



ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA EN LA SUBESTACIÓN LA CALDERA
Práctica empresarial en la modalidad de semestre de industria

Eider Adrián Góngora Mendoza

Informe de práctica para optar al título de Ingeniero Eléctrico

Asesores

Nelson De Jesús Londoño Ospina, Ingeniero Electricista
Universidad de Antioquia

Jhon Freddy Ruiz, jefe de mantenimiento
Antioqueña de Porcinos SAS

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Eléctrica
Medellín, Antioquia, Colombia
2023

Cita	Góngora Mendoza [1]
Referencia Estilo IEEE (2020)	[1] E. A. Góngora Mendoza, “análisis de la calidad de la energía en la subestación la caldera”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2023.



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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Julio César Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: Noé 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.

Créditos:

Empresa Antioqueña de Porcinos SAS

Ingeniero Electricista de Antioqueña de Porcinos SAS: Daniel de Jesús Salazar Salazar

Docente de la Universidad de Antioquia: Nelson De Jesús Londoño Ospina

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
I. INTRODUCCIÓN	9
II. OBJETIVOS	11
A. Objetivo general	11
B. Objetivos específicos	11
III. MARCO TEÓRICO	11
IV. METODOLOGÍA	22
V. RESULTADOS	23
VI. ANÁLISIS	39
VII. CONCLUSIONES	40
REFERENCIAS	41

LISTA DE TABLAS

TABLA I LAVA CANASTAS	17
TABLA II CALDERA 200 BHP	18
TABLA III SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO	19
TABLA IV TRANSFORMADORES	19
TABLA V ILUMINACION TRANFORMADOR SUBESTACION	19

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Cuarto eléctrico subestación la caldera.....	24
Fig. 2. Características tablero principal.....	25
Fig. 3. Distorsión armónica de corriente transformador de iluminación.....	26
Fig. 4. Distorsión armónica de corriente del compresor de sistema neumático.....	26
Fig. 5. Distorsión armónica de corriente de lava canastas.....	27
Fig. 6. Torsión armónica de corriente de la caldera.....	28
Fig. 7. Torsión armónica de corriente totalizador.....	29
Fig. 8. Corriente armónica transformador de iluminación.....	30
Fig. 9. Corriente armónica transformador de iluminación.....	30
Fig. 10. Corriente armónica lava canastas.....	31
Fig. 11. Corriente armónica lava canastas.....	31
Fig. 12. Corriente armónica compresor.....	33
Fig. 13. Corriente armónica compresor.....	33
Fig. 14. Corriente armónica caldera.....	34
Fig. 15. Corriente armónica caldera.....	34
Fig. 16. Corriente armónica tablero principal.....	35
Fig. 17. Corriente armónica tablero principal.....	35
Fig. 18. Corriente reactiva tablero principal.....	37
Fig. 19. Corriente RMS de totalizador con mayor desequilibrio.....	38

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LED.	Light Emitting Diode
RMS	Raíz Cuadrada Media
THD	Distorsión Armónica Total
UdeA	Universidad de Antioquia
V	Voltaje
<i>THD_v</i>	Distorsión Armónica Total de Voltaje
<i>THD_i</i>	Distorsión Armónica Total de Corriente
I	Corriente
Q	Potencia Reactiva
P	Potencia Activa
T	Periodo

RESUMEN

Este documento presenta el informe de la práctica empresarial en Antioqueña de Porcinos SAS, una empresa dedicada a la venta de productos cárnicos de cerdo y sus derivados. En el informe, se llevará a cabo un análisis exhaustivo de armónicos en una subestación industrial, mediante la medición de variables eléctricas utilizando un analizador de redes especializado. La finalidad principal del análisis es evaluar la presencia de distorsión armónica, centrándose especialmente en cargas con altas tasas de distorsión. Si se detectan niveles significativos de armónicos, se contemplará la instalación de un filtro específico en el tablero principal. La intención es mitigar los efectos adversos de la distorsión armónica y al mismo tiempo, mejorar la calidad general de la energía suministrada a la edificación.

El proceso de instalación de filtros de armónicos se concibe como una medida proactiva que garantizará un funcionamiento eléctrico más eficiente y confiable en el entorno industrial de Antioqueña de Porcinos SAS. Este informe también aborda los objetivos establecidos, detalla la metodología empleada para su consecución y presenta información específica sobre los resultados obtenidos en relación con los diseños previamente descritos.

ABSTRACT

This document presents the report of the business practice at Antioqueña de Porcinos SAS, a company dedicated to the sale of pork products and their derivatives. In this report, an exhaustive analysis of harmonics in an industrial substation will be carried out. This will be achieved by measuring electrical variables using a specialized network analyzer. The main purpose of this analysis is to evaluate the presence of harmonic distortion, focusing especially on loads with high distortion rates. If significant levels of harmonics are detected, the installation of a specific filter in the main panel will be considered. The intention is to mitigate the adverse effects of harmonic distortion and, at the same time, improve the overall quality of the power supplied to the building.

This process of installing harmonic filters is conceived as a proactive measure that will ensure a more efficient and reliable electrical operation in the industrial environment of Antioqueña de Porcinos SAS. This report also addresses the established objectives, details the methodology used to achieve them and presents specific information on the results obtained in relation to the previously described designs.

I. INTRODUCCIÓN

En el entorno actual de la industria y tecnología, la demanda de energía eléctrica se ha vuelto cada vez más vital para el funcionamiento eficiente y sostenible de las operaciones empresariales. Sin embargo, a medida que las organizaciones implementan sistemas más avanzados y diversos, como equipos electrónicos, variadores de velocidad e iluminación LED, surge un desafío inherente en forma de distorsiones en la calidad de la energía suministrada. Estas distorsiones, conocidas como armónicos, se han convertido en una preocupación significativa ya que, pueden tener un impacto adverso en la eficiencia, la confiabilidad operativa del equipo y, en última instancia, en la rentabilidad de la empresa.

Los antecedentes de este problema se encuentran en la creciente dependencia de dispositivos electrónicos y sistemas de control en la mayoría de las industrias. Aunque estos elementos modernos ofrecen ventajas indiscutibles, también introducen fluctuaciones no deseadas en la calidad de la energía eléctrica. En la instalación específica donde se llevarán a cabo las mediciones, es importante destacar que hasta el momento no se han registrado inconvenientes significativos debido a la presencia de armónicos en parte, a que el transformador que alimenta la instalación se encuentra en un porcentaje muy bajo de su capacidad total. Sin embargo, a medida que la carga en la instalación aumente y el transformador se acerque a su capacidad nominal, existe una preocupación creciente de que los armónicos pueden manifestarse en un mayor porcentaje y causar perturbaciones en el sistema eléctrico. La posibilidad de que la capacidad del transformador se sature en el futuro podría aumentar la distorsión armónica y sus efectos adversos en la operación y la eficiencia. Por lo tanto, es esencial abordar este problema de manera proactiva para prevenir cualquier complicación futura y garantizar un funcionamiento continuo y óptimo de los sistemas eléctricos.

