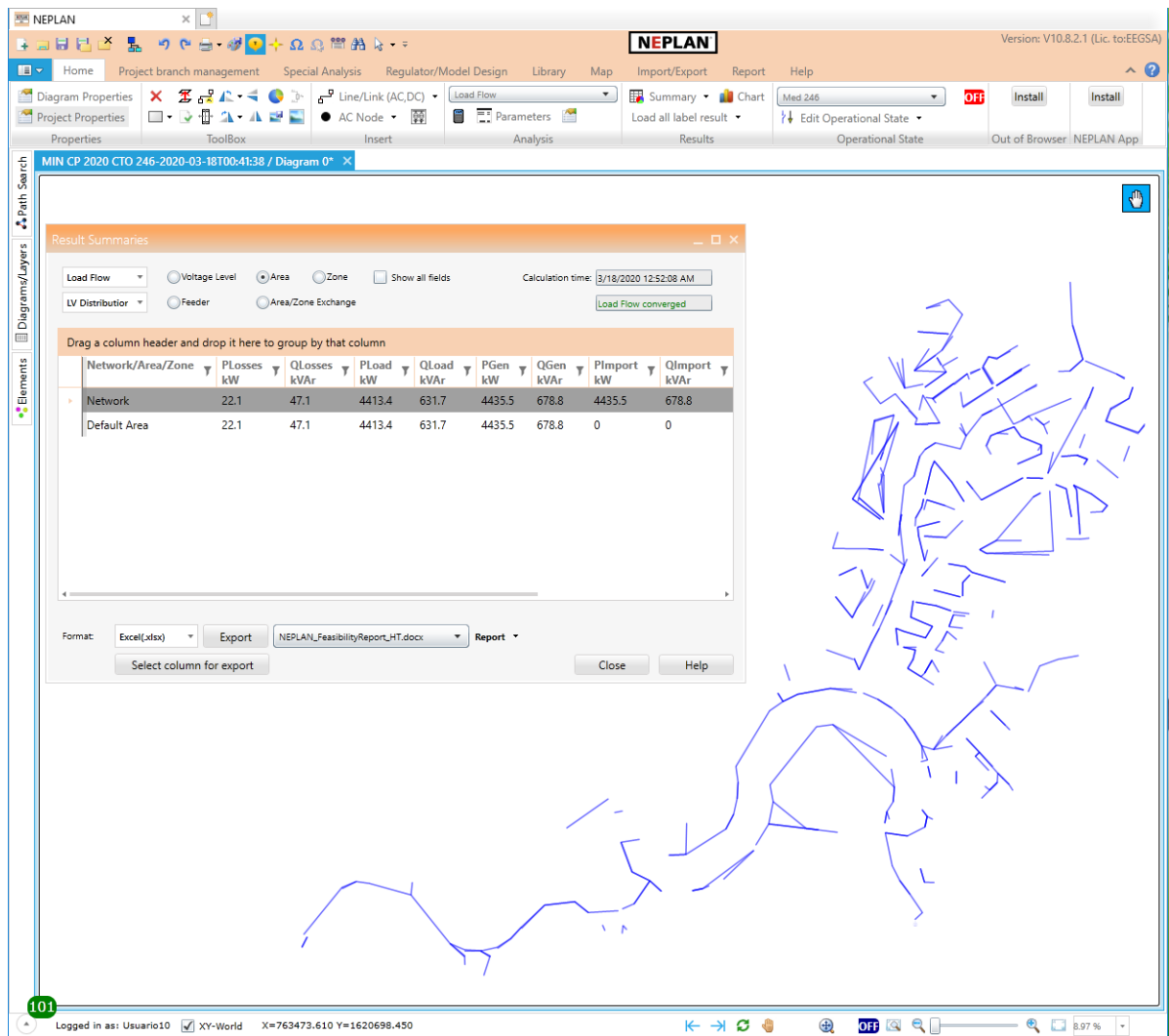
## Apéndice 12. Flujo de carga en demanda mínima con caso estático del circuito 246



Fuente: elaboración propia, empleando Neplan.

