



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**DISEÑO DE UN BANCO DE CAPACITORES EN
EL MÓDULO A PARA LA EMPRESA COMPAÑÍA
DE EMPAQUES**

Autor

Johan Steven Arias Pérez

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Medellín, Colombia

2021



Diseño de un banco de capacitores en el módulo A para la empresa Compañía de Empaques

Johan Steven Arias Pérez

Informe final de prácticas académicas como requisito para optar al título de:
Ingeniero Electricista.

Asesor interno:

Walter Mauricio Villa Acevedo

Profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica

Asesor externo:

Anderson Felipe Flórez Zapata

Ingeniero Electricista de la empresa Compañía de Empaques

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Medellín, Colombia

2021

Contenido

1. Resumen.....	10
2. Introducción	11
3. Objetivos	12
3.1. Objetivo General.....	12
3.2. Objetivos Específicos	12
4. Marco Teórico	12
4.1. Potencia activa.....	12
4.2. Potencia reactiva	12
4.3. Potencia aparente.....	13
4.4. Factor de potencia.....	13
4.5. Triángulo de potencia	13
4.6. Cargas resistivas	14
4.7. Cargas inductivas	14
4.8. Cargas capacitivas.....	14
4.9. Distorsión armónica.....	15
4.10. Distorsión armónica total	16
4.11. Distorsión total demandada.....	16
4.12. Voltaje y corriente rms.....	16
4.13. Efectos de la distorsión armónica en los capacitores.....	17
4.13.1. Impedancia de un capacitor	17
4.13.2. Resonancia en paralelo.....	18
4.14. Compensación	19
4.15. Capacidad y conexión de un capacitor.....	20
4.15.1. Conexión en estrella.....	21
4.15.2. Conexión en delta.....	21
4.16. Beneficios de la compensación.....	22
4.16.1. Mejora el perfil de voltaje	22
4.16.2. Reduce las pérdidas de potencia	22
4.16.3. Libera capacidad en el sistema	22
4.16.4. Reducción en el costo de consumo de electricidad	22
4.17. Tipos de Compensación	22
4.17.1. Compensación distribuida	23

4.17.2.	Compensación por grupos.....	23
4.17.3.	Compensación centralizada	24
4.17.4.	Compensación mixta.....	25
4.17.5.	Compensación automática.....	26
4.18.	Temperatura interna en un banco de capacitores	26
4.19.	Marco Normativo.....	27
4.19.1.	Artículo 23 de la Ley 143 de 1994.....	27
4.19.2.	Artículo 87.8 de la Ley 142 de 1994	27
4.19.3.	Resolución CREG 015-2018, capítulo 12 “Costos de transporte de energía reactiva”	28
4.19.4.	Resolución CREG 199-2019, Artículo 7	29
4.19.5.	Resolución CREG 108-1997, Artículo 25 “Control al factor de potencia en el servicio de energía eléctrica”	29
4.19.6.	IEEE Std 18-2012, <i>Standard for Shunt Power Capacitors</i>	30
4.19.7.	IEEE Std 1036-2020, <i>Guide for the Application of Shunt Power Capacitors</i>	31
4.19.8.	Transitorios en la conmutación de capacitores.	31
4.19.9.	Limitaciones armónicas para un capacitor.	32
4.19.10.	IEEE Std 519-2014, <i>Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems</i>	32
4.19.11.	IEC 61642-1997, <i>Application of filters and shunt capacitors</i>	33
4.19.12.	RETIE artículo 20.11, Condensadores de baja y media tensión.....	33
4.20.	Python.....	34
4.20.1.	NumPy.....	34
4.20.2.	Pandas.....	34
4.20.3.	Matplotlib	34
5.	Metodología.....	34
5.1.	Identificación del área de trabajo	34
5.2.	Revisión de los planos eléctricos.....	35
5.3.	Obtención de las medidas eléctricas	35
5.4.	Procesamiento de datos	35
5.5.	Análisis de datos.....	35
5.6.	Revisión del marco normativo.	35
5.7.	Dimensionamiento del banco subestación 14 y 15.....	35

5.8.	Análisis de armónicos.....	35
5.9.	Diseño del banco de capacitores 14 y 15.....	35
5.10.	Evaluación del banco de capacitores 14 y 15.....	36
6.	Resultados y análisis	36
6.1.	Área de trabajo.....	36
6.2.	Medidas eléctricas.....	38
6.2.1.	Equipo de medida, Lovato DMG 800.....	38
6.2.2.	Subestación 14.	38
6.2.3.	Subestación 15	40
6.3.	Procesamiento y análisis de datos.	41
6.4.	Dimensionamiento del banco de capacitores.....	44
6.4.1.	Semana crítica subestación 14.....	44
6.4.2.	Semana crítica subestación 15.....	45
6.4.3.	Dimensionamiento del banco para la subestación 14.	47
6.4.3.1.	Elección de la potencia nominal del banco.	48
6.4.3.2.	Análisis armónico.....	49
6.4.3.3.	Pasos eléctricos.	51
6.4.3.4.	Controlador automático.	54
6.4.3.5.	Contactores con resistencias de preinserción.	55
6.4.3.6.	Capacitores.....	56
6.4.3.7.	Reactancia de filtrado.	56
6.4.3.8.	Interruptor principal.....	56
6.4.3.9.	Interruptores por paso.....	57
6.4.3.10.	Conductores.....	58
6.4.3.11.	Refrigeración forzada.	58
6.4.4.	Dimensionamiento del banco para la subestación 15.	59
6.4.4.1.	Elección de la potencia nominal del banco.	60
6.4.4.2.	Análisis armónico.....	62
6.4.4.3.	Pasos eléctricos.	64
6.4.4.4.	Controlador automático.	67
6.4.4.5.	Contactores con resistencias de preinserción.	67
6.4.4.6.	Capacitores.....	68
6.4.4.7.	Reactancia de filtrado.	69

6.4.4.8.	Interruptor principal.....	69
6.4.4.9.	Interruptores por paso.....	69
6.4.4.10.	Conductores.....	70
6.4.4.11.	Refrigeración forzada.....	71
6.4.5.	Evaluación del banco de capacitores bajo el estándar IEEE std 18-2012 y IEEE Std 1036-2020.....	72
6.4.5.1.	Evaluación del banco de capacitores subestación 14.....	72
6.4.5.2.	Evaluación del banco de capacitores subestación 15.....	72
6.4.6.	Planos eléctricos.....	73
7.	Conclusiones.....	76
8.	Referencias Bibliográficas.....	78
9.	Anexos.....	80
9.1.	Anexo 1.....	80
9.2.	Anexo 2.....	80
9.3.	Anexo 3.....	80

Lista de tablas.

Tabla 1. Límites de distorsión armónica de voltaje.....	32
Tabla 2. Características principales del transformador, subestación 14.	40
Tabla 3. Características principales del transformador, subestación 15.	41
Tabla 4. Percentiles para la variable Q_c , banco subestación 14.	48
Tabla 5. Distorsión total armónica de voltaje y corriente, semana 2 subestación 14.	50
Tabla 6. Datos para el diseño del banco de capacitores subestación 14.	52
Tabla 7. Potencia reactiva de operación entrega por un capacitor CLZ-FP-HD Circutor [26].	53
Tabla 8. Pasos para el banco de condensadores, subestación 14.	53
Tabla 9. Combinación de pasos para el banco de condensadores, subestación 14.	54
Tabla 10. Selección de contactores catálogo Circutor línea CMC-B [28].....	55
Tabla 11. Selección de capacitores catálogo Circutor línea CLZ-HP-HD [26].....	56
Tabla 12. Selección de reactancia de filtrado catálogo Circutor línea R-RB [25]. .	56
Tabla 13. Selección del interruptor principal catálogo ABB de la línea Tmax [29].	57
Tabla 14. Selección del interruptores catálogo ABB de la línea Tmax [29].....	57
Tabla 15. Selección de conductores Centelsa [30].	58
Tabla 16. Pérdidas en los elementos banco subestación 14.....	58
Tabla 17. Selección del ventilador fabricante Laumayer [31].	59
Tabla 18. Percentiles para la variable Q_c , banco subestación 15.	60
Tabla 19. Distorsión total armónica de voltaje y corriente, semana 1 subestación 15.	63
Tabla 20. Datos para el diseño del banco de capacitores subestación 15.	64
Tabla 21. Potencia reactiva de operación entrega por un capacitor CLZ-FP-HD Circutor [26].	65
Tabla 22. Pasos para el banco de condensadores, subestación 15.	66
Tabla 23. Combinación de pasos para el banco de condensadores, subestación 15.	66
Tabla 24. Selección de contactores catálogo Circutor línea CMC-B [28].....	68
Tabla 25. Selección de capacitores catálogo Circutor línea CLZ-HP-HD [26].....	68

Tabla 26. Selección de reactancia de filtrado catálogo Circutor línea R-RB [25]. .	69
Tabla 27. Selección del interruptor principal catálogo ABB de la línea Tmax [29].	69
Tabla 28. Selección del interruptores catálogo ABB de la línea Tmax [29].	70
Tabla 29. Selección de conductores Centelsa [30].	70
Tabla 30. Pérdidas en los elementos banco subestación 15.	71
Tabla 31. Selección del ventilador fabricante Laumayer [31].	72
Tabla 32. Evaluación Armónica Banco de Capacitores Subestación 14.	74
Tabla 33. Evaluación Armónica Banco de Capacitores Subestación 14.	75

Lista de figuras.

Figura 1. Triángulo de potencia	13
Figura 2. Triángulo de potencia para una carga inductiva.....	14
Figura 3. Triángulo de potencia para una carga capacitiva	15
Figura 4. Distorsión de la corriente causada por una carga no lineal [6].....	15
Figura 5. Conexión de un capacitor en derivación [9].	19
Figura 6. Diagrama fasorial de corrientes [9].....	19
Figura 7. Triángulo de potencia que ilustra la corrección del factor de potencia [5].....	20
Figura 8. Conexión tipo estrella.....	21
Figura 9. Conexión tipo estrella.....	21
Figura 10. Compensación distribuida.....	23
Figura 11. Compensación por grupos.....	24
Figura 12. Compensación centralizada.....	25
Figura 13. Compensación mixta.....	26
Figura 14. Vista en planta Módulo A.	36
Figura 15. (a) y (b) módulo A, Compañía de Empaques.....	38
Figura 16. (a) y (b) Lovato DMG 800.....	38
Figura 17. Capacitores existentes subestación 14.....	39
Figura 18. Tablero de distribución principal subestación 14.....	39
Figura 19. Tablero de distribución principal subestación 15.....	40
Figura 20. (a) Potencia activa y reactiva durante los 6 meses.....	42
Figura 21. (a) Potencia activa y reactiva con periodo de muestreo de 3 minutos.....	43
Figura 22. (a) Potencia activa y reactiva, semana crítica, subestación 14.	45
Figura 23. (a) Potencia activa y reactiva, semana crítica, subestación 15.	46
Figura 24. Potencia reactiva capacitiva requerida, banco subestación 14.....	47
Figura 25. (a) Simulación de la corrección del factor de potencia, banco de 190 kVAr.	48
Figura 26. (a) Armónicos de corriente, subestación 14.	50
Figura 27. Controlador automático del factor de potencia [27].	54
Figura 28. Potencia reactiva capacitiva requerida, banco subestación 15.....	60

Figura 29. (a) Simulación de la corrección del factor de potencia, banco de 80 kVAr.	61
Figura 30. (a) Armónicos de corriente, subestación 15.	62
Figura 31. Controlador automático del factor de potencia [27].	67

Diseño de un banco de capacitores en el módulo A para la empresa Compañía de Empaques

1. Resumen

Durante el periodo de prácticas académicas industriales en la empresa Compañía de Empaques se realizaron diversas actividades enfocadas al mejoramiento del manejo y consumo de la energía eléctrica en el módulo A de la compañía. Principalmente, dichas actividades tenían como objeto el diseño de un banco de capacitores para atender la demanda de energía reactiva de las cargas presentes en dicha sección.

Durante la primera fase en el desarrollo del banco de capacitores se realizó una etapa exploratoria la cual consistía en conocer de una manera precisa y detallada los diferentes tipos de procesos industriales que se llevaban a cabo en la empresa. Durante esta etapa de inspección se determinó que tipo de control tenían las diferentes cargas encontradas. Paralelamente, se hizo una revisión de los planos eléctricos del módulo A para determinar cuáles subestaciones alimentan las diferentes cargas y en cuáles puntos era factible hacer mediciones eléctricas.

A partir de la información obtenida en las primeras etapas se optó por el diseño de dos bancos de capacitores, uno para la subestación 14 y otro para la subestación 15, y así realizar una compensación centralizada en cada subestación. Los principales factores que influyeron en la toma de esta decisión fue el poco espacio que se tenía para realizar otro tipo de compensación y los recursos destinados para el proyecto.

Para el diseño de ambos bancos de capacitores se utilizaron diferentes herramientas tecnológicas para el análisis de datos. Los datos fueron agrupados de acuerdo a la subestación y por periodos de tiempo equivalente a semanas. A partir de la semana más crítica para el sistema, donde se dieran los periodos más altos de demanda de potencia reactiva, se realizó el diseño del banco de capacitores para la subestación 14 y 15. Una vez delimitada la semana de estudio se realizó un análisis de armónicos para cada subestación, teniendo en cuenta, por supuesto, las implicaciones que tiene un sistema que se encuentra bajo presencia armónica.

El banco de la subestación 14 se diseñó con una potencia reactiva nominal de 200 kVAr y un voltaje nominal superior a la del sistema por cuestiones de presencia armónica, el banco está conformado por 5 pasos que son conmutados de manera automática a través de un controlador automático de factor de potencia. El banco de la subestación 15 se diseñó con una potencia reactiva nominal de 90 kVAr, al igual que el banco de la subestación 14, se diseñó para un voltaje nominal

superior a la del sistema por cuestiones de presencia armónica. El banco está conformado por 4 pasos que se conmutan de manera automática través de un controlador automático de factor de potencia.

2. Introducción

El módulo A de Compañía de Empaques es una sección de la empresa en donde se fabrican sacos de polipropileno para el empaqueo de alimentos. Allí, se producen los hilos para el tejido, se lamina y se teje el saco, se imprimen los diseños para cada saco y finalmente se cortan y se prensan para su empaqueo. Dada la gran cantidad de motores existentes en las máquinas, con potencias nominales considerables, se demanda una gran cantidad de energía reactiva. El exceso de demanda de energía reactiva y la producción de la misma, está regulada por la Comisión de Regulación de Energía y Gas, CREG, en la resolución CREG 015 de 2018 [1] y la resolución CREG 199 de 2019 [2]. No obstante, una gran cantidad de carga inductiva (motores y transformadores) genera una caída del factor de potencia. De acuerdo a la resolución CREG 108 de 1997 artículo 25 parágrafo 1, los usuarios no residenciales deben de tener un factor de potencia igual o superior a 0.9 inductivo [3]. Para las instalaciones que violen este límite, se exigirá que instalen equipos apropiados para controlar y medir la energía reactiva.

De acuerdo a la normativa anterior y a los índices de consumo de energía reactiva del módulo A registrados, se evidenció la necesidad de diseñar un banco de capacitores para solventar el exceso de demanda de energía reactiva proveniente de las grandes cargas inductivas y así, no solamente cumplir con la normatividad sino también, tener un consumo eficiente de la energía eléctrica. Por lo tanto, se realizó esta propuesta de trabajo con fin de solventar dicha necesidad y promover el uso eficiente de la energía eléctrica en la compañía. A través de esta propuesta se planteó el uso de nuevas herramientas enfocadas al manejo eficiente de datos que permitían realizar análisis más detallados para el diseño del banco de capacitores para la subestación 14 y 15. El uso de estas herramientas, como lenguajes de programación enfocados a la ciencia de los datos, permiten desarrollar nuevas metodologías con un enfoque detallado e innovador.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Diseñar un banco de capacitores, mediante mediciones de energía en las cargas del módulo A, con el fin de realizar una compensación de energía reactiva para cumplir la normatividad vigente y mejorar el uso eficiente de la energía eléctrica.

3.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar las mediciones correspondientes al consumo de energía eléctrica de las cargas presentes en el módulo A.
- Implementar una metodología correspondiente al diseño de bancos de condensadores de acuerdo a los estándares IEEE Std. 18-2002 e IEEE Std. 1036-1992, a partir de los datos obtenidos por las mediciones.

4. Marco Teórico

En esta sección se sustenta toda la fundamentación teórica utilizada para la realización del diseño del banco de capacitores.

4.1. Potencia activa

La potencia activa (P) o también conocida como potencia real, representa la potencia promedio de la potencia instantánea a lo largo de un periodo. La potencia es la variación respecto al tiempo del gasto o absorción de energía, medida en *watts* (W); es la única potencia útil, es la verdadera potencia disipada en la carga y se define como [4]:

$$P = V \cdot I \cdot \cos(\theta) \quad (1)$$

Donde V es el valor *rms* del voltaje suministrado a la carga, I es el valor *rms* de la corriente que fluye a través de la carga y θ es el ángulo de impedancia de la carga

4.2. Potencia reactiva

La potencia reactiva (Q) representa la energía que es almacenada y posteriormente liberada en el campo magnético de un inductor o en el campo eléctrico de un capacitor. La potencia reactiva es intercambiada de manera continua entre la fuente y la carga. La potencia reactiva de una carga está dada por [4]:

$$Q = V \cdot I \cdot \sen(\theta) \quad (2)$$

Donde V es el valor *rms* del voltaje suministrado a la carga, I es el valor *rms* de la corriente que fluye a través de la carga y θ es el ángulo de impedancia de la carga. Las unidades de la potencia reactiva son *voltio-amperios reactivos* (VAr).

4.3. Potencia aparente

La potencia aparente (S) que es suministrada a una carga se define como el producto del voltaje a través de la carga y la corriente en la carga. Ésta es la potencia que “parece” ser suministrada a la carga si se ignoran las diferencias de ángulo de fase entre el voltaje y la corriente. Por lo tanto, la potencia aparente de una carga está dada por [4]:

$$S = V \cdot I \quad (3)$$

Donde V es el valor *rms* del voltaje suministrado a la carga, I es el valor *rms* de la corriente que fluye a través de la carga. Las unidades de la potencia aparente son *voltio-amperios* (VA).

4.4. Factor de potencia

Se conoce como factor de potencia a la cantidad $\cos(\theta)$ de una carga. Esta se define como la fracción de la potencia aparente S que en realidad suministra potencia real a la carga. Por lo tanto, el factor de potencia se define como [5]:

$$FP = \cos(\theta) \quad (4)$$

Donde θ es el ángulo de impedancia de la carga. El valor de FP varía entre cero y la unidad. Dependiendo del tipo de carga que se tenga, resistiva, inductiva o capacitiva, el valor de FP varía. Es importante aclarar que el FP es adimensional.

4.5. Triángulo de potencia

A través del triángulo de potencia es posible relacionar los tres tipos de potencia descritos anteriormente como se observa en la Figura 1.

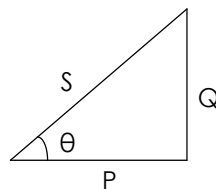


Figura 1. Triángulo de potencia

El ángulo θ corresponde al ángulo de la impedancia de la carga, el cateto adyacente P corresponde a la potencia activa, el cateto opuesto corresponde a la potencia reactiva Q y finalmente la hipotenusa S corresponde a la potencia

aparente. La ventaja de emplear el triángulo de potencia es que permite relacionar cada una de las potencias a partir de las relaciones trigonométricas, conociendo dos elementos del triángulo de potencia se puede conocer el resto de elementos aplicando relaciones trigonométricas.

4.6. Cargas resistivas

Son aquellas cargas puramente resistivas donde no existen elementos que almacenen energía en forma de campo magnético o campo eléctrico (inductores y capacitores). Para este tipo de cargas la tensión y la corriente están en fase de modo que $\theta = 0$ y por lo tanto $FP = 1$ (ver ecuación (4)). Lo que significa que la potencia aparente es igual a la potencia activa y no hay presencia de potencia reactiva, $Q = 0$ [5].

4.7. Cargas inductivas

Son aquellas cargas en donde existe la presencia de bobinas (inductores) en donde la onda de corriente está atrasada θ grados con respecto a la onda de voltaje. Por lo tanto, la carga tendrá un ángulo de impedancia θ positivo, porque la reactancia del inductor es positiva y la potencia reactiva (Q) sería mayor a cero, $Q > 0$ (ver ecuación (2) y Figura 2) [5].

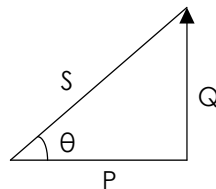


Figura 2. Triángulo de potencia para una carga inductiva

Para este tipo de cargas se dice que el factor de potencia se encuentra en atraso.

4.8. Cargas capacitivas

Son aquellas cargas en donde existe la presencia de condensadores (capacitores) en donde la onda de corriente está adelantada θ grados con respecto a la onda de voltaje. Por lo tanto, la carga tendrá un ángulo de impedancia θ negativo, porque la reactancia de un capacitor es negativa y la potencia reactiva (Q) sería menor a cero, $Q < 0$ (ver ecuación (2) y Figura 3) [5].

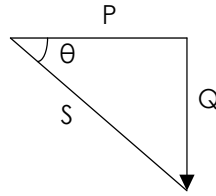


Figura 3. Triángulo de potencia para una carga capacitiva

Para este tipo de cargas se dice que el factor de potencia se encuentra en adelanto.

4.9. Distorsión armónica

La distorsión armónica es causada por dispositivos no lineales en el sistema de energía. Un dispositivo no lineal es uno en el que la corriente no es proporcional al voltaje aplicado.