Se busca abordar de manera sistemática el desafío potencial de los armónicos en un entorno industrial. Mediante de la determinación precisa de la tasa de distorsión armónica en la instalación actual, se pretende evaluar la magnitud del impacto potencial de los armónicos en el sistema eléctrico. Estas mediciones se llevarán a cabo para tener una comprensión clara de la situación actual y, con base en los resultados, tomar decisiones informadas para resolver los

problemas encontrados. En caso de que los armónicos representen un riesgo potencial para la calidad y estabilidad del sistema eléctrico, se considerarán soluciones como la implementación de filtros de armónicos. Estos dispositivos pueden reducir eficazmente las distorsiones armónicas y mantener la integridad de la energía. Para ello, se implementará un enfoque que involucra la ubicación estratégica de puntos de medición en las instalaciones clave.

II. OBJETIVOS

A. *Objetivo general*

Desarrollar un análisis de armónicos en instalación eléctrica de tipo industrial con el fin de determinar el verdadero impacto que estos generan sobre dicha instalación.

B. *Objetivos específicos*

- Realizar la medición de variables eléctricas con un analizador de redes en una edificación de tipo industrial.
- Reconocer y clasificar los fenómenos de la distorsión armónica presentes en el sistema (si es que existen).
- Analizar posibles soluciones (si es necesario) en medida del impacto de la distorsión armónica existente en el sistema.
- Verificar si realmente es necesario tomar medidas para mitigar el efecto de la distorsión armónica durante la etapa de diseño de una red tipo industrial.

III. MARCO TEÓRICO

Los armónicos son componentes de una señal periódica que tienen frecuencias enteras múltiples de la frecuencia fundamental. En otras palabras, cuando tiene una onda o señal periódica, como una onda sinusoidal, su frecuencia más baja se llama frecuencia fundamental. Los armónicos son las frecuencias adicionales presentes en la señal que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental [2]. La frecuencia fundamental es la frecuencia a la que ocurre un ciclo completo de la onda, y los armónicos son como versiones "superiores" de esa frecuencia fundamental. El segundo armónico tendrá el doble de la frecuencia fundamental, el tercer armónico tendrá tres veces la frecuencia fundamental, y así sucesivamente.

Los armónicos son desviaciones o deformaciones que se presentan en las ondas eléctricas sinusoidales de voltaje y/o corriente en sistemas eléctricos. Según [2] estas distorsiones surgen

debido a la presencia de dispositivos y cargas que no siguen un comportamiento lineal con relación a la electricidad, así como al uso de materiales magnéticos y equipos que requieren cambios rápidos en su operación normal. La aparición de estas corrientes y tensiones armónicas en el sistema eléctrico conlleva a problemas como: incremento en las pérdidas de energía, excesos de voltaje en condensadores, errores en las mediciones, fallas en sistemas de protección, daños en los aislamientos, deterioro de componentes dieléctricos y acortamiento de la vida útil de los equipos, entre otros inconvenientes. Históricamente en [3], los estudios sobre armónicos comenzaron en la década de 1920-1930 en Alemania, y desde entonces ha habido un constante interés y esfuerzo en comprender y abordar los efectos de los armónicos en los sistemas eléctricos.

El análisis armónico implica el cálculo de las amplitudes y fases de la frecuencia fundamental y sus múltiplos en una forma de onda que se repite en intervalos regulares. Este proceso da lugar a la serie de Fourier, que es una representación matemática de la forma de onda periódica $X(t)$. En esta serie, se describen las contribuciones de cada componente armónico en la función $X(t)$ [4].

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi x}{L} + b_n \sin \frac{n\pi x}{L} \right) \quad (1)$$

Esto constituye una representación en el dominio del tiempo de la función periódica. En esta expresión a_0 es el valor promedio y T el período de la función $X(t)$, mientras que a_0 y b_0 son los coeficientes de la serie para la n -ésima armónica.

El término constante de la serie de Fourier es dado por:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(\tau) dt \quad (2)$$

Lo cual es el área bajo la curva de $X(t)$ desde $-T/2$ hasta $+T/2$, dividido por el periodo de la forma de onda T ; es decir, igual al valor promedio de la función. Mientras que a_0 y b_0 son dados respectivamente por:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(\tau) \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \text{ para } n=1 \gg \infty \quad (3)$$

$$b_0 = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(\tau) \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \text{ para } n=1 \gg \infty \quad (4)$$

Las ecuaciones (3) y (4) se simplifican cuando la forma de onda tiene simetría. Si la forma de onda tiene simetría impar, esto es $X(t) = -X(-t)$, entonces a_0 es cero para todos los valores de n , y b_n es dado por:

$$b_0 = \frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} x(\tau) \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad (5)$$

La serie de Fourier para una función impar tendrá solamente términos seno. Si la forma de onda tiene simetría par, esto es $X(t) = X(-t)$, entonces b_0 es cero para todos los valores de n , y a_n , es dado por:

$$a_0 = \frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} x(\tau) \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad (6)$$

La serie de Fourier para una función par contendrá solamente términos coseno.

Las siguientes definiciones, en términos de la serie de Fourier, se usan para describir los sistemas de potencia con corrientes y voltajes armónicos [5]:

Voltaje:

$$V(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (V_n \sin(n\omega_0 t + \phi_n)) \quad (7)$$

Corriente:

$$I(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (I_n \sin(n\omega_0 t + \phi_n)) \quad (8)$$

Potencia activa:

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} (V_n I_n \cos(\theta_n + \phi_n)) \quad (9)$$

Potencia reactiva:

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} (V_n I_n \sin(\theta_n + \phi_n)) \quad (10)$$

Voltaje RMS:

$$V_{RMS} = \left[\sum_{n=1}^{\infty} v_n^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

Corriente RMS:

$$I_{RMS} = \left[\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

Distorsion de voltaje:

$$THDv = \frac{\sum_{\eta=2}^n [v_{\eta}^2]^{1/2}}{v_1} \quad (13)$$

Distorsion de corriente:

$$THDi = \frac{\sum_{\eta=2}^n [I_{\eta}^2]^{1/2}}{I_1} \quad (14)$$

Según [6], las cargas no lineales pueden clasificarse, básicamente, en tres categorías; a continuación, se presenta una lista con las más importantes.

A- Basadas en arcos y descargas eléctricas:

- Lámparas de descarga (fluorescentes, ahorradoras de energía, neón, vapores de sodio y mercurio, etc.)
 - Soldadores de arco.
 - Hornos de arco Eléctrico.
- B- Basadas en inductancias saturables:
- Transformadores,
 - Motores.
 - Reactancias para limitar los arcos de descarga.
- C- Electrónicas:
- Rectificadores para cargas resistivas e inductivas.
 - Fuentes de alimentación (aparatos electrónicos domésticos y de oficina, variadores de frecuencia, sistemas de alimentación ininterrumpida, lámparas electrónicas, etc.)
 - Reguladores y recortadores (variación de velocidad de pequeños motores, ahorradores de energía para motores, reguladores de luz, compensadores estáticos de energía reactiva (SVC, TCR), reguladores para dispositivos de caldeo, etc.)
 - Cargadores de baterías
 - Convertidor continuo-alterno sobre la red (energía solar, accionamientos con recuperación de energía, transmisión de energía en corriente continua, etc.)