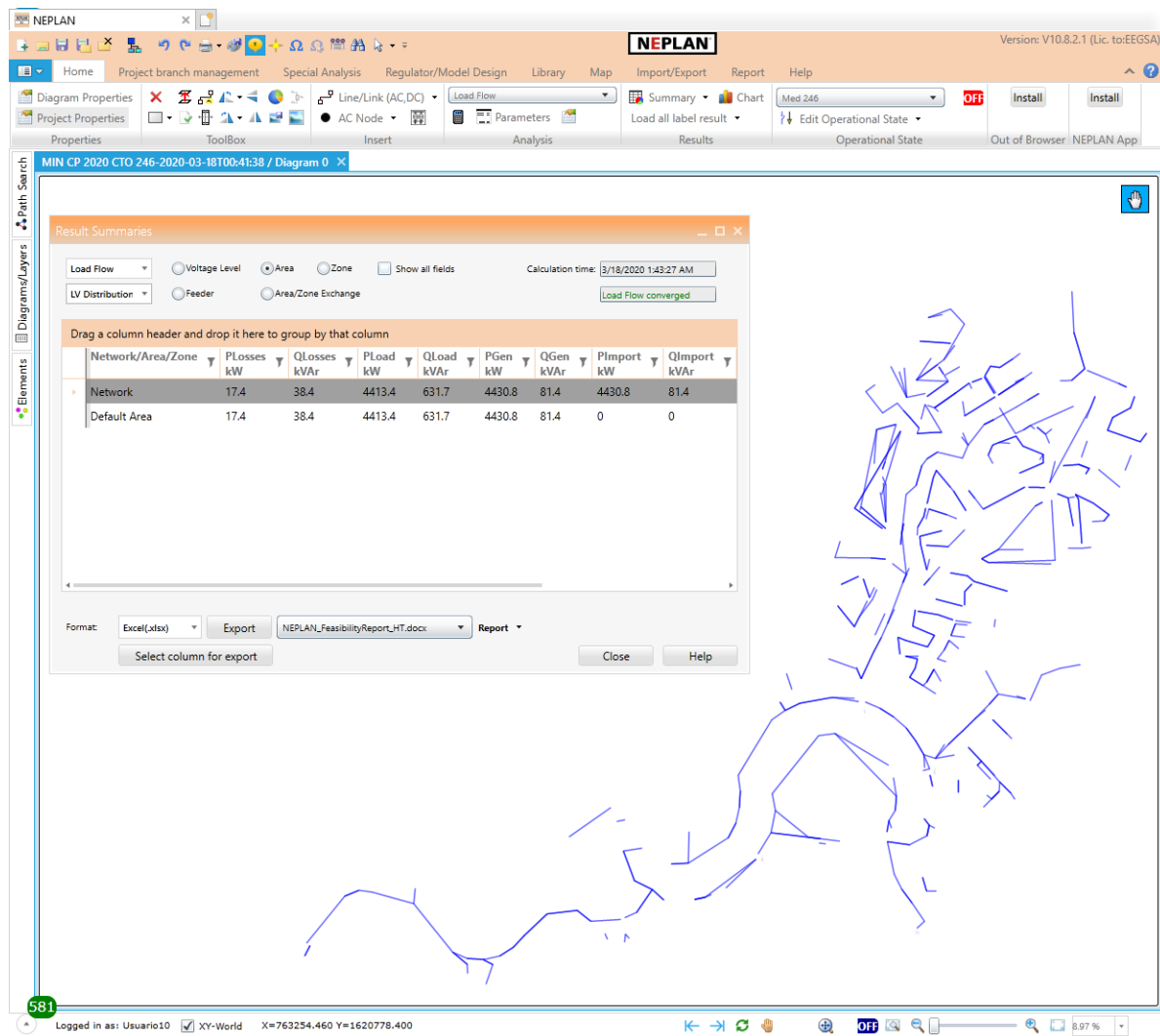


## Apéndice 13. Flujo de carga en demanda media con caso base