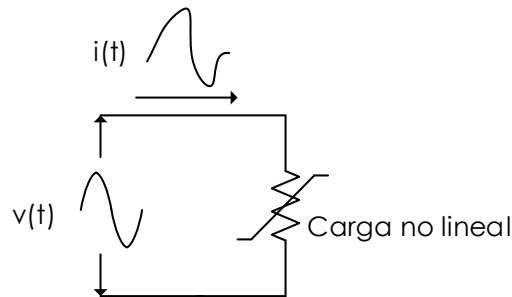


Figura 4. Distorsión de la corriente causada por una carga no lineal [6].

En la Figura 4 se ilustra como una carga no lineal distorsiona la corriente a pesar de que se alimenta con una señal de voltaje perfectamente sinusoidal. Aumentar el voltaje en un pequeño porcentaje puede causar que la corriente se duplique y adopte una forma de onda de corriente diferente [6].

Las industrias generalmente suelen tener un gran porcentaje de cargas no lineales que corresponden a equipos enfocados en la automatización industrial y luminarias LED, estos equipos tienen la característica de poseer circuitos electrónicos conformados por componentes no lineales como transistores y diodos.

Cualquier forma de onda distorsionada se puede expresar como una suma de ondas sinusoidales puras siempre que se cumpla la condición de ser una señal periódica. La frecuencia de cada una de estas ondas sinusoidales se expresa en un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la onda distorsionada. Este múltiplo recibe el nombre de armónico [6].

4.10. Distorsión armónica total

La distorsión total armónica, *Total Harmonic Distortion (THD)*, es una medida de la cantidad de armónicos que posee una onda distorsionada. Generalmente estos valores se dan en porcentaje respecto al valor de la componente fundamental [6]. Para una señal de voltaje la distorsión total armónica se define como:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \cdot 100\% \quad (5)$$

Donde h representa el orden del armónico.

Para una señal de corriente la distorsión total armónica se define como:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \cdot 100\% \quad (6)$$

Donde h representa el orden del armónico.

4.11. Distorsión total demandada

Se define como la relación entre la distorsión de corriente armónica y la demanda máxima de corriente. Una corriente pequeña demandada por una carga puede tener un THD significativamente alto, pero esto no necesariamente significa que pueda afectar al sistema debido a la magnitud baja de la corriente, por tal motivo es importante introducir el concepto de distorsión total demandada [6]. El estándar IEEE 519 [7] define la distorsión total demandada como:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \cdot 100\% \quad (7)$$

Donde I_L corresponde al pico máximo de corriente demanda por la carga en la frecuencia fundamental medida en el punto de acoplamiento (PCC).

4.12. Voltaje y corriente rms

Cuando el voltaje y la corriente rms son valores de una onda puramente sinusoidal, es decir, la onda sólo contiene la componente de frecuencia fundamental. Estos valores rms se pueden determinar de la siguiente manera [6]:

$$V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_1 \quad (8)$$

$$I_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_1 \quad (9)$$

Donde V_1 e I_1 corresponde a los valores de voltaje y corriente en la frecuencia fundamental.

Para una onda que no es puramente sinusoidal, es decir distorsionada, existirán diferentes amplitudes formadas por diferentes frecuencias armónicas. Por lo tanto, los valores rms no se determinan con las expresiones (8) y (9) sino, a través de las siguientes expresiones [6]:

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} (V_h)^2} \quad (10)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} (I_h)^2} \quad (11)$$

Donde V_h e I_h son la amplitud rms de la onda en el armónico h

4.13. Efectos de la distorsión armónica en los capacitores

Generalmente los circuitos, y más aún los circuitos industriales, contienen tanto inductancias como capacitancias, lo que implica múltiples frecuencias naturales. Cuando alguna de esas frecuencias naturales propias de los elementos inductivos o capacitivos se encuentra con otra misma frecuencia generada por el sistema (red eléctrica) se genera un efecto llamado resonancia. La resonancia conlleva a que tanto el voltaje como la corriente a esa frecuencia aumente de magnitud significativamente causando que se supere los umbrales de corriente y voltaje nominal soportados por el condensador [6]. Se hablará de circuito resonante en serie cuando la inductancia y capacitancia están conectados en serie, o de circuito resonante paralelo si la inductancia y la capacitancia se encuentran conectados en paralelo. En una misma red, pueden darse al mismo tiempo una resonancia en serie y una resonancia en paralelo y, esta resonancia tiene lugar a una frecuencia concreta, llamada frecuencia de resonancia [8].

En un banco de capacitores se debe evitar la resonancia con el sistema, ya que si la resonancia persiste por tiempos prolongados puede generar el deterioro acelerado del mismo.

4.13.1. Impedancia de un capacitor

Los capacitores en derivación, ya sea para la corrección del factor de potencia o para el control de voltaje, alteran drásticamente la variación de la impedancia del sistema con la frecuencia. Los condensadores no crean

armónicos, pero la distorsión armónica severa a veces se puede atribuir a su presencia. Mientras que la reactancia de los componentes aumenta proporcionalmente a la frecuencia, la reactancia capacitiva X_c disminuye proporcionalmente [6] como se muestra a continuación:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} \quad (12)$$

Donde X_c es la reactancia capacitiva, C es la capacitancia en faradios y f es la frecuencia en Hz. Generalmente el valor de C no es fácil de obtener o no suele ser dado por fabricantes. La reactancia capacitiva equivalente de línea a neutro a la frecuencia fundamental para un banco de capacitores se puede determinar mediante [6]:

$$X_c = \frac{kV^2}{MVA_r} \quad (13)$$

Para determinar la corriente de fase que es demanda por el banco de capacitores en un sistema trifásico basta con aplicar la siguiente expresión:

$$I_f = \frac{Q_c}{\sqrt{3} V_A} \quad (14)$$

Donde I_f es la corriente de fase en A, Q_c es la potencia del banco en kVAR y V_A es el voltaje aplicado en kV.

4.13.2. Resonancia en paralelo

La resonancia en paralelo ocurre cuando la reactancia de X_c y el sistema de distribución se cancelan entre sí. La frecuencia a la que se produce este fenómeno se denomina frecuencia de resonancia. La frecuencia de resonancia se puede expresarse de la siguiente manera [6]:

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_{eq}C}} \quad (15)$$

Donde f_p es la frecuencia de resonancia paralela, L_{eq} es la inductancia equivalente de la fuente combinada con la del transformador y C es la capacitancia del banco de capacitores.

Generalmente no se suele tener L_{eq} y C como datos disponibles, por lo tanto, se prefiere usar otras formas de relación. Por lo general se calcula el armónico resonante h_r en función de las impedancias y clasificaciones de la frecuencia fundamental utilizando la siguiente expresión [6]:

$$h_r = \sqrt{\frac{kVA_T * 100}{kVA_{r_{banco}} * Z_T(\%)}} \quad (16)$$

Donde h_r es el armónico resonante, kVA_T es la potencia nominal aparente en kVA del transformador, $kVAR_{banco}$ es la potencia reactiva nominal del banco en kVAR y $Z_T(\%)$ es la impedancia del transformador en porcentaje.

4.14. Compensación

El término compensación se utiliza para describir la inserción intencional de dispositivos de potencia reactiva, capacitiva o inductiva, en una red eléctrica para lograr un efecto deseado. Esto puede incluir perfiles de voltaje mejorados, factor de potencia mejorado, rendimiento de estabilidad mejorado y capacidad de transmisión mejorada [9].

Los capacitores en derivación (paralelo) suministran potencia reactiva capacitiva al sistema en el punto donde están conectados principalmente para contrarrestar la componente fuera de fase de la corriente requerida por una carga inductiva [9]. Estos capacitores pueden estar conectados continuamente a la red eléctrica o pueden activar o desactivarse durante ciertos periodos de tiempo.

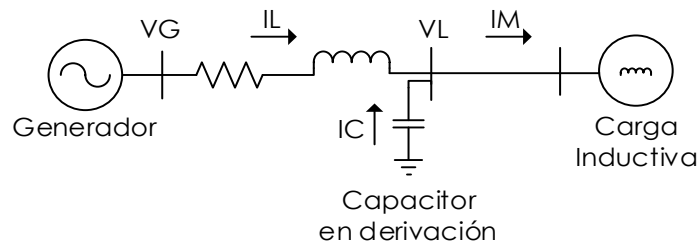


Figura 5. Conexión de un capacitor en derivación [9].

En la Figura 5 se puede observar la conexión de un capacitor en derivación, de esta manera toda la potencia reactiva que necesita la carga inductiva no será suministrada por el generador sino por el capacitor.

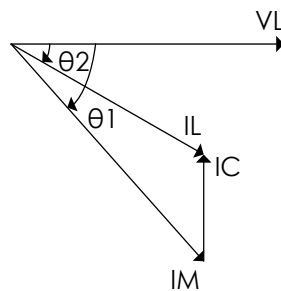


Figura 6. Diagrama fasorial de corrientes [9].

En la Figura 6 se observa que la corriente que circula por la línea (I_L) decrece al instalarse el capacitor en derivación y, el ángulo entre el voltaje de carga (V_L) y la corriente decrece pasando de θ_1 a θ_2 . Esto implica una mejora en la

capacidad de transmisión de la línea ya que se reducen las pérdidas de potencia activa al disminuir la corriente que circula por ella.

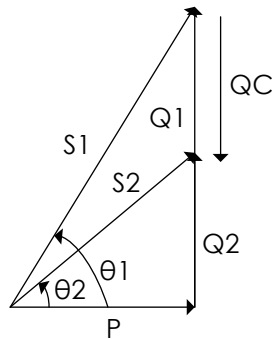


Figura 7. Triángulo de potencia que ilustra la corrección del factor de potencia [5].

Considerando una carga inductiva con una potencia S_1 como se muestra en la Figura 7 tenemos entonces que:

$$P = S_1 \cdot \cos(\theta_1) , \quad Q_1 = S_1 \cdot \text{sen}(\theta_1) = P \cdot \tan(\theta_1) \quad (17)$$

Si se desea incrementar el factor de potencia de θ_1 a θ_2 manteniendo el mismo valor de potencia activa (es decir, $P = S_2 \cdot \cos(\theta_2)$), la nueva potencia reactiva es:

$$Q_2 = P \cdot \tan(\theta_2) \quad (18)$$

La reducción de la potencia reactiva es causada por el capacitor en derivación (ver Figura 7) por lo tanto, se tiene que:

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P \cdot (\tan(\theta_1) - \tan(\theta_2)) \quad (19)$$

A partir de la ecuación (19) podemos determinar el valor del capacitor a instalar en derivación si se desea realizar una compensación por factor de potencia [5]. No obstante, existen ya tablas construidas en la literatura donde se encuentra valores preestablecidos para capacitores con base a valores típicos deseados de factor de potencia en un sistema eléctrico, ver referencia [8].

4.15. Capacidad y conexión de un capacitor

La capacitancia requerida en Faradios para garantizar un suministro de potencia reactiva se determina mediante la siguiente expresión [6].

$$C = \frac{Q_c}{2\pi \cdot f \cdot U^2} \quad (20)$$

Donde C es la capacitancia en F , Q_c es la potencia reactiva en VAr , f es la frecuencia Hz y U es el voltaje nominal en V .

4.15.1. Conexión en estrella

La capacitancia por fase en una conexión tipo estrella es igual a la capacitancia C , ver ecuación (20).

$$C_Y = C = \frac{Q_c}{2\pi \cdot f \cdot U^2} \quad (21)$$

Lo que significa que cada capacitor que conforma la conexión estrella debe tener una capacitancia C . En la Figura 8 se puede observar el tipo de conexión.

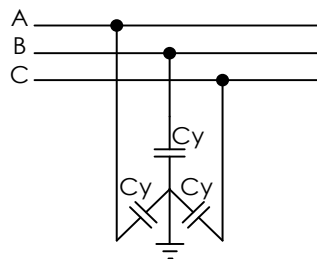


Figura 8. Conexión tipo estrella.

4.15.2. Conexión en delta

La capacitancia por fase en una conexión tipo delta es igual se calcula mediante la siguiente expresión:

$$C_\Delta = \frac{C}{3} = \frac{Q_c}{6\pi \cdot f \cdot U^2} \quad (22)$$

Lo que significa que cada capacitor que conforma la conexión delta es una tercera parte de la capacitancia C . En Figura 9 la se puede observar el tipo de conexión.

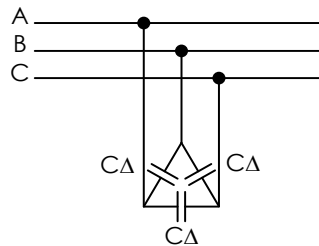


Figura 9. Conexión tipo estrella.

De acuerdo a lo anterior significa entonces que la capacitancia requerida para por fase para alcanzar un valor Q_c es tres veces menor en una conexión tipo delta que en una conexión tipo estrella. Esto se traduce a que en términos

económicos es mucho mejor una conexión tipo delta ya que requiere capacitores de menor capacitancia.

4.16. Beneficios de la compensación

4.16.1. Mejora el perfil de voltaje

Generalmente los sistemas eléctricos tienden a tener una impedancia interna inductiva, por lo tanto, es el cambio de potencia reactiva de la carga lo que tiene el efecto más adverso sobre la regulación de voltaje. Tradicionalmente, la caída de voltaje se compensa con capacitores en derivación y, al conmutarlos de acuerdo con la demanda de potencia reactiva, se logra un perfil de voltaje constante. Además, manteniendo un factor de potencia cerca de la unidad [10].

4.16.2. Reduce las pérdidas de potencia

Al realizar una correcta corrección del factor de potencia se puede reducir considerablemente las pérdidas de tipo I^2R en la transmisión de potencia entre el punto de generación y el punto donde se realiza la compensación, ver sección 4.14.

4.16.3. Libera capacidad en el sistema

Al conectar capacitores al sistema, estos suministrarán la potencia reactiva que demanda la carga generando así un aumento en el factor de potencia. Esto implica que para un nivel de corriente más bajo se produce una utilización de potencia activa más alta. Por lo tanto, los bancos de capacitores se pueden utilizar para reducir la sobrecarga o permitir que se agregue una carga adicional al sistema existente [10].

4.16.4. Reducción en el costo de consumo de electricidad

Las cargas con bajos factores de potencia demanda una corriente mayor de la fuente de alimentación como se vio en la sección 4.14. La situación ideal sería demandar una corriente mínima de una fuente de alimentación de manera que $S = P$, $Q = 0$ y $FP = 1$. Una carga con $Q \neq 0$ implica que existe una energía que fluye entre la fuente y la carga, como se explicó en la sección 4.2, generando así pérdidas adicionales de potencia [5]. Con base a esto, las compañías suministradoras de energía eléctrica suelen incentivar a sus clientes a tener factores de potencia lo más cercano posible a uno y sancionan a algunos clientes que no mejoran sus factores de potencia de carga generando cobros extras por demanda de potencia reactiva, ver sección 4.19.

4.17. Tipos de Compensación

Existen diferentes formas de realizar una compensación de acuerdo a la ubicación del banco de capacitores. La ubicación del banco depende de las

necesidades que se presenten en el sistema y los recursos económicos que se tengan disponibles. De acuerdo a la ubicación del banco de capacitores se tiene que los principales métodos son:

4.17.1. Compensación distribuida

La compensación distribuida se realiza conectando un banco de condensadores directamente a los terminales de la carga que necesita la potencia reactiva [8]. Este tipo de compensación se suele implementar cuando la carga representa un alto porcentaje de potencia en relación con la potencia total. Este tipo de compensación cuenta con la ventaja de omitir la corriente reactiva en los conductores de la instalación, pero, suele ser costosa si se desea compensar muchas cargas. En la Figura 10 se puede observar este tipo de compensación.

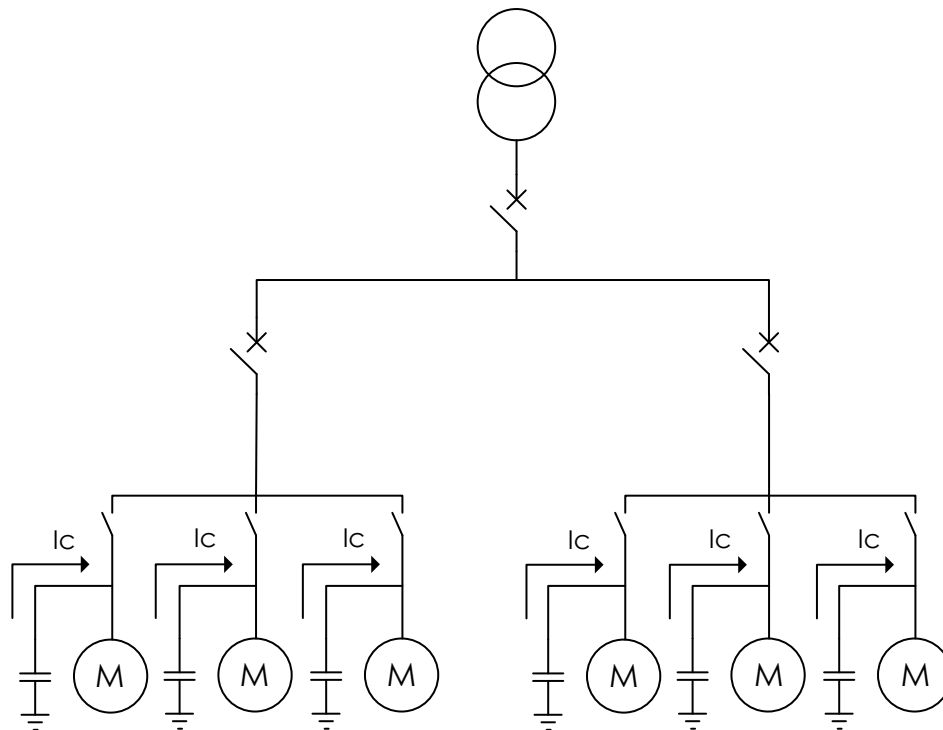


Figura 10. Compensación distribuida.

4.17.2. Compensación por grupos

La compensación por grupos consiste en conectar un banco de capacitores por grupo de cargas. Generalmente, se suelen agrupar cargas con características similares. Este tipo de compensación suele ser más atractiva ya que es más económica que la compensación distribuida, sin embargo, los beneficios de la compensación sólo afectan a los conductores aguas arriba del punto de conexión del banco de capacitores [8]. En la Figura 11 se puede observar este tipo de compensación.

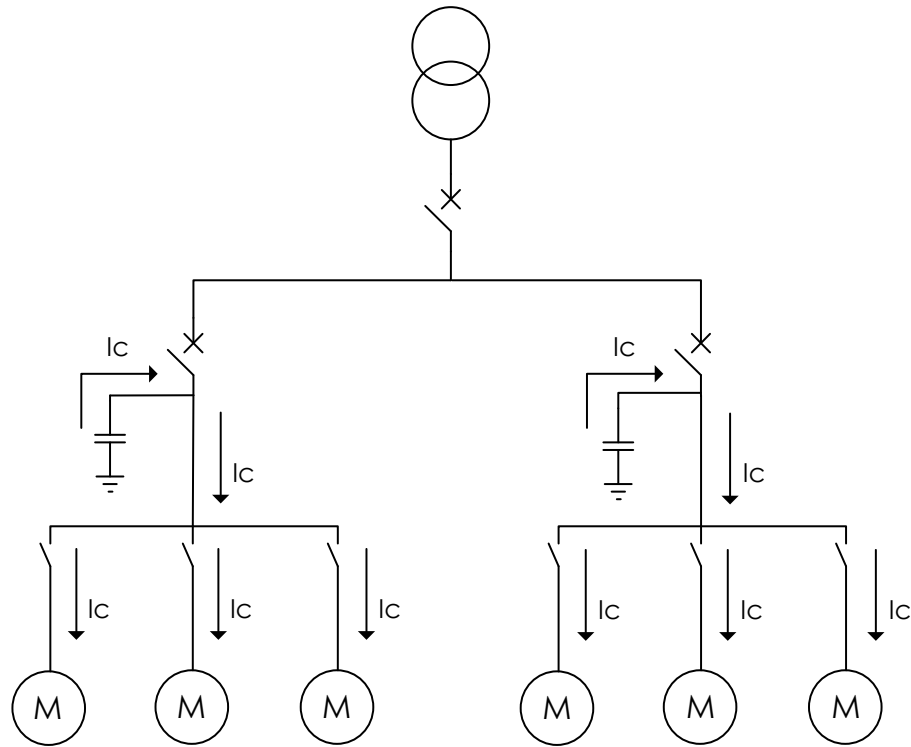


Figura 11. *Compensación por grupos.*

4.17.3. Compensación centralizada

La compensación centralizada consiste en conectar un banco de capacitores de tal forma que abarca todas las cargas. Es decir, se realiza la compensación en el punto inicial de conexión de la instalación. Este tipo de compensación se utiliza a menudo cuando se tienen muchas cargas y algunas de estas solo operan durante algunas horas al día, es evidente que la solución de la compensación distribuida resulta demasiado costosa, quedando durante largos periodos inutilizados muchos de los capacitores instalados [8]. En la Figura 12 se puede observar este tipo de compensación.