Cuando se analizan los impactos perjudiciales de estos armónicos, según [6] estos están relacionados con la duración de la carga instalada, manifestándose tanto en efectos instantáneos como a largo plazo. A continuación, se presentan algunos de los problemas más significativos causados por los armónicos en relación con el funcionamiento de los principales equipos eléctricos presentes en sistemas de distribución:

Transformadores: Aumento de las pérdidas eléctricas en cobre y hierro; riesgo de saturación en presencia de pares armónicos; Disminución de la vida útil debido a sobrecalentamiento o deterioro del aislamiento.

Máquinas asíncronas: Aumento de la generación de calor, especialmente en las partes dobles de jaula.

Conductor Neutro: Elevación de temperatura debido a armónicos de secuencia cero. Los equipos electrónicos generan armónicos de tercer, quinto y séptimo orden, que se suman a los armónicos Triplens. En sistemas trifásicos equilibrados, los Triplens tienen secuencia cero y, por lo tanto, se suman en el conductor neutro.

Controles electrónicos: La distorsión en el voltaje puede afectar negativamente a los controles electrónicos para la conversión de potencia, control de velocidad y fuentes de energía. Muchos de estos dispositivos dependen de señales, por lo que es necesario pasar por cero para lograr la sincronización en el disparo de tiristores. Cuando la forma de onda del voltaje está distorsionada, estas señales de sincronización se vuelven inexactas y resultan en un funcionamiento impredecible.

Condensadores de potencia: Aumento del calor generado, demanda de aislamiento y reducción de la vida útil.

Cables y Conductores Eléctricos: Incremento de las pérdidas óhmicas y dieléctricas, lo que conlleva a una vida útil reducida.

Interferencia en las comunicaciones: Dado que los armónicos son ondas de frecuencia superior, son más susceptibles de irradiarse y pueden interferir con sistemas de comunicación y señales electrónicas.

Efectos en otros usuarios: Aunque los efectos armónicos en una instalación puedan ser insignificantes, pueden causar problemas a otros usuarios conectados a la misma red. Por esta razón, las empresas proveedoras establecen límites máximos para los niveles de armónicos que los usuarios pueden introducir en la red. Internacionalmente, existen numerosos estándares para controlar los efectos de los armónicos, tanto para el funcionamiento de la red eléctrica como para la seguridad de los usuarios y sus instalaciones.

En [7] se muestra que uno de los efectos de las armónicas es la resonancia, la cual es una condición en la que se igualan las reactancias capacitivas e inductivas a una determinada frecuencia y que la resistencia eléctrica presente es omisible. Se puede presentar en los bancos de capacitores, utilizados para corregir el factor de potencia, o los circuitos asociados a ellos. La resonancia ocasiona el flujo de excesivas corrientes con el subsecuente daño a los capacitores.

Asimismo, es fundamental analizar qué equipos son alimentados por cada una de las cargas, para examinar los tipos de cargas y determinar si estas se trataban de cargas que aportaran armónicos a nuestro sistema. A continuación, se describen los equipos que son alimentados por cada uno de los alimentadores.

TABLA I
LAVA CANASTAS

Equipos	Voltaje Nominal (V)	Corriente (A)	HP	Potencia Activa (KW)	Potencia Aparente (KVA)	Potencia Reactiva (KVA)	Coseno De PHI
Motor Bomba Prelavado	440,00	60,00	40,23	30,00	45,73	38,23	0,66
Motor Bomba Lavado	440,00	60,00	40,23	30,00	45,73	38,23	0,66
Bomba Aclarado Recirculado	440,00	30,00	20,12	15,00	22,86	19,12	0,66
Reductor Filtro Helicoidal Prelavado	440,00	0,17	0,16	0,12	0,13	0,10	0,93
Reductor Filtro Rotativo Prelavado	440,00	0,17	0,16	0,12	0,13	0,10	0,93
Reductor Filtro Rotativo Lavado	440,00	0,57	0,16	0,12	0,43	0,42	0,28
Reductor Filtro Rotativo Aclarado	440,00	0,57	0,16	0,12	0,43	0,42	0,28
Motor Cadena 1 Túnel	440,00	2,40	1,01	0,75	1,83	1,69	0,41
Motor Cadena 2 Túnel	440,00	2,40	1,01	0,75	1,83	1,69	0,41
Extractor De Vahos	440,00	5,40	4,02	3,00	4,12	3,33	0,73
Motor Bomba Lavado	440,00	60,00	40,23	30,00	45,73	38,23	0,66
Bomba Aclarado Recirculado	440,00	60,00	40,23	30,00	45,73	38,23	0,66
Reductor Filtro Helicoidal	440,00	30,00	20,12	15,00	22,86	19,12	0,66

Prelavado							
Reductor Filtro Rotativo Prelavado	440,00	0,17	0,16	0,12	0,13	0,10	0,93
Reductor Filtro Rotativo Lavado	440,00	0,17	0,16	0,12	0,13	0,10	0,93
Reductor Filtro Rotativo Aclarado	440,00	0,57	0,16	0,12	0,43	0,42	0,28
Motor Cadena 1 Túnel	440,00	0,57	0,16	0,12	0,43	0,42	0,28
Motor Cadena 2 Túnel	440,00	2,40	1,01	0,75	1,83	1,69	0,41
Extractor De Vahos	440,00	2,40	1,01	0,75	1,83	1,69	0,41

TABLA III
CALDERA 200 BHP

Equipos	Voltaje Nominal (V)	Corriente (A)	HP	Potencia Activa (KW)	Potencia Aparente (KVA)	Potencia Reactiva (KVA)	Coseno De PHI
Motor Filtro 1	440,00	2,10	1,00	0,75	1,60	1,45	0,47
Motor Rotativa Ciclón	440,00	2,10	1,00	0,75	1,60	1,45	0,47
Motor Ventilador Parrilla	440,00	1,30	0,50	0,37	0,99	0,93	0,38
Motor Parrilla	440,00	2,10	1,00	0,75	1,60	1,45	0,47
Motor Rotativa Caldera	440,00	2,10	1,00	0,75	1,60	1,45	0,47
Motor Ventilador Biomasa	440,00	12,00	7,50	5,59	9,15	7,80	0,61
Motor Bomba	440,00	7,00	4,00	2,98	5,33	4,66	0,56
Motor Bomba Standby	440,00	7,00	4,00	2,98	5,33	4,66	0,56
Motor Inducido	440,00	60,00	40,00	29,83	45,73	38,30	0,65