del circuito 246



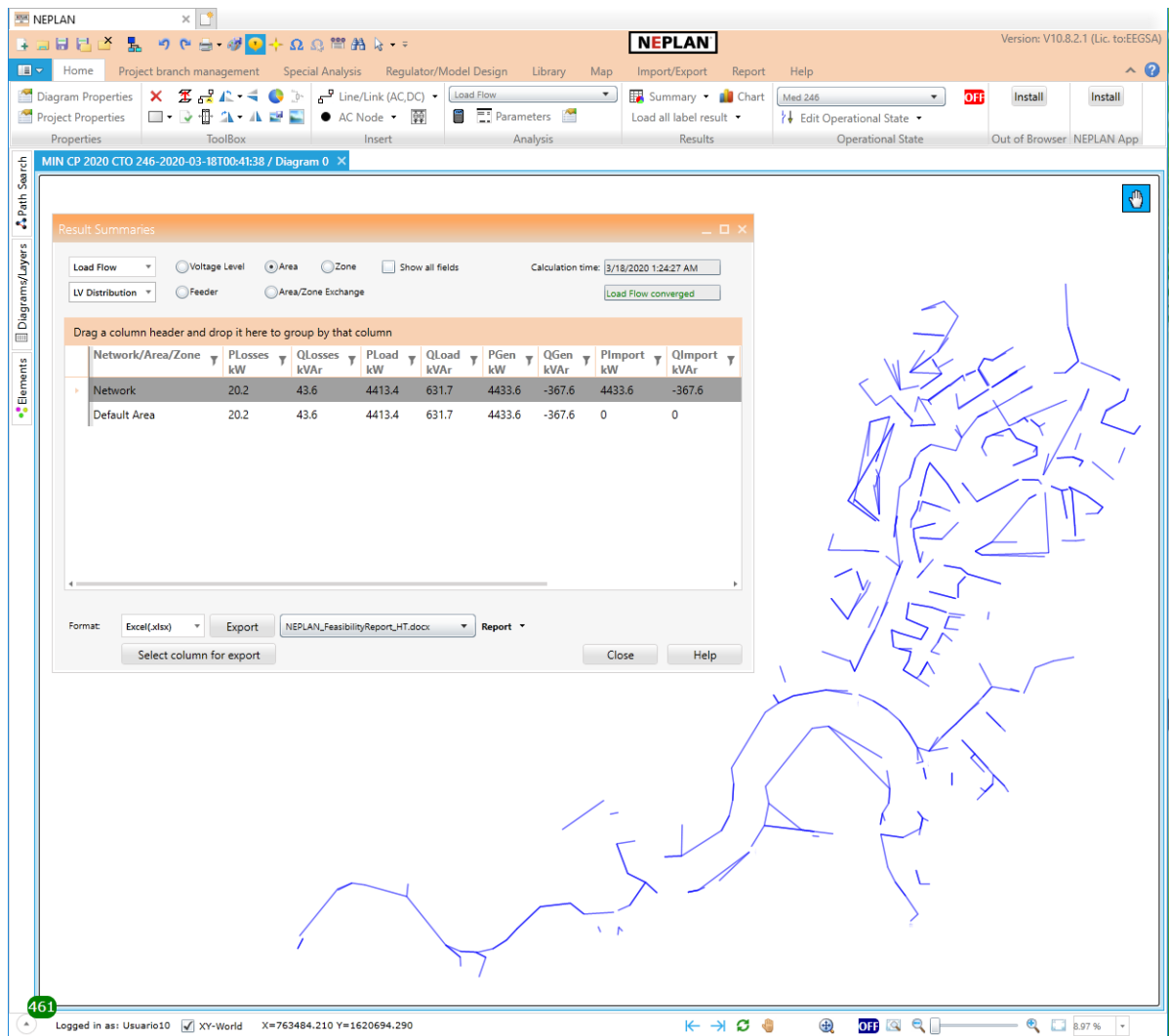
Fuente: elaboración propia, empleando Neplan.

