



**Implementación, diseño, ensamble, pruebas y suministro de filtro activo
CleanPOWER APF**

Julián Andrés López Chica

Informe de práctica para optar al título de:
Ingeniero Electricista.

Asesores:

Melisa de Jesús Barrera Durango, Docente universitaria
Juan David Ospina Granada, Ingeniero Electrónico

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Eléctrica.
Medellín, Antioquia, Colombia
2022.

Cita	López Chica [1]
Referencia	[1] J. López Chica, “Implementación, diseño, ensamble, pruebas y suministro de filtro activo CleanPOWER APF”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2022.
Estilo APA 7 (2022)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Noé Alejandro Mesa Quintero.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Contenido

1. Resumen	9
2. Introducción	10
3. Objetivos	11
3.1. Objetivos específicos:	11
4. Marco Teórico	11
4.1. Potencia activa	11
4.2. Potencia reactiva	11
4.3. Potencia aparente	12
4.4. Factor de potencia	12
4.5. Triángulo de potencia	12
4.6. Cargas resistivas	13
4.7. Cargas inductivas	13
4.8. Cargas capacitivas	13
4.9. Cargas no lineales	13
4.10. Armónicos	13
4.11. Relación entre cargas no lineales y los armónicos	14
4.12. Distorsión armónica	14
4.13. Distorsión armónica total	15
4.14. Distorsión total demandada	16
4.15. Voltaje y corriente rms	16
4.16. Efectos de la distorsión armónica	17
4.17. Calidad de la energía	17
4.18. Compensación	17
4.19. Beneficios de la compensación	18
4.19.1. Mejora el perfil de voltaje	18
4.19.2. Reduce las pérdidas de potencia	18
4.19.3. Libera capacidad en el sistema	18
4.19.4. Reducción en el costo de consumo de electricidad	18
4.20. Filtro activo	18
4.20.1. Estructura de un filtro activo de potencia	19
4.21. Filtro activo de potencia APF	21
4.22. Marco Normativo	22

4.22.1.	Artículo 23 de la Ley 143 de 1994.	23
4.22.2.	Artículo 87.8 de la Ley 142 de 1994.	23
4.22.3.	Resolución CREG 015-2018, capítulo 12 “Costos de transporte de energía reactiva”.	23
4.22.4.	Resolución CREG 199-2019, Artículo 7.....	24
4.22.5.	Resolución CREG 108-1997, Artículo 25 “Control al factor de potencia en el servicio de energía eléctrica”	24
4.22.6.	IEEE Std 18-2012, Standard for Shunt Power Capacitors	25
4.22.7.	IEEE Std 519-2014, sobre el control de armónicos (Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems).....	25
4.22.8.	RETIE artículo 20.11, Condensadores de baja y media tensión.	26
4.22.9.	Control de Armónicos IEEE 519-1992	26
5.	Metodología	27
5.1.	Recopilación de información	27
5.2.	Identificación de la planta.....	27
5.3.	Análisis de datos de medición	28
5.4.	Análisis de armónicos	28
5.5.	Diseño de planos y de filtros activos	28
5.6.	Análisis de resultados	28
6.	Resultados y análisis	28
6.1.	Identificación del área de trabajo.....	28
6.2.	Revisión de los planos eléctricos	31
6.3.	Obtención de las medidas eléctricas	31
6.4.	Subestación de servicios P1	32
6.5.	Toma y medición de datos	33
6.6.	Análisis de variables eléctricas	36
6.6.1.	Frecuencia.....	36
6.6.2.	Tensión	37
6.6.3.	Corriente	39
6.6.4.	Desbalance de tensión y de corriente	39
6.6.5.	Armónicos de tensión y de corriente	41
6.7.	Dimensionamiento del Filtro activo	48
6.7.1.	Cálculo del filtro activo	48

6.8.	Selección de proveedor para el Filtro Activo.	52
6.8.1.	Negociación y cotización proveedor ECOENER.....	54
6.8.2.	Toma de datos de la subestación de servicios por parte de proveedor ECOENER	54
6.8.4.	Criterios de selección para selección del tipo de filtro activo	57
6.8.5.	Instalación del filtro activo CleanPOWER APF.	63
6.9.	Resultados del filtro activo CleanPOWER APF primer mes	70
7.	Conclusiones	73
8.	Referencias Bibliográficas	74
9.	Anexos.....	76
9.1.	Anexo 1.....	76

Lista de figuras

Figura 1. Triangulo de potencias[2].	12
Figura 2. Formas de onda de cargas lineales y no lineales [3].	14
Figura 3. Distorsión de la corriente causada por una carga no lineal [3].	15
Figura 4. Principio de operación de un filtro activo de corriente [6].	19
Figura 5. Convertidor monofásico de medio puente [7.]	20
Figura 6. Convertidor monofásico de puente completo [7].	20
Figura 7. Convertidor trifásico de tres hilos [7].	21
Figura 8. Compensador trifásico de 4 hilos con conexión a neutro [8].	21
Figura 9. Onda de corriente de una red eléctrica con carga no lineal a) sin APF. b) con APF. [7].	22
Figura 10. Límites de distorsión de voltaje y corriente IEEE519-1992[17].	27
Figura 11. En planta compañía Colcafé norte [Fuente propia].	29
Figura 12. Subestación principal 5 Mva [Fuente propia].	30
Figura 13. Subestación de servicios izquierda (exterior). Derecha (interior) [Fuente propia].	30
Figura 14. Instrumento de medición (analizador de redes SONEL PQM-702[Fuente propia].	31
Figura 15. Subestación de servicios P1	32
Figura 16. Transformador Subestación de servicios P1 [Fuente propia].	33
Figura 17. Toma de medidas de variables eléctricas con acompañamiento de personal calificado. [Fuente propia].	36
Figura 18. Históricos de medida de la frecuencia. [Fuente analizador de redes SONEL]. .	37
Figura 19. Historial de medida de la tensión de línea [Fuente analizador de redes SONEL].	38
Figura 20. Historial de medida de tensión de fase [Fuente analizador de redes SONEL]. .	38
Figura 21. Historial de medición de la corriente por fase [Fuente analizador de redes SONEL].	39
Figura 22. Desbalance de tensión registrado [Fuente analizador de redes SONEL].	40
Figura 23. Desbalance de corriente registrado [Fuente analizador de redes SONEL].	40

Figura 24. Armónicos individuales de tensión promedio [Fuente analizador de redes SONEL].	42
Figura 25. Armónicos individuales de corriente promedio [Fuente analizador de redes SONEL].	44
Figura 26. Historial de comportamiento del factor de potencia [Fuente analizador de redes SONEL].	45
Figura 27. Comportamiento de las potencias activas [Fuente analizador de redes SONEL].	46
Figura 28. Comportamiento de las potencias reactivas [Fuente analizador de redes SONEL].	46
Figura 29. Comportamiento de las potencias aparentes [Fuente analizador de redes SONEL].	47
Figura 30. Gráfica de corriente y distorsión armónica [Fuente analizador de redes SONEL].	49
Figura 31. Superposición gráfica de corriente, potencia reactiva y factor de potencia [Fuente analizador de redes SONEL].	50
Figura 32. Llegada y recepción del filtro a la planta [Fuente propia].	64
Figura 33. Ingreso del filtro a la subestación de servicios [Fuente propia].	65
Figura 34. Instalación del filtro activo a la red de Colcafé [Fuente propia].	65
Figura 35. Vista de la instalación estructural del filtro activo [Fuente propia].	66
Figura 36. Porcentaje de mitigación de armónicos [Fuente propia].	67
Figura 37. Compensación del factor de potencia [Fuente propia].	68
Figura 38. Compensación en armónicos de tensión [Fuente propia].	68
Figura 39. Instalación de nuevas rendijas de extracción de calor [Fuente propia].	69
Figura 40. Temperaturas de operación con los ajustes de disipación térmicos [Fuente propia].	69
Figura 41. Datos de funcionamiento del filtro activo segunda semana [Fuente propia].	70
Figura 42. Datos de funcionamiento del filtro activo tercera semana [Fuente propia].	71
Figura 43. Datos de funcionamiento del filtro activo cuarta semana [Fuente propia].	71

Listado de tablas

Tabla 1. Límites de distorsión armónica de voltaje.....	26
Tabla 2. Características principales del transformador, subestación de servicios P1.....	33
Tabla 3. Características de la medida.	34
Tabla 4. Valores promedio de las medidas obtenidas.	34
Tabla 5. Clasificación, denominación y valores de la tensión nominal.....	37
Tabla 6. Distorsión armónica total de tensión.	41
Tabla 7. Armónicos individuales de tensión.	41
Tabla 8. Límites de distorsión armónica de tensión según NTC 50001-2008.	43
Tabla 9. Armónicos individuales de corriente.	43
Tabla 10. Opciones de filtro comerciales y corriente disponible.	51
Tabla 11. Comparativo de precios Filtro activo para corrección de armónicos.	52
Tabla 12. Valores de la medición realizada por proveedor del filtro.	54
Tabla 13. Valores de los armónicos de corriente y voltajes medidos por el proveedor.	55

Implementación, diseño, ensamble, pruebas y suministro de filtro activo CleanPOWER APF

1. Resumen

El caso de estudio del presente proyecto tiene como objetivo el diseño, dimensionamiento e implementación de un compensador de armónicos para el mejoramiento de la calidad de la energía. Durante el periodo de prácticas académicas en la empresa Colcafé S.A.S se llevaron a cabo una serie de actividades que tenían como objetivo el mejoramiento del manejo y el consumo de la energía eléctrica en una de las subestaciones de la compañía. Ante todo, estas actividades tenían como principal propósito el dimensionamiento de un filtro activo para la disminución de armónicos que serviría como piloto para las demás subestaciones de la planta.

La primera fase en el desarrollo del proyecto fue la de conocer los procesos que hacían parte de la compañía, haciendo recorridos que permitieran conocer las cargas existentes en el proceso de elaboración de café y a que subestaciones estaban asignadas dichas cargas. Al mismo tiempo se llevó a cabo una revisión de los planos eléctricos de la planta con el fin de obtener la información necesaria que permitiera conocer los puntos críticos para realizar las mediciones y determinar los puntos con mayor presencia de armónicos en la red.

Para el dimensionamiento del filtro activo se llevaron a cabo durante dos semanas una serie de mediciones con la ayuda de equipos especializados para estas actividades en la subestación de servicios P1, subestación que contaba con una mayor cantidad de cargas no lineales conectadas y por ende mayor cantidad de armónicos presentes. Los datos se tomaron durante los periodos de demanda de energía más altos en la subestación para lograr calcular un filtro para condiciones críticas de armónicos.

El filtro activo seleccionado según las mediciones realizadas fue un filtro activo APF CleanPOWER anti-armónicos de 300 A a 480 V, que está diseñado para realizar tres funciones: mitigación de armónicos, compensación de reactivos y estabilización de red eléctrica con el cual se logró mitigar la presencia de armónicos en la red de un 14% a 2,5%. Con estos resultados se logró asentar unas buenas bases para dimensionar y adquirir filtros activos para las demás subestaciones de la empresa para un proyecto futuro necesario para cumplir con la normativa exigida.

2. Introducción

En la industria del café todos los procesos productivos que implican la transformación del café desde que llega en forma de grano hasta que se empaca y sale para su distribución y posterior venta, requiere de un proceso sistemático y ordenado a través de grandes líneas de producción conformadas por una variedad de equipos y máquinas. Estos equipos y máquinas se traducen en cargas que deben ser alimentadas a través de la red eléctrica de la empresa que está alimentada por una subestación principal interna de 5000 Kva y las correspondientes subestaciones secundarias. En muchas ocasiones estas cargas son irregulares y se comportan de manera no lineal. Con el incremento de las cargas no lineales en los procesos industriales que se han venido agregando con los nuevos proyectos que están realizando en Colcafé, surgen problemas de distorsión armónica en las señales de voltaje y de corriente, lo cual provoca pérdidas de energía y una degradación del factor de potencia, afectando la calidad de la energía en los sistemas eléctricos de la empresa. Para resolver este tipo de problemas se han venido utilizado entre otras soluciones, arreglos de capacitores y reactores conocidos como filtros pasivos, los cuales, si bien pueden ayudar a amortiguar estos problemas, pueden presentar problemas de resonancia con la impedancia de la red, además de una sobrecompensación de la potencia reactiva a la frecuencia fundamental y una baja flexibilidad dinámica para poder compensar diferentes elementos de frecuencias armónicas. Como una solución alterna a los problemas mencionados anteriormente, se ha venido discutiendo la viabilidad de usar filtros activos, cuyas características se adaptan de forma versátil a las necesidades del sistema a compensar.

Debido a todo lo mencionado anteriormente, se planea implementar, diseñar, ensamblar, y realizar las pruebas y suministro de un *filtro un activo CleanPOWER APF*, que será instalado en la subestación de servicios de la torre de molidos, lugar en el cual se realizará un estudio de calidad de la energía para determinar la capacidad respectiva del filtro activo para que logre compensar los armónicos presentes en la red de alimentación de la planta Colcafé.

3. Objetivos

Objetivo General: Diseñar, implementar y ensamblar un suministro de filtros activos que permitan la disminución de las distorsiones armónicas debido a las cargas no lineales conectadas a la red.

3.1. Objetivos específicos:

- Realizar una revisión del estado del arte de los procesos de limpieza de café y analizar qué tipo de cargas se están utilizando y cuales presentan mayor agotamiento de la red en cuanto a calidad se refiere.
- Diseñar los planos eléctricos que permitan una visualización del sistema a intervenir y localizar los puntos más críticos y la correcta conexión de los filtros a la red existente.
- Gestionar todo el proceso de instalación, comenzando desde la fase de diseño, hasta la contratación del servicio con las contratistas afiliadas a la empresa y finalizando con las pruebas pertinentes del proyecto.

4. Marco Teórico

En esta sección se sustenta la fundamentación teórica necesaria para la realización del diseño del proyecto.

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 con 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 [1]:

$$P=V*I*\text{Cos}(\theta) \quad (1)$$

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 [1]:

$$Q=V*I*\text{Sen}(\theta) \quad (2)$$

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 [1]:

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

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 $\text{Cos}(\theta)$ 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 [2]:

$$\text{FP}=\text{Cos}(\theta) \quad (4)$$

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 factor de potencia varía. Es importante aclarar que el factor de potencia 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 observar en la Figura 1.

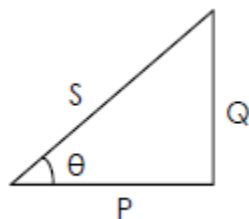


Figura 1. Triangulo de potencias [2].

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 los 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, $Q=0$ [2].

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). Para este tipo de cargas se dice que el factor de potencia está en atraso [2].

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) [2].

4.9. Cargas no lineales

Una carga se considera no lineal si su impedancia cambia con el voltaje aplicado. La impedancia que cambia se puede traducir en que la corriente que consume la carga no lineal no será sinusoidal incluso cuando esté conectada a un voltaje sinusoidal. Estas corrientes no sinusoidales contienen corrientes armónicas que se relacionan con la impedancia del sistema de distribución de energía y de esta forma crean una distorsión de voltaje que puede afectar tanto al equipo del sistema de distribución como a las cargas que se encuentran conectadas a este [3].

4.10. Armónicos

Una tensión armónica se puede definir como una tensión con forma de onda sinusoidal cuya frecuencia se considera múltiplo entero de la llamada frecuencia fundamental de la tensión de alimentación proveniente de la red. Cualquier señal periódica, sin tener en cuenta su complejidad puede descomponerse en la suma de señales cuya frecuencia es múltiplo de la fundamental o la de referencia. Los armónicos dan lugar a cargas no lineales, que, conectadas a la red eléctrica, absorben corrientes que son no lineales y que dependiendo de la

deformación de la onda de corriente cuando se aplica una tensión sinusoidal se tendrá su valor de amplitud y frecuencia [3].

4.11. Relación entre cargas no lineales y los armónicos

En el pasado, se podía encontrar las cargas no lineales en aplicaciones industriales pesadas, como hornos de arco, unidades de frecuencia variable, rectificadores pesados para refinación electrolítica, entre otros. Los armónicos que generaban eran localizados y se abordaban por personal calificado.

Actualmente los problemas de armónicos tienden a ser más comunes no solo en aplicaciones industriales sino también en lugares comerciales. Esto se debe principalmente a las actuales tecnologías de conversión de energía, como la fuente de alimentación conmutada (SMPS), la cual se puede encontrar en prácticamente todos los dispositivos electrónicos de alimentación (computadores, servidores, monitores, impresoras, fotocopias, sistemas de telecomunicaciones, equipos de transmisión, etc.) [3].

El SMPS es una gran fuente de alimentación, pero también es una carga altamente no lineal. En la figura 2 se muestra una representación de la corriente de varios tipos de equipos. La forma más común de corriente distorsionada es una forma de onda de pulso con un alto factor de pico.

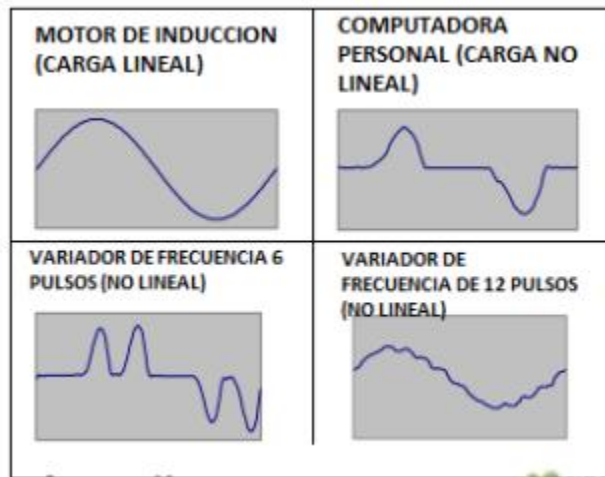


Figura 2. Formas de onda de cargas lineales y no lineales [3].