Motor Forzado	440,00	16,00	10,00	7,46	12,19	10,40	0,61
Motor Ventilador Fuego	440,00	12,00	7,50	5,59	9,15	7,80	0,61
Motor Forzado	440,00	16,00	10,00	7,46	12,19	10,40	0,61
Motor Ventilador Fuego	440,00	12,00	7,50	5,59	9,15	7,80	0,61
Motor Filtro 1	440,00	2,10	1,00	0,75	1,60	1,45	0,47

**TABLA IIIII
SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO**

Equipos	Voltaje Nominal (V)	Corriente (A)	HP	Potencia Activa (KW)	Potencia Aparente (KVA)	Potencia Reactiva (KVA)	Coseno De PHI
Compresor Kaeser	440,00	98,00	60,00	44,74	74,69	64,07	0,60
Compresor Kaeser	440,00	98,00	60,00	44,74	74,69	64,07	0,60
Compresor Atlas	440,00	98,00	60,00	44,74	74,69	64,07	0,60

**TABLA IVV
TRANSFORMADORES**

Equipos	Voltaje Secundario (V)	Voltaje Primario (kV)	Frecuencia (HZ)	Corriente Primario (A)	Corriente Secundario (A)	Potencia Aparente (kVA)	Numero De Fases
Subestación	220/127	0,44	60	65,608	131,22	50	3
En Poste						100	3

**TABLA V
ILUMINACION TRANSFORMADOR SUBESTACION**

Equipos	Voltaje nominal (V)	Corriente (A)	Cantidad	Tipo	Potencia (W)	Potencia total (KVA)	Eficacia (LM/W)
Caldera	120	1,25	14	Led	150	2,1	160
Cuarto De Control	120	0,2	4	Highbay Paneles RD	24	0,096	85

				(pequeño)			
				Hermética			
Subestación	120	0,333333333	6	lineal	40	0,24	
				LED			130
Cuarto				Hermética			
Compresor	120	0,333333333	3	lineal	40	0,12	
				LED			130
Casa Caldera				Hermética			
	120	0,333333333	15	lineal	40	0,6	
				LED			130
El Guaje	120	1,25	7	UFO	150	1,05	110
Lava Canastas	120	0,3	2	Led	36	0,072	90

En las tablas anteriores se evidenció que las cargas de Caldera, Compresor y canastas eran cargas que tenían equipos o elementos que generan armónicos al sistema, entre esas cargas tenemos:

1. Motores de inducción. El motor opera mediante el principio de potencia inducida, la cual se emplea para superar la resistencia necesaria durante el arranque. Esto da lugar a un estado transitorio en el motor, donde la corriente nominal puede aumentar hasta ocho veces. Este incremento se debe al campo electromagnético inducido, que resulta en la generación de armónicos de alta magnitud.
2. Variadores de frecuencia. Los armónicos en los variadores de frecuencia son el resultado de la modulación de la forma de onda de la corriente o voltaje por parte de estos dispositivos electrónicos
3. Bombas para bombeo de agua. Estos equipos generan una determinada cantidad de armónicos debido a que los motores de las bombas son de tipo inductivo
4. Iluminación Led. Los armónicos en la iluminación LED pueden surgir debido a la naturaleza de los dispositivos electrónicos utilizados en las lámparas y sistemas de iluminación LED.

Para determinar los armónicos es indispensable el uso de analizadores de redes, el propósito de los analizadores de redes es llevar a cabo una evaluación del estado energético de las cargas conectadas a la subestación. Para lograr esto, es necesario recopilar datos sobre variables clave

como corriente y voltaje TMRS, potencia activa, reactiva y aparente, así como frecuencia y factor de potencia. Con el fin de evaluar la calidad de la energía, se requiere la medición de la tasa total de distorsión armónica (THD), tanto de corriente como de tensión. Los valores anteriores, permiten la identificación del estado técnico-operativo de la red que suministra energía a la zona operativa objeto de estudio. Además, facilitan la detección de posibles infracciones a las restricciones técnico-operativas, las cuales podrían dar lugar a sanciones por parte del operador de la red eléctrica.

Para hacer un análisis de armónicos correcto es necesario tener el $THDi$, $THDv$, corriente RMS y la corriente fundamental. Los THD al momento de tomar la medida se da en porcentaje, dicho porcentaje indica qué tan grande es la contribución de los armónicos con respecto a la corriente fundamental. Un valor de THD bajo es deseable tanto para los armónicos de corriente como de tensión, indicando que la forma de onda de corriente se asemeja más a una onda sinusoidal pura, siendo esta la forma de onda ideal en un sistema de alimentación eléctrica. La corriente RMS es la suma de la corriente fundamental más las corrientes asociadas a cada uno de los armónicos que tenga el sistema. El analizador de redes nos entrega la corriente RMS y la tasa de distorsión armónica, es necesario hallar la corriente asociada a los armónicos para un análisis correcto, para ello se emplea la siguiente ecuación.

$$I_{armónico\ fase} = I_{RMS} \sqrt{\frac{THDi\%^2}{100^2 + THDi\%^2}} \left(1 + \frac{THDv_{fase}}{10}\right) \left[\frac{A}{fase}\right] \quad (15)$$

Para eliminar las perturbaciones armónicas es necesario e indispensable emplear filtros de armónicos, existen filtros de armónicos tanto activos como pasivos, y se utilizan para mitigar las perturbaciones en las señales fundamentales de tensión como de corriente en sistemas eléctricos y electrónicos, dichos filtros usan componentes pasivos como inductores, condensadores y resistencias para filtrar los armónicos.

Filtros pasivos: Estos componentes absorben o desvían selectivamente ciertas frecuencias armónicas y suelen tener un diseño fijo, están optimizados para reducir armónicos en un rango específico de frecuencias.

Filtros activos: Estos filtros incorporan componentes activos, como transistores y amplificadores operacionales, que les permiten generar corrientes o voltajes adicionales para contrarrestar selectivamente los armónicos no deseados. Los filtros activos pueden ajustarse dinámicamente para adaptarse a cambios en las condiciones de carga y en la presencia de armónicos, permitiendo una mayor flexibilidad en la corrección de armónicos en tiempo real. A continuación, se presentan las ecuaciones para calcular la corriente y así determinar el filtro de armónico adecuado.

$$I_{\text{filtro activo}} = \sqrt{I_{\text{armonicos}}^2 + I_{\text{pot reactiva}}^2 + I_{\text{equilibrado fase}}^2} \left[\frac{A}{\text{fase}} \right] \quad (16)$$

$$I_{\text{armonico fase}} = I_{\text{RMS}} \sqrt{\frac{\text{THDi}\%^2}{100^2 + \text{THDi}\%^2}} \left(1 + \frac{\text{THDv}_{\text{fase}}}{10} \right) \left[\frac{A}{\text{fase}} \right] \quad (15)$$

$$I_{\text{pot reactiva}} = \frac{Q_{\text{fase}}}{V_{\text{fase}}} [A] \quad (17)$$

$$I_{\text{equilibrado de fases}} = \text{valor mas grande entre} \begin{cases} I_{\text{media}} - I_{\text{minima}} \\ I_{\text{maxima}} - I_{\text{media}} \end{cases} [A] \quad (18)$$

IV. METODOLOGÍA

En la actualidad, no se ha establecido un protocolo normativo uniforme, ni un enfoque preciso para llevar a cabo la evaluación de armónicos en una red eléctrica. Sin embargo, se encuentran diversas metodologías descritas por los fabricantes de tecnologías vinculadas a la calidad de la energía. En este caso se seguirán los siguientes pasos para darle finalidad al objetivo general planteado.