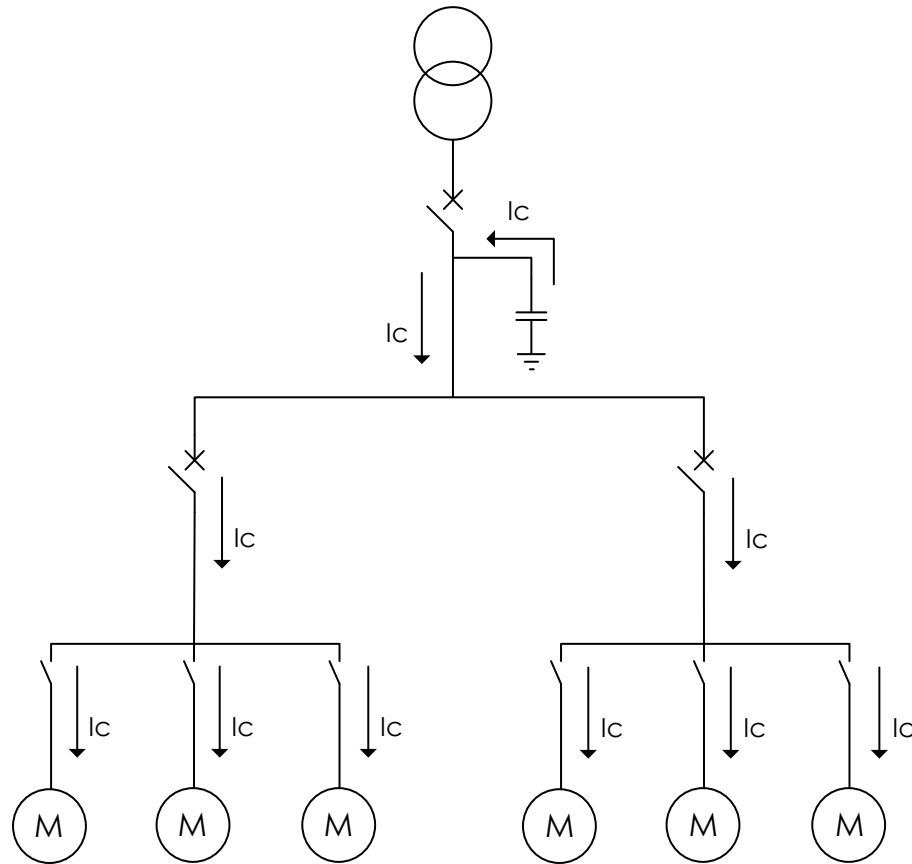


Figura 12. Compensación centralizada.

4.17.4. Compensación mixta

La compensación mixta combina la compensación distribuida y la compensación por grupos. Para las cargas de mayor potencia se utiliza la compensación distribuida, para las demás cargas se usa la compensación por grupos. La compensación mixta se usa sólo cuando se usan con mayor frecuencia las cargas más demandantes y esporádicamente el resto de las cargas [8]. En la Figura 13 se puede observar este tipo de compensación.

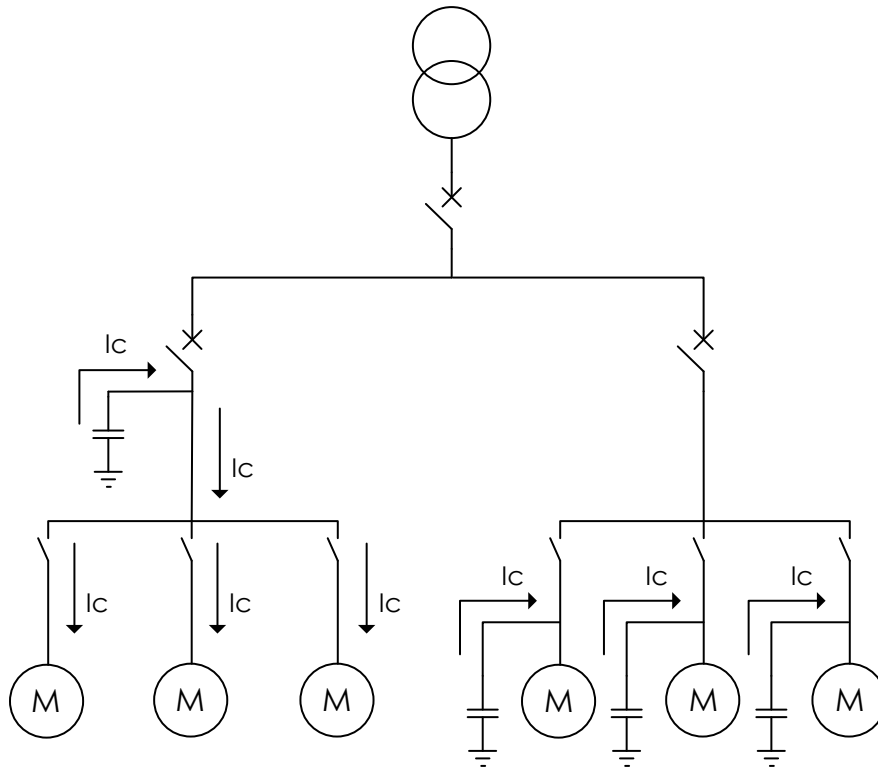


Figura 13. Compensación mixta.

4.17.5. Compensación automática

La compensación automática consiste en la conexión y desconexión automática de capacitores pertenecientes a un banco, de esta forma el banco proporcionará diferentes valores de potencia reactiva durante un periodo de tiempo. En la mayoría de las instalaciones industriales no hay un consumo de potencia reactiva constante debido a los ciclos de trabajo de las cargas, debido esto se emplea un banco automático que proporciona la potencia reactiva que necesita la carga para diferentes instantes de tiempo [8]. En cuanto a la ubicación del banco, los bancos automáticos pueden ser de tipo centralizado o por grupos.

4.18. Temperatura interna en un banco de capacitores

De acuerdo con el estándar IEEE Std 18-2012 los bancos de capacitores deben de estar diseñados para un funcionamiento continuo, incluyendo operaciones de conmutación frecuentes, en cualquier disposición de montaje ya sea interior o exterior, a una temperatura ambiente media máxima de 46 °C durante un periodo de 24 horas con picos de 55 °C, medido en la proximidad de los capacitores. La temperatura ambiente mínima de operación continua para un banco de capacitores es de -40 °C.

El incremento medio de temperatura al interior de un armario cerrado se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\Delta T = \frac{P_T}{h * A} \quad (23)$$

Donde ΔT es el incremento de temperatura en el interior del gabinete en °C, P_T es la potencia total de pérdidas en el banco en W, A es la superficie de refrigeración en m² y h es el coeficiente de transmisión, convección y radiación, el cual es $5,8 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ para envolventes metálicas y $5,2 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ para envolventes no metálicas.

Si la temperatura ambiente más el incremento medio de la temperatura excede los límites como solución se puede emplear un ventilador para mejorar aún más la refrigeración por convección a través de la siguiente expresión.

$$V = \frac{3,1 * P_D}{\Delta T} \quad (24)$$

Donde V es el caudal de aire necesario en m³/h, P_D es la potencia extra a disipar por el ventilador en W y ΔT es el incremento de temperatura deseado en el interior del armario en °C.

$$P_D = P_T - \Delta T(h * A) \quad (25)$$

4.19. Marco Normativo

A continuación, se mencionará la normatividad colombiana que regula el consumo de energía reactiva para los usuarios. Por supuesto, este marco normativo dará contexto a cerca de la importancia de tener un buen factor de potencia en nuestras instalaciones; también se mencionará la normativa correspondiente al correcto diseño de un banco de capacitores.

4.19.1. Artículo 23 de la Ley 143 de 1994

La Comisión de Regulación de Energía y Gas, CREG, tiene dentro de sus funciones la de "definir la metodología para el cálculo de las tarifas por el acceso y uso de las redes eléctricas, y los cargos por los servicios de despacho y coordinación prestados por los centros regionales de despacho y el centro nacional de despacho" [11].

4.19.2. Artículo 87.8 de la Ley 142 de 1994

"Toda tarifa tendrá un carácter integral, en el sentido de que supondrá una calidad y grado de cobertura del servicio, cuyas características definirán las comisiones reguladoras. Un cambio en estas características se considerará como un cambio en la tarifa" [12].

4.19.3. Resolución CREG 015-2018, capítulo 12 “Costos de transporte de energía reactiva”

El pago del costo de transporte de energía reactiva se deberá efectuar cuando un operador de red, OR, o un usuario final se encuentre incursos en alguna de las siguientes condiciones [1]:

- a. “Cuando la energía reactiva (kVArh) inductiva consumida por un OR sea mayor al cincuenta por ciento (50%) de la energía activa (kWh) que le es entregada en cada periodo horario en los niveles de tensión 3, 2 o 1. En este caso (...)”.
- b. “Cuando un *usuario final* registre en su frontera comercial un consumo de energía reactiva inductiva superior al cincuenta por ciento (50 %) de la energía activa (kWh) que le es entregada en cada periodo horario. En caso que la energía activa sea igual a cero en algún periodo y exista transporte de energía reactiva inductiva, el costo del transporte de energía reactiva se efectuará sobre la totalidad de energía reactiva registrada en dicho período”.
- c. “Cuando se registre en una frontera comercial el transporte de energía reactiva capacitiva, independientemente del valor de energía activa, se cobrará el costo de transporte de energía reactiva sobre la totalidad de energía reactiva registrada”.

El costo del transporte de energía reactiva se efectuará con base en la siguiente expresión [1]:

$$CTER_{u,n,h,m,j} = ER_{u,h,m,j} * M * D_{n,h,m} \quad (26)$$

Donde:

$CTER_{u,n,h,m,j}$: Costo de transporte de energía reactiva en exceso sobre el límite asignado al usuario del STR o SDL u , en pesos, del nivel de tensión n , en la hora h del mes m , del sistema operado por el OR, j .

$ER_{u,h,m,j}$: Cantidad de energía reactiva transportada en exceso sobre el límite asignado al usuario del STR o SDL u , en la hora h del mes m , en el sistema del OR, j , en kVAr.

$D_{n,h,m}$: Cargo por uso de sistemas de distribución para el transporte de energía reactiva. Es igual al cargo por uso del nivel de tensión n en la hora h del mes m que enfrenta un usuario conectado al sistema, cuando se registró el transporte de energía reactiva. El cargo por uso aplicable para el pago del transporte de energía reactiva por parte del usuario del STR o SDL será

igual al cargo por uso de energía activa que enfrenta en función del sistema y el nivel de tensión en el que se encuentre conectada la frontera.

M: Variable asociada con el periodo mensual en el que se presenta el transporte de energía reactiva sobre el límite establecido.

4.19.4. Resolución CREG 199-2019, Artículo 7

La definición de la variable *M* incluida en el Capítulo 12 del anexo general de la Resolución CREG 015 de 2018 quedará así [2]:

“*M*: Variable asociada con el periodo mensual en el que se presenta el transporte de energía reactiva sobre el límite establecido, variando entre 1 y 12.

Cuando el transporte de energía reactiva en exceso sobre el límite se presente durante cualquier período horario en diez (10) días o menos en un mismo mes calendario, la variable *M* será igual a 1.

Cuando el transporte de energía reactiva en exceso sobre el límite se presente durante cualquier período horario en más de diez (10) días en un mismo mes calendario, la variable *M* será igual a 1 durante los primeros 12 meses en los que se presente esta condición. A partir del décimo tercer mes de transporte de energía reactiva con la misma condición, esta variable se incrementará mensualmente en una unidad hasta alcanzar el valor de 6.

Si el transporte de energía reactiva en exceso sobre el límite desaparece durante más de tres meses consecutivos, la variable reiniciará a partir de 1.

Cuando el valor de $M=6$ se haya mantenido durante 12 meses, en caso de persistir el consumo de energía reactiva en exceso sobre el límite, a partir del mes siguiente la variable continuará incrementándose mensualmente en una unidad hasta alcanzar el valor de 12.”

4.19.5. Resolución CREG 108-1997, Artículo 25 “Control al factor de potencia en el servicio de energía eléctrica”

En la prestación del servicio público domiciliario de energía eléctrica, se controlará el factor de potencia de los suscriptores o usuarios no residenciales, y de los residenciales conectados a un nivel de tensión superior al uno [3].

Parágrafo 1. “El factor de potencia inductiva (coseno phi inductivo) de las instalaciones deberá ser igual o superior a punto noventa (0.90). La empresa exigirá a aquellas instalaciones cuyo factor de potencia inductivo viole este límite, que instalen equipos apropiados para controlar y medir la energía reactiva.”

Un alto factor de potencia inductivo previene la demanda excesiva de potencia reactiva en la red. No obstante, no garantiza que el usuario no inyecte potencia reactiva en esta, de ser así, hay penalización por transporte de potencia reactiva de acuerdo a la CREG 015 – 2018.

4.19.6. IEEE Std 18-2012, Standard for Shunt Power Capacitors

La IEEE std 18 – 2012 define las siguientes clasificaciones y capacidades para un banco de capacitores [13]:

a. Tolerancia capacitiva: La capacitancia medida de una unidad no variará entre el -10% y el +10% del valor nominal basado en kVAr nominal, voltaje y frecuencia, medido a 25 °C caja uniforme y temperatura interna.

b. Límites de operación de voltaje, corriente y kVAr: Los capacitores deben poder operar tanto en condiciones de defecto como de contingencia siempre y cuando no se superan los siguientes límites. Esta operación no está destinada a ser una condición permanente:

- 110% de la tensión rms nominal (incluidos armónicos, pero excluyendo transitorios).
- 120% del voltaje pico nominal, es decir, voltaje pico que no exceda $1,2 \times \sqrt{2}$ x voltaje rms nominal, incluidos los armónicos, pero excluyendo los transitorios.
- 135% de la corriente rms nominal basada en kVAr nominal y voltaje nominal.
- 135% del kVAr nominal.

Es importante tener presente que: un reactor conectado en serie con una instalación de capacitor aumenta el voltaje de la unidad de este. (El voltaje del reactor resultante de la corriente capacitiva se suma al voltaje del sistema). El voltaje nominal del capacitor debe ser igual o mayor que la suma del voltaje operativo máximo del sistema (con el capacitor en servicio) más el aumento de voltaje del reactor en este sistema tensión máxima de funcionamiento.

c. Frecuencia: Los condensadores de potencia deben estar diseñados para funcionar a la frecuencia nominal de 50 Hz o 60 Hz.

4.19.7. IEEE Std 1036-2020, *Guide for the Application of Shunt Power Capacitors*

La IEEE std 1036-2020 define los siguientes lineamientos para la potencia reactiva en un banco de capacitores [14].

Los condensadores son adecuados para un funcionamiento continuo al 135% de la potencia reactiva nominal. Esta potencia reactiva máxima incluye los siguientes factores (los efectos combinados no deben superar el 135%):

- a. Potencia reactiva debido a un voltaje que exceda el valor nominal de la placa de identificación a la frecuencia fundamental, pero dentro de las limitaciones de voltaje permisibles descritas en la IEEE std 18-2012.
- b. Potencia reactiva debida a tensiones armónicas superpuestas a la frecuencia fundamental.
- c. Potencia reactiva superior a la nominal de la placa de identificación debido a la tolerancia de fabricación dentro de los límites especificados en la IEEE std 18-2012.

La potencia reactiva de salida se puede determinar cómo:

$$Q_{op} = (2\pi f C) V_A^2 \quad (27)$$

Donde Q_{op} es la potencia reactiva de operación del capacitor en kVAr, V_A es el voltaje aplicado en kV, f es la frecuencia del sistema y C es la capacitancia del capacitor en microfaradios.

La salida de potencia reactiva variará según el voltaje aplicado real, que puede ser diferente al voltaje nominal. Por lo tanto, la potencia reactiva de operación se puede calcular como:

$$Q_{op} = Q_R \left(\frac{V_A}{V_R} \right)^2 \quad (28)$$

Donde Q_{op} es la potencia reactiva de operación del capacitor en kVAr, Q_R es la potencia reactiva nominal del capacitor en kVAr, V_A es el voltaje aplicado y V_R es el voltaje nominal.

4.19.8. **Transitorios en la conmutación de capacitores.**

De acuerdo a lo establecido en la IEEE std 1036-2020 cuando un banco de capacitores se energiza o desenergiza, se producen transitorios de corriente y voltaje que afectan tanto al banco de capacitores como al sistema donde

se encuentra conectado. Cuando el interruptor está cerrado, una corriente de alta frecuencia y gran magnitud fluye hacia el capacitor, intentando igualar el voltaje del sistema y el voltaje del capacitor. Si el interruptor se cierra en un pico de voltaje, el voltaje en el capacitor intenta aumentar inmediatamente desde la condición de voltaje cero, desenergizado, al voltaje pico. En el proceso de lograr este cambio de voltaje, se produce un sobreimpulso. Esta sobretensión también es de la misma alta frecuencia que la corriente de irrupción, y decae rápidamente al voltaje del sistema [14]. Los valores típicos de magnitud transitoria voltaje fase tierra oscilan entre 1.2 y 1.8 p.u para bancos de subestaciones. Las frecuencias transitorias debido a la conmutación de condensadores generalmente oscilan entre los 300 Hz y los 1000 Hz [14].

4.19.9. Limitaciones armónicas para un capacitor.

De acuerdo a la IEEE std 1036-2020, si las corrientes armónicas en un sistema sobre pasan los límites establecidos de acuerdo a la IEEE std 18-2012 se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones [14]:

- a. Reubicar el banco de capacitores a otras partes del circuito, de esta manera se pueden reducir sobrecorrientes debido a resonancia.
- b. Los capacitores pueden desconectarse, de manera automática, del circuito durante periodos de tiempo en los que es probable que se produzcan sobrecorrientes.
- c. Eliminar la tierra del banco de capacitores si este presenta.
- d. En caso de que los ítems anteriores no sean suficientes, puede ser necesario el uso de filtros armónicos. Las aplicaciones con carga armónica significativa representan condiciones de servicio inusuales y deben de remitirse directamente al fabricante.

4.19.10. IEEE Std 519-2014, Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems

De acuerdo a la IEEE std 519-2014 se presenta en la Tabla 1 los valores límites de distorsión de voltaje para sistemas de media y alta tensión [7].

Tabla 1. Límites de distorsión armónica de voltaje.

Nivel de tensión (kV)	Distorsión total de voltaje THD (%)
$V \leq 69$	5,0
$69 < V \leq 161$	2,5
$V > 161$	1,5

4.19.11. IEC 61642-1997, Application of filters and shunt capacitors

De acuerdo a la IEC 61642. La solución más común para evitar problemas de resonancia en un banco de capacitores es conectar un reactor en serie con el condensador, sintonizado a una frecuencia de resonancia en serie que esté por debajo de la frecuencia más baja de las tensiones y corrientes armónicas en la red. La interacción de la inductancia de la red y la impedancia (inductiva) del capacitor - reactor ya no puede crear una condición de resonancia, ya sea una resonancia en serie o paralelo, en las frecuencias de los voltajes y corrientes armónicas de la red. El reactor puede especificarse por su impedancia relativa de la siguiente manera [15]:

$$\frac{f_{LC}}{f_1} = \sqrt{\frac{100}{\rho}} \quad (29)$$

Donde f_{LC} es la frecuencia de sintonía en Hz, f_1 es la frecuencia fundamental del sistema en Hz y ρ es el factor de sobretensión en %.

En la mayoría de las redes, el quinto armónico es la frecuencia más baja con una amplitud considerable. Para estos casos, es útil elegir una conexión de capacitor - reactor con una frecuencia de sintonización por debajo de $5 \cdot f_1$, es decir, $\rho > 4\%$ [15].

Para los filtros, se debe considerar el aumento de voltaje en el condensador causado por la conexión en serie del reactor. Algunos fabricantes establecen que el aumento de voltaje en las terminales del capacitor se determina como [16]–[18]:

$$U_c = \frac{U_N}{1 - \frac{\rho\%}{100}} \quad (30)$$

Donde U_c es el voltaje en el capacitor en V, U_N es el voltaje nominal del sistema en V y ρ es el factor de sobrevoltaje en %.

4.19.12. RETIE artículo 20.11, Condensadores de baja y media tensión.

De acuerdo al RETIE, Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas para Colombia, en el artículo 20.11 se establecen los requerimientos para los condensadores de baja y media tensión [19]. Entre estos encontramos: "Para instalaciones donde la distorsión armónica total de tensión (THDv), sea superior al 5% en el punto de conexión, los bancos capacitivos deben ser dotados de reactancias de sintonización o en su defecto se deben implementar filtros activos de armónicos."

4.20. Python

Python es un lenguaje de programación interpretado, orientado a objetos y de alto nivel con semántica dinámica. Sus estructuras de datos integradas de alto nivel, combinadas con tipado dinámico y enlace dinámico, lo hacen muy atractivo para el desarrollo rápido de aplicaciones [20]. Python a menudo es usado para la computación científica de datos, por lo tanto, es una excelente opción a la hora de trabajar con grandes volúmenes de datos.

4.20.1. NumPy

NumPy es el paquete fundamental para la computación científica en Python. Es una biblioteca de Python que proporciona un objeto de matriz multidimensional, varios objetos derivados (como matrices y matrices enmascaradas) y una variedad de rutinas para operaciones rápidas en matrices, incluidas las matemáticas, lógicas, manipulación de formas, clasificación, selección, transformadas discretas de Fourier, álgebra lineal básica, operaciones estadísticas básicas, simulación aleatoria, entre otras [21].

4.20.2. Pandas

Pandas es un paquete de Python de código abierto que se usa ampliamente para la ciencia de datos, análisis de datos y tareas de aprendizaje automático. Pandas está construido sobre el paquete NumPy, que proporciona soporte para matrices multidimensionales [22].

4.20.3. Matplotlib

Matplotlib es una biblioteca completa para crear visualizaciones estáticas, animadas e interactivas en Python. Por supuesto, permite crear todo tipo de visualizaciones de datos [23].

5. Metodología

A continuación, se presentan todos los pasos metodológicos que se realizaron para el desarrollo de este trabajo.