4.12. 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.

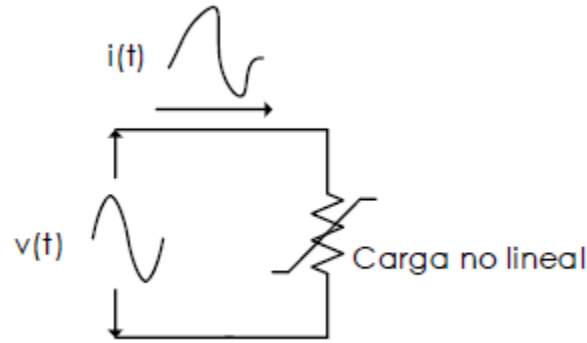


Figura 3. Distorsión de la corriente causada por una carga no lineal [3].

En la figura 1 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 [3].

En muchas industrias generalmente suelen tener un gran porcentaje de cargas no lineales que corresponden a equipos enfocados en la automatización industrial, ventilación 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 [3].

4.13. 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:

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

Donde h representa el orden del armónico.

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

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

Donde h representa el orden del armónico.

4.14. 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:

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

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

4.15. 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]:

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

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

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

4.16. Efectos de la distorsión armónica

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 puede ocasionar a que tanto el voltaje como la corriente a esa frecuencia aumenten de magnitud de manera significativa lo que puede causar que se supere los umbrales de corriente y voltaje nominal que puede soportar el condensador. En una misma red, se puede dar al mismo tiempo una resonancia en serie (inductancia y capacitancia están conectados en serie) y una resonancia en paralelo (inductancia y capacitancia conectados en paralelo), esta resonancia se da a lugar en una frecuencia concreta, conocida como frecuencia de resonancia [4].

4.17. Calidad de la energía

La calidad de la energía eléctrica puede definirse como la ausencia de fallas, interrupciones, sobretensiones y posibles deformaciones producidas por la presencia de armónicos en la red y variaciones de voltajes RMS que se suministran al usuario final; teniendo en cuenta las características de estabilidad de la frecuencia, voltaje y la continuidad del servicio eléctrico.

Un aspecto crucial de la calidad y eficiencia energética consiste en generar y movilizar al máximo energía activa que produce trabajo útil, tratando en lo más posible de compensar cargas de energía fluctuante y no productiva, como la energía reactiva, así como la de distorsión que generan algunos equipos eléctricos con componentes no lineales (véase sección 4.9) tales como variadores de velocidad, rectificadores y arrancadores electrónicos, entre muchos otros [5].

4.18. Compensación

El termino compensación se utiliza para describir la integración intencionada de dispositivos de potencia activa o reactiva, en una red eléctrica para poder lograr un efecto deseado. Estos pueden incluir entre otras características, perfiles de voltaje mejorados, factor de potencia mejorado, rendimiento de estabilidad mejorado y capacidad de transmisión mejorada [5].

Usualmente para solucionar o compensar en gran medida los problemas de armónicos en la red, se usan acondicionadores de señal tales como los filtros pasivos sintonizados o filtros activos. Si bien, los filtros pasivos son más económicos, su focalización no les permite compensar más allá de su frecuencia sintonizada.

4.19. Beneficios de la compensación

4.19.1. 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].

4.19.2. 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.

4.19.3. Libera capacidad en el sistema

Al conectar un dispositivo compensador al sistema, este suministrará 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 un uso 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].

4.19.4. Reducción en el costo de consumo de electricidad

Las cargas con bajos factores de potencia demandan una corriente mayor de la fuente de alimentación como se vio en la sección 3.14. 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, 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.

4.20. Filtro activo

Los filtros activos son dispositivos que se basan en convertidores con modulación de ancho de pulso PWM. Estos dispositivos se clasifican en dos tipos: Filtros serie y filtros paralelo [5].

Los filtros activos de corriente o filtros activos en paralelo eliminan de la red eléctrica la circulación de armónicos de corriente no deseadas y compensan el factor de potencia carga. En la figura 4 se ilustra el diagrama equivalente del filtro activo de corriente, modelado como una fuente de corriente.

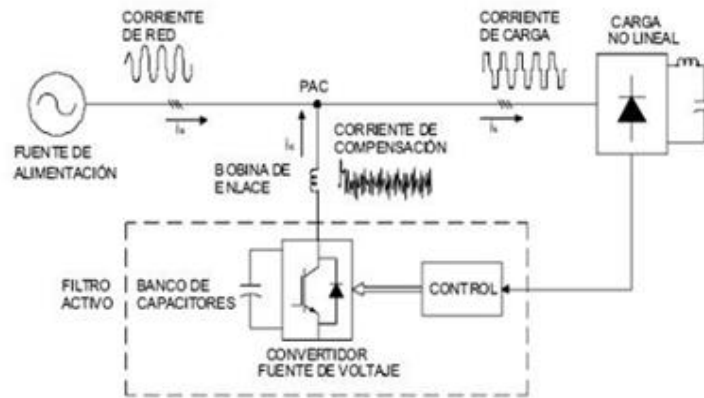


Figura 4. Principio de operación de un filtro activo de corriente [6].

Normalmente para lograr apearse a las normas IEC-61000-3.4 e IEEE-519 se utilizan filtros en paralelo, los cuales poseen principio de funcionamiento que consiste en la inyección a la red, en contrafase, de los armónicos que son consumidos por la carga, a través de un ondulador [6].

Los filtros activos de voltaje o filtros activos en serie tienen como característica principal cancelar los armónicos de tensión que se puedan presentar en la red, alcanzando así que la corriente de línea sea sinusoidal, logrando que el voltaje en el punto de conexión común también lo sea [6].

4.20.1. Estructura de un filtro activo de potencia.

Como se ha venido explicando, un filtro activo de potencia principalmente está conformado por dos etapas; la primera es una etapa de potencia que está conformada por un convertidor estático conectado a un elemento almacenador de energía en corriente continua y la segunda etapa es la de control para el manejo del convertidor mencionado [7].

La configuración del convertidor del filtro activo de potencia va a depender en su mayor medida del sistema al cual se va a emplear, en otras palabras, va a depender de si el sistema es monofásico, bifásico o trifásico, ya que de esto dependerá de si el convertidor de filtro es:

- Monofásico de una rama o medio puente.

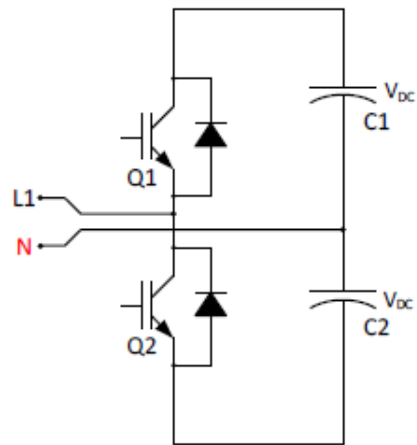


Figura 5. Convertidor monofásico de medio puente [7].

- Monofásico de dos ramas o de puente.

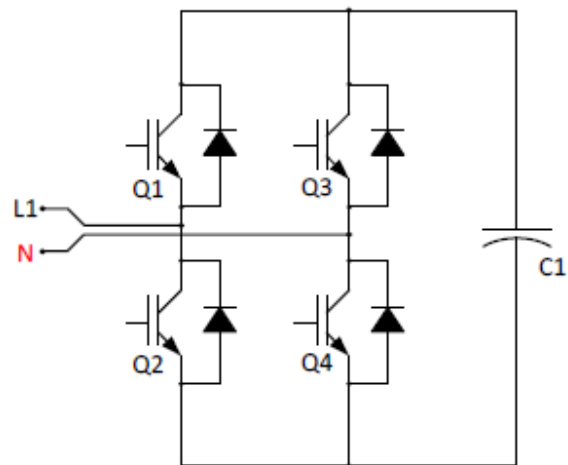


Figura 6. Convertidor monofásico de puente completo [7].

- Trifásico de tres ramas.

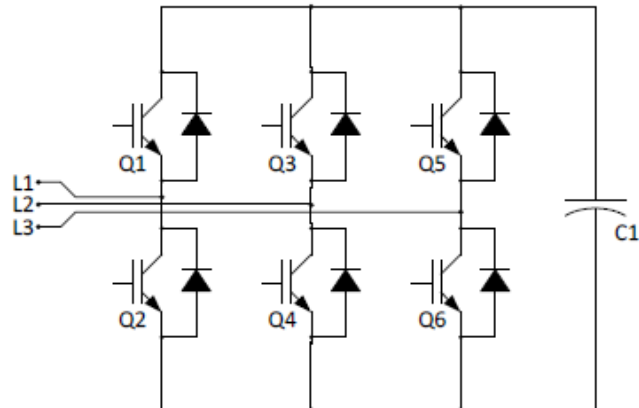


Figura 7. Convertidor trifásico de tres hilos [7].

- Trifásico de cuatro ramas con conexión a neutro

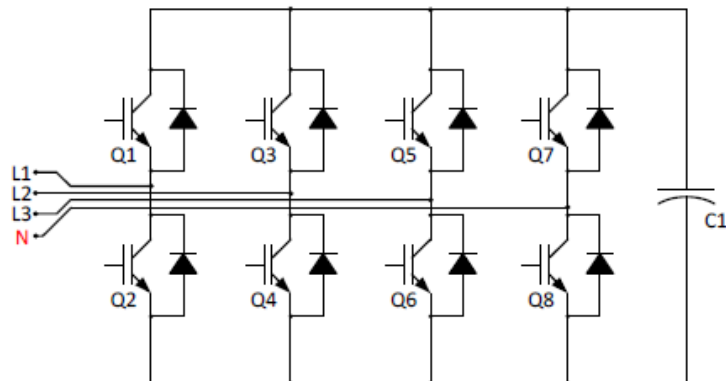


Figura 8. Compensador trifásico de 4 hilos con conexión a neutro [8].

El elemento de almacenamiento de energía continua puede ser un dispositivo de almacenamiento capacitivo o inductivo; para el elemento capacitivo la energía disponible para la compensación se almacena en un condensador y se establece un nivel de energía para el filtro activo de potencia a través de la medida de la tensión continua, para el elemento de almacenamiento inductivo el nivel de energía del filtro activo se obtiene mediante la medida de la corriente continua de la bobina [8].

4.21. Filtro activo de potencia APF

Un filtro activo de potencia (APF) consiste esencialmente en un sistema que compensa la corriente y cuya principal característica es la de reducir los armónicos que se puedan presentar en la red eléctrica. Un filtro activo está elaborado de tal forma que se pueda acoplar

a cualquier cambio que se presente en la red eléctrica, dado que, al inyectar cargas no lineales a la red, se pueden presentar distorsiones y pérdidas de eficiencia debido al bajo factor de potencia que se puede evidenciar [7].

El principio de funcionamiento de un filtro activo se basa en la estructura de un inversor; este está conformado por elementos de conmutación que permiten el paso de señales hacia la red y que amortiguan los armónicos que se puedan presentar en una red determinada, dejando así que la señal de la corriente sea lo más parecido a una sinusoidal sin distorsión como se muestra en la figura 9.

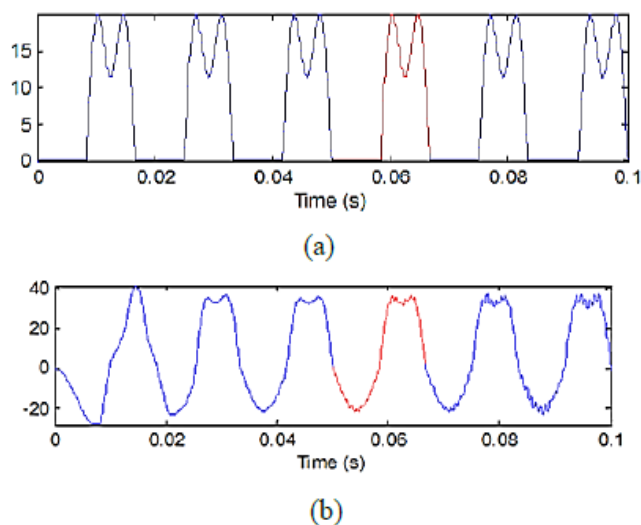


Figura 9. Onda de corriente de una red eléctrica con carga no lineal a) sin APF. b) con APF. [7].

Un filtro activo además de la eliminación de armónicos que se hacen presentes en una red eléctrica realiza varias funciones de corrección para un sistema eléctrico. Como lo son la eliminación de la corriente de neutro, el equilibrio de corrientes entre fases, también la corrección del factor de potencia, compensación en medida parcial o total de energía reactiva, la eliminación o amortiguación de armónicos de voltaje en los puntos de conexión de la carga, entre otros [7].

4.22. Marco Normativo.

A continuación, se mencionará la normativa colombiana que regula el consumo de energía reactiva para los usuarios. Es de aclarar, que este marco normativo dará contexto de la importancia de tener un buen factor de potencia en nuestras instalaciones industriales; también se mencionará la normativa correspondiente al correcto diseño de un sistema compensador de la energía eléctrica.

4.22.1. 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].

4.22.2. 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].

4.22.3. 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 encuentren incurso en alguna de las siguientes condiciones [14]:

- a. “Cuando la energía reactiva (kVAr/h) 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”.
- 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 de 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 [14]:

$$CTER_{u,n,h,m,j} = ER_{u,h,m,j} * M * D_{n,h,m} \quad (12)$$

Donde:

$CTER_{u,,h,m,j}$: 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.

4.22.4. 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 dicta [15]:

“ 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[15].

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.” [15].

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

En la prestación del servicio público a domicilios de energía eléctrica, se controlará el factor de potencia de los usuarios no residenciales, y de los residenciales conectados a un nivel de tensión superior al uno [16].

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 con la CREG 015 – 2018.

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

La IEEE std 18 – 2012 define las siguientes clasificaciones y capacidades para un sistema compensador [17]:

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 $1,2 \times \sqrt{2} \times$ 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.

4.22.7. IEEE Std 519-2014, sobre el control de armónicos (Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems)

De acuerdo con 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 [18].

Tabla 1. Límites de distorsión armónica de voltaje.

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

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

De acuerdo con el 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 (THD_v), 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.”

4.22.9. Control de Armónicos IEEE 519-1992

La IEEE 519 1992 nos habla principalmente de los problemas con armónicos, en especial los introducidos por cargas no lineales, con el fin de poder prevenir los problemas con la calidad de la energía. El cumplimiento de esta norma está siendo cada día más requerido dado el crecimiento en la utilización de VDF y otras cargas no lineales [20].

Esta norma además define la distorsión total e individual de tensión y corriente. El argumento que se adopta es el de restringir la inyección de corrientes armónicas de consumidores individuales para que no ocurran niveles de distorsión de voltaje inaceptables como se indica en la figura 10.

Low-Voltage System Classification and Distortion Limits			
	Special Applications¹	General System	Dedicated System²
Notch Depth	10%	20%	50%
THD (voltage)	3%	5%	10%
Notch Area (A_n) ³	16 400	22 800	36 500

NOTE: The Value AN for other than 480 V systems should be multiplied by V/480.
 1 Special applications include hospitals and airports.
 2 A dedicated system is exclusively dedicated to the converter load.
 3 In volt-microseconds at rated voltage and current.

Current Distortion Limits for General Distribution Systems (120 V Through 69.000V)						
Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{sc}/I_2	<11	11<h<17	17<h<23	23<h<35	35<h	TDD
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Where:
 I_{sc} = Maximum short-circuit current at PCC.
 I_L = Maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.

Figura 10. Límites de distorsión de voltaje y corriente IEEE519-1992[17].

5. Metodología

A continuación, se presentan los pasos metodológicos que se llevaron a cabo para la realización de este trabajo.

5.1. Recopilación de información

Durante la fase inicial del proyecto se hizo un análisis y un estudio tanto de las instalaciones de la compañía como de sus principales puntos de trabajo, en donde se llevan a cabo los procesos de transformación del café. Esto permitió tener una visión más amplia de cómo funcionaba la planta además de cómo y dónde aplicar el mejoramiento de la calidad de la energía mediante los filtros activos APF.

5.2. Identificación de la planta

Se realizaron visitas de reconocimiento por la planta, con el fin de identificar la ubicación de las subestaciones, y de las distintas líneas de producción y determinar que cargas estaban conectadas a las subestaciones escogidas para el análisis.

5.3. Análisis de datos de medición

Una vez identificadas las subestaciones a intervenir, se procedió a tomar las medidas pertinentes que nos arrojaran la información necesaria tanto para diseñar los planos eléctricos e integrar los filtros activos y el diseño y capacidad de los filtros dependiendo de los resultados obtenidos por el equipo de medición.

5.4. Análisis de armónicos

Una vez el equipo de medición arrojó los resultados de las diferentes líneas de alimentación, se procedió a realizar el estudio de armónicos y ver que tanto estaban afectando la calidad de la energía, haciendo un análisis exhaustivo y determinando hasta que puntos que armónicos eran los que más causaban daño a la red.

5.5. Diseño de planos y de filtros activos

Con los datos de las mediciones y realizando un estudio previo de la normatividad en cuanto a calidad de la energía según observaciones del operador de red, se procedió a determinar la capacidad de los filtros activos que ayudarían a mitigar el problema de armónicos en la red para la subestación de servicio P1. Además se realizaron los planos eléctricos de adaptación a la subestación de servicios P1 de los filtros activos APF.

5.6. Análisis de resultados

Una vez se instalaron los filtros activos se llevaron a cabo mediciones con el fin de analizar el desempeño de los filtros activos y lograr así un comparativo de un antes y un después de la instalación de estos y concluir en cuanto mejoraron la mitigación de armónicos y de su comportamiento en cuanto a mejoramiento de calidad de la energía se refiere.