1. Detectar posibles efectos de los armónicos: En este punto se verá si hay sobrecargas, calentamientos, problemas en máquinas, resonancia, entre otros.
2. Información de la instalación: Se detalla el esquema del sistema, tipos de cargas, condensadores y nivel de trabajo.

3. Inspección visual: Se observa el estado de los equipos y conductores que se encuentren dentro del área de interés.

4. Mediciones eléctricas: Se miden valores RMS, tensión, corriente, distorsión armónica, factor de potencia, entre otros, esto mediante el analizador de redes.

5. Análisis temporal o definitivo: Una vez se tengan los resultados, se llega a una conclusión si es o no necesario darle tratamiento al problema de armónicos (si existen) con un filtro.

V. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos durante el proceso de práctica académica. Los resultados corresponden a las actividades desarrolladas para cumplir con lo establecido por los objetivos, general y específicos, además a lo descrito en la metodología.

En esta sección, se examinan los distintos elementos de la zona operativa donde se llevará a cabo la evaluación de la calidad de la energía. El propósito es identificar la ubicación para conectar el analizador de red y los requisitos específicos de la zona relacionados con el tipo de cargas. Antioqueña de Porcinos SAS cuenta con 3 subestaciones, en este caso se realizó el estudio para la subestación la caldera. Esta subestación se alimenta mediante un transformador de 500 KVA con un nivel de tensión en su devanado secundario de 440 V trifásico y una carga nominal de 850 A. La alimentación de la red llega al tablero de distribución principal, desde donde se derivan dos tableros secundarios de distribución y un tablero de paso, los cuales tiene asociadas 4 cargas al momento de la medida, estas son:

1. Transformador 50kVA 440/220 V
2. Compresor
3. Caldera
4. Canastas



Fig. 1. Cuarto eléctrico subestación la caldera

La Figura 1, ilustra la subestación de la caldera, que constituye el área de la empresa destinada a la aplicación de la metodología de medición de calidad energética, incluyendo los tableros, circuitos y cargas que la conforman. La elección de la subestación de la caldera como el área para el análisis y la implementación del proyecto de mejora se debe a que carece de compensación de armónicos y nunca ha sido objeto de un análisis de calidad de la energía para su cálculo.

Las cargas que se alimentan a un nivel de tensión de 440 V desde el tablero de distribución principal incluyen todo el sistema de la caldera, la máquina lava canasta y el sistema de aire comprimido e iluminación. En la subestación, hay dos transformadores que reducen el nivel de tensión a 120/240 V. El transformador de 50 KVA abastece todo el sistema de iluminación y tomas de servicio 110/220 V disponibles para bombas y otros equipos en esta zona. El transformador de 100 KVA suministra energía a la zona donde se realiza el mantenimiento de la flota de transporte de la empresa.

Dado el elevado número de circuitos en la zona bajo análisis y la presencia de un único analizador de red, se llevará a cabo el análisis de calidad de la energía en un único punto de conexión correspondiente a la alimentación principal, es decir, el transformador de 500 KVA. Por lo tanto, toda la metodología propuesta en este proyecto de mejora está enfocada en una única medición centralizada. En la figura 2, se muestra el tablero principal donde se tomaron las medidas y las características que este tiene.

Nombre de equipo	TABLERO DE DISTRIBUCIÓN	
Ref. / Fecha de Fabricación	MYD-10000200003640	JUNIO / 2019
Tensión Nominal/	440V	
Corriente Nominal / ICC	850 A	50 KA
Frecuencia Nominal	60 Hz	
T. Ambiente	INTERIOR	
Numero de Fases / Hilos	3F	5H
Grado de Protección / O.P.	IP 41	27703-1
Obra	SUBESTACIÓN CALDERAS	



Fig. 2. Características tablero principal

La primera intervención que se tomó fue observar los posibles efectos de los armónicos en cada una de las cargas, en estas observaciones se pretendía detectar sobrecargas, posibles calentamientos, problemas en máquinas y resonancias que estuvieran asociadas a las mismas. Una vez realizadas las observaciones de manera visual, tacto y auditivas, se determinó que sacar conclusiones con base en lo realizado era incurrir en errores dado que estos tenían gran incertidumbre.

Posteriormente, se realizó el proceso de toma de datos de la distorsión armónica durante 20 días calendario, los datos fueron tomados con una periodicidad de un minuto durante el tiempo ya definido, generando un total aproximado de 28.800 datos. Asimismo, para obtener las gráficas pertinentes en cada caso se empleó un código mediante el programa de programación Python.

A continuación, se mencionan los resultados obtenidos de la toma de datos.

Las figuras [3-7]. Muestran la tasa de distorsión armónica de corriente durante el tiempo de medida, los porcentajes de las tasas de distorsión armónicas presentadas en cada una de las figuras son porcentajes con respecto a la corriente fundamental de cada una de las cargas, recordando que la corriente RMS es la suma de la corriente fundamental más las corrientes asociadas a cada uno de los armónicos presentes en el sistema.

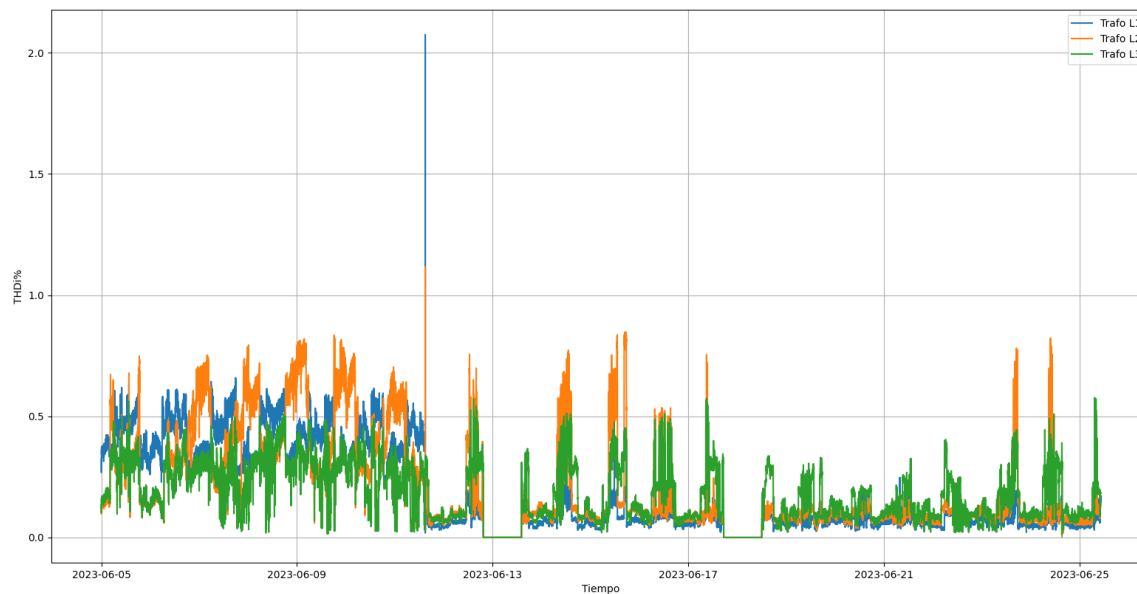


Fig.3. Distorsión armónica de corriente transformador de iluminación.