5.1. Identificación del área de trabajo

Se identificó el área de trabajo a través de varias visitas realizadas a la planta (módulo A). Esta actividad permitió conocer qué tipo de carga se encontraba instalada y cuáles eran los ciclos de trabajo para los diferentes grupos de carga, esta información fue recolectada a través de consultas realizadas a trabajadores, supervisores e ingenieros de planta.

5.2. Revisión de los planos eléctricos

Se revisó los planos eléctricos del módulo A con el objetivo de determinar cuál era la carga total instalada para cada uno de los diferentes tableros de distribución encontrados y qué subestación o subestaciones alimentaban la planta y de esta forma, poder determinar puntos factibles de medición y compensación en caso de que fuese necesario.

5.3. Obtención de las medidas eléctricas

Se obtuvo los datos correspondientes a dos subestaciones, subestación 14 y 15, que alimentan el módulo A; las medidas corresponden a voltajes, corrientes, factor de potencia, potencia activa, reactiva y aparente en el barraje del tablero de distribución principal para cada una de las dos subestaciones.

5.4. Procesamiento de datos

Se procesaron los datos obtenidos por el analizador de redes a través de la herramienta de programación Python descrita en la sección 4.20 para las dos subestaciones.

5.5. Análisis de datos

Se analizaron los datos respectivos mediante gráficos y parámetros estadísticos para cada una de las subestaciones. Los datos fueron separados en periodos de una semana para un análisis mucho más acertado y confiable.

5.6. Revisión del marco normativo.

Se revisó la norma expuesta en la sección 4.19 con el fin de determinar si se estaba cumpliendo o no los requerimientos exigidos por la Resolución CREG 015-2018 y Resolución CREG 108-1997.

5.7. Dimensionamiento del banco subestación 14 y 15

Una vez se obtuvieron los datos de forma tabulada de acuerdo al paso 5.4 y 5.5 descrito anteriormente, se dimensionó el banco de capacitores de acuerdo a la semana más crítica tanto para la subestación 14 como para la 15.

5.8. Análisis de armónicos

Para cada banco de capacitores, banco 14 y 15, se analizó el contenido armónico con base a los estándares IEEE Std 18-2012 e IEEE Std 1036-2020.

5.9. Diseño del banco de capacitores 14 y 15

Se diseñó un banco de capacitores automático para las subestaciones 14 y 15 de acuerdo a los resultados obtenidos en 5.7 y 5.8. Se definió el número de pasos y elementos que lo conforman.

5.10. Evaluación del banco de capacitores 14 y 15

Se evaluó el desempeño de ambos bancos de acuerdo a los lineamientos de la IEEE Std 18-2012.

6. Resultados y análisis

6.1. Área de trabajo

El módulo A de Compañía de Empaques es alimentado a través de dos subestaciones, subestación 14 y 15, las cuales se encargan de proveer todo el suministro de energía eléctrica a dicha área.

En el módulo A podemos encontrar cuatro grandes zonas de procesado de sacos de polipropileno los cuales son: Laminado, terminación, tejido y flexografía.

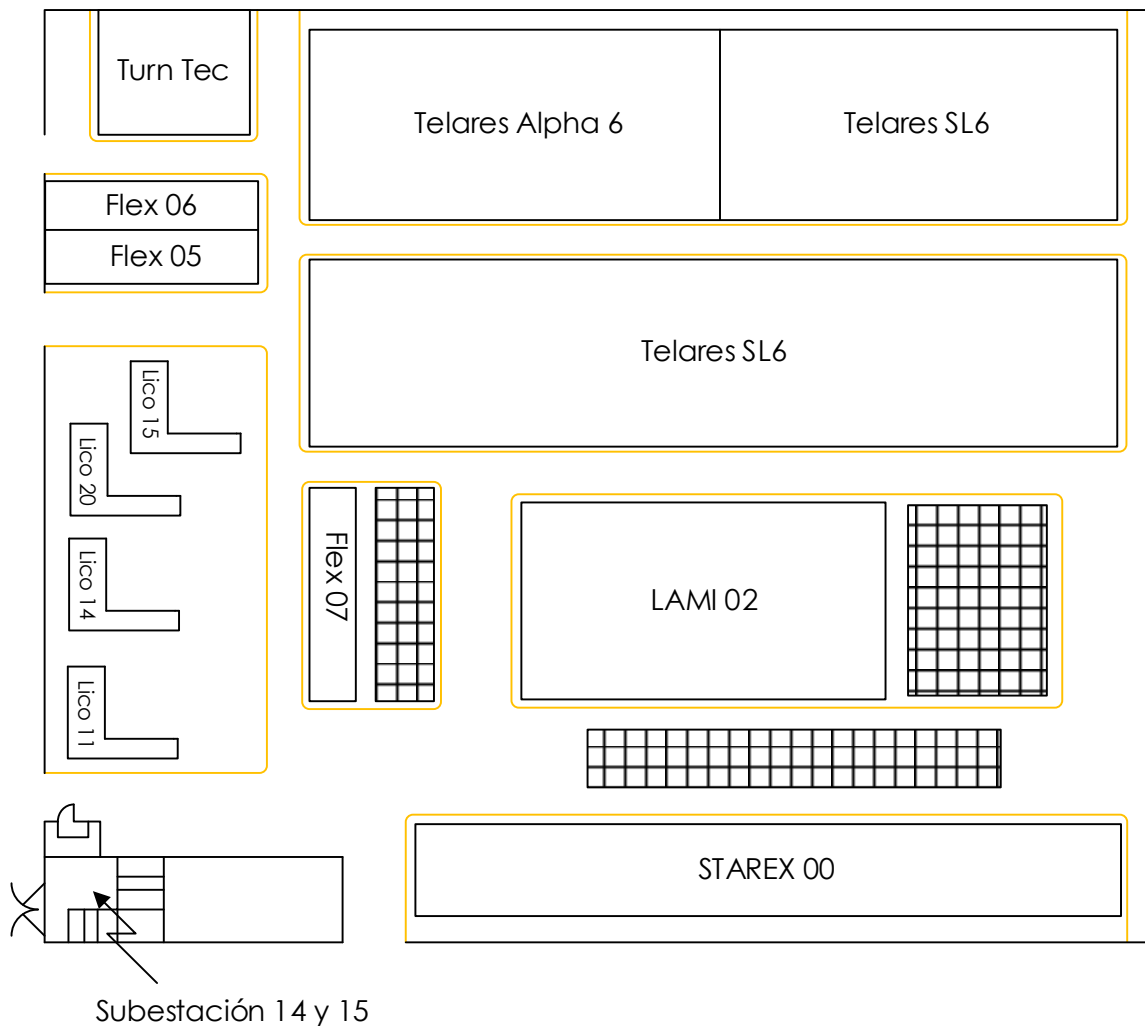


Figura 14. Vista en planta Módulo A.

En la Figura 14 se observa la vista en planta del módulo A, la subestación 14 y 15 se encuentran ubicadas en el mismo cuarto. El módulo A es una de las plantas de la compañía cuyo ciclo de trabajo es de 24 horas de lunes a domingo en donde se manejan tres turnos labores. EL primer turno maneja el horario de 6:00 a.m. - 2:00 p.m. El segundo turno maneja el horario de 2:00 p.m. - 10:00 p.m. Y el tercer turno maneja el horario de 10:00 p.m. – 6:00 a.m.

En la Figura 15 se encuentran algunos registros fotográficos del Módulo A.



(a)



(b)

Figura 15. (a) y (b) módulo A, Compañía de Empaques.

6.2. Medidas eléctricas.

6.2.1. Equipo de medida, Lovato DMG 800.

El Lovato DMG 800 es un analizador de redes de operación continua con un tamaño estándar de 96x96 mm y una pantalla LCD de 128x80 píxeles, compatible con redes de baja, media y alta tensión. Con capacidad de medir hasta más de 300 parámetros eléctricos, entre ellos tensión, corriente, factor de potencia, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, armónicos de tensión y corriente hasta el orden 31, etc. La precisión del equipo es del $\pm 0.2\%$ para tensión de fase, compuesta y corriente. En la figura se observa el equipo [24].



(a)



(b)

Figura 16. (a) y (b) Lovato DMG 800.

6.2.2. Subestación 14.

La subestación 14 está conformada por un transformador en aceite de 630 kVA, 13,2 kV / 460 V. Las cargas que alimenta el transformador son: extruder, enconadoras, laminadora, chiller y compresores. Es importante tener en cuenta que la subestación 14 posee dos grupos de capacitores existentes uno de 12 kVAr y otro de 24 kVAr (ver Figura 17) los cuales se encuentran en funcionamiento.



Figura 17. Capacitores existentes subestación 14.

Las medidas eléctricas de la subestación 14 fueron obtenidas a través del analizador de redes Lovato DMG 800, ubicado en el tablero principal de distribución de la subestación 14 (ver Figura 18). Los datos obtenidos corresponden a 6 meses de medida comprendidos entre el 01 de septiembre de 2020 y 01 de marzo de 2021, para un total de 80.687 datos registrados.

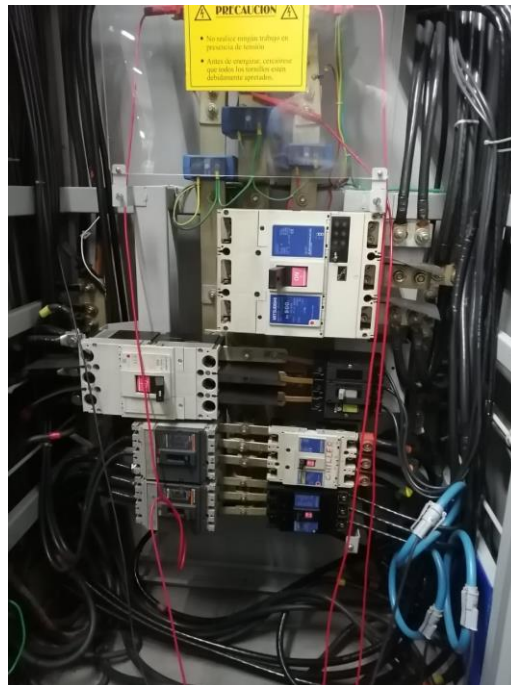


Figura 18. Tablero de distribución principal subestación 14.

En la Tabla 2 se presenta de una manera más detallada las características principales del transformador de la subestación 14.

Tabla 2. Características principales del transformador, subestación 14.

Transformador subestación 14	
Capacidad	630 kVA
Alta tensión	13200 V
Baja tensión	460 V
Uz % (630 kVA)	4,68
Conexión	Dyn5
Líquido aislante	Aceite mineral
Fabricante	SUNTEC

6.2.3. Subestación 15

La subestación 15 está conformada por un transformador en aceite de 500 kVA, 13,2 k / 460 V. Las cargas que alimenta el transformador son: telares, licos, flexográficas, repasadora, iluminación, entre otras. Las medidas eléctricas de la subestación 15 fueron obtenidas a través del analizador de redes Lovato DMG 800, ubicado en el tablero principal de distribución de la subestación 15 (ver Figura 19). Los datos obtenidos corresponden a 6 meses de medida comprendidos entre el 01 de septiembre de 2020 y 01 de marzo de 2021, para un total de 80.687 datos registrados.



Figura 19. Tablero de distribución principal subestación 15.

En la Tabla 3 se presenta de una manera más detallada las características principales del transformador de la subestación 15.

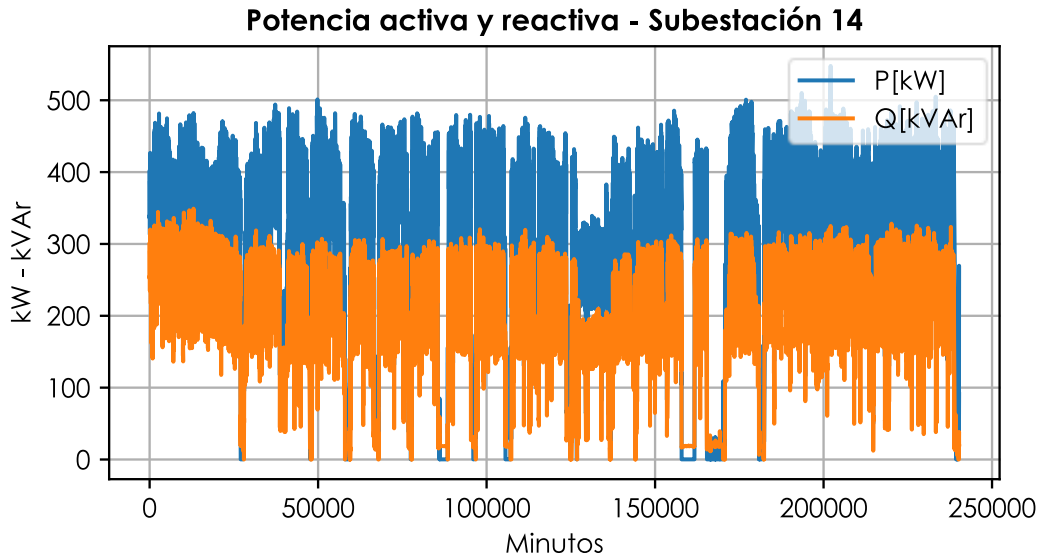
Tabla 3. Características principales del transformador, subestación 15.

Transformador subestación 15	
Capacidad	500 kVA
Alta tensión	13200 V
Baja tensión	460 V
Uz % (630 kVA)	4,66
Conexión	Dyn5
Líquido aislante	Aceite mineral
Fabricante	SUNTEC

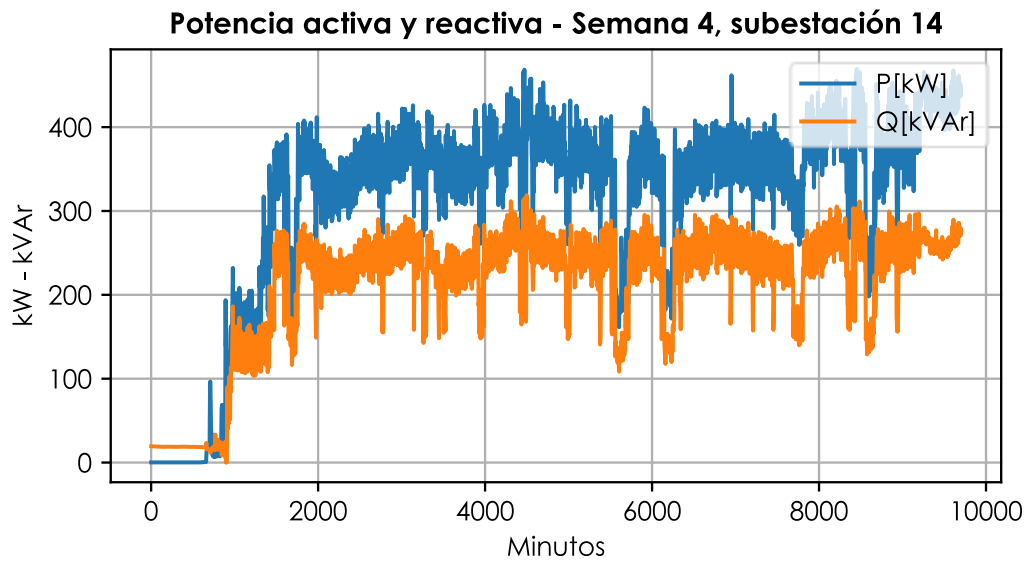
6.3. Procesamiento y análisis de datos.

Debido a la gran variedad de cargas y ciclos de trabajo que tienen las cargas en el módulo A se decidió realizar una compensación centralizada para cada una de las dos subestaciones, ver sección 4.17.3. Otros factores importantes que llevaron a tomar esta decisión era la falta de espacio para realizar otro tipo de compensación y los recursos destinados para el banco; ambos bancos serán automáticos por la misma razón que se optó por la compensación centralizada.

Para ambas subestaciones se tomaron 80.687 datos como se mencionó anteriormente con un periodo de muestreo de cada 3 minutos. El primer filtro aplicado a los datos fue eliminar aquellas instancias que contenían valores nulos. Es decir, se eliminaron aquellas muestras donde existía algún valor vacío para alguna variable eléctrica a causa de un error en la medida. Una vez aplicado el primer filtro el total de datos se redujo a 80.076 datos. Como segundo proceso, aplicado a los datos, fue separar la muestra por semanas, esto permitía realizar un mejor seguimiento de las diferentes variables medidas. Por ejemplo, en la Figura 20 (a) se encuentra la gráfica de la potencia activa y reactiva durante todo el tiempo de medición, como se puede apreciar es bastante difícil tratar de analizar un comportamiento para ambas potencias debido a la variabilidad de las mismas en el tiempo. Por el contrario, en la Figura 20 (b) se encuentra la gráfica de ambas potencias en un periodo de una semana, en esta grafica si es mas cómodo analizar el comportamiento de la potencia activa y reactiva.



(a)

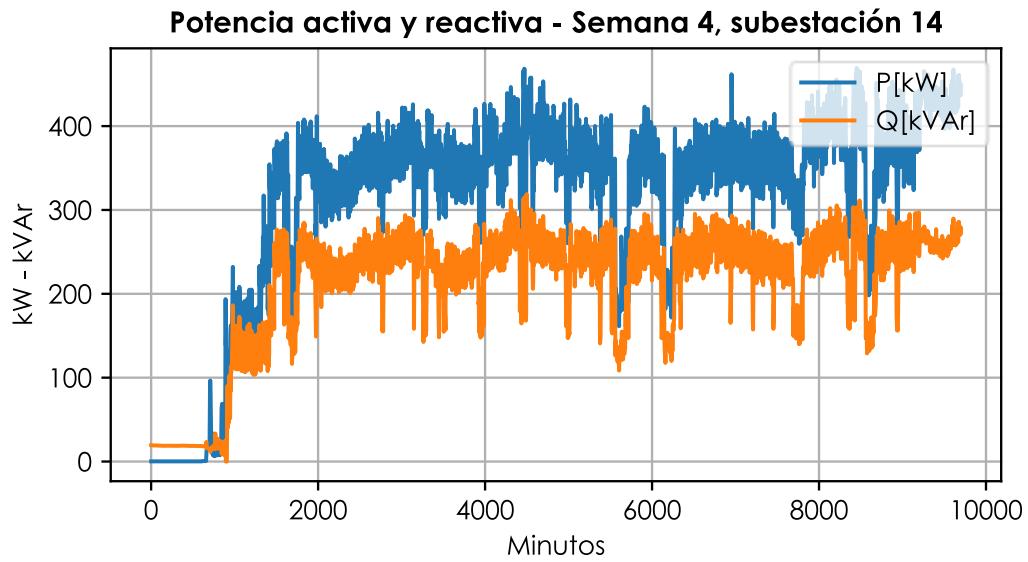


(b)

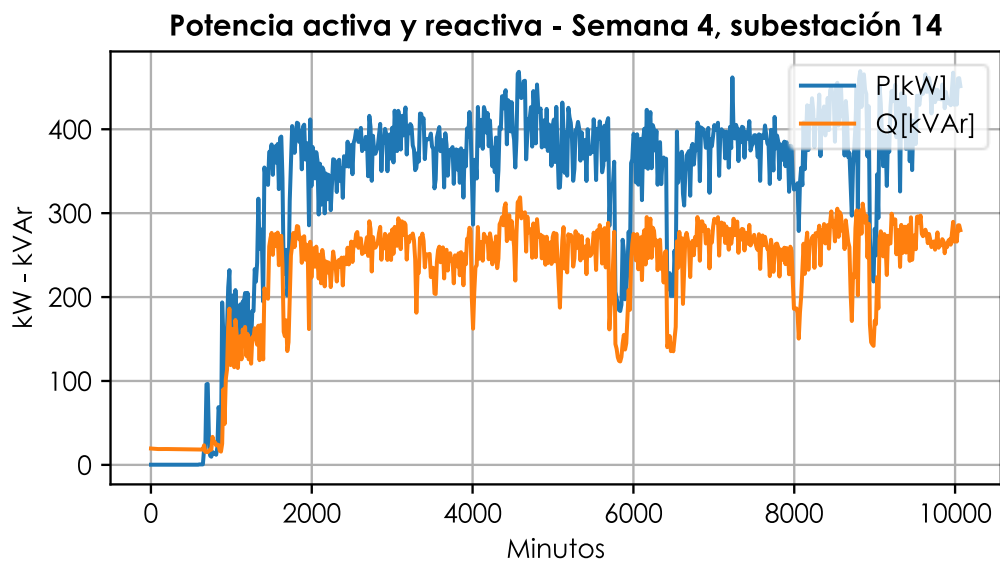
Figura 20. (a) Potencia activa y reactiva durante los 6 meses.
(b) Potencia activa y reactiva durante una semana.

En total se obtuvieron 28 semanas entre el primer y último día de medida.

Cómo último paso en el ajuste de los datos se exploró la opción de agrupar los datos en periodos de muestreo de 15 minutos para reducir un poco más los datos y hacer mucho más visible el comportamiento de cada una de las variables. A la hora de agrupar los datos cada 15 minutos se eligió el valor máximo del conjunto. Es decir, originalmente los datos están cada 3 minutos, por lo tanto, 15 minutos serán 5 datos de 3 minutos en el cual se elige el valor máximo de los 5 datos. Por su puesto se siguen conservando los periodos semanales.



(a)



(b)

Figura 21. (a) Potencia activa y reactiva con periodo de muestreo de 3 minutos.
(b) Potencia activa y reactiva con periodo de muestreo de 15 minutos.

En la Figura 21 (a) se observa la gráfica de potencia activa y reactiva con un periodo de muestreo de 3 minutos, en la Figura 21 (b) se observa la misma gráfica con un periodo de 15 minutos. Si bien el muestreo cada 15 minutos, es menos detallado que el de 3 minutos, permite una visualización y un análisis más cómodo y sigue conservando la tendencia de las variables eléctricas.