6. Resultados y análisis

6.1. Identificación del área de trabajo

Se identificó el área de trabajo a través de varias visitas realizadas a la planta (Colcafé). Esta actividad permitió conocer donde están ubicadas las subestaciones de la planta y qué tipo de carga se encontraban instaladas 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, además de consultas hechas a planos unifilares de los diferentes sectores de la empresa.

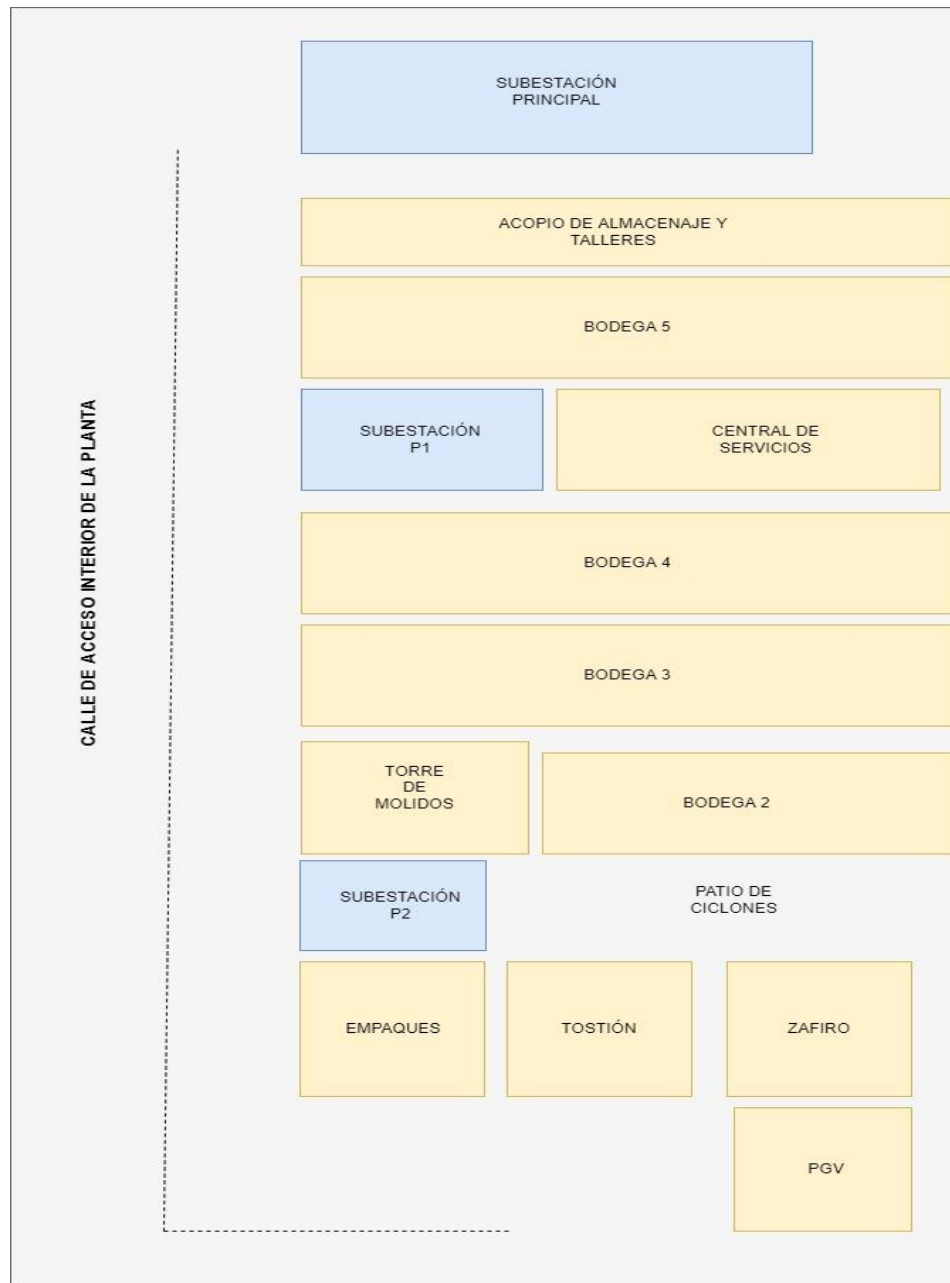


Figura 11. En planta compañía Colcafé norte [Fuente propia].

En la figura 11 se detalla la distribución de la planta Colcafé, la distribución de las subestaciones analizadas y los diferentes bloques que hacen parte de la línea de producción de la empresa.



Figura 12. Subestación principal 5 Mva [Fuente propia].

En la figura 12 se muestra la subestación principal de la compañía Colcafé, esta es alimentada por Epm, red primaria de media tensión 44 kV. De esta subestación se alimentan las 10 subestaciones secundarias distribuidas por toda la compañía.



Figura 13. Subestación de servicios P1 izquierda (exterior). Derecha (interior) [Fuente propia].

La figura 13 muestra la subestación de servicios P1 con capacidad de 13.2 kV, esta subestación fue la seleccionada para realizar los estudios de calidad de la energía dada su criticidad y la cantidad de cargas asociadas a ella.

6.2. Revisión de los planos eléctricos

Se realizó la revisión de los planos eléctricos de la planta Colcafé con el objetivo de determinar cuántas subestaciones existentes hay en el momento, además de determinar cuáles eran las cargas totales instaladas para cada una de ellas y así tener una referencia para poder lograr una medición y de esta forma, poder determinar puntos factibles críticos y puntos de compensación en caso de que fuese necesario.

6.3. Obtención de las medidas eléctricas

Se obtuvo los datos correspondientes a la subestación más crítica en cuanto a armónicos, siendo esta la subestación de servicios P1 (central de servicios), que alimenta el sector de tostión, la torre de granulado, la PGV, la bodega de cafetal, los Crioconcentradores, y servicios varios. Las medidas obtenidas corresponden a voltajes, corrientes, factor de potencia, potencia activa, reactiva y aparente en el barraje del tablero de distribución principal.



Figura 14. Instrumento de medición (analizador de redes SONEL PQM-702[Fuente propia].

El elemento utilizado para llevar a cabo las mediciones en las líneas de las subestaciones especificadas fue un analizador de redes SONEL PQM-702. El analizador de calidad de energía eléctrica PQM-702 es un producto de tecnología avanzada que permite la medición universal, el análisis y el registro de los parámetros de las redes eléctricas de 50/60 Hz y la

calidad de la energía eléctrica de acuerdo con la normativa europea sobre las condiciones específicas de funcionamiento del sistema eléctrico. “El analizador está dirigido a usuarios que necesitan controlar la calidad de la energía utilizando un dispositivo móvil que cumple con los requisitos del estándar IEC 61000 clase A para analizadores. El PQM-702 satisface plenamente las necesidades funcionales de análisis de calidad de energía y diagnóstico de interferencia en redes de energía. El PQM-702 se utiliza en el campo de los servicios profesionales de energía y mantenimiento en las plantas industriales, así como entre especialistas independientes en calidad de energía” [21].

6.4. Subestación de servicios P1

La subestación de servicios P1 está alimentada por un transformador de capacidad de 630KVA, 3 ϕ , con aceite mineral como aislante, 13.2Kv/440V, $U_z = 5.32$, con una conexión Dyn5. Esta subestación es la encargada de alimentar el sector de tosti3n, la torre de granulado, la PGV (planta generadora de vapor), la bodega de cafetal, los Crioconcentradores, y servicios varios. Los resultados de las medidas fueron obtenidos mediante el analizador de redes SONEL PQM-702 que se ubic3 en los tableros de distribuci3n de la subestaci3n. Los datos obtenidos fueron tomados durante 2 semanas comenzando el 2 de mayo y finalizando el 30 de septiembre del 2021.



Figura 15. Subestaci3n de servicios P1

Tabla 2. Características principales del transformador, subestación de servicios P1

TRANSFORMADOR SUBESTACIÓN DE SERVICIOS P1	
CAPACIDAD	630kVA
ALTA TENSIÓN	13.2kV
BAJA TENSIÓN	440V
Uz	5.32
CONEXIÓN	Dyn5
AISLANTE	ACEITE MINERAL
FABRICANTE	SIERRA



Figura 16. Transformador Subestación de servicios P1 [Fuente propia].

6.5. Toma y medición de datos

Los datos obtenidos por el analizador de redes para el estudio de calidad de la energía de la planta fueron tomados durante 2 semanas. Estos datos se obtuvieron con el fin de determinar el estado actual del suministro de energía eléctrica de la instalación eléctrica alimentada desde un transformador de 630 kVA perteneciente a la subestación de servicios de Colcafé ubicada en el municipio de Medellín – Antioquia, y evaluar las variables eléctricas medidas que permitan conocer el estado actual de la instalación en términos de calidad de la potencia en general.

La recolección de datos se realizó con el analizador de redes SONEL PQM700, el cual se instaló en el totalizador del tablero principal de tensión nominal 440/277v.

Tabla 3. Características de la medida.

Duración	2 semanas
Tiempo de Integración	30 segundos
Inicio	20/08/2021
Fin	04/09/2021

Durante este tiempo se hizo un seguimiento con el analizador de redes, se hacían varias sesiones de medición con el fin de determinar las horas pico y observar cómo se comportaban las variables durante distintos momentos del día y escoger las más críticas para el sistema. A continuación, se muestra un resumen de los resultados de medición de las principales variables eléctricas registradas por el analizador de redes en el periodo de medición.

Tabla 4. Valores promedio de las medidas obtenidas.

Fase	MINIMO	MAXIMO	PROMEDIO	REFERENCIA	CUMPLE SI/NO
Frecuencia [Hz]					
TOTAL	60.01	60.03	60.02	Entre 59.8 Y 60.2	SI
Tensión de Línea [V]					
Fase 1-2	440	485	460	Entre 428 y 483 (+5%-8%)	SI
Fase 2-3	448	486	460		
Fase 1-3	440	486	460		
Tensión de Fase					
Fase 1	254	280	262	Entre 244 y 278 (+5%-8%)	SI
Fase 2	255	281	263		
Fase 3	255	281	262		
Potencia Activa [kW]					
Fase 1	40	230	120	N.A	
Fase 2	38	230	120		
Fase 3	37	230	120		
TOTAL	100	670	350		
Corriente [A]					
Fase 1	150	1000	450	Máximo 830 A (corriente nominal transformador)	SI
Fase 2	150	1000	450		
Fase 3	150	1000	450		
Potencia reactiva [kVAR]					
Fase 1	5	200	60	N.A	
Fase 2	5	200	60		
Fase 3	5	200	60		

TOTAL	20	400	180		
Potencia Aparente [kVA]					
Fase 1	100	300	250	Máximo 363 kVA	SI
Fase 2	100	300	250		
Fase 3	100	300	250		
TOTAL	100	700	400	Máximo 630 KVA	SI
Factor de potencia					
Fase 1	0.57	0.97	0.92	Mínimo 0.9	SI
Fase 2	0.5	0.97	0.92		SI
Fase 3	0.6	0.97	0.92		SI
TOTAL	0.5	0.98	0.93		SI
Energía [MW-h, MVar-h, MVA-h]					
Activa total	42.55	Para evitar penalización por consumo de energía reactiva, ésta no puede superar la mitad de la energía activa. Relación 42.05%			SI
Reactiva total	17.49				
Aparente total	55.89				
Desequilibrio de corriente %					
Unb-I	0	5.5	2.8	Máximo 40%	SI
Desequilibrio de tensión %					
Unb-V	0	0.4	0.1	Máximo 3%	SI
THD-V (Distorsión Armónica Total de tensión)					
Fase 1	2.6	7.2	5.3	Máximo 5%	
Fase 2	2.9	7.4	5.3		
Fase 3	2.2	6.5	4.4		
TDD-i % (Distorsión Armónica Total de corriente demandada)					
Fase 1	4.4	34.3	14	Máximo 15%	SI
Fase 2	4.1	31.5	11		SI
Fase 3	3.8	29	12		SI

En la tabla 4 se resumen los datos obtenidos que se realizaron durante las semanas de prueba, en ella se aprecian las distintas variables que se detectaron en el barraje del transformador. Con estos resultados se procedió a realizar los cálculos pertinentes para el dimensionamiento del filtro activo.



Figura 17. Toma de medidas de variables eléctricas con acompañamiento de personal calificado. [Fuente propia].

6.6. Análisis de variables eléctricas

6.6.1. Frecuencia

En Colombia la frecuencia nominal de la tensión es 60Hz, y se encuentra regulada por la NTC 1340 de 2013 y la NTC 5001 de 2008. Existen tolerancias y duración de variaciones de manera que no afecten ni produzcan interrupciones en las funciones de los equipos. La NTC 1340 menciona que en condiciones normales de suministro la frecuencia se debe encontrar entre 59,8 Hz y 60,1Hz para el 95% de los datos medidos en una semana.

A continuación, se muestra la gráfica del historial de la frecuencia durante el periodo de medición.

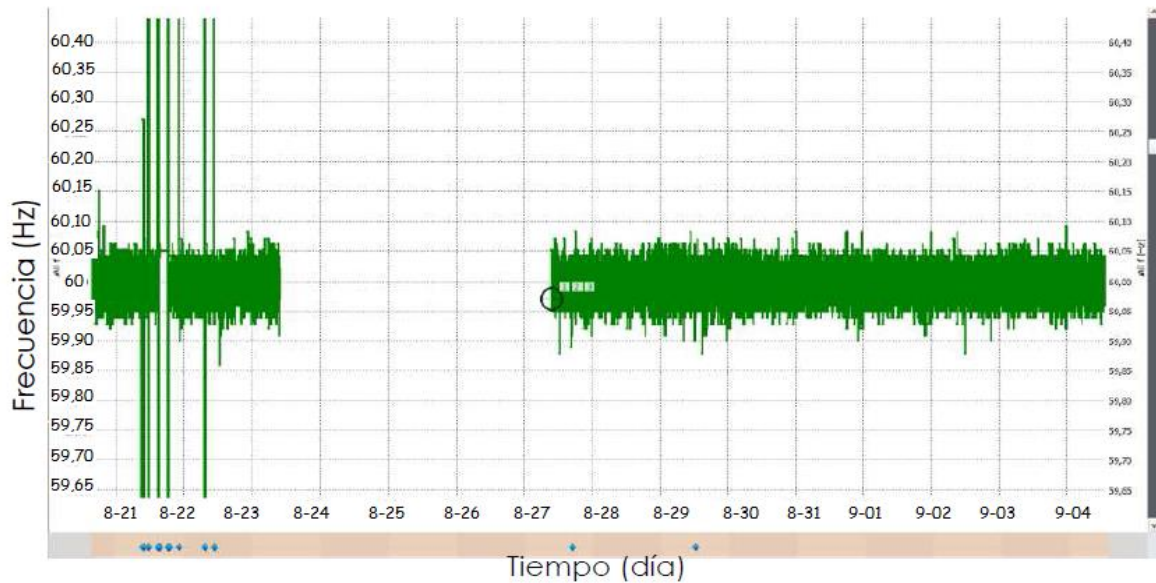


Figura 18. Históricos de medida de la frecuencia. [Fuente analizador de redes SONEL].

Según los valores consignados en la tabla 2 y la gráfica anterior, se concluye que la frecuencia se encontró dentro de los valores permisibles por la norma en condiciones normales de suministro durante el tiempo de medición.

6.6.2. Tensión

Según la NTC 1340, en condiciones normales de suministro, el 100% de los valores registrados en el periodo de medida deben estar en el intervalo definido por los valores consignados en la tabla 5. Es decir, según la tensión nominal, dichos valores deben estar entre 423V y 483V como se muestra a continuación.

Tabla 5. Clasificación, denominación y valores de la tensión nominal.

Clasificación	Nivel	Tensión Nominal (V)		Tensión Máxima (% de la nominal)	Tensión mínima (% de la nominal)
		Sistemas trifásicos de 3 o 4 conductores	Sistemas monofásicos de 3 o 4 conductores		
Baja Tensión Vn < 1kV	Nivel 1 Vn < 1kV		120	(+) 5	Clientes urbanos (-) 8 Clientes rurales (-) 10
		120/208			
			120/240		
		127/220			
		220			
		277/480			
		480			

En la siguiente gráfica se observa el historial de las tensiones de línea y de fase con sus respectivos valores límites que se obtuvieron durante el tiempo de medición en la subestación.

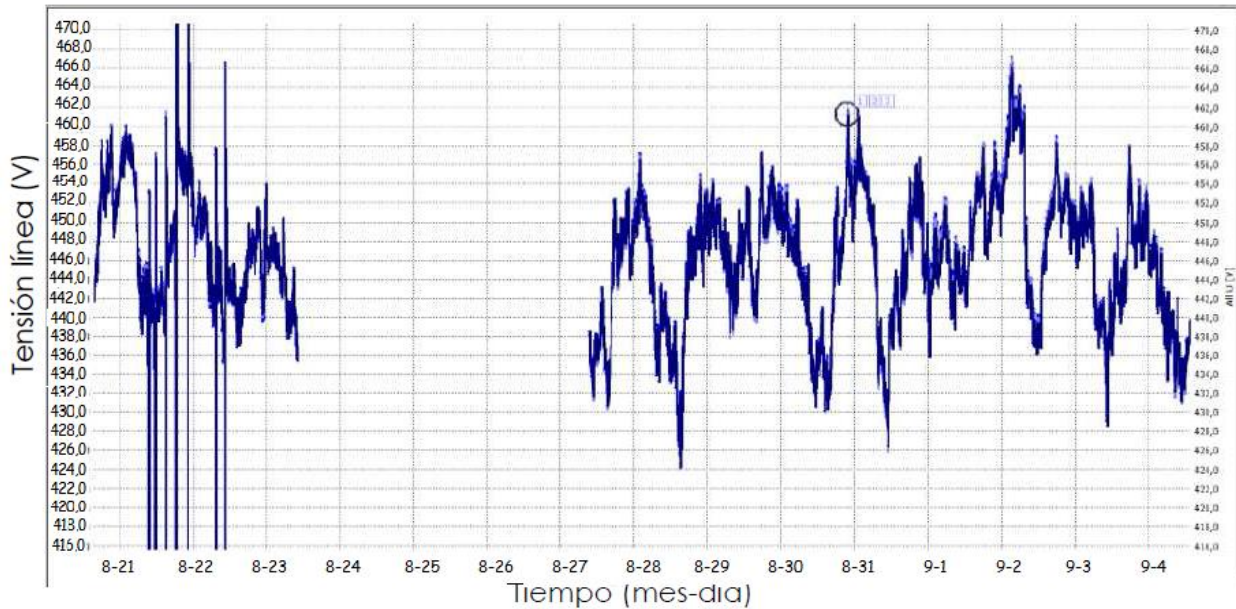


Figura 19. Historial de medida de la tensión de línea [Fuente analizador de redes SONEL].