La carga del transformador representa lo relacionado a la iluminación y tomas de servicio, esta carga no tiene grandes aportes de corrientes armónicas debido a sus características, por tal motivo los porcentajes son mínimos, se logra ver que la tendencia no pasa del 1%.

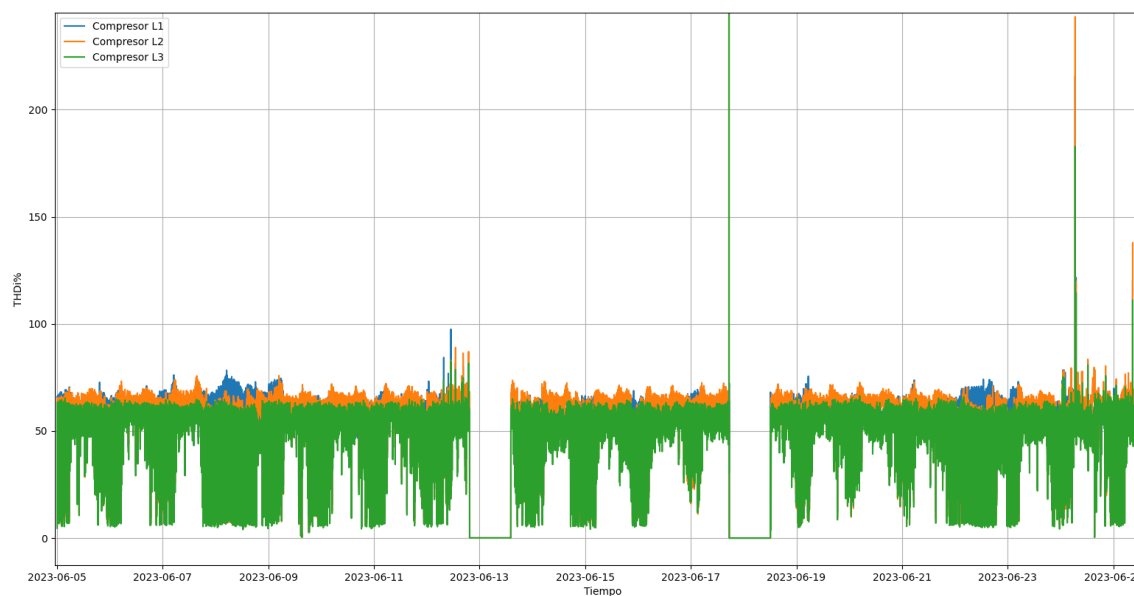


Fig.4. Distorsión armónica de corriente del compresor de sistema neumático.

La carga del compresor representa el suministro de todo el sistema neumático tanto del proceso como de la caldera, tiene un motor de 60 HP y es controlado por un variador de velocidad. Dicha carga tiene una alta tasa de distorsión armónica con respecto a la fundamental, se podría decir que para esta subestación es la segunda carga con más aportes de armónicos.

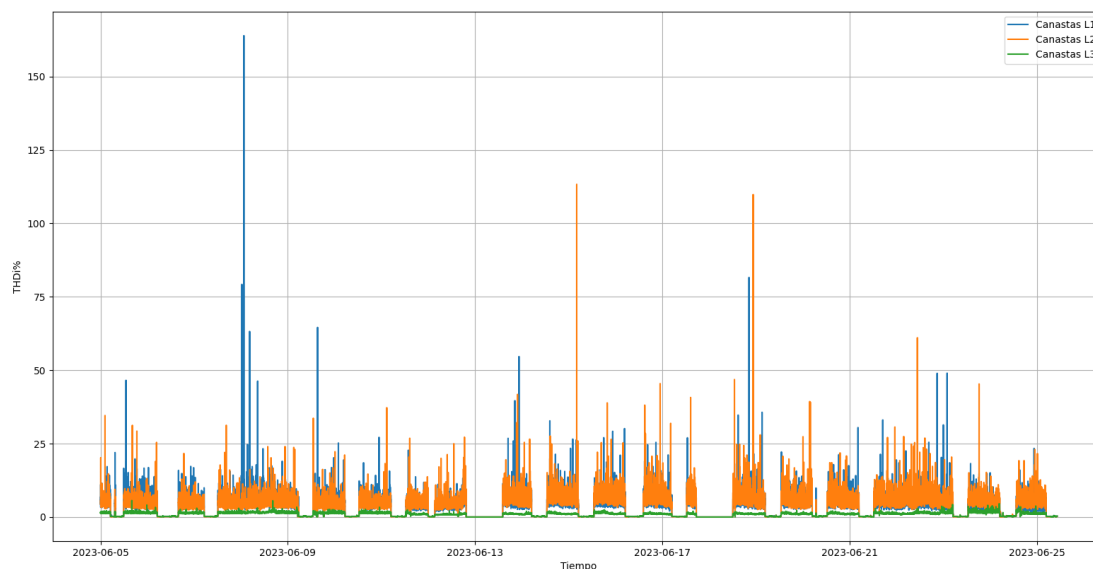


Fig.5. Distorsión armónica de corriente de lava canastas.

La carga de lava canastas cumple la función de lavado y lo hace en tiempos periódicos, tiene contribución de armónicos debido a los motores de las bombas y a sus respectivos variadores de velocidad, el porcentaje de distorsión armónica ronda en un valor promedio del 20% de la corriente fundamental de dicha carga; presenta sobre picos en el momento de iniciar los procesos y posteriormente se estabilizan.