## Apéndice 14. Flujo de carga en demanda media con caso automatizado del circuito 246



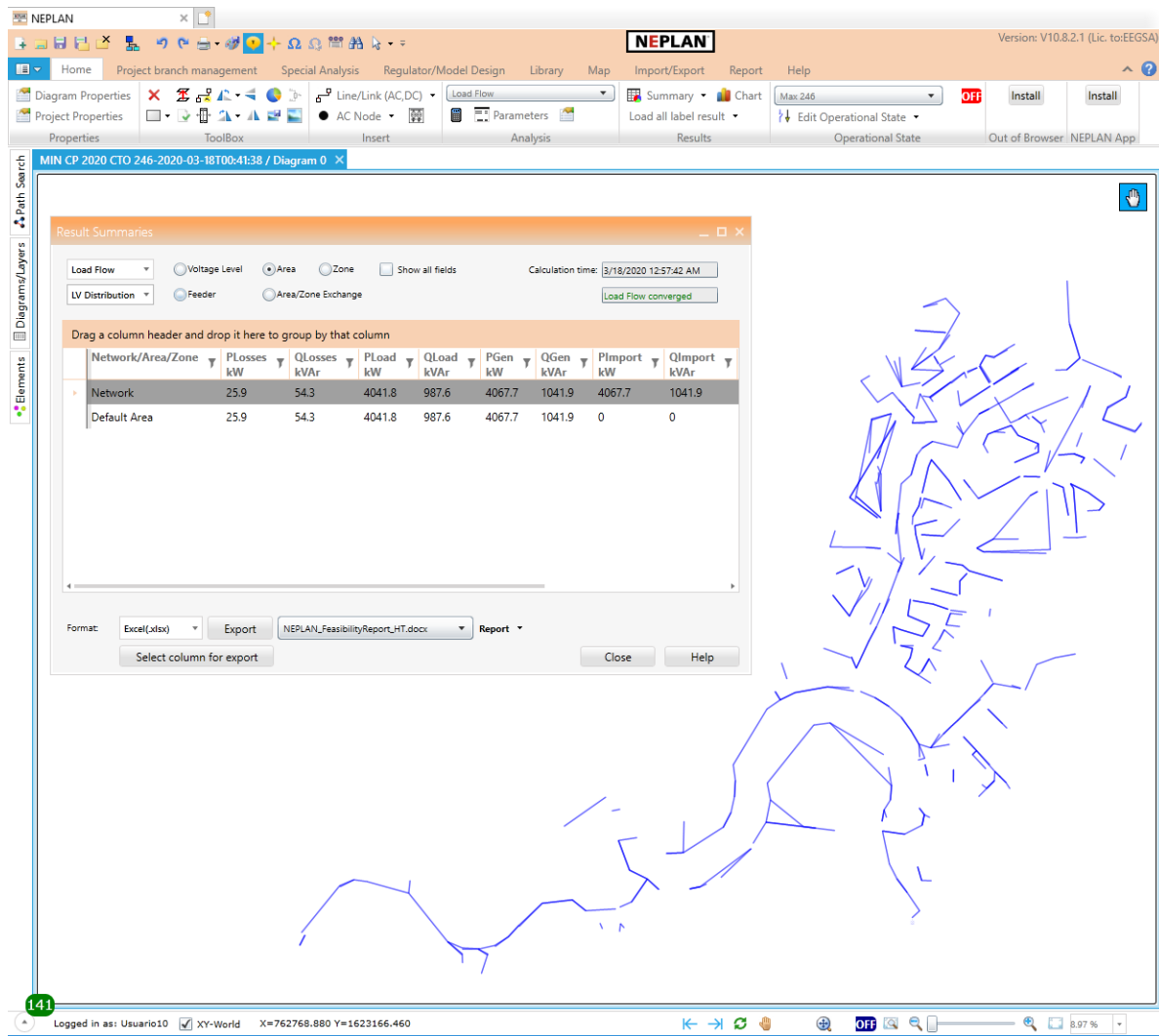
Fuente: elaboración propia, empleando Neplan.