Por otro lado, las tensiones de fase deben estar entre 244 y 278 V. En la siguiente gráfica se observa el comportamiento histórico.

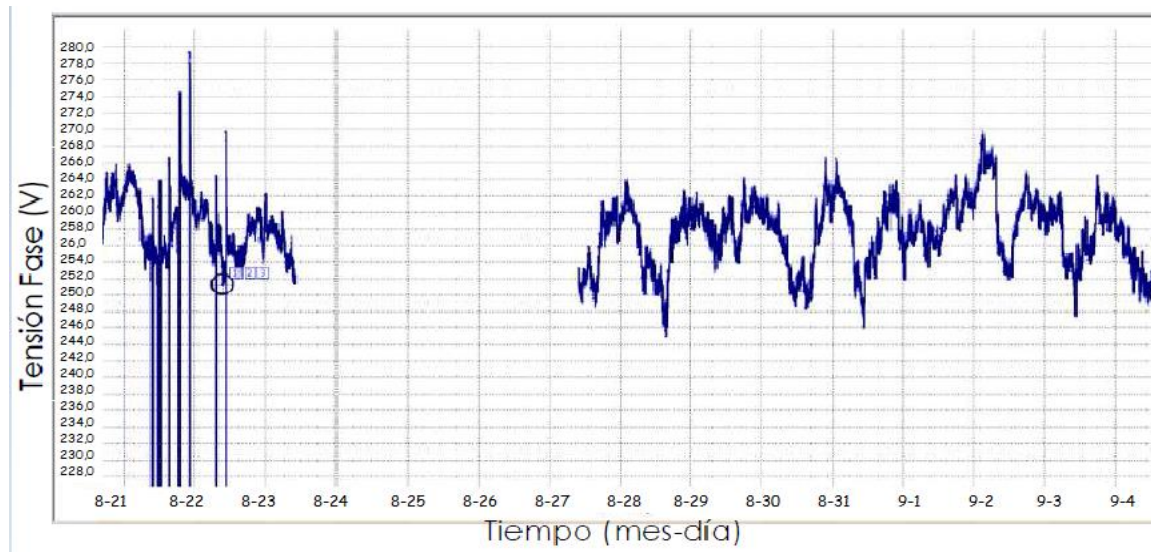


Figura 20. Historial de medida de tensión de fase [Fuente analizador de redes SONEL].

Luego de haber analizado las mediciones y haber tabulado sus resultados se determinó que la tensión medida por el analizador de redes se encontró dentro de los rangos permisibles durante la mayor parte del tiempo que duraron las pruebas y mediciones.

6.6.3. Corriente

En la siguiente gráfica se plasman el comportamiento de la corriente según los datos registrados por el analizador de redes.

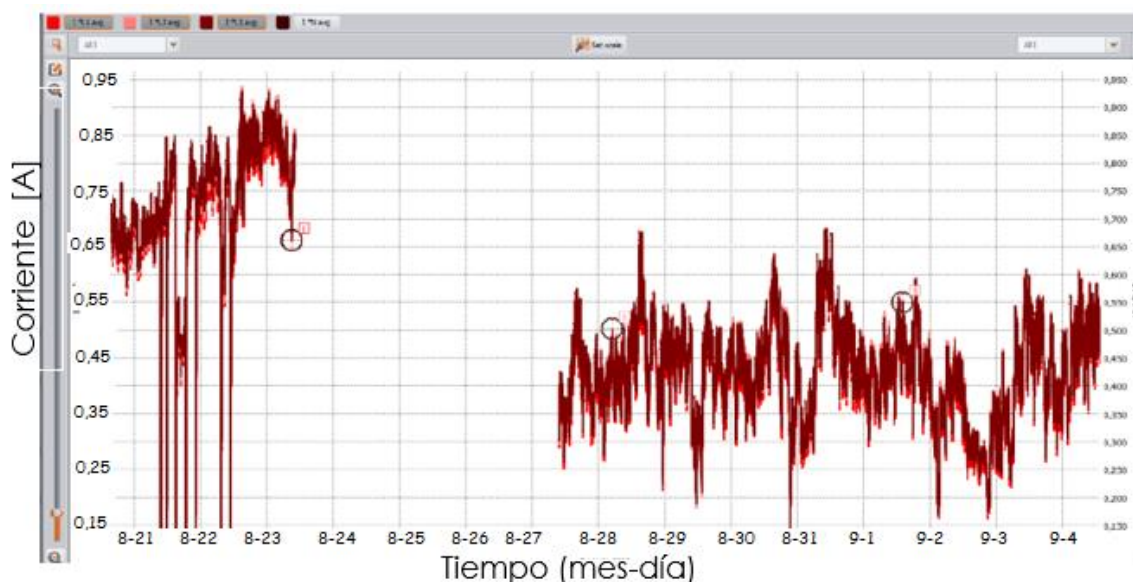


Figura 21. Historial de medición de la corriente por fase [Fuente analizador de redes SONEL].

De las mediciones obtenidas durante el tiempo que duraron las pruebas con el analizador se obtuvo que la corriente máxima registrada por el analizador de redes fue de 1000 A correspondientes a un transitorio por desconexión de la carga en bloque o transitorios de arranques o conexión.

6.6.4. Desbalance de tensión y de corriente

Cuando un sistema trifásico está balanceado, significa que las tensiones de la línea 1, 2 y 3 son iguales en magnitud y están igualmente desfasadas. Según la norma internacional de referencia IEEE 1159-2005, el porcentaje de desbalance es la desviación máxima de la tensión de línea del promedio dividido sobre el promedio, y este valor debe ser inferior al 2% (Límite recomendado). Tomando como referencia este valor máximo de desbalance, se puede concluir que el desbalance máximo de corriente debe ser de 40% (IEC 61000-2-2).

Durante el tiempo de duración de las pruebas con el analizador de redes, se obtuvieron las siguientes gráficas que permiten observar los desbalances de tensión y de corriente registrados.

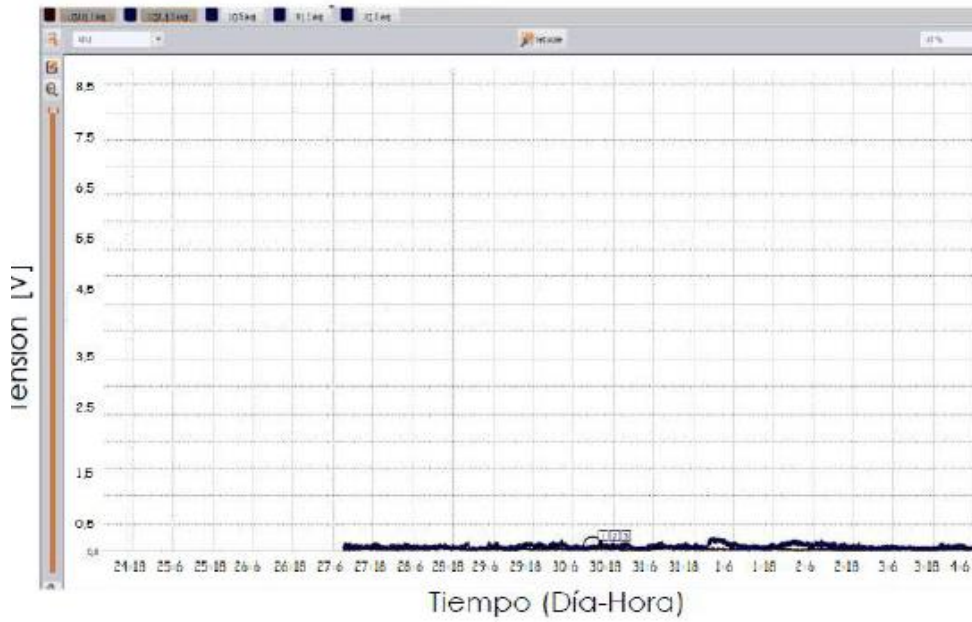


Figura 22. Desbalance de tensión registrado [Fuente analizador de redes SONEL].

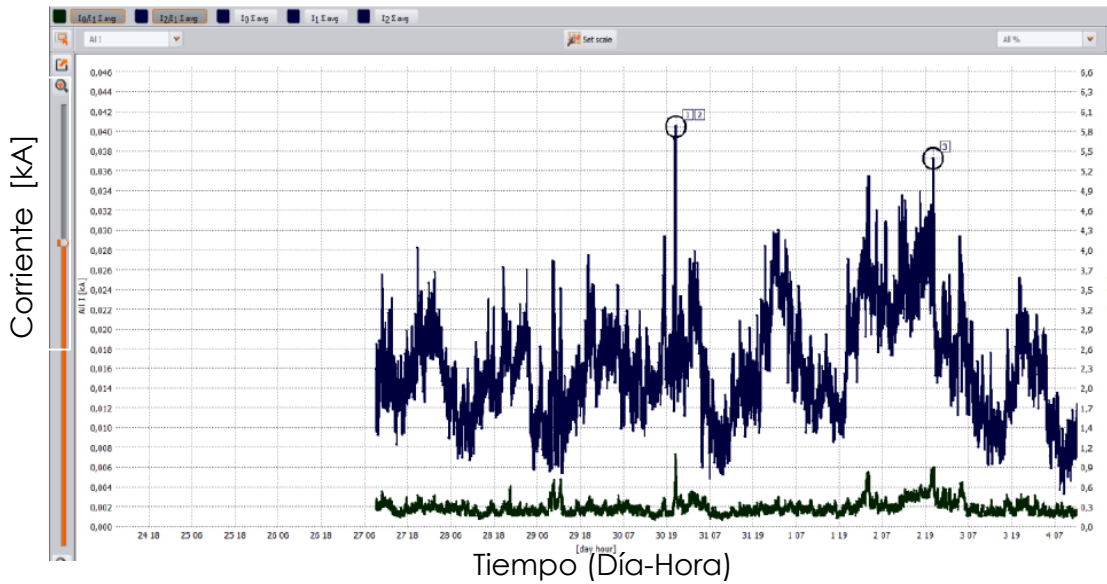


Figura 23. Desbalance de corriente registrado [Fuente analizador de redes SONEL].

Se concluyó entonces de los datos obtenidos por el analizador de redes que los desbalances de tensión y corriente no superaron los máximos recomendados, lo que mostró que el sistema esta balanceado de acuerdo con los límites recomendados por la norma.

6.6.5. Armónicos de tensión y de corriente

Los armónicos son producidos por cargas no lineales como equipos electrónicos que producen formas de onda no sinusoidales múltiplos de la frecuencia fundamental del sistema 60 Hz los cuales pueden ser de voltaje o de corriente. Actualmente los límites máximos están definidos en la norma NTC-5001-2008 tanto para los armónicos de tensión como de corriente.

A. Tensión

En las siguientes tablas se muestra el resultado del THD de voltaje que se compara con la referencia definida en la normatividad vigente, donde el 95% de los datos medidos deben estar por debajo del 5% para THD-V y 3% para los armónicos individuales.

Tabla 6. Distorsión armónica total de tensión.

Nombre	Máximo medido	Referencia	Cumple
V1 THD	7,1	5,00	NO
V2 THD	7,4		NO
V3 THD	6,5		NO

Tabla 7. Armónicos individuales de tensión.

Línea 1	Máximo %	Línea 2	Máximo %	Línea 3	Máximo	Referencia [%]	Cumple
V1h3	0,5	V2h3	0,4	V3h3	0,4	3,00	SI
V1h5	7,5	V2h5	7,9	V3h5	7,5		NO
V1h7	5	V2h7	5,4	V3h7	4,7		NO
V1h9	0,5	V2h9	0,6	V3h9	0,6		SI
V1h11	8,4	V2h11	7,4	V3h11	6,6		NO

De la tabla 6 se pudo evidenciar que la distorsión armónica total en tensión medido cuando se le compara con el valor de referencia establecido por la norma no cumple con el rango establecido por lo que se debía corregir dado que esto nos demostraba problemas con los armónicos en la red. Además, en la tabla 7 se comparó cada una de las tensiones de línea y se comparó con los valores de referencia y se tuvieron resultados variados dado que comparados con los de referencia algunos cumplían el rango de armónicos y otros que no lo hacían, por lo que se hizo necesario corregir todo el sistema.

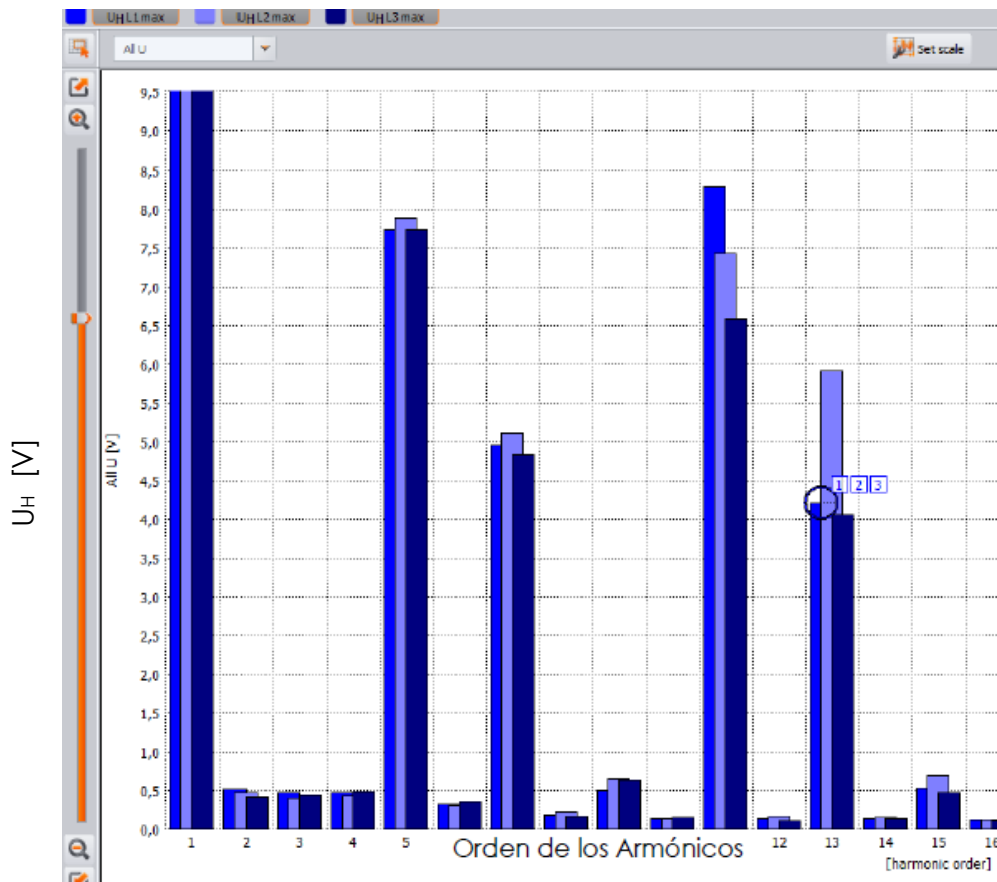


Figura 24. Armónicos individuales de tensión promedio [Fuente analizador de redes SONEL].

Después de haber analizado los datos obtenidos de las gráficas plasmadas podemos observar que, aunque hay parámetros en los cuales, si se cumple la normativa, se evidenció que hay problemas muy pronunciados con los armónicos 5, 7, 11 y 13 que requirieron una acción para su corrección dado que su presencia afecta de manera negativa la calidad de energía de la planta.

B. Corriente

La guía IEEE 519-1992, muestra los límites para componentes de armónicas individuales, así como también para la distorsión armónica total en función del tamaño de los clientes con respecto al sistema de distribución (Límites de distorsión de Armónicos de la corriente).

El tamaño del consumidor es definido por la corriente total de frecuencia fundamental en la carga, I_L , que incluye todas las cargas lineales y no lineales. El tamaño del sistema de abastecimiento es definido por el nivel de la corriente de cortocircuito, ISC , al PCC (Punto común de acoplamiento). Estas dos corrientes definen el SCR. Una relación alta significa que la carga es relativamente pequeña y que los límites aplicables no serán tan estrictos como los que corresponden cuando la relación es más baja.

Esto se observa en la tabla 8 tomada de la norma NTC 5001 de 2008, donde se recomiendan los niveles máximos de distorsión armónica en función del valor de SCR y el orden del armónico.

Tabla 8. Límites de distorsión armónica de corriente según NTC 50001-2008.

Límites de distorsión en corriente para sistemas de distribución $120V < V_n \leq 69kV$						
Relación I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	≥ 35	TDD
< 20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
$20 < 50$	7	3,5	2,5	1	0,5	8
$50 < 100$	10	4,5	4	1,5	0,7	12
$100 < 1000$	12	5,5	5	2	1	15
> 1000	15	7	6	2,5	1,4	20

A continuación, en la tabla 9 se muestran los valores máximos de distorsión armónica de corriente individual obtenidos de la norma, estos son los valores base los cuales no se deben sobrepasar para no generar costos extras impuestos por el operador de red.

Tabla 9. Armónicos individuales de corriente.