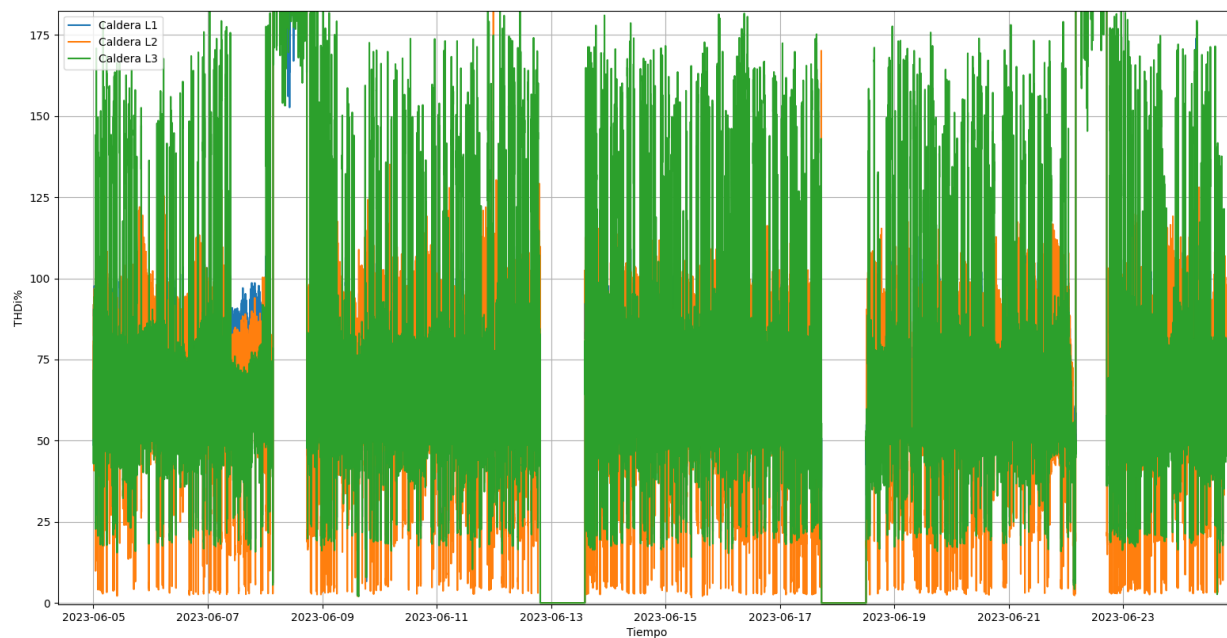


Fig.6. Distorsión armónica de corriente de la caldera.

La carga de la caldera representa la generación de vapor a base de carbón, el cual es el suministro de calefacción de todo el proceso de la planta, tiene un proceso automático el cual los hace con ayuda de los motores y sus variadores. Tiene una alta tasa de distorsión armónica con respecto a la fundamental, para dicha subestación es la carga con más aportes de armónicos, el porcentaje de corriente con respecto a la fundamental se encuentra por encima del 150%, los valores tan altos no son uniformes, pero ocurren con una alta periodicidad.

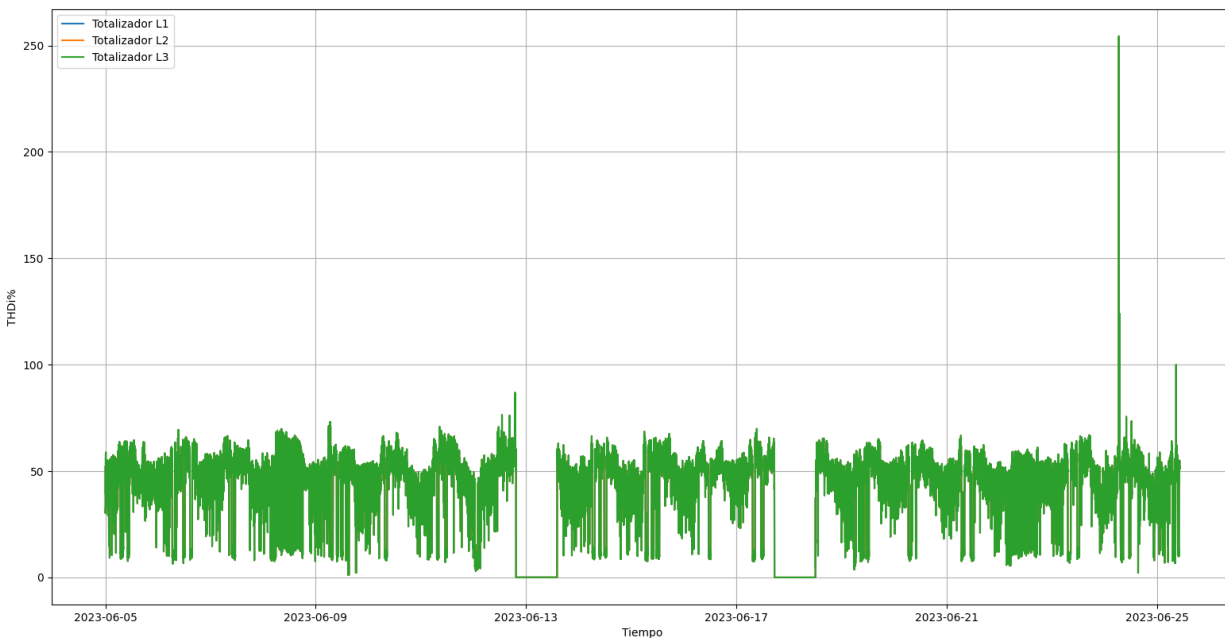


Fig.7. Distorsión armónica de corriente totalizador.

Finalmente, se tiene la medida en el tablero principal, aquí, se evidencian todas las corrientes armónicas de cada una de las cargas, tiene una distorsión que supera el 50% de la corriente fundamental que llega al tablero, lo cual es una corriente considerable teniendo en cuenta que se está sumando a la corriente fundamental y puede conllevar consecuencias en el cable o en los equipos, para este caso es la tasa de distorsión armónica de referencia dado que en el totalizador es el lugar donde se dimensionará el filtro de armónicos.

A continuación, se mostrará el equivalente en amperios de cada uno de porcentajes de distorsión armónicos evidenciados en las cargas y así ver qué tan grande realmente son.