## Apéndice 15. Flujo de carga en demanda media con caso estático del circuito 246



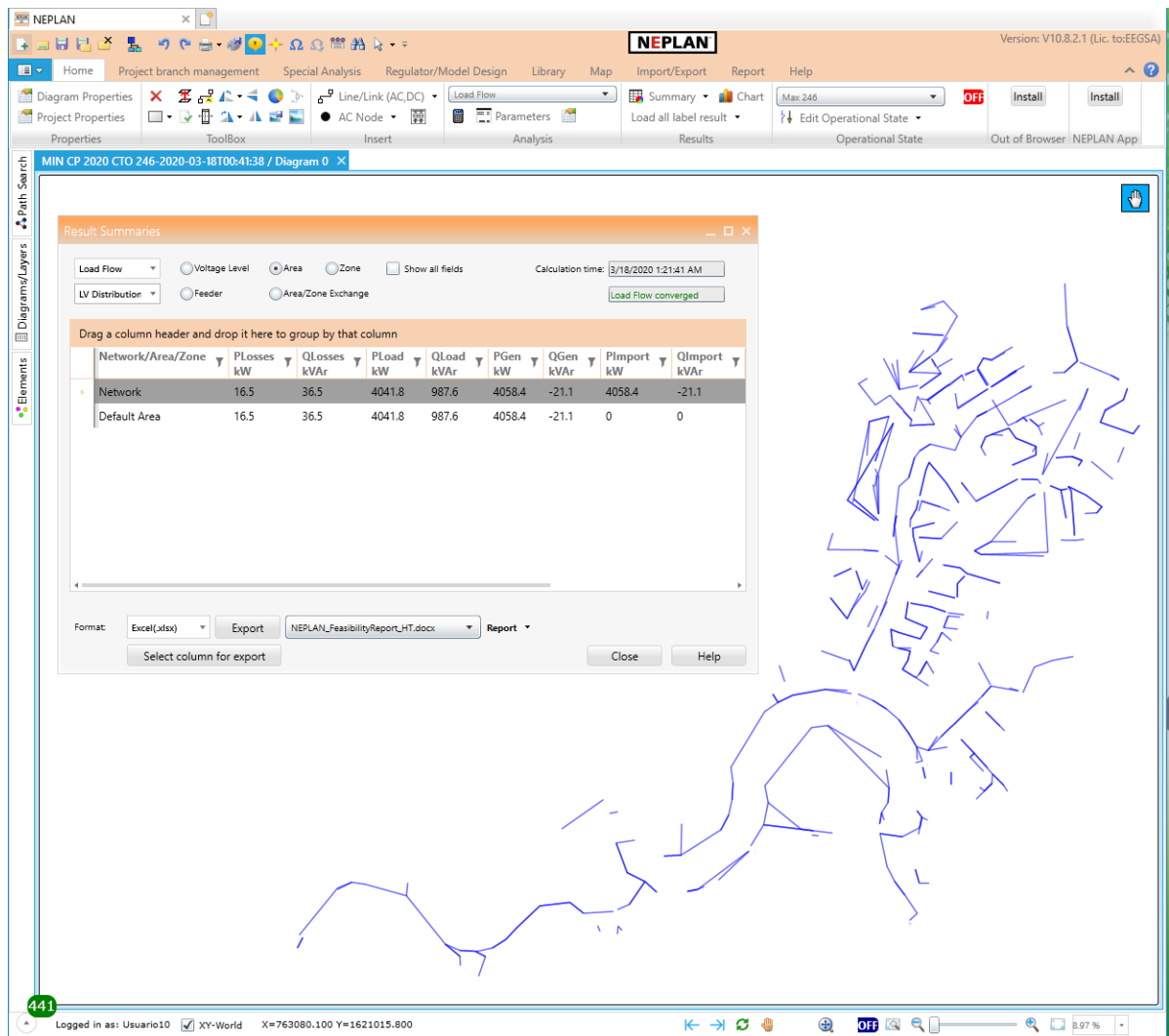
Fuente: elaboración propia, empleando Neplan.