Línea	Max. %	Línea 2	Máx. %	Línea 3	Max. %
I1h3	4	I2h3	3	I3h3	3
I1h5	43	I2h5	43	I3h5	45
I1h7	15,8	I2h7	16	I3h7	14,4
I1h9	1,8	I2h9	2	I3h9	2,5
I1h11	27	I2h11	23	I3h11	21

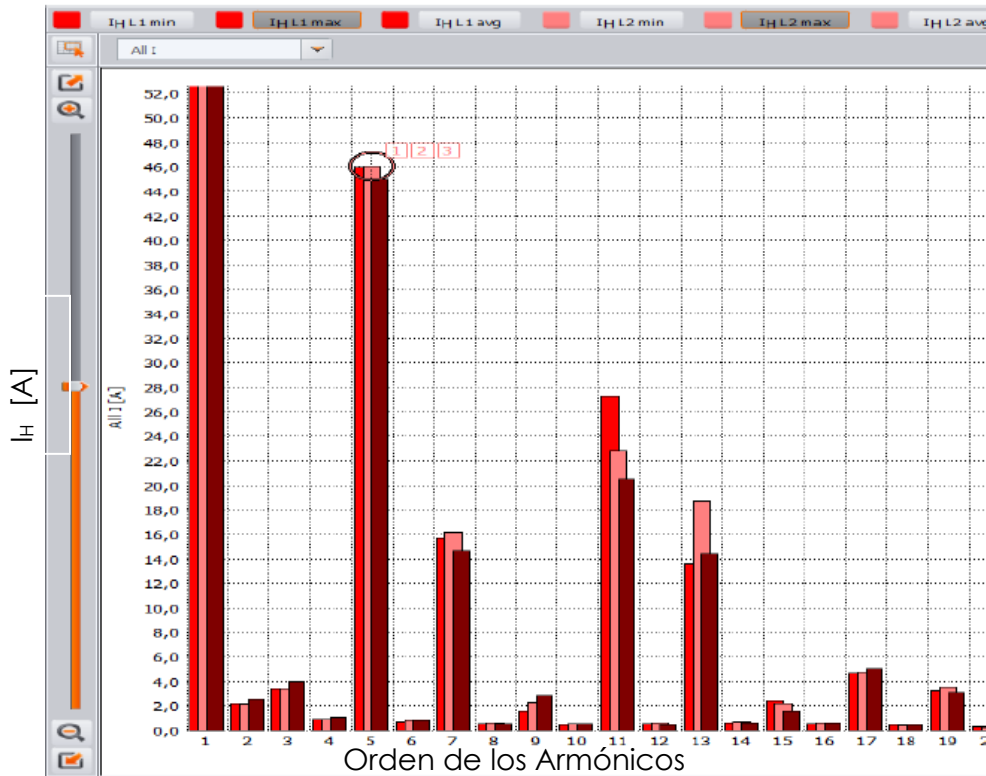


Figura 25. Armónicos individuales de corriente promedio [Fuente analizador de redes SONEL].

Se evidenció luego de tomar los resultados para la corriente con el analizador de redes que los armónicos de mayor magnitud son los de orden 5, que se mantuvieron cerca al 45%. Estos armónicos corresponden a los armónicos de secuencia cero que típicamente se presentan en sistemas con un alto número de inversores, variadores de frecuencia y arrancadores suaves. Como es el caso de las cargas asociadas a esta subestación en específico.

C. Potencias y Factor de potencia

En este numeral se analizaron los registros de potencias activa, reactiva y aparente además del factor de potencia desde el punto de vista del consumo de reactivos que se encuentra regulado en Colombia por la resolución CREG 108 de 1997 (artículo 25). En su parágrafo 3 indica que en el caso de que la energía reactiva sea mayor al 50% de la energía activa (kWh) consumida por un suscriptor o usuario, el exceso sobre este límite se considerará como consumo de energía activa para efectos de determinar el consumo facturable. El factor de potencia medido indica si el límite de consumo de energía reactiva se puede estar superando en el periodo facturable, por lo que es necesario verificar cobros de energía en la factura de energía cuando el valor total promedio está por debajo de 0.9.

En la siguiente gráfica se puede observar el comportamiento del factor de potencia por fase total durante el tiempo de medición con el analizador de redes.

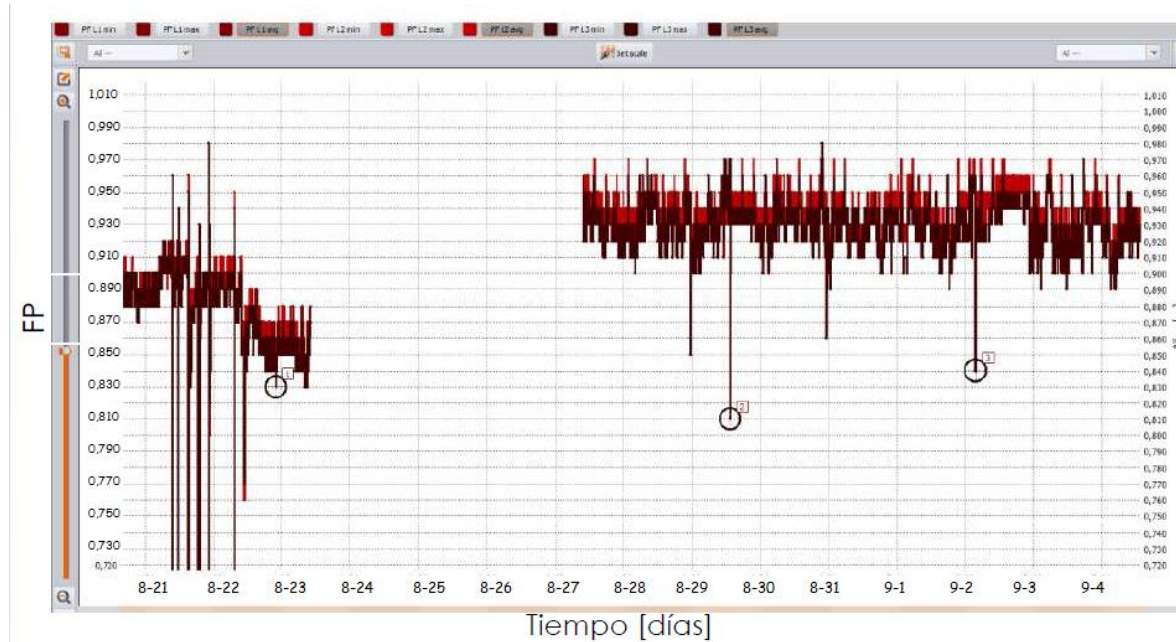


Figura 26. Historial de comportamiento del factor de potencia [Fuente analizador de redes SONEL].

Durante el tiempo en el que se realizaron las mediciones se logró determinar que el factor de potencia del sistema estuvo en la mayoría del tiempo en valores permisibles y que no contradicen lo que dice la normatividad es decir (0.9 inductivo). Sin embargo, se observaron transitorios con valores cercanos a 0.8. Lo cual fue una clara evidencia de tener que tomar acciones correctivas para que el problema no escalara.

Por último, se hicieron las mediciones de las potencias activas, reactivas y aparentes por fase y totales que están representadas en las figuras 27, 28 y 29, una vez se obtuvieron los resultados medidos se compararon con la normativa vigente para lograr establecer un punto de partida para ver si se estaban respetando los límites de generación de potencia. A partir de estos resultados se comenzó a establecer los puntos de partidas para el dimensionamiento del filtro que se requería para la subestación analizada:

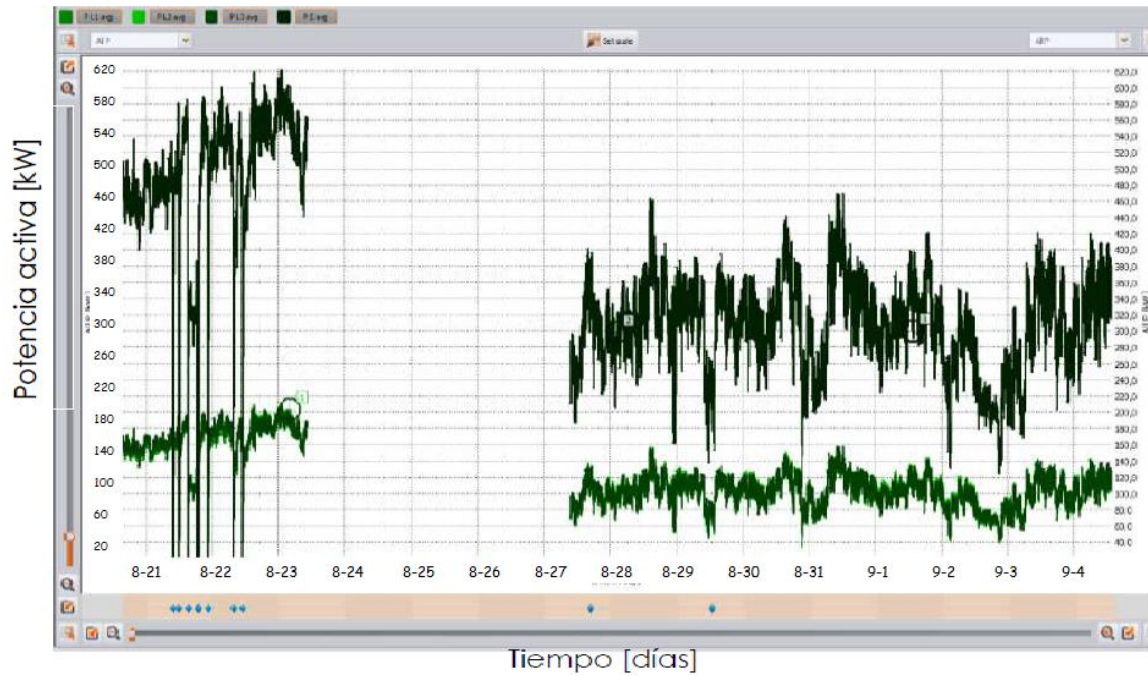


Figura 27. Comportamiento de las potencias activas [Fuente analizador de redes SONEL].

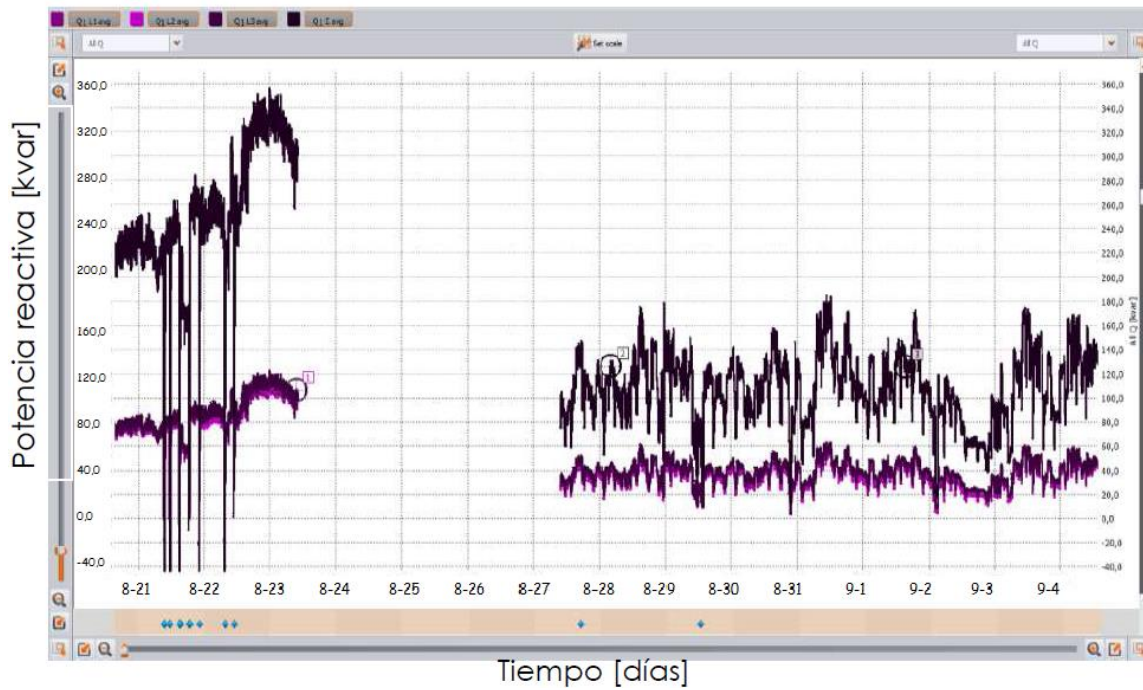


Figura 28. Comportamiento de las potencias reactivas [Fuente analizador de redes SONEL].

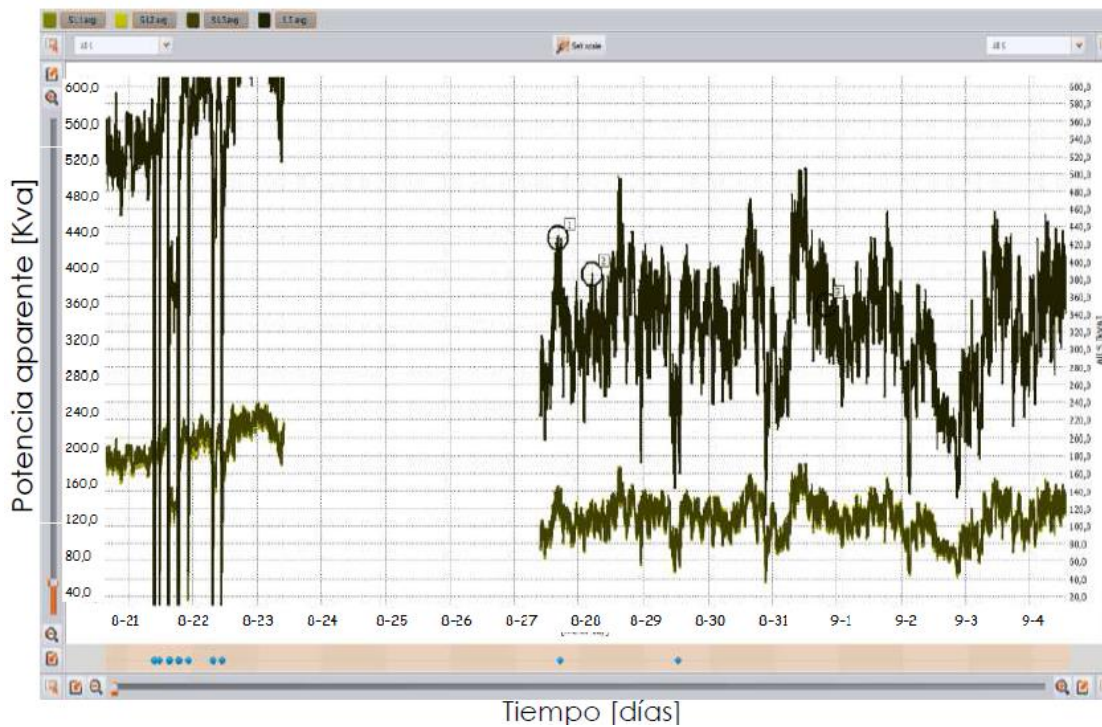


Figura 29. Comportamiento de las potencias aparentes [Fuente analizador de redes SONEL].

Una vez se dieron por terminadas las dos semanas de mediciones y de recopilación de todos los datos, se analizaron y se determinaron varias falencias en los sistemas de la red de la subestación, entre los que se denotaron:

- Se evidenció que los armónicos de mayor magnitud son los de orden 5 y 11, que se mantuvieron cerca al 7%. Estos armónicos corresponden a los armónicos de secuencia cero que típicamente se presenta en sistemas con alto número de inversores, variadores y arrancadores suaves; una posible solución que se discutió fue la de revisar que los variadores y equipos y proceder a la instalación de reactancias en línea o filtros además de contemplar la instalación de filtración activa.
- Un problema que llamó la atención durante las mediciones, fueron los resultados de los análisis del factor de potencia de esta subestación. Si bien los valores en la mayoría del tiempo se comportaron dentro del umbral permitido, se presentan varios episodios donde el FP está fuera de los valores permisibles de la norma.
- Ante la ausencia de un banco de compensación automático de factor de potencia y las evidencias de problemas de armónicos en la subestación, se sugirió la instalación de un sistema de filtración activa que permitiera solucionar los problemas de armónicos y a la vez mantener el factor de potencia en los valores adecuados permitidos por norma.

6.7. Dimensionamiento del Filtro activo

Una vez se recopilaron todos los datos tomados por el analizador de redes, y se analizaron sus mediciones, se realizó un proceso de dimensionamiento para mitigar los principales problemas encontrados durante este proceso. Este dimensionamiento se hizo según las necesidades del sistema y siguiendo los estándares normativos actuales.

La presencia de armónicos que se detectaron en la red durante las dos semanas de mediciones podría tener varias consecuencias. Las más importantes son las siguientes:

- a. Deterioro de la calidad de la onda de tensión, afectando algunos receptores sensibles.
- b. Sobrecarga y posible resonancia paralela entre la inductancia de línea y los condensadores de compensación de factor de potencia.
- c. Empeoramiento de factor de potencia. La capacidad de la red para suministrar potencia se ve disminuida por ello, obligando a su sobredimensionamiento.
- d. Sobrecarga de cables y sobre todo de transformadores (aumento muy significativo de las pérdidas en el hierro).
- e. Problemas de disparo intempestivo de protecciones.

Para evitar estos fenómenos, las normas establecen un mínimo de calidad de suministro, que se fija limitando los niveles máximos de distorsión en la onda de tensión suministrada en el punto de acople a la red pública (PCC). Estos límites se denominan límites de compatibilidad. Los armónicos de tensión detectados durante las pruebas se deben a la caída de tensión que producen los armónicos de corriente sobre las impedancias de la red de distribución. Así pues, el alcanzar estos límites depende de dos factores:

1. Nivel de emisión de los receptores: A mayor emisión, mayor distorsión debida a la caída de tensión producida por las corrientes armónicas en la red.
2. Impedancia de la red: A mayor impedancia, mayor caída de tensión para el mismo valor de emisión en los receptores.