En resumen, se trabajaron 28 semanas tanto para la subestación 14 como para la 15 con un periodo de muestreo de 15 minutos para cada semana. Las

variables eléctricas medidas fueron: voltaje de línea, corriente de línea, factor de potencia, potencia aparente y armónicos. Las demás potencias se calcularon mediante las expresiones expuestas en la sección 4.1, 4.2 y 4.5.

En el anexo 1 se encuentran los datos de las variables medidas, por el cual, a través de la herramienta Python fueron procesados, ver sección 4.20.

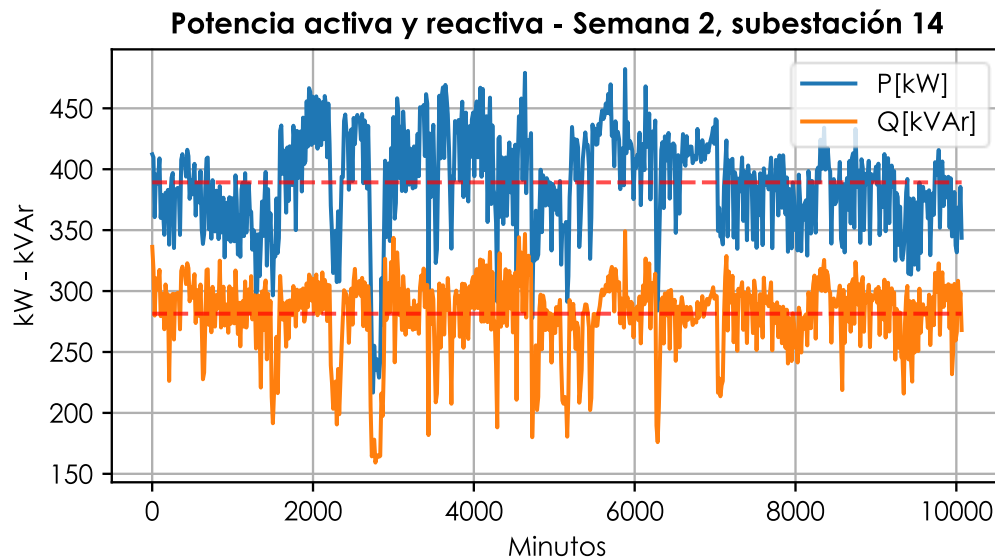
6.4. Dimensionamiento del banco de capacitores.

Para el dimensionamiento del banco 14 y 15 se utilizó la semana más crítica de las 28, para ambas subestaciones. No se realizó ningún tipo de promedio entre semanas debido al comportamiento variable de la carga (ver Figura 21 (b)) ya que el promedio es una medida de tendencia central que es fuertemente afectada por valores que estén muy por encima o por debajo de la muestra, dando como resultado un valor poco confiable.

Una semana crítica es aquella que cumple con las características de tener una alta demanda de potencia activa y reactiva con un bajo factor de potencia ya que requeriría gran potencia reactiva capacitiva para elevar el factor de potencia, es decir, requeriría un banco más grande.

6.4.1. Semana crítica subestación 14.

Para la subestación 14 la semana más crítica corresponde a la semana 2, semana del 6 de septiembre de 2020.



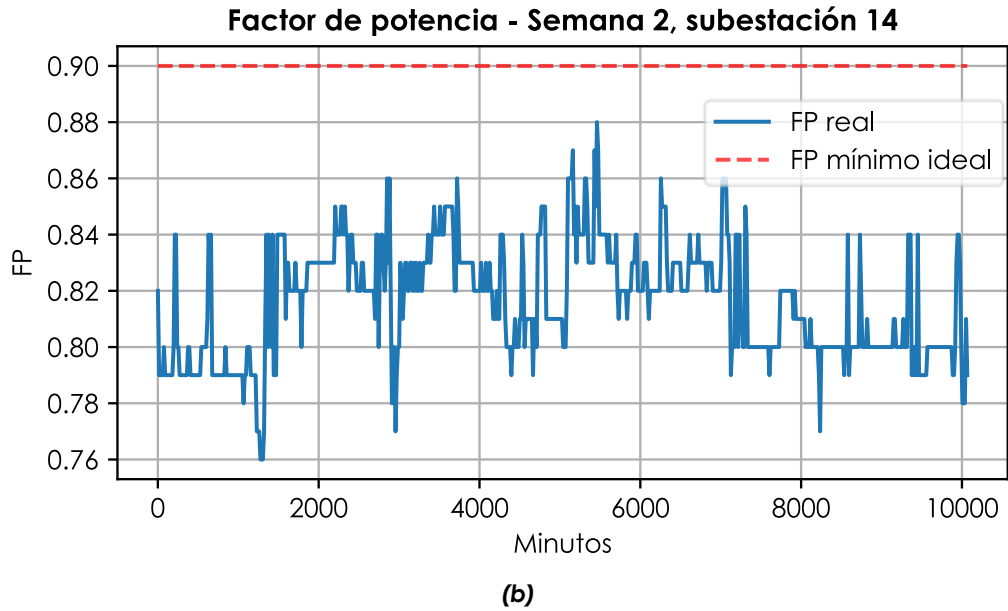
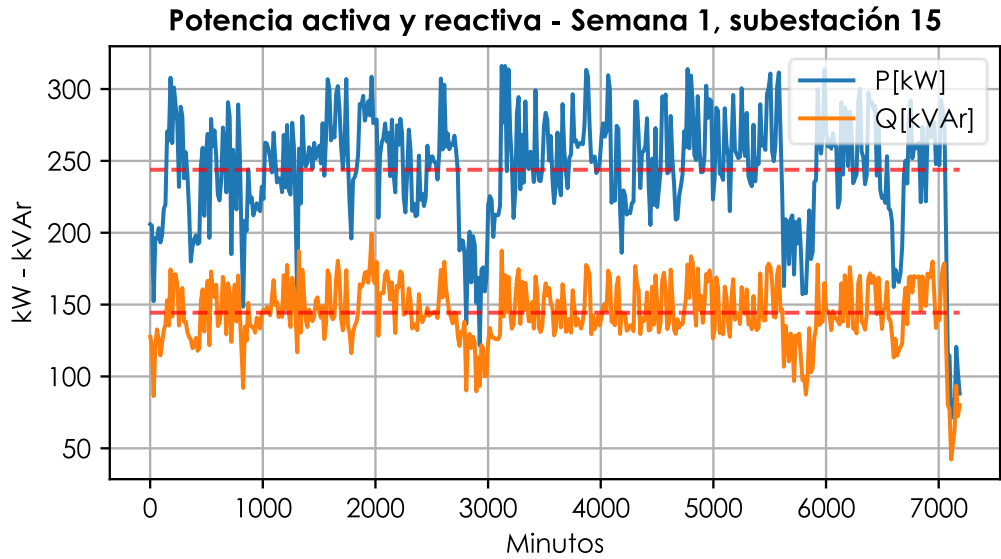


Figura 22. (a) Potencia activa y reactiva, semana crítica, subestación 14.
(b) Factor de potencia, semana crítica, subestación 14.

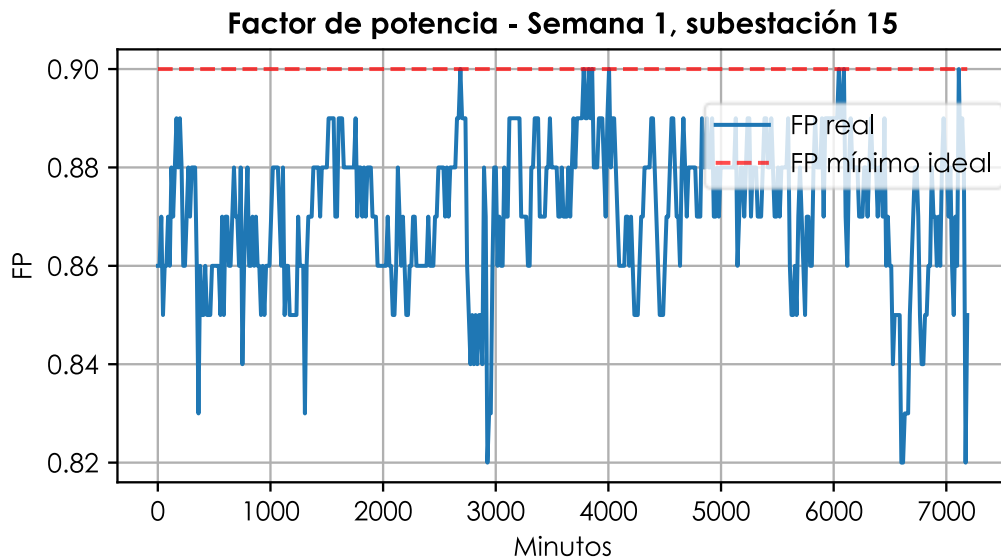
En la Figura 22 (a) se puede observar la semana más crítica de la subestación 14 donde la línea punteada roja representa la media tanto para la potencia activa como para la reactiva. Ambas potencias presentan picos elevados como bajos alrededor de la media. Sin embargo, la potencia reactiva es la que genera grandes problemas cuando en algunos instantes de tiempo se generan picos elevados. En la Figura 22 (b) se encuentra para esa misma semana el factor de potencia. Como se puede observar en ningún momento el factor de potencia alcanzó el mínimo deseado, mínimo establecido de acuerdo a la sección 4.19.5. Es importante resaltar que ambas figuras están estrechamente relacionadas, si bien, al generarse grandes picos de potencia reactiva se genera grandes caídas en el factor de potencia, ver sección 4.2 y 4.4.

6.4.2. Semana crítica subestación 15.

Para la subestación 15 la semana más crítica corresponde a la semana 1, semana del 1 de septiembre de 2020. En la semana 2 la subestación 15 presentó intervalos de tiempo en los que no se encontraba operando a plena carga por esa razón la semana crítica de la subestación 15 no corresponde a la de la 14.



(a)



(b)

Figura 23. (a) Potencia activa y reactiva, semana crítica, subestación 15.

(b) Factor de potencia, semana crítica, subestación 15.

En la Figura 23 (a) se puede observar la semana más crítica de la subestación 15 donde la línea punteada roja representa la media tanto para la potencia activa como para la reactiva. Ambas potencias presentan picos elevados como bajos alrededor de la media. En la Figura 23 (b) se encuentra para esa misma semana el factor de potencia. Como se puede observar en algunos instantes de tiempo el factor de potencia alcanza el mínimo deseado, mínimo establecido de acuerdo a la sección 4.19.5.

Comparando la subestación 14 con la 15 se puede observar que para el caso de la subestación 15 el factor de potencia se encuentra mucho más

cercano al factor de potencia mínimo deseado lo que implica que el banco de capacitores de la subestación 15 será de menor potencia reactiva que el banco de capacitores de la subestación 14. Además, se puede concluir que la subestación 15 posee cargas menos demandantes que la subestación 14 debido a que su consumo de potencia activa es mucho menor al consumo de la subestación 14.

6.4.3. Dimensionamiento del banco para la subestación 14.

Con base a la semana más crítica, ver sección 6.4.1, se dimensionó el banco de capacitores. Para cada instante de tiempo se compensó de acuerdo a la ecuación (19) y se seleccionó el Q_c máximo, como la potencia nominal inicial del banco de capacitores. El factor de potencia deseado se seleccionó de 0,95 inductivo y no uno mayor para evitar una posible sobrecompensación en el sistema. Es decir, al tener un factor de potencia muy cercano a 1 se corre el riesgo de que el consumo de potencia activa baje en un periodo determinado de tiempo y el sistema pase de ser inductivo a capacitivo generando así, un posible transporte de energía reactiva en el sistema.

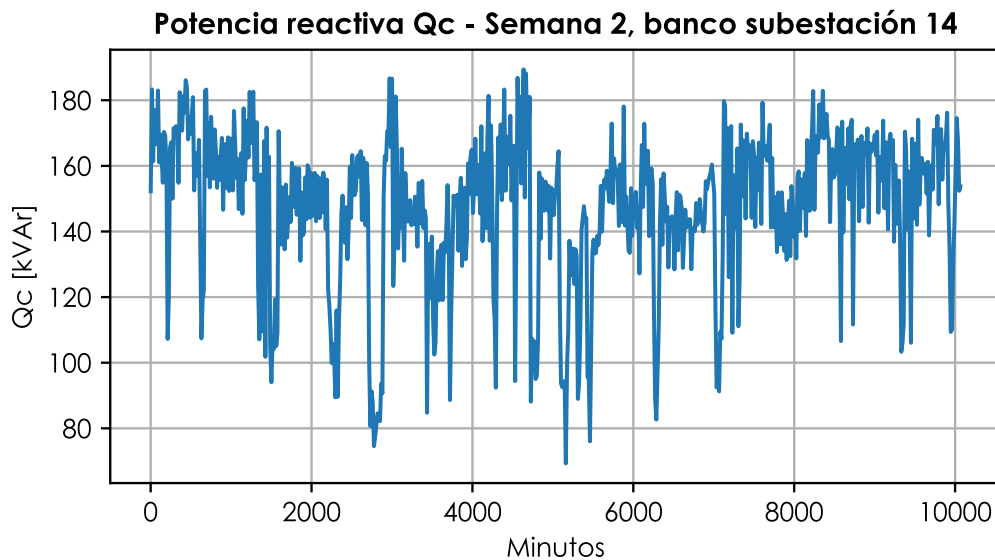


Figura 24. Potencia reactiva capacitiva requerida, banco subestación 14

En la Figura 24 se observa la potencia reactiva capacitiva necesaria durante todo el periodo de tiempo para mantener un factor de potencia en 0,95 inductivo. El valor máximo Q_c nos entregará en primera medida un valor inicial de la potencia reactiva necesaria del banco. En la Tabla 4 se encuentra los percentiles para la variable Q_c donde inicialmente se indica la potencia nominal del banco, valor que corresponde al máximo.

Tabla 4. Percentiles para la variable Q_c , banco subestación 14.

Banco de capacitores subestación 14	
Percentiles Q_c	[kVAr]
Máximo	189,40
95 %	175,54
75%	163,49
50%	152,01
25%	138,77
Mínimo	69,32

6.4.3.1. Elección de la potencia nominal del banco.

De acuerdo a los valores de la Tabla 4 se realizaron diferentes simulaciones para verificar cuáles valores de Q_c cumplirían con los requerimientos mínimos de factor de potencia.

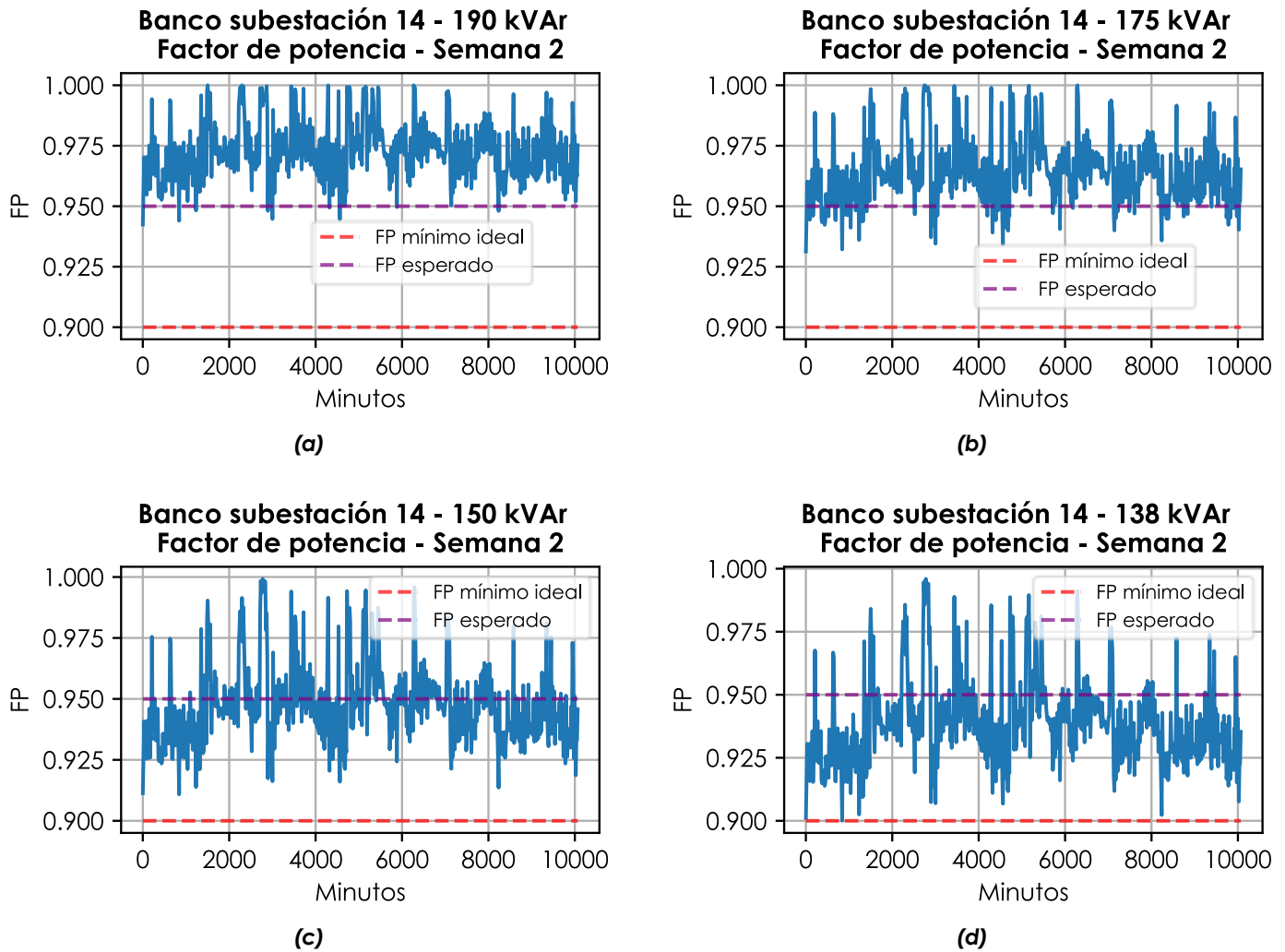


Figura 25. (a) Simulación de la corrección del factor de potencia, banco de 190 kVAr.

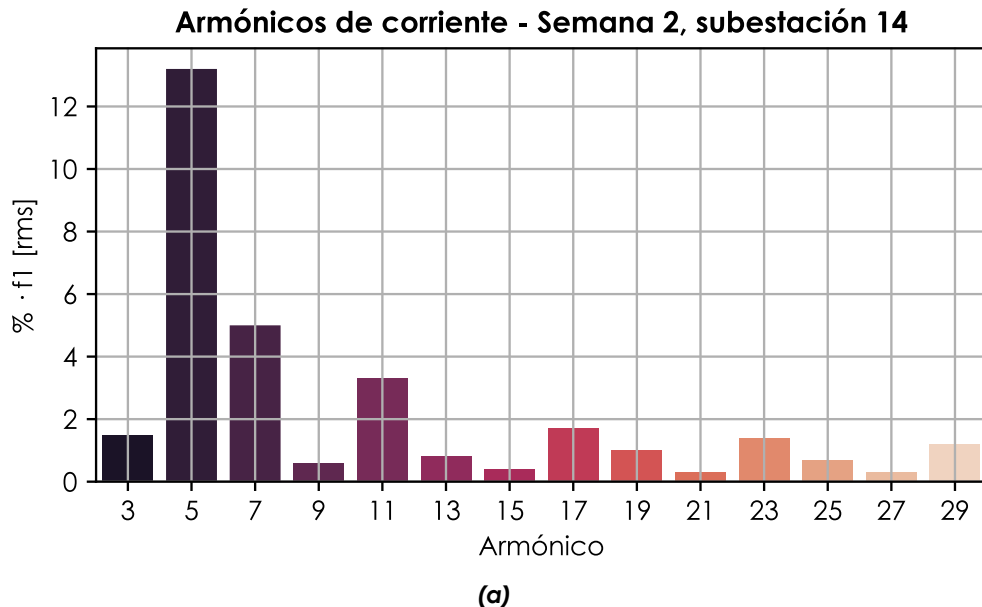
- (b) Simulación de la corrección del factor de potencia, banco de 175 kVAr.
- (c) Simulación de la corrección del factor de potencia, banco de 150 kVAr.
- (d) Simulación de la corrección del factor de potencia, banco de 138 kVAr.

Como se puede observar en la Figura 25 se realizaron diferentes simulaciones con potencias nominales diferentes de acuerdo a los valores obtenidos en la Tabla 4. Para la Figura 25 (a) y Figura 25 (b) se observa que el banco de capacitores cumple perfectamente tanto el valor mínimo de factor de potencia establecido por la resolución CREG 108, como el valor de factor de potencia deseado que para este caso es de 0,95. Para la Figura 25 (c) y Figura 25 (d) la compensación realizada por el banco de 150 kVAr y 138 kVAr ya comienza a ser poco efectivo debido a que la compensación del factor de potencia en su mayoría queda por debajo del valor deseado. No obstante, dichos valores siguen cumpliendo con la resolución CREG 108.

Por lo tanto, el valor óptimo a elegir es el banco de 175 kVAr, ya que implica un costo financiero menor que el banco de 190 kVAr en temas constructivos.

6.4.3.2. Análisis armónico.

De acuerdo a lo expuesto en la sección 4.13 los bancos de capacitores son afectados fuertemente por los sistemas donde existe una gran distorsión armónica.