## Apéndice 16. Flujo de carga en demanda máxima con caso base del circuito 246



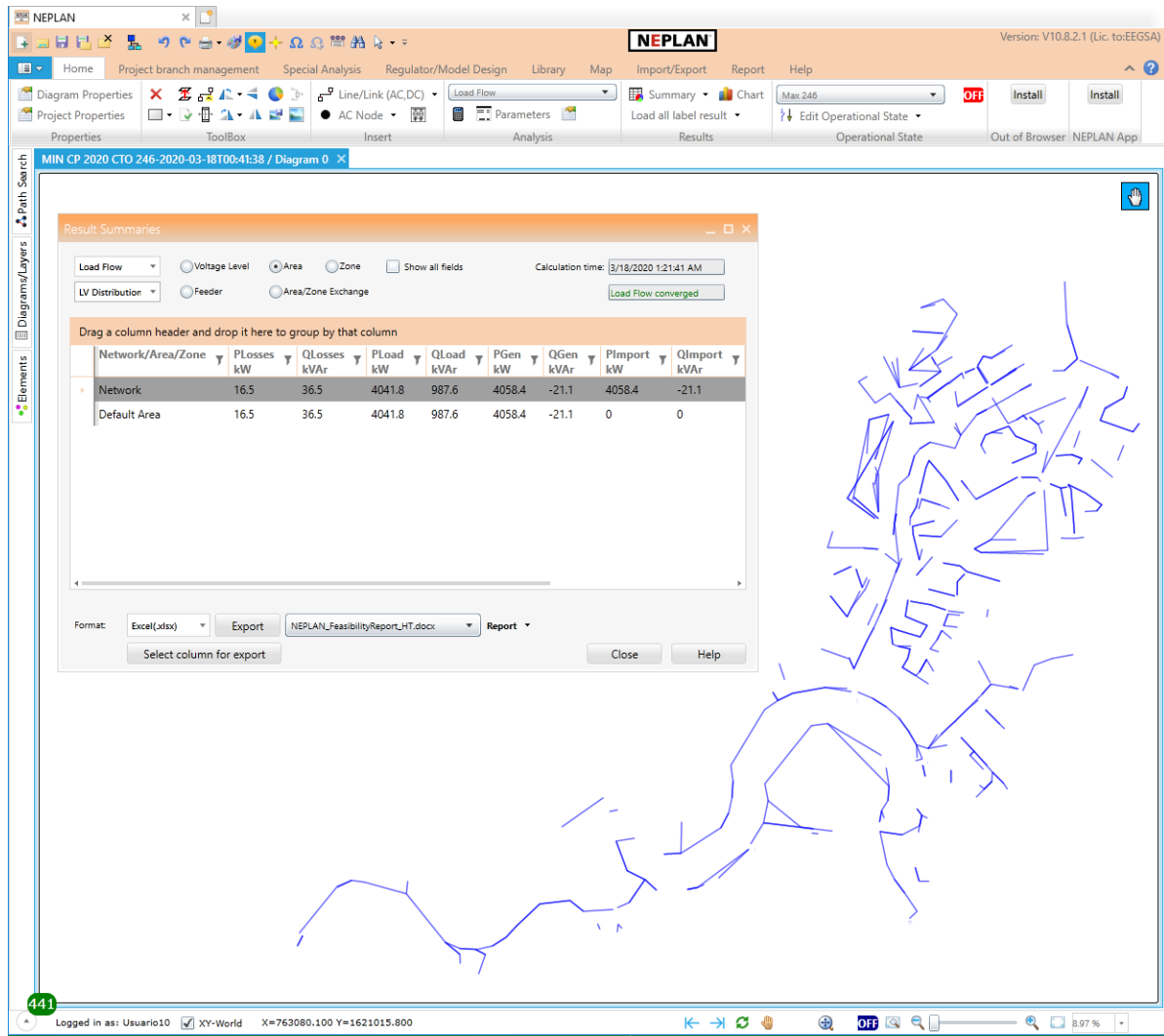
Fuente: elaboración propia, empleando Neplan.

## Apéndice 17. Flujo de carga en demanda máxima con caso automatizado del circuito 246



Fuente: elaboración propia, empleando Neplan.

## Apéndice 18. Flujo de carga en demanda máxima con caso estático del circuito 246



Fuente: elaboración propia, empleando Neplan.