Teniendo lo anterior presente se procedió entonces a realizar los cálculos para determinar la capacidad del filtro activo necesario para compensar los problemas de redes detectados.

6.7.1. Cálculo del filtro activo

Para el cálculo y selección del filtro debemos determinar la corriente del filtro bajo la ecuación:

$$I_{Filtro} = \sqrt{I_r^2 + I_h^2} \quad (12)$$

Donde I_r es la corriente reactiva e I_h es la corriente armónica.

Lo primero que procedemos a calcular es la corriente armónica representada por I_h calculada bajo la ecuación:

$$I_h = \frac{I}{\sqrt{\frac{1}{THDI^2} + 1}} \quad (13)$$

De la gráfica de corriente y distorsión armónica THDI (figura 30) tomamos los valores máximos para llevarlos a la ecuación.

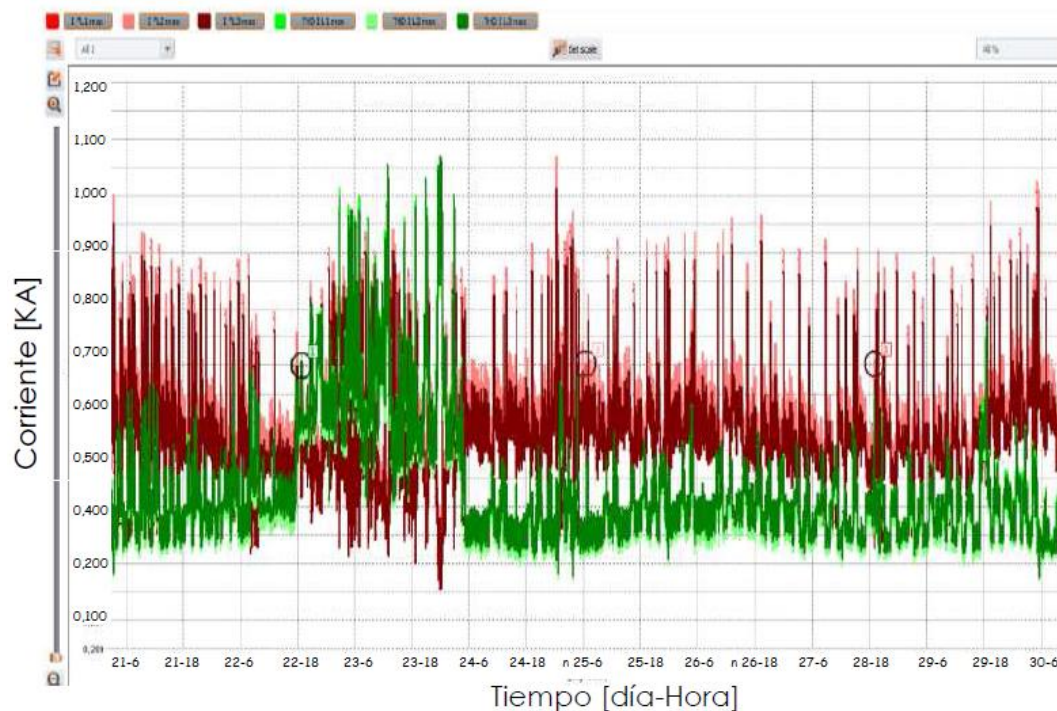


Figura 30. Gráfica de corriente y distorsión armónica [Fuente analizador de redes SONEL].

Haciendo un barrido a la gráfica anterior obtuvimos que los valores máximos son:

I_{max} (Amps)	702
THDI	0,2287

Reemplazando los valores anteriores obtenidos en la ecuación 13, obtenemos un valor para la corriente armónica a corregir de:

$$I_h = 156.5 \text{ Amps}$$

Luego para el tamaño total del filtro, nos falta tener la corriente asociada a la potencia reactiva. Para esto, usamos la gráfica de corriente, factor de potencia y potencia reactiva en KVAR.

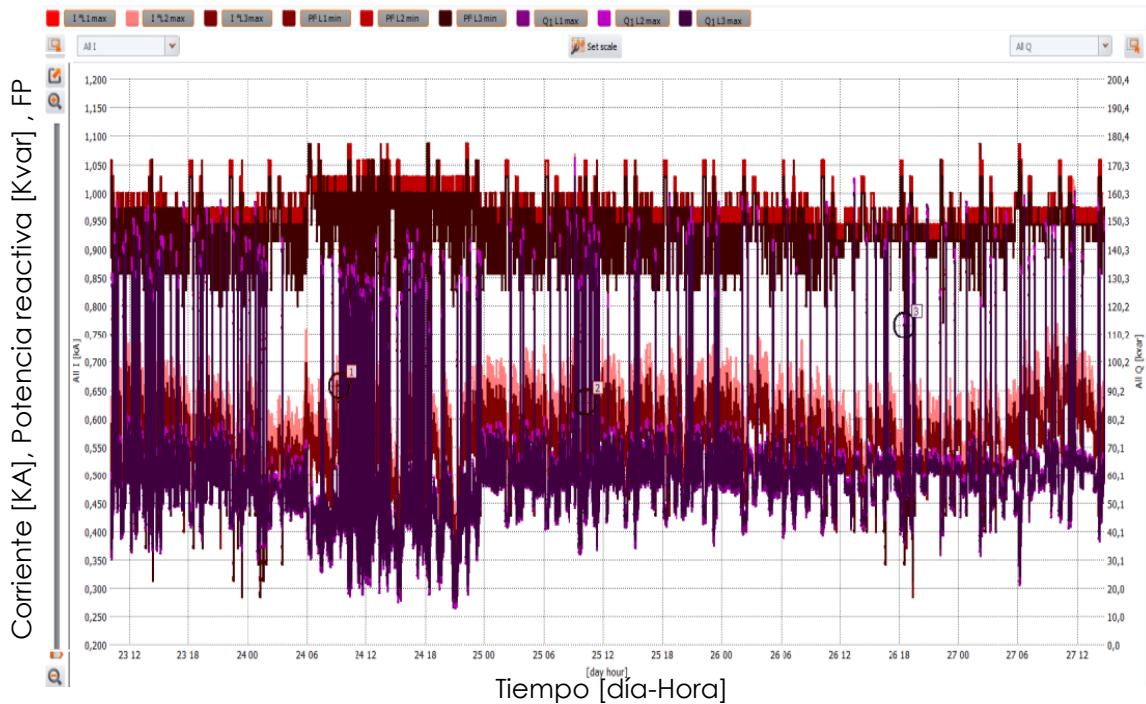


Figura 31. Superposición gráfica de corriente, potencia reactiva y factor de potencia [Fuente analizador de redes SONEL].

Una vez hacemos el barrido por la figura 31, tomamos el máximo valor de la potencia reactiva y el mínimo valor de factor de potencia, comparando con la tendencia de corriente. Con lo cual tendremos que se requiere compensar de acuerdo con las curvas 113 KVAR más la capacidad del banco actual que está dado por 24 KVAR. Es importante aclarar que el banco actual de condensadores no puede convivir con el filtro activo y por ello se descarta en los cálculos dado que posteriormente se desinstalaron y se dejó la compensación total a cargo del filtro activo.

Ahora bien, la corriente reactiva estará dada por la ecuación:

$$Q = V_X I_X \text{Sen}\varphi \quad (14)$$

Donde tendremos que:

$$I_r = \frac{Q}{V \text{sen}\varphi} \quad (15)$$

En donde usamos los valores obtenidos al haber hecho el barrido por la figura 31

Q (Kvar)	137
V (Voltios)	440

Lo que nos dará una corriente reactiva por compensar de $I_r = 179.77 \text{ A}$ para tener un factor de potencia estimado $0,9492 \cong 0,95$.

Aplicando la formula anteriormente mencionada para determinar la corriente por filtrar (ecuación 12), tendremos que la corriente necesaria que debe entregar el filtro teniendo en cuenta una posible ampliación de la subestación es de:

$$I_{Filtro} = 238.35 \text{ Amps}$$

Esta fue la corriente obtenida necesaria para que el filtro compense los armónicos que se presentaron durante la recolección de datos. Por lo que lo siguiente que se procedió a hacer fue la selección de filtros de acuerdo con los catálogos y opciones del mercado, para lo cual se tuvo una corriente armónica disponible indicada por la ecuación:

$$I_{Filtro} = \sqrt{I_{Filtro}^2 - I_r^2} \quad (16)$$

Por lo que tendremos que considerar las siguientes opciones de filtros propuestas en la tabla 10:

Tabla 10. Opciones de filtro comerciales y corriente disponible.

Opción de filtro	Ifiltro (Amps)	Ih disponible (Amps)
Filtro de 200 Amps	200	162.36
Filtro de 300 Amps	300	260.8

Una vez analizados los cálculos y habiendo determinado que corrientes suplen las necesidades de la subestación, se concluyó entonces basados en la tabla 8 que en la subestación de servicios P1 solo se compensa la totalidad de los armónicos usando un filtro de 300 Amperios.

Antes de comenzar a realizar las cotizaciones para la compra del filtro se siguieron una serie de recomendaciones para optimizar la compensación de armónicos en la red presentes en la subestación:

- Para la subestación de servicios con transformador de hasta 0.63 MVA y tensión de operación 440 voltios, se deberá instalar un filtro de 200 o 300 Amps. Donde se tendrá de acuerdo con la suma cuadrática disponibles 260.8 Amperios para compensar armónicos y 179 amperios para compensar factor de potencia equivalente a 137 KVAR.

- Se deberá suprimir el banco de condensadores actual de 24 KVAR para evitar resonancias, explosiones de condensadores y permitir que actúe el filtro de manera adecuada en el control de armónicos y energía reactiva.
- La selección del filtro está basada en una compensación de factor de potencia de 0.95. valor que va a permitir las oscilaciones e incorporaciones de nuevas cargas. Así mismo aportara a la mejora del factor de potencia en la frontera comercial de la compañía.
- Para los cambios de los bancos de condensadores por renovación o por cambio de tecnología, se recomienda se asocien estos cambios a los análisis de calidad de energía de la planta, de tal forma que se integren a la dinámica de control de armónicos y así prevenir resonancias y daños en los bancos de condensadores.

6.8. Selección de proveedor para el Filtro Activo.

Una vez se tuvieron todos los datos necesarios que nos informaban el tipo y la capacidad del filtro que se debía adquirir para la subestación de servicios P. Se procedió a entablar las conversaciones con los distintos proveedores de estos productos. Al cabo de una semana de indagar con distintos proveedores se recopiló la información de la tabla 11 acerca de los tipos de filtros que ofrecían y sus funcionalidades (NOTA: Por motivos de confidencialidad solo se muestra el nombre de la empresa cuya oferta fue seleccionada, que se dispone solo para fines académicos):

Tabla 11. Comparativo de características de Filtro activo para corrección de armónicos.

EMPRESA	ITEM	CANTIDAD	ENTREGA
EMPRESA 1	HGA Filtro Activo de Armónicos, NEMA 1, de 200A 480 VAC, marca TCI	1	8-10 Semanas
	Transformadores de corriente de núcleo abierto (600/5 hasta 5000/5)	2	8-10 Semanas
EMPRESA 2	HCU2200D5IP00 Filtro Activo de Armónicos, en chasis abierto, de 200A 480 VAC, marca Eaton. Encerramiento Nema 1.	1	10-14 Semanas
	Transformadores de corriente de núcleo abierto	2	10-14 Semanas
EMPRESA 3	Suministro de Filtro AccuSine PCS+ de 120A 380-480 IP31 Schneider electric para sistema de compensación automática de energía reactiva para una subestación de 630 kVA Torre	1	6-8 Semanas

	molienda Potencia reactiva 100 kvar 480 V CA 50/60 Hz. Incluye instalación (ccm de distribución a alimentación del filtro, transformadores de corriente, puesta en marcha e informe de calidad de energía después de la instalación.		
ECOENER	Filtro activo Anti-armónicos Línea: Filtro anti armónico CleanPower APF Referencia: ECH4L-480CP200-G- 480VAC, 60Hz, 3 FASES, 4 HILOS- Corriente de compensación: 200 A (armónicos y reactivos)- Tipo de montaje: Auto soportado- Interfaz de control: HMI 7" a color Incluye interruptor con protección termo magnética de 35KA isc @ 440V	1	60 Días
	Filtro activo Anti-armónicos Línea: Filtro anti armónico DYNAMOVAR SVG: ECH4L-480CP300-G- 480VAC, 60Hz, 3 FASES, 4 Hilos- Corriente de compensación: 300 A (armónicos y reactivos)- Tipo de montaje: Auto soportado- Interfaz de control: HMI 7" a color Incluye interruptor con protección termo magnética de 35KA isc @ 440V	1	60 Días
	Elementos de control Transformadores de corriente Cts. Núcleo partido, para medida 1000/5Amp, 690V, 25KAmp, Clase 0,5S, Toroidales, Barden 5VA	3	60 Días
EMPRESA 4	PQFI - V1 - M 30 - IP21 - Master	1	6-8 semanas
	Servicio de puesta en marcha filtro PQFM	24	6-8 semanas

Una vez se recibieron las ofertas de los distintos proveedores, se procedió a analizar y estudiar la mejor opción que no solo fuera la más económica, sino que resultara más efectiva para resolver la problemática que se estaba tratando en la subestación analizada. Luego de varias reuniones con los ingenieros a cargo del proyecto, se determinó que la oferta que más

cumplía con todos los estándares que Colcafé solicitaba fue la del proveedor ECOENER, dado que el filtro activo para la corrección de armónicos ofrecía no solo mitigar los efectos de los armónicos, sino una completa evaluación en tiempo real del estado de la red de la subestación, además de que los costos tanto del filtro como los de la instalación eran relativamente más económicos y brindaban el servicio de acompañamiento al momento de realizar todos los pasos de la instalación y puesta en marcha del mismo. Por lo que se tomó la decisión de adquirir el filtro activo APF por parte de ellos.

6.8.1. Negociación y cotización proveedor ECOENER

Una vez seleccionados como proveedores del filtro activo APF la empresa ECOENER se puso en contacto para realizar su oferta comercial. Pero primero como parte del servicio se realizó con ellos una segunda evaluación de la subestación para comprobar los datos obtenidos durante el estudio y medición de datos realizada por parte de Colcafé (estudio realizado por el estudiante e ingenieros a cargo del proyecto). A continuación, se detallan los resultados del estudio realizado por ECOENER el cual estuvo supervisado por los ingenieros de COLCAFÉ y el estudiante.

6.8.2. Toma de datos de la subestación de servicios por parte de proveedor ECOENER

Entre el 13 y el 17 de septiembre de 2021 se realizó la medición de las variables eléctricas en la subestación de servicios generales en la planta de Colcafé por parte de los ingenieros de la empresa ECONENER, para tener una comparativa con los datos iniciales tomados por los ingenieros de Colcafé; a continuación, en las tablas 12 y 13 se presenta un resumen de los datos obtenidos durante esta segunda revisión.

Tabla 12. Valores de la medición realizada por proveedor del filtro.

VARIABLE	PROMEDIO	MINIMOS	MAXIMOS	OBSERVACIONES
I [A]	610	370	900	Medida
V[VAC]	460	440	480	Medida
P[KW]	445	325	540	Medida en [KW]
S[KVA]	489	373.6	562.5	Potencia aparente en kVA
FP ACTUAL	0.91	0.87	0.96	Factor de potencia del sistema actual (medido)
FP DESEADO	0.96	0.95	0.96	Factor de potencia al que debe funcionar el sistema
Q COMPENS. [KVAR]	73.0	77.4	0	Potencia reactiva requerida en kVAR

Tabla 13. Valores de los armónicos de corriente y voltajes medidos por el proveedor.

VARIABLE	PROMEDIO	OBSERVACIONES
THDi %	20	Medida en %
THDv %	6	Medida en %
I rms [A]	610	Conociendo la corriente eficaz del sistema
I res [A]	149.5	Corriente residual armónica requerida para mitigar los armónicos THD < 3%

Una vez se finalizaron las mediciones por parte del proveedor, se realizó la comparación con los valores medidos por el personal de Colcafé y se determinó que los valores distaban dado que las mediciones hechas por Colcafé consideraban una posible ampliación del 15% en la subestación de servicios (179,77 A), y las mediciones hechas por la empresa Ecoener fueron para la capacidad instalada actual (149.5 A); pero concordaban en cuanto a los valores de armónicos a compensar. Estos últimos datos tomados por los proveedores se utilizaron como insumos para calcular y diseñar el filtro de energía adecuado para esta subestación donde se concluyó que se requería 77,4Kvar de capacidad de compensación de reactivos y 149,5 de corriente residual para mitigación de armónicos.

La solución propuesta para la subestación de servicios P1 es un filtro activo APF anti-armónicos de 200 A (CleanPOWER) a 480 V que está diseñado para realizar tres funciones: mitigar armónicos, compensación de reactivos y estabilización de red eléctrica y de manera opcional se ofreció un filtro anti armónico de 300 A.

El proveedor una vez analizado los datos, realizó la propuesta de precios de los equipos necesarios para el diseño e implementación del filtro activo APF que aparece en la tabla 11, correspondiente a la casilla de ECOENER.

6.8.3. Aceptación de propuesta por parte de Colcafé

Una vez recibida la propuesta de precios de equipos por parte de ECOENER, se tuvieron reuniones con los ingenieros y con el equipo encargado del proyecto compuesto por: dos especialistas de proyectos, un técnico electricista y un practicante del área de proyectos donde se discutieron los argumentos de porque era la mejor opción de compra y exponer dichos argumentos ante el comité de inversiones de Colcafé. Tales argumentos se expresan a continuación:

A. Flexibilidad y modularidad:

El equipo ofertado tiene diseño flexible y modular, tiene capacidad de aumentar la corriente de compensación en la medida que la carga lo demande utilizando el mismo

gabinete, solamente se deben adicionar módulos de potencia (módulos de 100 A) hasta una capacidad máxima de 600.