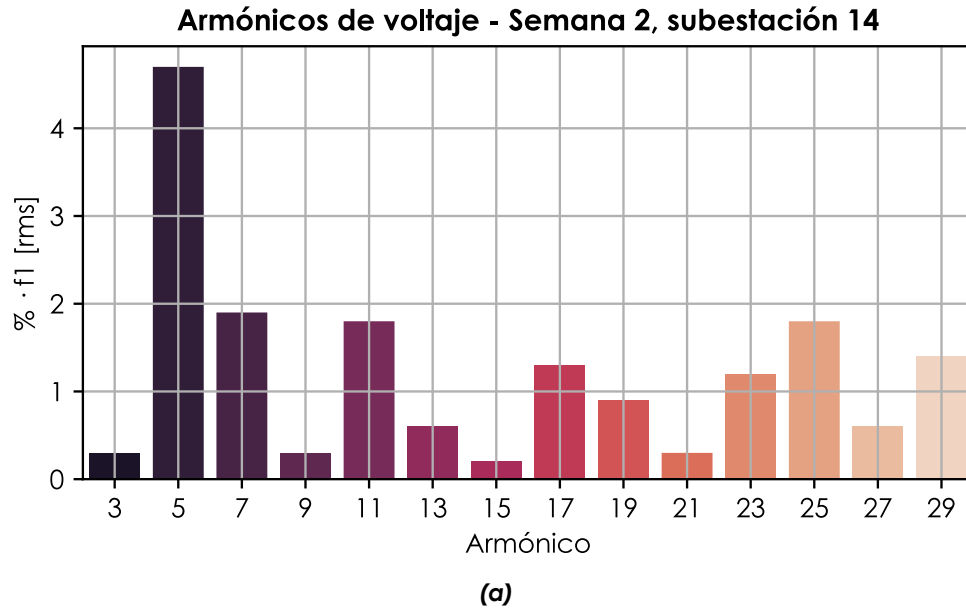


Figura 26. (a) Armónicos de corriente, subestación 14.
(b) Armónicos de voltaje, subestación 14.

En la Figura 26 (a) se observan los armónicos de corriente medidos en la subestación 14 para la semana 2 a plena carga. De igual forma en la Figura 26 (b) se observan los armónicos de voltaje para las mismas condiciones descritas anteriormente. El sistema está sujeto principalmente a dos armónicos el 5 y 7 tanto para la corriente como para el voltaje. Para el caso de los armónicos de corriente el armónico 5 y 7 corresponden a un 13,2 % y 5 % de la fundamental *rms* respectivamente. Para los armónicos de voltaje el armónico 5 y 7 corresponden a un 4,7 % y 1,9 % de la fundamental *rms* respectivamente.

En la Tabla 5 se puede observar la distorsión total armónica de corriente y voltaje para la subestación 14. De acuerdo a lo establecido en la norma técnica colombiana RETIE y en el estándar IEEE std 519-2014 se viola el límite de distorsión armónica total de voltaje teniendo en cuenta como referencia el valor máximo THDv, ver sección 4.19.10.

Tabla 5. Distorsión total armónica de voltaje y corriente, semana 2 subestación 14.

	THDi [%]			THDv [%]		
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Mínimo	4,33	4,36	4,25	1,30	1,36	1,33
Promedio	10,40	10,09	10,19	3,25	3,12	3,27
Máximo	15,22	15,02	15,36	5,40	5,17	5,36

Por lo tanto, de acuerdo con el RETIE artículo 20.11 (sección 4.19.11) es necesario implementar reactancias de sintonización para evitar una posible resonancia entre el banco y el sistema. No obstante, de acuerdo con la expresión (16) el armónico resonante para el banco de capacitores de acuerdo a las características del transformador (ver Tabla 2) y la capacidad del banco seleccionado es:

$$h_r = \sqrt{\frac{630 \text{ kVA} * 100}{170 \text{ kVAr} * 4,68}} \approx 9$$

Lo que implica que la frecuencia aproximada a la que resonaría el banco es 540 Hz, armónico 9. Esto implica instalar una reactancia de filtrado que abarque necesariamente el armónico 9. Una ventaja que posee el sistema es que el armónico 9 no es predominante, ver Figura 26 (a) y (b).

De acuerdo con la norma IEC 61642 expuesta en la sección 4.19.11 se necesita un valor ρ tal que sintonice a una frecuencia menor al armónico que se desea filtrar y de esta forma evite la resonancia para ese armónico y superiores. A partir de la Figura 26 se puede notar que el armónico predominante es el 5 tanto para el voltaje como para la corriente. Por lo tanto, si ajustamos una reactancia a un valor de f_{LC} por debajo de la frecuencia de $5 \cdot f_1$ (300 Hz) estaremos filtrando el armónico 5 y superiores, de esta forma reduciremos el armónico 5 y evitaremos una posible resonancia en el armónico 9. A partir de la ecuación (29) tenemos que:

$$\rho = 100 \% \left(\frac{60 \text{ Hz}}{5 * 60 \text{ Hz}} \right)^2 = 4\%$$

Por lo tanto, un valor de $\rho \geq 4\%$ servirá como ajuste para el filtro. Los filtros comerciales generalmente vienen con valores de ρ para 5,6 %, 6 %, 7 % y 14 %. De acuerdo con algunos fabricantes [25] $\rho = 7\%$ es el valor más frecuente de sintonía para evitar cualquier resonancia con el armónico 5 y superiores.

$$f_{lc} = 60 \text{ Hz} \sqrt{\frac{100 \%}{7 \%}} = 226,79 \text{ Hz}$$

Como se puede observar $\rho = 7\%$ cumple la condición de ser una frecuencia menor a la del quinto armónico (226,79 Hz < 300 Hz). Por tal motivo para las reactancias de sintonizado se propone $\rho = 7\%$.

6.4.3.3. Pasos eléctricos.

Para definir los pasos eléctricos del banco de capacitores es necesario tener en cuenta el concepto expuesto en la sección 4.19.7 en donde la potencia reactiva entregada por un capacitor depende del voltaje al cual esté operando. Al instalarse una reactancia de filtrado, el voltaje en bornes del capacitor aumentará de acuerdo al factor de sobretensión ρ , ver sección 4.19.11. Por lo tanto, es necesario determinar el voltaje real al cual estará sometido los capacitores del banco de acuerdo a la ecuación (30) y con base a los datos de la Tabla 6.

Tabla 6. Datos para el diseño del banco de capacitores subestación 14.

Tensión de red (U_n)	460 V
Frecuencia	60 Hz
Factor de sobretensión (ρ)	7 %
Potencia reactiva del banco (Q_c)	175 kVAr

A partir de la ecuación (30) tenemos que:

$$U_c = \frac{460 V}{1 - \frac{7}{100}} = 494,62 V$$

De acuerdo al valor obtenido de U_c el banco debe de seleccionarse para una tensión de 494,62 V, comercialmente no existen condensadores para una tensión de 494,62 V por lo tanto haremos la elección con base al catálogo del fabricante Circutor [26] el cual maneja capacitores para tensiones nominales de 525 V (valor lo más cercano a 494,62 V) y por medio de la expresión (28) se encuentra los kVAr entregados por el capacitor a un voltaje de 494,62 V.

En la Tabla 7 se encuentran los valores que corresponden a la potencia reactiva entregada por un capacitor de voltaje nominal 525 V operando a una tensión de 494,62 V de la serie CLZ-HP-HD del fabricante Circutor.

Es importante tener en cuenta, de acuerdo a la IEEE std 1036-2020, que: la unidad del capacitor puede soportar voltajes más altos que el voltaje nominal para contingencias a expensas de acortar su vida útil, La reducción de la vida útil del capacitor es una función exponencial de la sobretensión a la que está expuesto el capacitor e incluso una pequeña sobretensión (menos del 10%) aún resulta en una pérdida significativa de la vida útil de la unidad.

Tabla 7. Potencia reactiva de operación entrega por un capacitor CLZ-FP-HD Circutor [26].

Condensadores Tubulares CLZ-FP-HD	
[kVAr] a 525 V	[kVAr] a 494,62 V *
2,5	2,22
5	4,44
6,25	5,55
7,5	6,66
8,5	7,54
10	8,88
11,5	10,21
12,5	11,1
15	13,31
17	15,09
20	17,75
22,5	19,97
25	22,19
30	26,63
34	30,18
40	35,5

* Dichos valores fueron determinados a través del uso de la ecuación (28) sección 4.19.7.

A partir de la Tabla 7 podemos definir los pasos del banco teniendo en cuenta el voltaje de operación (494,62 V) y los kVAr necesarios para una correcta compensación del factor de potencia (175 kVAr).

En la Tabla 8 se definen los pasos para el banco de capacitores de la subestación 14.

Tabla 8. Pasos para el banco de condensadores, subestación 14.

Banco de capacitores subestación 14		
Pasos	kVAr nominales a 525 [V]	kVAr de operación a 494,62 [V]
1	40	35,5
2	40	35,5
3	40	35,5
4	40	35,5
5	40	35,5
Total	200 [kVAr]	177,5 [kVAr]

Como se puede observar en la Tabla 8 con 5 pasos de 40 kVAr, alcanzamos los 175 kVAr requeridos para realizar una correcta compensación con un

voltaje de operación aproximado de 494,62 V. En la Tabla 9 se presentan los valores posibles de potencia reactiva que puede entregar el banco de acuerdo al número de pasos asignado.

Tabla 9. Combinación de pasos para el banco de condensadores, subestación 14.

Combinación \ Pasos	0	1	2	3	4	5
40 kVAr						
40 kVAr						
40 kVAr						
40 kVAr						
40 kVAr						
kVAr a voltaje de operación	0	35,5	71	106,5	142	177,5

Para el banco de capacitores de la subestación 14 no se dejará ningún paso fijo para evitar generar posibles fuentes de potencia reactiva cuando la planta se encuentre parada u operando con una carga muy baja e incurrir en posibles penalizaciones por inyección de potencia reactiva de acuerdo a la CREG 015 – 2018, ver sección 4.19.3.

6.4.3.4. Controlador automático.

El controlador automático es aquel dispositivo encargado de conmutar los diferentes pasos de capacitores con el fin de mantener el factor de potencia en el *setpoint* establecido. Como controlador automático del factor de potencia se propone el uso del LOVATO DCRL8 [27] debido al uso y conocimiento previo que tiene la compañía con respecto a este dispositivo. En la Figura 27 se observa el controlador LOVATO DCRL8.



Figura 27. Controlador automático del factor de potencia [27].

El controlador LOVATO DCRL8 tiene capacidad para 8 pasos, expandible a 14 pasos por medio del uso de módulos de expansión. El rango de tensión de alimentación es de 100 – 400 V~ o 110 – 250 V=, el rango de frecuencia es de 45 – 66 Hz, la tensión nominal máxima de entrada voltimétrica es 600 V~ y la corriente nominal de entrada amperimétrica es de 1 A~ o 5 A~.

La cantidad de pasos del controlador influyó directamente en la elección del número de pasos para el banco en la sección 6.4.3.3. La idea era no ocupar todos los pasos disponibles del controlador automático, por eso la elección fue de 5 pasos para el banco y dejar 3 pasos más de reserva para una futura expansión.

6.4.3.5. Contactores con resistencias de preinserción.

De acuerdo al fenómeno que ocurre cuando se conmutan capacitores visto en la sección 4.19.8 la IEEE std 1036-2020 propone varias soluciones para controlar los transitorios por conmutación. El más popular es el uso de contactores con resistencias o inductores de preinserción.

El uso de una resistencia o inductor de preinserción en el dispositivo de conmutación proporciona un medio para reducir los transitorios de corrientes y voltajes asociados con la activación de un capacitor de condensadores en derivación. La impedancia se "corta" (puentea) poco después de que el transitorio inicial se disipa, produciendo así un segundo evento transitorio. Las resistencias de preinserción son un medio para controlar los transitorios de activación del condensador. El valor óptimo de la resistencia para controlar el transitorio de activación del capacitor depende principalmente del tamaño del banco de capacitores y de la fuente [14]. Para la elección de los contactores se propone la serie CMC-B del fabricante Circutor [28]. En la Tabla 10 se presentan los contactores a utilizar para el banco de condensadores, los contactores se seleccionan de acuerdo a la potencia reactiva de cada paso a la tensión nominal del sistema. Por supuesto no siempre los valores de los pasos coinciden con la potencia de los contactores, en estos casos se seleccionan los más cercanos.

Tabla 10. Selección de contactores catálogo Circutor línea CMC-B [28].

Paso	Potencia [kVAR] 400 – 440 – 480 [V]	Resistencia de preinserción	Tensión en la bobina [V]	Tipo	Código
1	30	Incluido	220	CMC-40B	R281A1
2	30	Incluido	220	CMC-40B	R281A1
3	30	Incluido	220	CMC-40B	R281A1
4	30	Incluido	220	CMC-40B	R281A1
5	30	Incluido	220	CMC-40B	R281A1

6.4.3.6. Capacitores.

Como se indicó en la sección 6.4.3.3 los capacitores a utilizar son de la serie CLZ-HP-HD del fabricante CIRCUTOR. En la Tabla 11 se muestran las especificaciones técnicas.

Tabla 11. Selección de capacitores catálogo CIRCUTOR línea CLZ-HP-HD [26].

Condensador Tubular Trifásico – CLZ-FP-HD					
Paso	Tensión nominal [V]	[kVAr]	Frecuencia [Hz]	Resistencia de descarga	Código
1	525	40	60	Incluido	R2H67R
2	525	40	60	Incluido	R2H67R
3	525	40	60	Incluido	R2H67R
4	525	40	60	Incluido	R2H67R
5	525	40	60	Incluido	R2H67R

Las resistencias de descarga como su nombre lo indica permite que los condensadores se descarguen una vez son desconectados. De acuerdo con el fabricante para capacitores entre 33 – 50 kVAr la tasa de descarga es de 75 V / 3 minutos. La conexión interna de estos condensadores es en delta.

6.4.3.7. Reactancia de filtrado.

De acuerdo al análisis armónico realizado en la sección 6.4.3.2 se propone la implementación de reactancias de filtrado de la serie R-RB del fabricante CIRCUTOR de acuerdo al catálogo [25]. En la Tabla 12 se muestran las especificaciones técnicas.

Tabla 12. Selección de reactancia de filtrado catálogo CIRCUTOR línea R-RB [25].

Paso	[kVAr]	Factor ρ [%]	Tensión nominal [V]	Tipo
1	40	7	460	RB-40-460/ 50-460
2	40	7	460	RB-40-460/ 50-460
3	40	7	460	RB-40-460/ 50-460
4	40	7	460	RB-40-460/ 50-460
5	40	7	460	RB-40-460/ 50-460

6.4.3.8. Interruptor principal.

Para proteger la acometida principal de un posible cortocircuito en el banco de capacitores se hace necesario instalar un interruptor principal. Para determinar dicho elemento es necesario conocer la corriente nominal que el banco demandará multiplicado por un factor de seguridad

de 1.5 veces la corriente nominal. Generalmente este factor suele ser bastante grande debido a las altas corrientes transitorias que genera el banco al conmutar sus diferentes capacitores. A partir de la ecuación (14) mostrada en la sección 4.13.1 tenemos que la corriente de fase demandada por el banco es:

$$I_f = \frac{177,5 \text{ kVAr}}{\sqrt{3} * 0,494 \text{ kV}} * 1,5 = 311,17 \text{ A}$$

De acuerdo con el valor obtenido I_f tenemos que el banco demandará aproximadamente 311,17 A por fase. Para la elección del interruptor principal se propone el interruptor T4 de la serie Tmax del fabricante ABB [29]. En la Tabla 13 se muestra la especificación técnica.

Tabla 13. Selección del interruptor principal catálogo ABB de la línea Tmax [29].

Corriente nominal de interrupción I_n [A]	Tipo de interruptor	Polos	Relé*	Código
320	T4	3	PR22	T4L 320 PR223EF

* El relé PR22 es tipo electrónico

6.4.3.9. Interruptores por paso.

De la misma manera en que se determinó la corriente total demanda por el banco en la sección anterior, se determinará la corriente que demanda cada paso para seleccionar su correcta protección. A partir de la ecuación (14) tenemos que:

$$I_f = \frac{35,5 \text{ kVAr}}{\sqrt{3} * 0,494 \text{ kV}} * 1,5 = 62,74 \text{ A}$$

En la Tabla 14 se presenta la selección de interruptores para cada paso, en los interruptores propuestos son T4 termomagnéticos (TMA) de la serie Tmax del fabricante ABB [29].

Tabla 14. Selección de interruptores catálogo ABB de la línea Tmax [29].

Paso	Corriente demandada [A]	Corriente nominal de interrupción I_n [A]	Tipo de interruptor	Polos	Relé	Código
1	62,74	80	T4	3	TMA	T4L 80 TMA
2	62,74	80	T4	3	TMA	T4L 80 TMA
3	62,74	80	T4	3	TMA	T4L 80 TMA
4	62,74	80	T4	3	TMA	T4L 80 TMA
5	62,74	80	T4	3	TMA	T4L 80 TMA

6.4.3.10. Conductores.

De acuerdo a los cálculos realizados en la sección 6.4.3.8 y 6.4.3.9, para determinar la corriente de la acometida principal y de cada paso del banco, se seleccionan los conductores. Para la elección de conductores se propone el uso de cables THW, Cable de cobre suave, aislado con PVC para una temperatura de operación de 75°C del fabricante Centelsa [30]. En la Tabla 15 se muestra la selección de conductores.

Tabla 15. Selección de conductores Centelsa [30].

Conexión	Corriente con factor de seguridad de 1,5 [A]	Conductor THW 75°C por fase
Paso 1	62,74	Nº 4 AWG
Paso 2	62,74	Nº 4 AWG
Paso 3	62,74	Nº 4 AWG
Paso 4	62,74	Nº 4 AWG
Paso 5	62,74	Nº 4 AWG
Acometida principal	311,17	2x1/0 AWG

6.4.3.11. Refrigeración forzada.

De acuerdo con la normatividad expuesta en la sección 4.18 es necesario realizar un análisis de temperatura interna en el banco para saber si es necesario instalar ventilación forzada y así evitar un sobre calentamiento al interior del armario. De acuerdo a la expresión (23) es necesario determinar las pérdidas totales al interior del armario. En la Tabla 16 se presentan las pérdidas de cada elemento tomado de los catálogos de los fabricantes mencionados anteriormente.

Tabla 16. Pérdidas en los elementos banco subestación 14.

Elemento	Cantidad	Pérdidas de Potencia por Unidad	Pérdidas Totales de Potencia [W]
Contactores	5	25,5 W	127,5
Capacitores	5	0,4 W/kVAr	71
Reactancias	5	145 W	725
Interruptor Ppal.	1	21,5 W por polo	64,5
Interruptores Paso	5	4,6 W por polo	69
Nº 4 AWG	15 m	2,03 W/m *	30,45
1/0 AWG	5 m	23,15 W/m *	115,75

* No se tiene en cuenta el factor de seguridad de 1.5 para la corriente

Por lo tanto, las pérdidas en el interior del banco son 1.203,2 W. Para la superficie total de refrigeración se asume un armario metálico estándar de 7 m² (1m x 2m x 0.5m). De acuerdo con (23) tenemos que:

$$\Delta T = \frac{1203,2}{5,8 * 7} \approx 30^{\circ}C$$

Por lo tanto, asumiendo una temperatura ambiente de 25°C y con un incremento de temperatura de 30°C tendríamos al interior del armario una temperatura aproximada de 55°C por lo que se hace necesario instalar un ventilador ya que se viola el límite de temperatura de acuerdo con el estándar IEEE Std 18-2012.

Por criterio de diseño se desea un incremento de temperatura ΔT al interior del armario de 10°C de tal manera que la temperatura total de operación sea de 35°C. De acuerdo con la expresión (25) tenemos que:

$$P_D = 1203,2 - 10(5,8 * 7) = 797,2 W$$

Utilizando la expresión (24) se necesita un caudal de aire de:

$$V = \frac{3,1 * 797,2}{10} = 247,13 \frac{m^3}{h}$$

Por lo tanto, se necesita un ventilador que proporcione 247,13 m³/h. En la Tabla 17 se presenta la selección del ventilador del fabricante Laumayer de la serie DKC [31].

Tabla 17. Selección del ventilador fabricante Laumayer [31].

Flujo de aire necesario [m3/h]	Flujo de aire nominal [m3/h]	Tensión [V]	Referencia	Código
247,13	230 – 270	220	R5KV15230	R5KV15230

6.4.4. Dimensionamiento del banco para la subestación 15.

Con base a la semana más crítica, ver sección 6.4.2, se dimensionó el banco de capacitores. Para cada instante de tiempo se compensó de acuerdo a la ecuación (19) y se seleccionó el Q_c máximo, como la potencia nominal inicial del banco de capacitores. El factor de potencia deseado se seleccionó de 0,95 inductivo y no uno mayor para evitar una sobrecompensación en el sistema. Como se explicó en la sección 6.4.3 para el dimensionamiento del banco de la subestación 14.

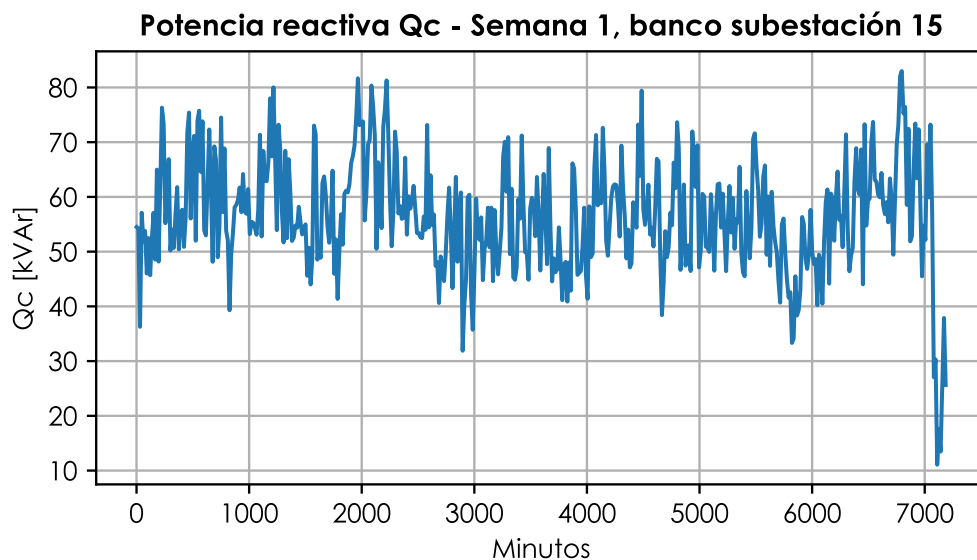


Figura 28. Potencia reactiva capacitiva requerida, banco subestación 15

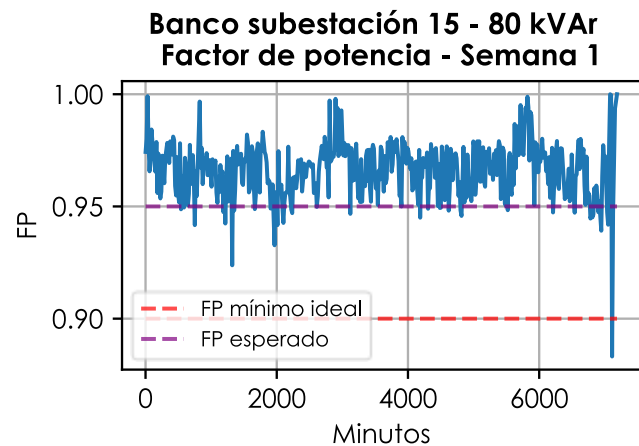
En la Figura 28 se observa la potencia reactiva capacitiva necesaria durante todo el periodo de tiempo para mantener un factor de potencia en 0,95 inductivo. El valor máximo Q_c nos entregará en primera medida un valor inicial de la potencia reactiva necesaria del banco. En la Tabla 18 se encuentra los percentiles para la variable Q_c donde inicialmente se indica la potencia nominal del banco, valor que corresponde al máximo.

Tabla 18. Percentiles para la variable Q_c , banco subestación 15.

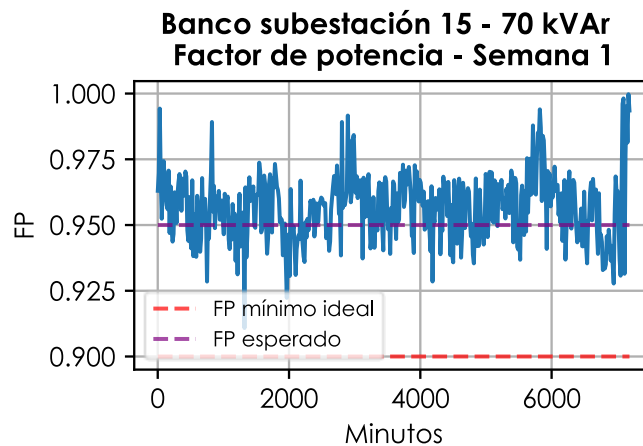
Banco de capacitores subestación 15	
Percentiles Q_c	[kVAR]
Máximo	83,00
95 %	73,35
75 %	62,35
50 %	56,03
25 %	49,97
Mínimo	11,07

6.4.4.1. Elección de la potencia nominal del banco.

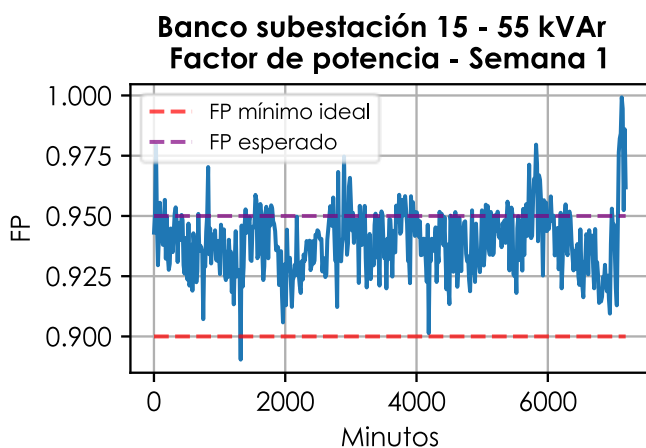
De acuerdo a los valores de la Tabla 18 se realizaron diferentes simulaciones para verificar cuáles valores de Q_c cumplieran con los requerimientos mínimos de factor de potencia.



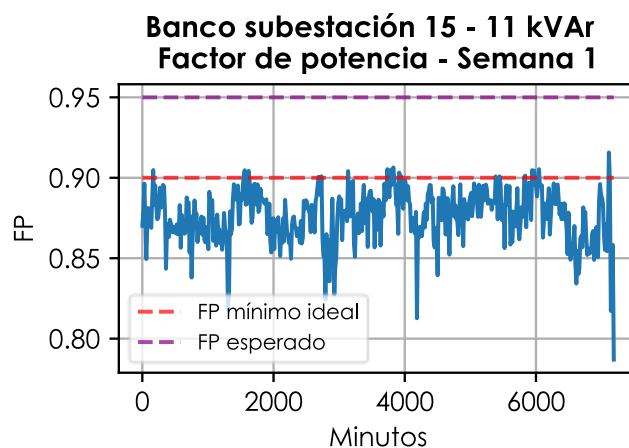
(a)



(b)



(c)



(d)

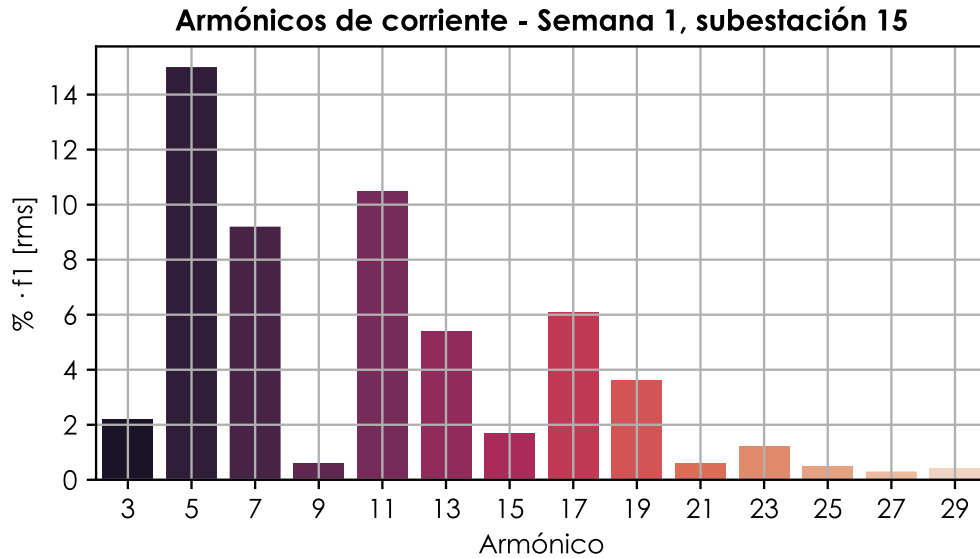
Figura 29. (a) Simulación de la corrección del factor de potencia, banco de 80 kVAr.
 (b) Simulación de la corrección del factor de potencia, banco de 70 kVAr.
 (c) Simulación de la corrección del factor de potencia, banco de 55 kVAr.
 (d) Simulación de la corrección del factor de potencia, banco de 11 kVAr.

Como se puede observar en la Figura 29 se realizaron diferentes simulaciones con potencias nominales diferentes de acuerdo a los valores obtenidos en la Tabla 18. Para la Figura 29 (a) y Figura 29 (b) se observa que el banco de capacitores cumple perfectamente tanto el valor mínimo de factor de potencia establecido por la resolución CREG 108, como el valor de factor de potencia deseado que para este caso es de 0,95 inductivo. Para la Figura 29 (c) y Figura 29 (d) la compensación realizada por el banco de 55 kVAr y 11 kVAr ya comienza a ser poco efectiva debido a que el factor de potencia en su mayoría queda por debajo del valor deseado. No obstante, el banco de 55 kVAr sigue cumpliendo con la resolución CREG 108.

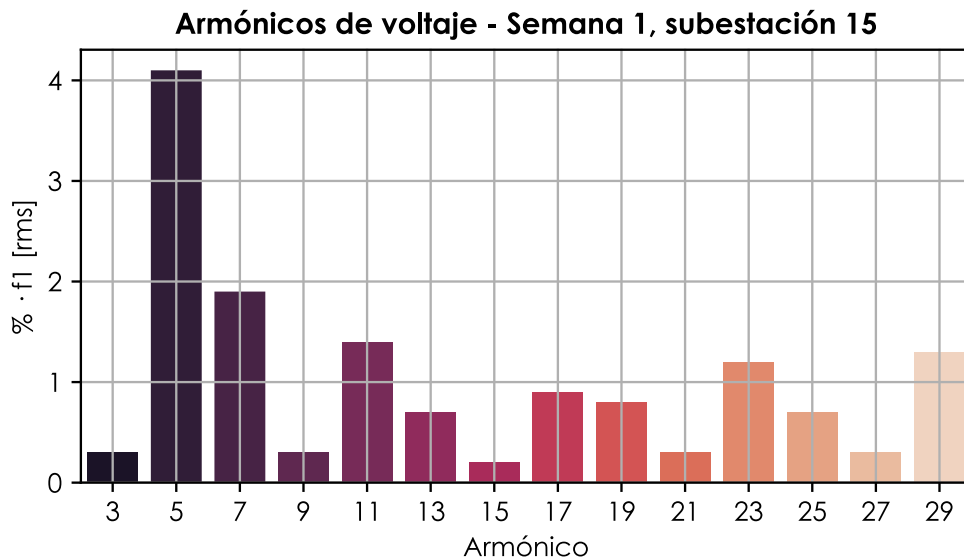
Por lo tanto, la potencia nominal elegida para el banco de la subestación 15 será 80 kVAr debido a que se adapta de manera adecuada a los requerimientos solicitados.

6.4.4.2. Análisis armónico.

De acuerdo a lo visto en la sección 4.13 los bancos de capacitores son afectados fuertemente por los sistemas donde existe una gran distorsión armónica.



(a)



(a)

Figura 30. (a) Armónicos de corriente, subestación 15.
(b) Armónicos de voltaje, subestación 15.

En la Figura 30 (a) se observan los armónicos de corriente medidos en la subestación 15 para la semana 1 a plena carga. De igual forma en la Figura 30 (b) se observan los armónicos de voltaje para las mismas condiciones descritas anteriormente. El sistema está sujeto principalmente a tres armónicos el 5, 7 y 11 tanto para la corriente como para el voltaje. Para el caso de los armónicos de corriente el armónico 5, 7 y 11 corresponden a un 15 %, 9,2 % y 10,5 % de la frecuencia fundamental *rms* respectivamente. Para los armónicos de voltaje el armónico 5, 7 y 11 corresponden a un 4,1 %, 1,9 % y 1,4 % de la frecuencia fundamental *rms* respectivamente.

En la Tabla 5 se puede observar la distorsión total armónica de corriente y voltaje para la subestación 15. De acuerdo a lo establecido en la norma técnica colombiana RETIE y en el estándar IEEE std 519-2014 se viola el límite de distorsión armónica total de voltaje, no por mucho, teniendo en cuenta como referencia el valor máximo THDv, ver sección 4.19.10.

Tabla 19. Distorsión total armónica de voltaje y corriente, semana 1 subestación 15.

	THDi [%]			THDv [%]		
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Mínimo	3,40	3,85	3,70	1,88	1,78	1,80
Promedio	6,80	7,12	7,25	3,57	3,35	3,57
Máximo	17,50	18,16	18,10	5,32	5,36	5,47

Por lo tanto, de acuerdo con el RETIE artículo 20.11 (sección 4.19.11) es necesario implementar reactancias de sintonización para evitar una posible resonancia entre el banco y el sistema. No obstante, de acuerdo con la expresión (16) el armónico resonante para el banco de capacitores de acuerdo a las características del transformador (ver Tabla 3) y la capacidad del banco seleccionado es:

$$h_r = \sqrt{\frac{500 \text{ kVA} * 100}{170 \text{ kVAr} * 4,66}} = 7,94 \approx 8$$

Lo que implica que la frecuencia aproximada a la que resonaría el banco es 480 Hz, armónico 8. Esto implica instalar una reactancia de filtrado que abarque necesariamente el armónico 8. Al igual que en la subestación 14, el armónico de resonancia de la subestación 15 no corresponde a un armónico con fuerte presencia en el sistema, ver Figura 30 (a) y (b).

De acuerdo con la norma IEC 61642 expuesta en la sección 4.19.11 se necesita un valor ρ tal que sintonice a una frecuencia menor al armónico

que se desea filtrar y de esta forma evite la resonancia para ese armónico y superiores. A partir de la Figura 30 se puede notar que el armónico predominante es el 5 tanto para el voltaje como para la corriente. Por lo tanto, si ajustamos una reactancia a un valor de f_{LC} por debajo de la frecuencia de $5 \cdot f_1$ (300 Hz) estaremos filtrando el armónico 5 y superiores, de esta forma reduciremos el armónico 5 y evitaremos una posible resonancia en el armónico 8. A partir de la ecuación (29) tenemos que:

$$\rho = 100 \% \left(\frac{60 \text{ Hz}}{5 * 60 \text{ Hz}} \right)^2 = 4\%$$

Por lo tanto, un valor de $\rho \geq 4\%$ servirá como ajuste para el filtro. Los filtros comerciales, como se mencionó durante el diseño del banco de la subestación 14, vienen generalmente con valores de ρ para 5,6 %, 6 %, 7 % y 14 %. De acuerdo con algunos fabricantes [25] $\rho = 7\%$ es el valor más frecuente de sintonía para evitar cualquier resonancia con el armónico 5 y superiores.

$$f_{lc} = 60 \text{ Hz} \sqrt{\frac{100 \%}{7 \%}} = 226,79 \text{ Hz}$$

Como se puede observar $\rho = 7\%$ cumple la condición de ser una frecuencia menor a la del quinto armónico (226,79 Hz < 300 Hz). Por tal motivo para las reactancias de sintonizado se propone $\rho = 7\%$.

6.4.4.3. Pasos eléctricos.

Para definir los pasos eléctricos del banco de capacitores es necesario tener en cuenta el concepto expuesto en la sección 4.19.7 en donde la potencia reactiva entregada por un capacitor depende del voltaje al cual esté operando. Al instalarse una reactancia de filtrado, el voltaje en bornes del capacitor aumentará de acuerdo al factor de sobretensión ρ , ver sección 4.19.11. Por lo tanto, es necesario determinar el voltaje real al cual estará sometido los capacitores del banco de acuerdo a la ecuación (30) y con base a los datos de la Tabla 20.

Tabla 20. Datos para el diseño del banco de capacitores subestación 15.

Tensión de red (U_n)	460 V
Frecuencia	60 Hz
Factor de sobretensión (ρ)	7 %
Potencia reactiva del banco (Q_c)	80 kVAr

A partir de la ecuación (30) tenemos que:

$$U_c = \frac{460 V}{1 - \frac{7}{100}} = 494,62 V$$

De acuerdo al valor obtenido de U_c el banco debe de seleccionarse para una tensión de 494,62 V, comercialmente no existen condensadores para una tensión de 494,62 V por lo tanto haremos la elección con base al catálogo del fabricante Circutor [26] el cual maneja capacitores para tensiones nominales de 525 V (valor lo más cercano a 494,62 V) y por medio de la expresión (28) se encuentra los kVAr entregados por el capacitor a un voltaje de 494,62 V.

En la Tabla 21 se encuentran los valores que corresponden a la potencia reactiva entregada por un capacitor de voltaje nominal 525 V operando a una tensión de 494,62 V de la serie CLZ-HP-HD del fabricante Circutor.

Tabla 21. Potencia reactiva de operación entrega por un capacitor CLZ-FP-HD Circutor [26].

Condensadores Tubulares CLZ-FP-HD	
[kVAr] a 525 V	[kVAr] a 494,62 V *
2,5	2,22
5	4,44
6,25	5,55
7,5	6,66
8,5	7,54
10	8,88
11,5	10,21
12,5	11,1
15	13,31
17	15,09
20	17,75
22,5	19,97
25	22,19
30	26,63
34	30,18
40	35,5

* Dichos valores fueron determinados a través del uso de la ecuación (28) sección 4.19.7.

A partir de la Tabla 21 podemos definir los pasos del banco teniendo en cuenta el voltaje de operación (494,62 V) y los kVAr necesarios para una correcta compensación del factor de potencia (80 kVAr).

En la Tabla 22 se definen los pasos para el banco de capacitores de la subestación 15.

Tabla 22. Pasos para el banco de condensadores, subestación 15.

Banco de capacitores subestación 15		
Pasos	kVAr nominales a 525 [V]	kVAr de operación a 494,62 [V]
1	12,5	11,1
2	22,5	19,97
3	22,5	19,97
4	34	30,18
Total	91,5 [kVAr]	81,22 [kVAr]

Como se puede observar en la Tabla 22 con un paso de 12,5 kVAr, dos de 22,5 kVAr y uno de 34 kVAr, alcanzamos los 80 kVAr requeridos para realizar una correcta compensación con un voltaje de operación aproximado de 494,62 V. En la Tabla 23 se presentan los valores posibles de potencia reactiva que puede entregar el banco de acuerdo al número de pasos asignado.

Tabla 23. Combinación de pasos para el banco de condensadores, subestación 15.

Combinación	0	1	2	3	4	5	6	7	8
12,5 kVAr									
22,5 kVAr									
22,5 kVAr									
34 kVAr									
kVAr a voltaje de operación	0	11,1	19,97	30,18	41,28	50,15	61,25	70,12	81,22

Como se puede observar en la Tabla 23 al tener pasos de diferentes magnitudes permite obtener una gama más amplia de valores de potencia aparente entregados por el banco, pese a tener un menor número de pasos comparado con el banco de la subestación 14, ver Tabla 9. La decisión de implementar pasos de diferentes magnitudes para el banco de la subestación 15 fue debido a la variabilidad de Q_c donde en algunos instantes de tiempo para diferentes semanas se requería solamente valores de Q_c entre 10 kVAr y 20 kVAr.

Para el banco de capacitores de la subestación 15, al igual que para la subestación 14, no se dejará ningún paso fijo para evitar generar posibles fuentes de potencia reactiva cuando la planta se encuentre parada u operando con una carga muy baja e incurrir en posibles penalizaciones

por inyección de potencia reactiva de acuerdo a la CREG 015 – 2018, ver sección 4.19.3.

6.4.4.4. Controlador automático.

El controlador automático, como se enunció en la sección 6.4.3.4, es aquel dispositivo encargado de conmutar los diferentes pasos de capacitores con el fin de mantener el factor de potencia en el *setpoint* establecido. Como controlador automático del factor de potencia se propone el uso del LOVATO DCRL8 [27] debido al uso y conocimiento previo que tiene la compañía con respecto a este dispositivo. En la Figura 27 se observa el controlador LOVATO DCRL8.



Figura 31. Controlador automático del factor de potencia [27].

El controlador LOVATO DCRL8 tiene capacidad para 8 pasos, expandible a 14 pasos por medio del uso de módulos de expansión. El rango de tensión de alimentación es de 100 – 400 V~ o 110 – 250 V=, el rango de frecuencia es de 45 – 66 Hz, la tensión nominal máxima de entrada voltimétrica es 600 V~ y la corriente nominal de entrada amperimétrica es de 1 A~ o 5 A~.

La cantidad de pasos del controlador influyó directamente en la elección del número de pasos para el banco en la sección 6.4.4.3. La idea era no ocupar todos los pasos disponibles del controlador automático, por lo tanto, el objetivo era elegir los pasos tal que no fueran los 8 disponibles y tener una resolución lo más pequeña posible de tal forma que cumpliera con la compensación del factor de potencia para cada instante de tiempo.

6.4.4.5. Contactores con resistencias de preinserción.

De acuerdo al fenómeno que ocurre cuando se conmutan capacitores visto en la sección 4.19.8 la IEEE std 1036-2020, como se mencionó en el

proceso de selección de los contactores para la subestación 14, propone varias soluciones para controlar los transitorios por conmutación. El más popular es el uso de contactores con resistencias o inductores de preinserción, ver sección 6.4.3.5.

Para la elección de los contactores se propone la serie CMC-B del fabricante Circutor [28]. En la Tabla 24 se presentan los contactores a utilizar para el banco de condensadores, los contactores se seleccionan de acuerdo a la potencia reactiva de cada paso a la tensión nominal del sistema. Por supuesto no siempre los valores de los pasos coinciden con la potencia de los contactores, en estos casos se seleccionan los más cercanos.

Tabla 24. Selección de contactores catálogo Circutor línea CMC-B [28].

Paso	Potencia [kVAr] 400 – 440 – 480 [V]	Resistencia de preinserción	Tensión en la bobina [V]	Tipo	Código
1	12,5	Incluido	220	CMC-12B	R281A6
2	20	Incluido	220	CMC-20B	R281A4
3	20	Incluido	220	CMC-20B	R281A4
4	30	Incluido	220	CMC-40B	R281A1

6.4.4.6. Capacitores.

Como se indicó en la sección 6.4.4.3 los capacitores a utilizar son de la serie CLZ-HP-HD del fabricante Circutor. En la Tabla 25 se muestran las especificaciones técnicas.