Nota: a medida que se adicionen módulos se debe revisar la capacidad de protección del interruptor instalado en el gabinete.

B. Garantía

Los equipos de calidad de energía CleanPOWER tienen dos años de garantía y reemplazo de partes malgastadas.

C. Respaldo

- Los equipos CleanPOWER son fabricados por NANCAL en china y ensamblados y probados por ECOENER SAS Medellín, Colombia.
- Nancal es una empresa China, con participación en la bolsa de valores de Shangái (Stock code: 603859.SH), especialista en el diseño y fabricación de equipos de electrónica de potencia como variadores de potencia, arrancadores suaves, filtros de calidad de potencia. Sus productos ofrecen calidad y alto desempeño.

D. Soporte local

- ECOENER es una empresa que recibe entrenamiento para el mantenimiento y puesta en servicio de los equipos de calidad de energía y prestan un servicio de soporte técnico con una respuesta de menos de 24 horas con personal local.
- ECOENER es filial de "industrias SDT SAS" empresa especialista en diseño y fabricación de tableros eléctricos y subestaciones, experiencia en producción y manejo de máquinas modernas para producir una solución de calidad de energía robusta y confiable.

E. Soporte técnico

- Durante el primer año de funcionamiento del equipo se realizarán 3 visitas de mantenimiento preventivo, sin costo. Estas visitas se programan de la siguiente manera:
 - Primera visita: 3 meses después de la puesta en servicio.
 - Segunda visita: 6 meses después de la puesta en servicio.
 - Tercera visita: 12 meses después de la puesta en servicio.

F. Alcance de la oferta

En la oferta se incluye, además:

- Suministro de equipos listados en el cuadro de precios de la tabla 9.
- Entrega en bodega del cliente en el área metropolitana del valle de aburra.

- Se incluye el servicio de configuración y puesta en servicio de la solución por parte de un técnico especialista en la solución.
- Se incluye acompañamiento para la instalación eléctrica y estructural de la solución.

6.8.4. Criterios de selección para selección del tipo de filtro activo

Seleccionado el proveedor del filtro se dispuso entonces a seleccionar el tipo de filtro que la empresa ECOENER ofrece dependiendo de los datos recogidos y de los análisis hechos. Para realizar esta selección se realizó con el equipo de trabajo junto con el personal calificado de ECOENER una reunión donde se realizaron una serie de preguntas para determinar la mejor selección de filtro entre el CleanPOWER APF - Filtro anti-armónicos y el DYNAMOVAR SVG – Filtro de Compensación dinámica de reactivos ofrecidos por la empresa ECOENER.

1. Último armónico compensable:

¿Cuál es número del armónico más alto que el sistema es capaz de compensar?

CLEAN POWER APF	DYNAMOVAR SVG
APF puede compensar armónicos del orden desde 2 hasta 61	SVG puede compensar armónicos del orden 11 e inferiores

2. Tiempo de respuesta para compensación

¿Cuál es el tiempo transcurrido entre los procesos de muestreo, procesamiento y compensación?

CLEAN POWER APF	DYNAMOVAR SVG
5ms	5ms

3. Valor mínimo de compensación

¿Cuál es el valor mínimo en la distorsión aportada por un armónico que puede ser corregida para dicho armónico (En Amperios)?

CLEAN POWER APF	DYNAMOVAR SVG
Cuando la tasa de distorsión de corriente excede el 3%, CleanPOWER APF comenzará a funcionar	Cuando el factor de potencia de la red es menor al factor de potencia mínimo configurado, DynamoVAR SVG comenzará a funcionar

4. Valor máximo de compensación

¿Cuál es el valor máximo en la distorsión aportada por un armónico que puede ser corregida para dicho armónico (En Amperios)?

CLEAN POWER APF	DYNAMOVAR SVG
1200 A @ 480VAC	560 KVAR @ 480VAC

5. Cantidad de reactiva compensable [%]

¿Cuál es el porcentaje que el equipo puede destinar para compensación de energía reactiva y corrección del factor de potencia?

CLEAN POWER APF	DYNAMOVAR SVG
CleanPOWER APF da prioridad a la eliminación de armónicos, y el margen restante de energía disponible puede compensar la potencia reactiva. La capacidad de distribución de la compensación de potencia reactiva depende de cuánta capacidad queda después de que el equipo compensa los armónicos.	DynamoVAR SVG da prioridad a la compensación de potencia reactiva, y el margen restante solo puede compensar los armónicos del orden 11 e inferiores.

6. Protecciones internas para evitar daños

¿El equipo cuenta con elementos de monitoreo interno que permitan accionar protecciones intrínsecas que permitan proteger el equipo de fallos externos?

CLEAN POWER APF	DYNAMOVAR SVG
Protección de sobre temperatura	Protección de sobre temperatura
Sobretensión	Sobretensión
Subtensión	Subtensión
Sobre corriente	Sobre corriente
Sobre carga	Sobre carga
Rango de frecuencia	Rango de frecuencia
Sobre resonancia	Sobre resonancia
Enclavamiento de conectores	Estado de conectores
Tiempo de carga de condensadores.	Tiempo de carga de condensadores.

7. Capacidad de priorización de compensación

¿El sistema permite priorizar a través de criterios de selección, frecuencias específicas a ser compensadas? ¿Es posible obviar ciertas frecuencias, aunque estén aportando a la distorsión?

CLEAN POWER APF	DYNAMOVAR SVG
Si, tanto la magnitud de compensación como el orden del armónico a compensar es configurable.	Si, tanto la magnitud de compensación como el orden del armónico a compensar es configurable.

8. Requerimientos adicionales

¿Se deben instalar además de los transformadores de corriente otros dispositivos para que sea posible el funcionamiento del filtro, en caso afirmativo por favor listarlos?

CLEAN POWER APF	DYNAMOVAR SVG
CleanPower APF no requiere elementos externos adicionales para su funcionamiento, solo requiere los sensores de corriente externos (3 x TC's). NOTA1. Los TC's deben ser de clase 0,5SNOTA 2: el equipo tipo gabinete auto soportado viene completamente equipado con: interruptor termo magnético de 45KA (Isc), descargador de sobretensiones (DPS), extractores y accesorios para control térmico, tarjeta de I/O y tarjeta de comunicación MODBUS RS485 o Ethernet/IP.	DynamoVAR SVG no requiere elementos externos adicionales para su funcionamiento, solo requiere los sensores de corriente externos (3 x TC's). NOTA1. Los TC's deben ser de clase 0,5SNOTA 2: el equipo tipo gabinete auto soportado viene completamente equipado con: interruptor termo magnético de 45KA (Isc), descargador de sobretensiones (DPS), extractores y accesorios para control térmico, tarjeta de I/O y tarjeta de comunicación MODBUS RS485 o Ethernet/IP.

9. Compatibilidad

¿Puede el equipo "convivir" con bancos de condensadores, reactancias de línea o de entrada/salida de variadores de frecuencia? ¿Cuáles de estos equipos deben ser desinstalados para poder operar el filtro?

CLEAN POWER APF	DYNAMOVAR SVG
SI, el filtro Anti-armónico CleanPOWER APF se puede utilizar en paralelo con bancos de condensadores (TSC). Cuando el filtro APF se instala junto a un banco de condensadores existente, solo debe	DynamoVAR SVG solo se puede utilizar en paralelo con bancos de condensadores en el caso de estos dos métodos de cableado: Cuando se utilizan DynamoVAR SVG y bancos de

<p>recolectar la corriente de la carga, no la corriente del banco (TSC) y la carga. El método de instalación se muestra en la siguiente imagen. NOTA: cuando el filtro Anti-armónico CleanPOWER APF se instala junto a un banco de condensadores no puede utilizar la función de compensación de potencia reactiva.</p>	<p>condensadores (TSC) en combinación, el cableado de los sensores de corriente TC's del SVG debe ser como se muestra en las imágenes (imagen 3 y 4). Debe tenerse en cuenta que la potencia objetivo, establecida por el banco de condensadores (TSC) no puede exceder el factor de potencia objetivo establecido por el compensador DynamoVAR SVG. Con este método de cableado el banco de condensadores prioriza la compensación gruesa y DynamoVAR SVG se orienta a la compensación precisa. NOTA: Con este método de combinación, DynamoVAR SVG no puede filtrar armónicos.</p>
---	--

10. Escalabilidad

¿En caso de requerir un aumento en la capacidad de compensación el equipo es escalable?

CLEAN POWER APF	DYNAMOVAR SVG
Si, el filtro Anti-armónico CleanPOWER APF es flexible y modular. Puede ampliar su capacidad conectando módulos adicionales al sistema	Si, el filtro de compensación dinámica de reactivos DynamoVAR es flexible y modular. Puede ampliar su capacidad de compensación conectando módulos adicionales al sistema

11. Comunicaciones

¿Viene embebida en el equipo algún tipo de interfaz de comunicaciones (Ethernet, Modbus...)?

CLEAN POWER APF	DYNAMOVAR SVG
Incluido: 1 x link serial MODBUS RS4851 x RJ45 Ethernet IP (10BASET/100BASE-TX)	Incluido: 1 x link serial MODBUS RS4851 x RJ45 Ethernet IP (10BASET/100BASE-TX)

12. Monitoreo

¿Es posible realizar el monitoreo de las variables de estado y control del equipo?

¿Es posible programar puntos de control para generar alarmas?

CLEAN POWER APF	DYNAMOVAR SVG
Si, se pueden monitorear los siguientes parámetros a través del protocolo de comunicación: "ver listado de parámetros Anexo 1 "	Si, se pueden monitorear los siguientes parámetros a través del protocolo de comunicación: "ver listado de parámetros Anexo 1 "
NOTA: El equipo incluye módulo de entradas y salidas programable, las salidas pueden configurarse alarmas locales.	NOTA: El equipo incluye módulo de entradas y salidas programable, las salidas pueden configurarse alarmas locales.

13. Gestión

¿Existe una plataforma para realizar la gestión de la calidad de la energía a la que se pueda conectar el filtro? ¿Cuánto es el costo estimado de la licencia?

CLEAN POWER APF	DYNAMOVAR SVG
Los equipos de calidad de energía NANCAL (CleanPOWER APF y DynamoVAR SVG) pueden ser integrados a cualquier sistema de gestión de energía de otros fabricantes, a través del protocolo de comunicación Ethernet/IP o MODBUS RS845 incluido.	Los equipos de calidad de energía NANCAL (CleanPOWER APF y DynamoVAR SVG) pueden ser integrados a cualquier sistema de gestión de energía de otros fabricantes, a través del protocolo de comunicación Ethernet/IP o MODBUS RS845 incluido.

14. KPI

¿Es posible obtener indicadores de calidad de energía a través del equipo ofertado?

¿Además de la calidad de energía, se pueden monitorear otros parámetros de la red (Eventos)?

CLEAN POWER APF	DYNAMOVAR SVG
Si, se pueden monitorear parámetros de manera local a través de la HMI y de manera remota a través del bus de comunicación. Para ver los parámetros que se pueden monitorear "ver listado de parámetros"	Si, se pueden monitorear parámetros de manera local a través de la HMI y de manera remota a través del bus de comunicación. Para ver los parámetros que se pueden monitorear "ver listado de parámetros"

15. Licenciamiento

¿Se requiere adquirir licencias de software para la gestión del dispositivo y para el manejo/monitoreo de la información que pueda generar?

CLEAN POWER APF	DYNAMOVAR SVG
No se requiere	No se requiere

16. Tiempo de entrega

¿Cuál es el tiempo de entrega del equipo ofertado?

CLEAN POWER APF	DYNAMOVAR SVG
60 días, a partir de los siguientes requisitos: 1. Aceptación de orden de compra 2. Confirmación de pago del anticipo	60 días, a partir de los siguientes requisitos: 1. Aceptación de orden de compra 2. Confirmación de pago del anticipo

17. Garantía

¿Cuánto tiempo cumple la garantía del equipo ofertado y cuáles son los Criterios para hacer efectiva una garantía?

CLEAN POWER APF	DYNAMOVAR SVG
Garantía estándar: 24 meses después de la puesta en servicio	Garantía estándar: 24 meses después de la puesta en servicio

18. Mantenibilidad

¿El equipo es reparable en caso de avería o debe ser tratado como caja negra (Reemplazo completo)?

CLEAN POWER APF	DYNAMOVAR SVG
El módulo defectuoso se puede reparar o reemplazar y la falla de un módulo no afectará el funcionamiento normal de otros módulos	El módulo defectuoso se puede reparar o reemplazar y la falla de un módulo no afectará el funcionamiento normal de otros módulos

19. Stock

¿Mantiene en Stock repuestos críticos, cuál es el tiempo de entrega?

CLEAN POWER APF	DYNAMOVAR SVG
Generalmente se mantiene módulos en almacén local y el tiempo de entrega es inmediato. En caso de no haber disponibilidad de equipos localmente se envía la mercancía desde China por flete aéreo.	Generalmente se mantiene módulos en almacén local y el tiempo de entrega es inmediato. En caso de no haber disponibilidad de equipos localmente se envía la mercancía desde China por flete aéreo.

20. Servicio técnico

¿En caso de avería/fallo cual es el tiempo de respuesta para diagnóstico?

CLEAN POWER APF	DYNAMOVAR SVG
Dentro de 24 horas atención por personal de soporte técnico local. También se tiene soporte directo desde la fábrica dentro de las 24 horas al reporte del incidente basado en tener suficiente información de fallas, imágenes o videos.	Dentro de 24 horas atención por personal de soporte técnico local. También se tiene soporte directo desde la fábrica dentro de las 24 horas al reporte del incidente basado en tener suficiente información de fallas, imágenes o videos.

Luego de haber respondido las preguntas por parte del equipo de Colcafé, se analizaron las dos opciones y basados en los antecedentes de las mediciones hechas y en los presupuestos confirmados por parte del comité de inversiones, se llegó a la conclusión de adquirir el filtro CleanPOWER APF que es el que más se ajusta a las condiciones operativas necesarias para la subestación.

6.8.5. Instalación del filtro activo CleanPOWER APF.

Dado que la empresa Ecoener tenía en stock en bodega nacional el filtro CleanPOWER, la entrega de este se hizo de forma inmediata y no tardo más de una semana por lo que la instalación se pudo hacer antes de lo pactado con el cronograma, pudiendo así hacer la instalación el día de mantenimiento general de las subestaciones.



Figura 32. Llegada y recepción del filtro a la planta [Fuente propia].

Para la instalación del filtro dado que para este tipo de equipos se debe hacer la debida desconexión para poder implementarlo al sistema conectado de Colcafé, se destinó un día en específico en el cual se hace el mantenimiento general a las subestaciones y transformadores en general que hacen parte de la planta de Colcafé. Para este día se hace un paro general de todos los procesos que hacen parte en la elaboración del Café en todas sus presentaciones, permitiendo así realizar los debidos procesos de limpieza a los transformadores de la subestación principal y los de las otras 9 subestaciones. Este paro se realizó el día 7 de noviembre del 2021 y permitió lograr hacer la instalación del filtro activo en la subestación de servicios P1.



Figura 33. Ingreso del filtro a la subestación de servicios [Fuente propia.]

La contratista encargada de la instalación del filtro fue Servimontajes S.A.S que con el debido acompañamiento por parte del personal de Colcafé y de un técnico experto de la empresa ECOENER realizaron dicha instalación.



Figura 34. Instalación del filtro activo a la red de Colcafé [Fuente propia].

Durante la instalación del filtro se le hizo acompañamiento a Servimontajes para conocer las conexiones y detalles necesarios junto con el técnico especialista de ECOENER quien ofreció su asesoría durante todo el montaje de este. El tiempo de instalación del filtro y todos sus componentes fue de 4 horas. Tiempo que fue suficiente dado que el paro de la subestación principal estaba planeado para 10 horas lo cual coincidió por completo con el cronograma que se había considerado. Al finalizar la instalación se realizó una revisión minuciosa de todas las conexiones que se realizaron y las de los equipos que ya hacían parte de la subestación para no generar algún daño al momento de energizar. El mantenimiento de la subestación general termino a las 8:30 pm del domingo 7 de noviembre por lo que las pruebas para el filtro se dejaron para el día siguiente.

6.8.6. Funcionamiento y resultados del filtro activo CleanPOWER APF

El día siguiente a la instalación del filtro se hizo la prueba de funcionamiento del filtro y junto con el técnico especialista de ECOENER se realizó la parametrización del filtro según recomendaciones sus recomendaciones, la forma de su parametrización se realizó según lo estipulado en el manual de usuario entregado por ECOENER necesario para realizar dicha configuración Anexo1.

Los siguientes días posteriores a la instalación del filtro activo se comenzó a realizar el debido seguimiento y reportes del funcionamiento del filtro hasta la fecha actual. El equipo fue instalado el 7 de noviembre de 2021, ubicado en la subestación de servicios P1 de la planta Colcafé. La instalación eléctrica fue adecuada y la instalación estructural fue óptima.



Figura 35. Vista de la instalación estructural del filtro activo [Fuente propia].