Tabla 25. Selección de capacitores catálogo Circutor línea CLZ-HP-HD [26].

Condensador Tubular Trifásico – CLZ-FP-HD					
Paso	Tensión nominal [V]	[kVAr]	Frecuencia [Hz]	Resistencia de descarga	Código
1	525	12,5	60	Incluido	R2H67D
2	525	22,5	60	Incluido	R2H67K
3	525	22,5	60	Incluido	R2H67K
4	525	34	60	Incluido	R2H67P

Las resistencias de descarga como su nombre lo indica permite que los condensadores se descarguen una vez son desconectados. De acuerdo con el fabricante para capacitores entre 0,5 – 30 kVAr la tasa de descarga es de 50 V / 1 minuto y para capacitores entre 33 – 50 kVAr la tasa de descarga es de 75 V / 3 minutos. La conexión interna de estos condensadores es en delta.

6.4.4.7. Reactancia de filtrado.

De acuerdo al análisis armónico realizado en la sección 6.4.3.2 se propone la implementación de reactancias de filtrado de la serie R-RB del fabricante Circutor de acuerdo al catálogo [25]. En la Tabla 26 se muestran las especificaciones técnicas.

Tabla 26. Selección de reactancia de filtrado catálogo Circutor línea R-RB [25].

Paso	[kVAr]	Factor ρ [%]	Tensión nominal [V]	Tipo
1	10	7	460	R-10-460 / 12,5-460
2	20	7	460	RB-20-460 / 25-460
3	20	7	460	RB-20-460 / 25-460
4	30	7	460	RB-30-460 / 37-460

6.4.4.8. Interruptor principal.

Para proteger la acometida principal de un posible cortocircuito en el banco de capacitores se hace necesario instalar un interruptor principal. Para determinar dicho elemento es necesario conocer la corriente nominal que el banco demandará multiplicado por un factor de seguridad de 1,5 veces la corriente nominal. Generalmente este factor suele ser bastante grande debido a las altas corrientes transitorias que genera el banco al conmutar sus diferentes capacitores. A partir de la ecuación (14) mostrada en la sección 4.13.1 tenemos que la corriente de fase demandada por el banco es:

$$I_f = \frac{80 \text{ kVAr}}{\sqrt{3} * 0,494 \text{ kV}} * 1,5 = 140,24 \text{ A}$$

De acuerdo con el valor obtenido I_f tenemos que el banco demandará aproximadamente 140,24 A por fase. Para la elección del interruptor principal se propone el interruptor T4 de la serie Tmax del fabricante ABB [29]. En la Tabla 27 se muestra la especificación técnica.

Tabla 27. Selección del interruptor principal catálogo ABB de la línea Tmax [29].

Corriente nominal de interrupción I_u [A]	Tipo de interruptor	Polos	Relé*	Código
160	T2	3	PR22	T2N160 PR221GP

* El relé PR22 es tipo electrónico

6.4.4.9. Interruptores por paso.

De la misma manera en que se determinó la corriente total demanda por el banco en la sección anterior, se determinará la corriente que demanda

cada paso para seleccionar su correcta protección. A partir de la ecuación (14) tenemos que:

$$I_f = \frac{11,1 \text{ kVAr}}{\sqrt{3} * 0,494 \text{ kV}} * 1,5 = 19,45 \text{ A}$$

$$I_f = \frac{19,97 \text{ kVAr}}{\sqrt{3} * 0,494 \text{ kV}} * 1,5 = 35 \text{ A}$$

$$I_f = \frac{30,18 \text{ kVAr}}{\sqrt{3} * 0,494 \text{ kV}} * 1,5 = 52,91 \text{ A}$$

En la Tabla 28 se presenta la selección de interruptores para cada paso, en los interruptores propuestos son T4 termomagnéticos no regulable (TMD) de la serie Tmax del fabricante ABB [29].

Tabla 28. Selección del interruptores catálogo ABB de la línea Tmax [29].

Paso	Corriente demandada [A]	Corriente nominal de interrupción I _n [A]	Tipo de interruptor	Polos	Relé	Código
1	19,45	20	T1	3	TMD	T1 20 TMD
2	35	32	T1	3	TMD	T1 32 TMD
3	35	32	T1	3	TMD	T1 32 TMD
4	52,91	50	T1	3	TMD	T1 50 TMD

6.4.4.10. Conductores.

De acuerdo a los cálculos realizados en la sección 6.4.4.8 y 6.4.4.9, para determinar la corriente de la acometida principal y de cada paso del banco, se seleccionan los conductores. Para la elección de conductores se propone el uso de cables THW, Cable de cobre suave, aislado con PVC para una temperatura de operación de 75°C del fabricante Centelsa [30]. En la Tabla 29 se muestra la selección de conductores.

Tabla 29. Selección de conductores Centelsa [30].

Conexión	Corriente con factor de seguridad de 1,5 [A]	Conductor THW 75°C por fase
Paso 1	19,45	Nº 12 AWG
Paso 2	35	Nº 10 AWG
Paso 3	35	Nº 10 AWG
Paso 4	52,91	Nº 8 AWG
Acometida principal	140,24	1/0 AWG

6.4.4.11. Refrigeración forzada.

De acuerdo con la normatividad expuesta en la sección 4.18 es necesario realizar un análisis de temperatura interna en el banco, al igual como se realizó en el diseño del banco de la subestación 14, para saber si es necesario instalar ventilación forzada y así evitar un sobre calentamiento al interior del armario. De acuerdo a la expresión (23) es necesario determinar las pérdidas totales al interior del armario. En la Tabla 30 se presentan las pérdidas de cada elemento tomado de los catálogos de los fabricantes mencionados anteriormente.

Tabla 30. Pérdidas en los elementos banco subestación 15.

Elemento	Cantidad	Pérdidas de Potencia por Unidad	Pérdidas Totales de Potencia [W]
Contactador 12.5 kVAr	1	17 W	17 W
Contactador 20 kVAr	2	25,5 W	51 W
Contactador 30 kVAr	1	25,5 W	25,5 W
Capacitor	5	0,4 W / kVAr	32,5 W
Reactancia 10 kVAr	1	50 W	50 W
Reactancia 20 kVAr	2	76 W	152 W
Reactancia 30 kVAr	1	120 W	120 W
Interruptor Ppal.	1	12,7 W por polo	38,1 W
Interruptor Paso 1	1	1,7 W por polo	69 W
Interruptor Paso 2 y 3	2	2,4 W por polo	14,4 W
Interruptor Paso 4	1	3,6 W por polo	10,8 W
Nº 12 AWG	5 m	1,13 W/m *	5,65 W
Nº 10 AWG	10 m	2,23 W/m *	22,3 W
Nº 8 AWG	5 m	3,40 W/m *	17 W
1/0 AWG	5 m	23,15 W/m *	115,75 W

* No se tiene en cuenta el factor de seguridad de 1.5 para la corriente

Por lo tanto, las pérdidas en el interior del banco son 741 W. Para la superficie total de refrigeración se asume un armario metálico estándar de 7 m² (1m x 2m x 0.5m). De acuerdo con (23) tenemos que:

$$\Delta T = \frac{741}{5,8 * 7} \approx 18,25^{\circ}\text{C}$$

Por lo tanto, asumiendo una temperatura ambiente de 25°C y con un incremento de temperatura de 18,25°C tendríamos al interior del armario una temperatura aproximada de 43,25°C, por lo tanto, estamos dentro de los límites establecidos de acuerdo con el estándar IEEE Std 18-2012. Sin

embargo, se dimensionará un ventilador para bajar un poco más la temperatura.

Por criterio de diseño se desea un incremento de temperatura ΔT al interior del armario de 10°C de tal manera que la temperatura total de operación sea de 35°C. De acuerdo con la expresión (25) tenemos que:

$$P_D = 741 - 10(5,8 * 7) = 335 W$$

Utilizando la expresión (24) se necesita un caudal de aire de:

$$V = \frac{3,1 * 335}{10} = 103,85 \frac{m^3}{h}$$

Por lo tanto, se necesita un ventilador que proporcione 103,85 m³/h. En la Tabla 31 se presenta la selección del ventilador del fabricante Laumayer de la serie DKC [31].

Tabla 31. Selección del ventilador fabricante Laumayer [31].

Flujo de aire necesario [m3/h]	Flujo de aire nominal [m3/h]	Tensión [V]	Referencia	Código
103,85	230 – 270	220	R5KV15230	R5KV15230

6.4.5. Evaluación del banco de capacitores bajo el estándar IEEE std 18-2012 y IEEE Std 1036-2020.

A continuación, se evaluará el banco de capacitores de la subestación 14 y 15 de acuerdo al estándar IEEE std 18-2012 y IEEE Std 1036-2020, visto en la sección 4.19.6 y 4.19.7.

Para la correcta evaluación del banco de capacitores se deben de revisar los lineamientos expuestos en la sección 4.19.6 de acuerdo a las expresiones vistas en las secciones 4.10, 4.11, 4.12, 4.13.1. El formato de evaluación fue tomado de [6].

6.4.5.1. Evaluación del banco de capacitores subestación 14.

En la Tabla 32 se presenta la evaluación del banco de capacitores de la subestación 14. Como se puede observar el banco está dentro de los límites establecidos de acuerdo a la norma. Los valores de distribución armónica fueron tomados de la semana crítica en donde cada valor representa el máximo medido.

6.4.5.2. Evaluación del banco de capacitores subestación 15.

En la Tabla 33 se presenta la evaluación del banco de capacitores de la subestación 15. Como se puede observar el banco está dentro de los límites establecidos de acuerdo a la norma. Los valores de distribución armónica fueron tomados de la semana crítica en donde cada valor representa el máximo medido.

6.4.6. Planos eléctricos

En el anexo 2 y anexo 3 se encuentran los planos eléctricos para el banco de la subestación 14 y 15 respectivamente.

Tabla 32. Evaluación Armónica Banco de Capacitores Subestación 14.

Evaluación Armónica Banco de Capacitores Subestación 14

Potencia Nominal	200	kVAr
Voltaje Nominal	525	V _{L-L}
Voltaje de Operación	494	V _{L-L}
Potencia de Operación	177,5	kVAr

Corriente Fundamental Nominal	207,45	A
Frecuencia Fundamental	60	Hz
Reactancia Capacitiva	1,37	Ω

Distribución Armónica en la Barra de Alimentación

Armónico	Frecuencia	V _h [%]	V _h [V]	I _h [%]	I _h [A]
1	60	100	285,21	100	207,45
3	180	0,3	0,86	1,5	3,11
5	300	4,7	13,4	13,2	27,38
7	420	1,9	5,42	5	10,37
9	540	0,3	0,86	0,6	1,24
11	660	1,8	5,13	3,3	6,85
13	780	0,6	1,71	0,8	1,66
15	900	0,2	0,57	0,4	0,83
17	1020	1,3	3,71	1,7	3,53
19	1140	0,9	2,57	1	2,07
21	1260	0,3	0,86	0,3	0,62
23	1380	1,2	3,42	1,4	2,9
25	1500	1,8	5,13	0,7	1,45
27	1620	0,6	1,71	0,3	0,62
29	1740	1,4	3,85	1,2	2,49

Distorsión Total Armónica (THDv) [%]	6,24
Voltaje RMS [V]	285,76
Distorsión Total Armónica (THDi) [%]	14,88
Corriente RMS [A]	209,73

	Calculado	Límite	Excede límite
Voltaje Pico	117,25%	120%	No
Voltaje RMS	100,19%	110%	No
Corriente RMS	101,10%	180%	No
kVAr Banco	101,29%	135%	No

Tabla 33. Evaluación Armónica Banco de Capacitores Subestación 14.

Evaluación Armónica Banco de Capacitores Subestación 15

Potencia Nominal	91,5	kVAr
Voltaje Nominal	525	VL-L
Voltaje de Operación	494	VL-L
Potencia de Operación	81,22	kVAr

Corriente Fundamental Nominal	94,92	A
Frecuencia Fundamental	60	Hz
Reactancia Capacitiva	3	Ω

Distribución Armónica en la Barra de Alimentación

Armónico	Frecuencia	Vh [%]	Vh [V]	Ih [%]	Ih [A]
1	60	100	285,21	100	94,92
3	180	0,3	0,86	2,2	2,09
5	300	4,8	13,69	15	14,24
7	420	2,2	6,27	9,2	8,73
9	540	0,3	0,86	0,6	0,57
11	660	2,4	6,85	10,5	9,97
13	780	2,8	7,99	5,4	5,13
15	900	0,7	2	1,7	1,61
17	1020	1,6	4,56	6,1	5,79
19	1140	0,6	1,71	3,6	3,42
21	1260	0,2	0,57	0,6	0,57
23	1380	0,4	1,14	1,2	1,14
25	1500	0,2	0,57	0,5	0,47
27	1620	0,1	0,29	0,3	0,28
29	1740	0,3	0,86	0,4	0,38

Distorsión Total Armónica (THDv)	6,74
Voltaje RMS	285,86
Distorsión Total Armónica (THDi)	22,57
Corriente RMS	97,31

	Calculado	Límite	Excede límite
Voltaje Pico	116,91%	120%	No
Voltaje RMS	100,23%	110%	No
Corriente RMS	102,52%	180%	No
kVAr Banco	102,75%	135%	No

7. Conclusiones

A partir del análisis de los registros de consumo de energía del módulo A de la empresa Compañía de Empaques, se evidenció la necesidad de instalar dos bancos de capacitores. La revisión de los planos eléctricos y las diferentes visitas que se realizaron a la planta permitieron tomar la decisión de instalar un banco para la subestación 14 y otro para la subestación 15, ambos bancos de capacitores automáticos y conectados bajo la modalidad de compensación centralizada, es decir, conectados al barraje de distribución principal de cada subestación.

Para el dimensionamiento de ambos bancos se recolectó una cantidad de datos equivalente a 6 meses de medida con periodos de muestreo de 3 y 5 minutos. Dada la gran cantidad de datos se implementó el uso de la herramienta Python, lenguaje de programación enfocado al análisis científico de datos, que permitía un uso más eficiente y detallado a la hora de realizar análisis exploratorios de datos. A partir de los diferentes análisis iniciales se planteó dividir la muestra de datos por periodos de tiempo equivalentes a semanas para los registros de consumo de las dos subestaciones. Dividir la muestra de datos en semanas nos llevó a saber cuál fue la semana más crítica para ambas subestaciones y así, poder realizar un dimensionamiento de ambos bancos de capacitores.

Para la subestación 14 la semana más crítica de los 6 meses medidos fue la semana 2, con base a esta información se diseñó un banco de capacitores automático con una potencia reactiva nominal de 200 kVAr conformada por 5 pasos de 40 kVAr con una tensión nominal de 525 V para cada paso, debido a la presencia de armónicos en el sistema fue necesario diseñar reactancias desintonizadas, el controlador automático para la corrección del factor de potencia seleccionado fue el LOVATO DCRL8. Para la subestación 15 la semana más crítica de los 6 meses medidos fue la semana 1, a partir de los datos de la semana 1 se diseñó un banco de capacitores automático con una potencia reactiva nominal de 91,5 kVAr con un paso de 12,5 kVAr, dos pasos de 22,5 kVAr y un paso de 34 kVAr para un total de 5 pasos con una tensión nominal de 525 V, al igual que para el banco de la subestación 14, debido a la presencia de armónicos en el sistema fue necesario diseñar reactancias desintonizadas, el controlador automático para la corrección del factor de potencia seleccionado fue el LOVATO DCRL8.

Finalmente, ambos diseños fueron sometidos a una evaluación de acuerdo a los lineamientos establecidos en el estándar IEEE std 18-2012 y IEEE Std 1036-2020, donde cada diseño estuvo dentro de los límites correctos de operación.

8. Referencias Bibliográficas

- [1] Ministerio de Minas y Energía, *RESOLUCIÓN No. 015*. 2018.
- [2] Ministerio de Minas y Energía, *RESOLUCIÓN No. 199*. 2019.
- [3] Ministerio de Minas y Energía, *RESOLUCIÓN No. 108*. 1997. Accedido: may 29, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/Indice01/Resoluci%C3%B3n-1997-CR108-97>
- [4] S. J. Chapman, *Máquinas Eléctricas*, 5.ª ed. 2012.
- [5] C. K. Alexander y M. N. O. Sadiku, *Fundamentos de circuitos eléctricos*, 5.ª ed. 2013.
- [6] S. Santoso, H. W. Beaty, R. C. Dugan, y M. F. McGranaghan, *Electrical Power Systems Quality*, 2.ª ed. New York, 2002.
- [7] «IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems», *IEEE Std 519-2014 Revis. IEEE Std 519-1992*, pp. 1-29, 2014, doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6826459.
- [8] ABB, «Corrección del factor de potencia y filtrado de armónicos en las instalaciones eléctricas». Cuaderno de aplicaciones técnicas. [En línea]. Disponible en: https://library.e.abb.com/public/897462d590876b5fc125791a003bd1e0/1TXA007107G0701_CT8.pdf
- [9] J. de Kock y K. Strauss, Eds., «4 - Compensation», en *Practical Power Distribution for Industry*, 1.ª ed., Oxford: Newnes, 2004, pp. 69-81. doi: 10.1016/B978-075066396-0/50004-9.
- [10] E. F. Fuchs y M. A. S. Masoum, Eds., «Chapter 10 - Optimal Placement and Sizing of Shunt Capacitor Banks in the Presence of Harmonics», en *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*, Burlington: Academic Press, 2008, pp. 397-441. doi: 10.1016/B978-012369536-9.50011-5.
- [11] El Congreso De Colombia, *LEY 143*. 1994. Accedido: may 29, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/2b8fb06f012cc9c245256b7b00789b0c/cb63df49e18bff080525785a007a62d8?OpenDocument#23>
- [12] El Congreso De Colombia, *LEY 142*. 1994. Accedido: may 29, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/Indice01/Leyes-1994-Ley142-1994>
- [13] «IEEE Standard for Shunt Power Capacitors», IEEE. doi: 10.1109/IEEESTD.2013.6466331.
- [14] «IEEE Std 1036-2020, IEEE Guide for the Application of Shunt Power Capacitors», p. 96, 2021.
- [15] IEC, «IEC 61642 - 1997, Industrial a.c. networks affected by harmonics - Application of filters and shunt capacitors», *IEC 61642 - 1997*, 1997.

- [16] Schneider Electric, «Capacitors rated voltage with Detuned Reactor». [En línea]. Disponible en: <https://ckm-content.se.com/ckmContent/sfc/servlet.shepherd/document/download/0691H00000FJuyqQAD>
- [17] Tekhar, «Chapter 3 - Harmonic blocking reactors». [En línea]. Disponible en: http://www.tekhar.com/Programma/ICAR/pdf_pict/22.pdf
- [18] Edvard Csanyi, «Step-by-step tutorial for building capacitor bank and reactive power compensation panel». feb. 28, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://electrical-engineering-portal.com/building-capacitor-bank-reactive-power-compensation-panel>
- [19] Ministerio de Minas y Energía, *RETIE*. 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/1179442/Anexo+General+del+RETIE+vigente+actualizado+a+2015-1.pdf/57874c58-e61e-4104-8b8c-b64dbabedb13>
- [20] «Welcome to Python.org», *Python.org*, abr. 26, 2021. <https://www.python.org/> (accedido abr. 25, 2021).
- [21] «What is NumPy? — NumPy v1.20 Manual». <https://numpy.org/doc/stable/user/whatisnumpy.html> (accedido jun. 02, 2021).
- [22] «pandas - Python Data Analysis Library». <https://pandas.pydata.org/> (accedido jun. 02, 2021).
- [23] «Matplotlib: Python plotting — Matplotlib 3.4.2 documentation». <https://matplotlib.org/> (accedido jun. 02, 2021).
- [24] Lovato, «Manual Lovato DMG 800», jun. 03, 2021. https://www.lovatoelectric.com/HandlerDoc.ashx?s=1272IGBF02_17.pdf&ic=110
- [25] Circutor, «Reactancias de Filtrado». [En línea]. Disponible en: http://www.cirsoft.com.bo/descargas/catalogos/cat_p7.pdf
- [26] Circutor, «Soluciones para Compensación de Reactiva en Baja Tensión». [En línea]. Disponible en: http://docs.circutor.com/docs/CT_ReactivaBT_ES.pdf
- [27] Lovato, «Manual Lovato DCRL8». [En línea]. Disponible en: https://www.lovatoelectric.com/HandlerDoc.ashx?s=1417EGB12_14.pdf&ic=111
- [28] Circutor, «Contactores para Condensadores de Potencia». [En línea]. Disponible en: http://circutor.es/docs/FT_CMC-B_ES.pdf
- [29] ABB, «Tmax. Generación T Interruptores automáticos en caja moldeada de baja tensión hasta 1600 A». [En línea]. Disponible en: <https://library.e.abb.com/public/3b08be451a18368bc1257b49002f683f/1SDC210015D0705.pdf>
- [30] Centelsa, «Conductores Eléctricos THHN/THWN 90 °C». [En línea]. Disponible en: <https://www.centelsa.com/archivos/5344cd0e.pdf>
- [31] Laumayer, «Ventiladores para Tableros DKC». <https://laumayer.com/energia/tableros-cofres-gabinetes-y-accesorios-de->

conexion/aires-acondicionados-y-ventiladores-para-tableros/ventiladores-
para-tableros/

9. Anexos

9.1. Anexo 1.

9.2. Anexo 2.

9.3. Anexo 3.