La configuración y puesta en servicio del filtro activo se realizó el día siguiente de su instalación. Y luego de ser parametrizado se realizó su configuración de la siguiente manera:

- **Armónicos:** Se activó la opción de mitigación de armónicos desde el orden 3 hasta el 61

	IAS(%)	IBS(%)	ICS(%)	IAL(%)	IBL(%)	ICL(%)
Total	2.34	2.36	2.48	14.45	13.89	14.25
2nd	0.40	0.46	0.42	0.42	0.19	0.19
3rd	0.17	0.34	0.24	0.43	0.73	0.34
4th	0.18	0.15	0.12	0.27	0.68	0.07
5th	1.87	1.82	1.84	13.23	12.66	13.13
7th	0.58	0.79	0.74	4.88	4.87	4.75
9th	0.19	0.33	0.41	0.11	0.27	0.33
11th	0.44	0.24	0.19	2.47	2.25	2.32
13th	0.13	0.03	0.09	0.94	1.08	1.01
17th	0.27	0.37	0.23	1.18	1.06	1.07
19th	0.24	0.18	0.22	0.72	0.74	0.74
23rd	0.31	0.23	0.25	0.90	0.67	0.76

Figura 36. Porcentaje de mitigación de armónicos [Fuente propia].

Los resultados obtenidos por el filtro en cuanto a los armónicos en los que se presentaban mayores problemas son los esperados, dado que se reduce la distorsión armónica total THD desde un 14% hasta un 2,5% como se aprecia en la figura 36, que fue lo que según los cálculos realizados en el estudio de la subestación era lo que se debía obtener con la instalación de un compensador de armónicos.

- **Compensación del factor de potencia:** El filtro activo también se configuró de tal forma que lograra compensar el factor de potencia en 0,97 factor tipo inductivo. Luego de haber hecho la correcta configuración de los parámetros se ha observado que los resultados son los esperados, manteniendo el factor de potencia PF en un valor muy cercano a $> 0,97$. A partir de esta configuración se le hizo un seguimiento por horas para determinar los momentos del día en donde el factor de potencia se viera afectado por la alta cargabilidad de la red y poder realizar nuevas parametrizaciones para establecer el filtro en un punto de equilibrio óptimo para la compensación de las demás variables.

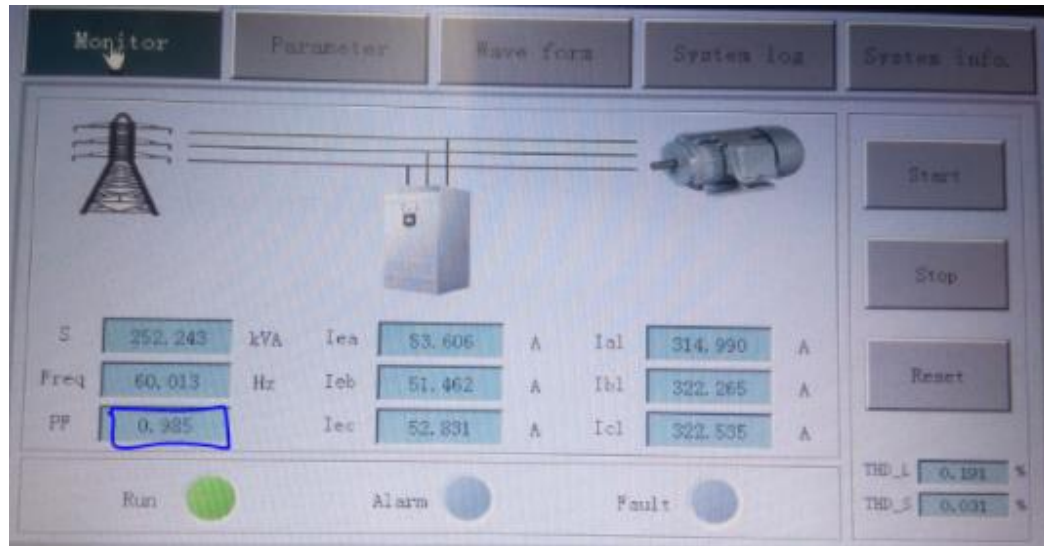


Figura 37. Compensación del factor de potencia [Fuente propia].

Como se observa en la figura 37 se han obtenido resultados positivos y que el desbalance de la red se mantiene en un máximo de 3%, lo cual era lo esperado según los cálculos realizados.

- **Compensación en voltaje:**

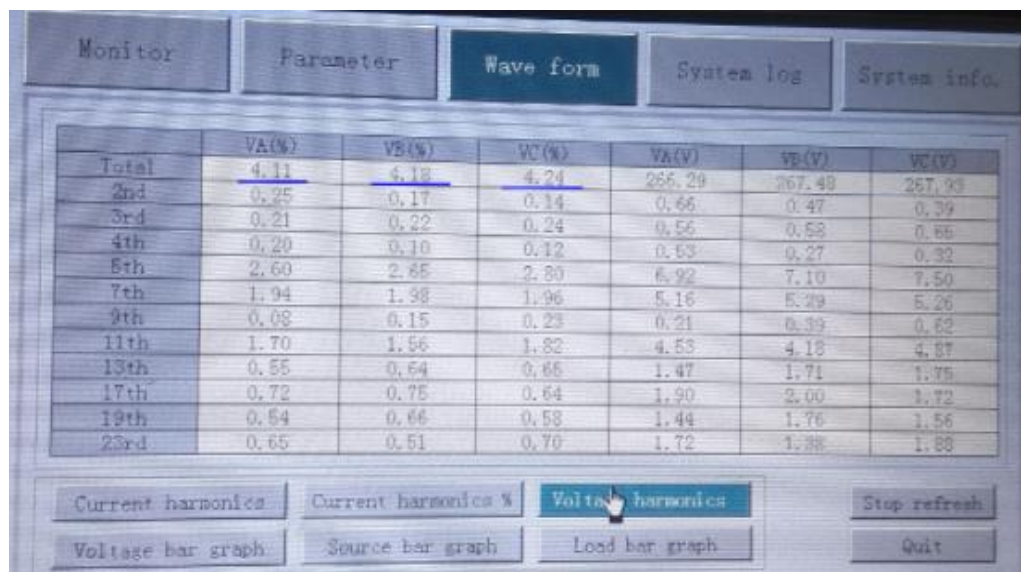


Figura 38. Compensación en armónicos de tensión [Fuente propia].

La parametrización de la función de mitigación de armónicos en tensión se realizó de manera correcta y se logró que la distorsión armónica en voltaje se mantuviera dentro de los límites establecidos por la norma IEEE519 por debajo del 5% como podemos observar en la figura 38.

- Estabilización del equipo:** Después de instalar el equipo luego de hacerle seguimiento durante dos semanas, fue necesario realizar un ajuste en el sistema de ventilación para mejorar la disipación térmica, debido a que se presentaban temperaturas altas en la operación. Se cambio la cubierta de extracción de aire por una con un mayor volumen de extracción (de 1100m³/h) como se observa en la figura 39 , y se logró bajar la temperatura de operación de 52° C hasta 47° C, generando un mejor ambiente para los componentes electrónicos de potencia. Y con la instalación del extractor en la subestación de servicios P1 se logró disminuir aún más la temperatura de operación a 42°C en promedio como se aprecia en la figura 40.



Figura 39. Instalación de nuevas rendijas de extracción de calor [Fuente propia].

Module	Module type	Communicate	Work status	Percent	Temperature
1#	100A	Online	Run	33.33%	46.95°C
2#	100A	Online	Run	33.33%	47.98°C
3#	100A	Online	Run	33.33%	48.71°C
4#					
5#					
6#					
7#					
8#					
9#					
10#					
11#					
12#					
13#					
14#					
15#					
16#					

Figura 40. Temperaturas de operación con los ajustes de disipación térmicos [Fuente propia].

- Supervisión de la solución de calidad de la energía – Monitoreo en tiempo real:**
 Con la instalación del filtro activo se garantizó disponibilidad de comunicación Ethernet para lograr un seguimiento en tiempo real de las variables para lograr llevar a cabo el análisis de la subestación y ver el progreso del filtro activo. Adicional a esto se puso en operación el sistema de monitoreo en tiempo real de la solución de calidad de energía, utilizando la interfaz de comunicación GPRS y la plataforma de ECOENER para la supervisión en la nube (Sara Cloud) y se logró presentar en las primeras semanas de funcionamiento de manera gráfica las variables de calidad de energía más importante de la subestación de servicios.

6.9. Resultados del filtro activo CleanPOWER APF primer mes.

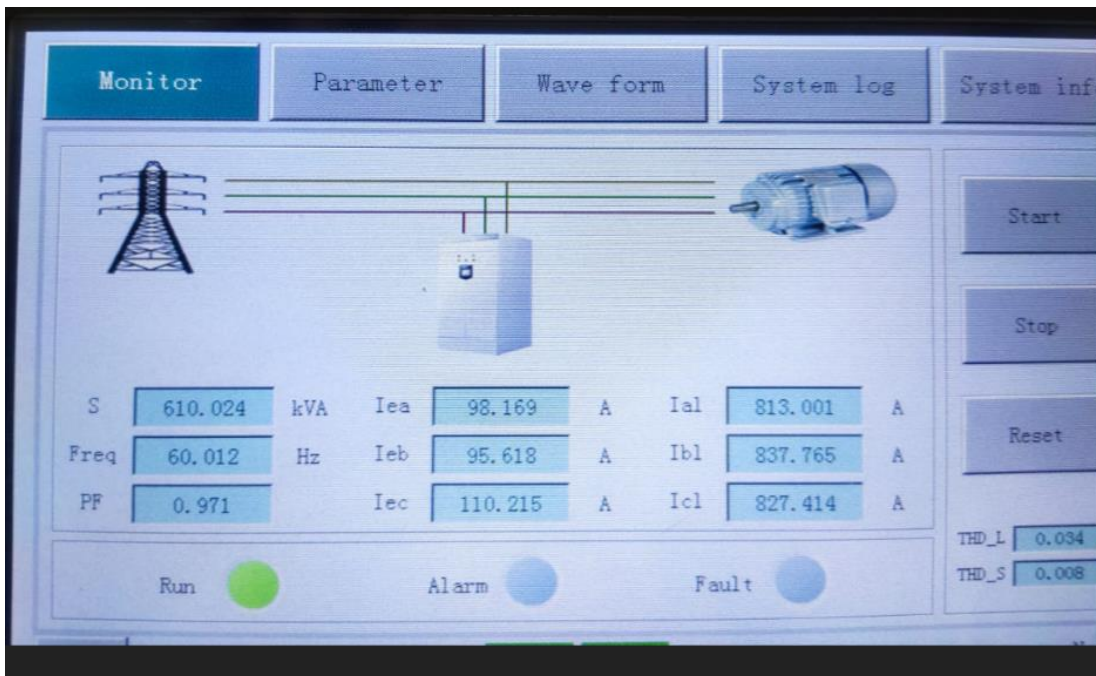


Figura 41. Datos de funcionamiento del filtro activo segunda semana [Fuente propia].

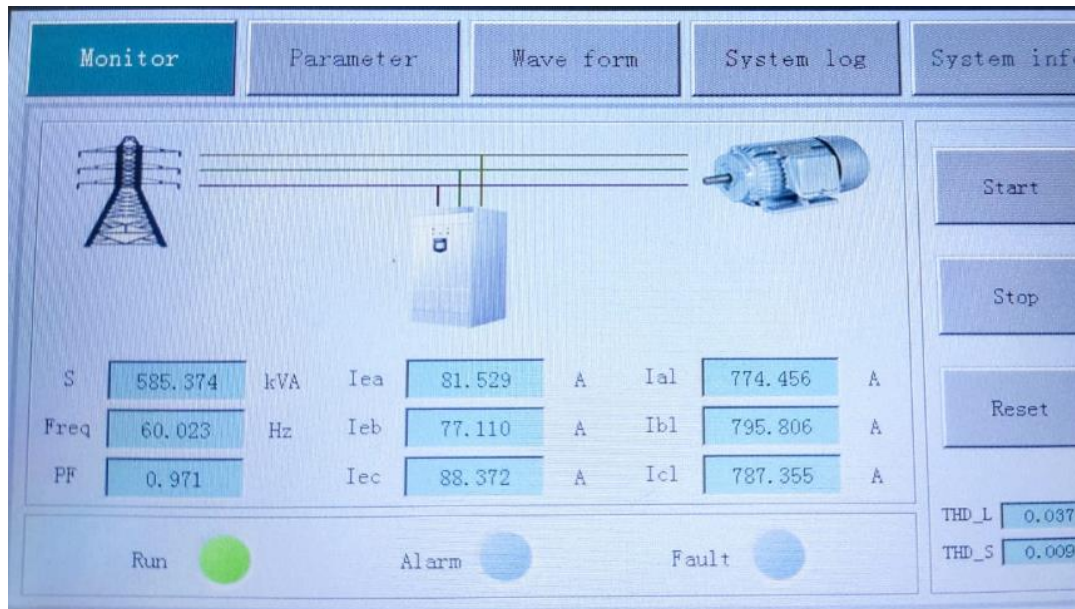


Figura 42. Datos de funcionamiento del filtro activo tercera semana [Fuente propia].



Figura 43. Datos de funcionamiento del filtro activo cuarta semana [Fuente propia].

Como se puede observar en las figuras 41, 42 y 43 se le realizó el seguimiento al filtro desde su instalación hasta la cuarta semana de seguimiento que es el tiempo más crítico para los resultados dado que es donde se puede observar el acoplamiento y la estabilización del mismo filtro a la red de Colcafé y los resultados obtenidos son los esperados dado que los armónicos con los que más problemas se contaban en la subestación de servicios se han visto reducidos

a valores aceptables tanto por la norma como los dispuestos por el operador de red, y el factor de potencia está en valor de 0,97 que es un valor apropiado y acertado con los cálculos realizados para la compensación de calidad de la energía.

Durante las primeras cuatro semanas de funcionamiento del filtro activo CleanPOWER APF se obtuvieron muy buenos resultados. Este fue instalado en una de las subestaciones con mayor potencia instalada, y sirvió de piloto para la posible expansión de filtros en las demás subestaciones. Antes de adquirir el equipo piloto, se dimensionó el equipo realizando una medición con el analizador de redes SONEL PQM-702, lo que brindó un argumento sólido a la hora de corroborar los resultados.

7. Conclusiones

De los análisis de la recolección de datos sobre la calidad de la energía hechos en la subestación de servicios de la empresa Colcafé S.A.S, se demostró la necesidad de adquirir e instalar un filtro compensador de armónicos. Debido a que esta tecnología era un piloto para la empresa, se realizó un estudio en donde se determinó que la subestación de servicios P1 sería la indicada debido a la cantidad de cargas no lineales conectadas a ella.

Para el dimensionamiento del filtro activo se realizaron dos semanas de mediciones y análisis mediante el analizador de redes SONEL que permitieron valorar el estado de la subestación y ver qué tipo de armónicos estaban presentes en la red. Los datos fueron usados para realizar mediante cálculos la capacidad del filtro activo a instalar apeándose a la normativa establecida por el operador de red.

Para lograr compensar los armónicos detectados en la subestación de servicios P1 se diseñó un filtro activo APF anti-armónicos de 200 A y 480 V diseñado para mitigar armónicos, compensar reactivos y estabilizar la red eléctrica, con lo cual se logró disminuir los armónicos totales THDv de un 14% a un 2.5% resultados que lograron que la subestación quedara en rangos permisibles por la normativa vigente de generación de armónicos.

Al finalizar el tiempo de diseño e implementación del filtro activo, es posible concluir que lograr poner en servicio este tipo de tecnologías de filtrado APF mejora en un gran porcentaje la calidad de energía, debido a la eliminación de armónicos presentes en la red eléctrica y a la corrección que se provoca en las formas de onda de tensión y corriente.

La tecnología aplicada durante el desarrollo de este proyecto de filtrado de armónicos, como proyecto piloto, demostró ser tecnología asequible, y de fácil instalación que puede dar solución al problema creciente de la contaminación armónica debido a cargas no lineales en el sector industrial.

8. Referencias Bibliográficas

- [1] S.J. Chapman, Máquinas Eléctricas, 5° ed. 2012
- [2] C. K. Alexander y M. N. O. Sadiku, Fundamentos de circuitos eléctricos, 5.a ed. 2013.
- [3] S. Santoso, H. W. Beaty, R. C. Dugan, y M. F. McGranaghan, Electrical Power Systems Quality, 2.a ed. New York, 2002.
- [4] ABB, «Corrección del factor de potencia y filtrado de armónicos en las instalaciones eléctricas». Cuaderno de aplicaciones técnicas. [En línea].
- [5] 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.
- [6] Reyes-Trujillo E., Rodríguez-Rivas J.J. y Robles-García J.. Aplicación de un filtro activo de corriente para mejorar la calidad de la energía en un sistema eléctrico industrial
- [7] Rodriguez Jose, Cortes Patricio. PREDICTIVE CONTROL of power Convertes and Electrical Drives.
- [8] Pigazo Alberto, Método de control de filtros activos de potencia paralelo tolerante a perturbaciones de la tensión de la red-capitulo 3
- [9] Colcafé Intranet. Plataforma de Intranet Industria Colombiana de Café <http://intra.gruponutresa.com/intColcafeWeb/colcafenet.nsf/frPrincipal?Open&id=0,096177615014878>.
- [10] ecoenersas.com/calidad-de-energia/
- [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] Ministerio de Minas y Energía, *RESOLUCIÓN No. 015*. 2018.
- [15] Ministerio de Minas y Energía, *RESOLUCIÓN No. 199*. 2019.

- [16] 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>
- [17] IEC, «IEC 61642 - 1997, Industrial a.c. networks affected by harmonics - Application of filters and shunt capacitors», *IEC 61642 - 1997*, 1997.
- [18] «IEEE Std 519-2014, Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems IEEE Std 519-2014»
- [19] Ministerio de Minas y Energía, *RETIE*. 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/1179442/Anexo+General+del+RETI+E+vigente+actualizado+a+2015-1.pdf/57874c58-e61e-4104-8b8c-b64dbabedb13>
- [20] IEEE 519-1992 - IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems
- [21]<https://www.sonel.pl/es/producto/pqm-702-analizador-de-calidad-de-energia/>

9. Anexos

9.1. [Anexo 1](#)