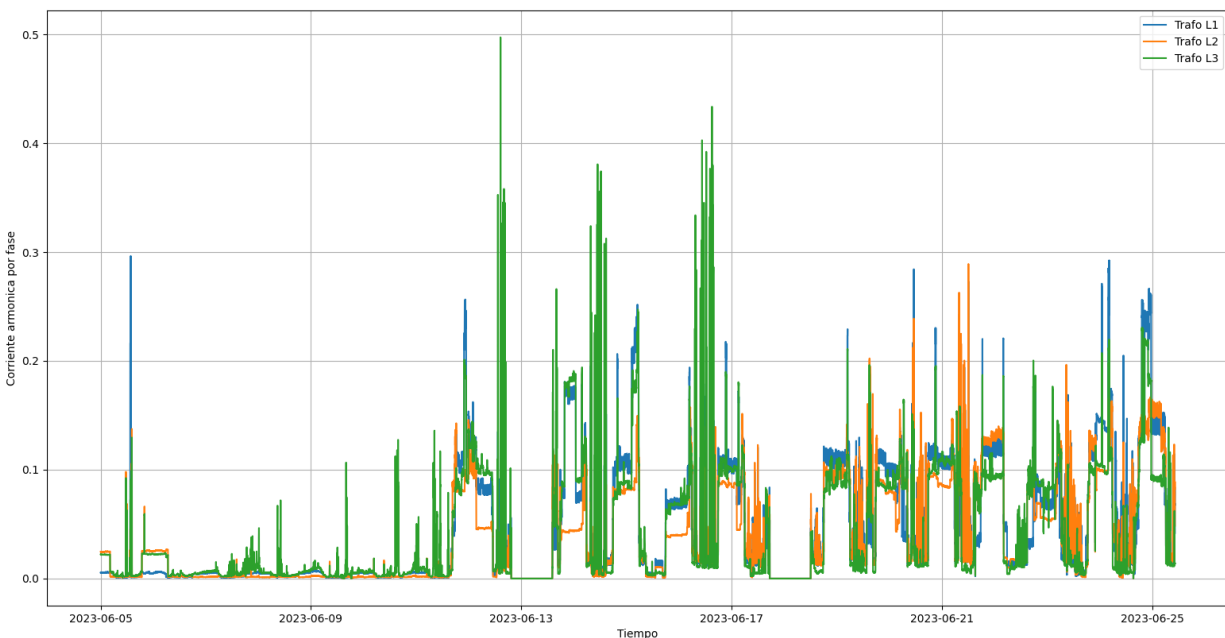


Fig.8. Corriente armónica transformador de iluminación.

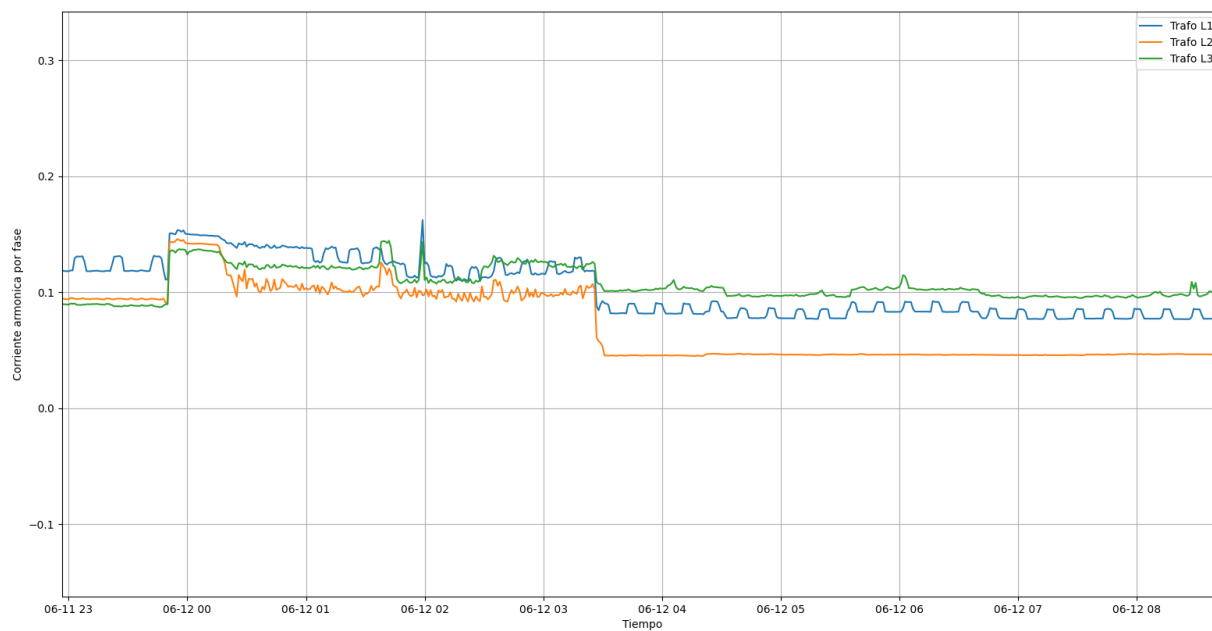


Fig.9. Corriente armónica transformador de iluminación.

Las fig. 8 y fig. 9 representan la corriente armónica por cada una de las fases del transformador, el cual, se definió que era el encargado de alimentar la iluminación y tomas de servicio. La fig. 8 muestra un plano total de la medición con unos determinados picos, dichos

picos se dan cuando se realizan procesos en el lugar. En la fig. 9 se observa el comportamiento de la corriente en horario nocturno, donde no se realizan muchas labores en el recinto. En ambos casos las corrientes asociadas a armónicos son muy bajas debido a las características de las mismas, estas corrientes rondan entre los 0 A y 0.4 A, siendo la carga que menos afecta al sistema.

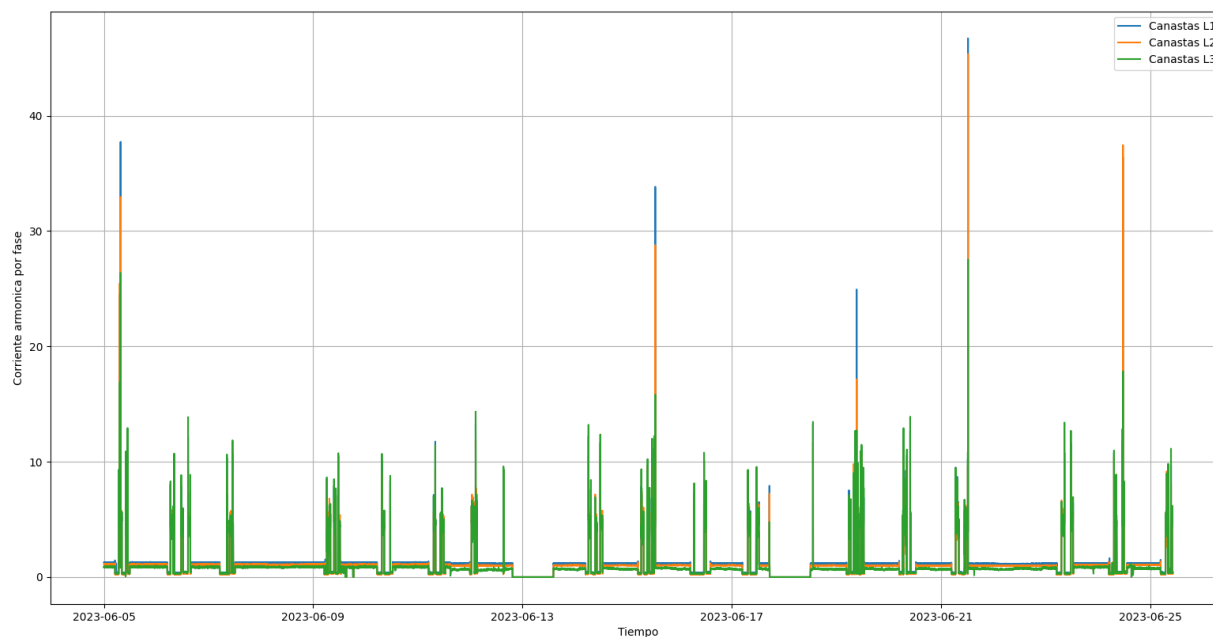


Fig.10. Corriente armónica lava canastas.

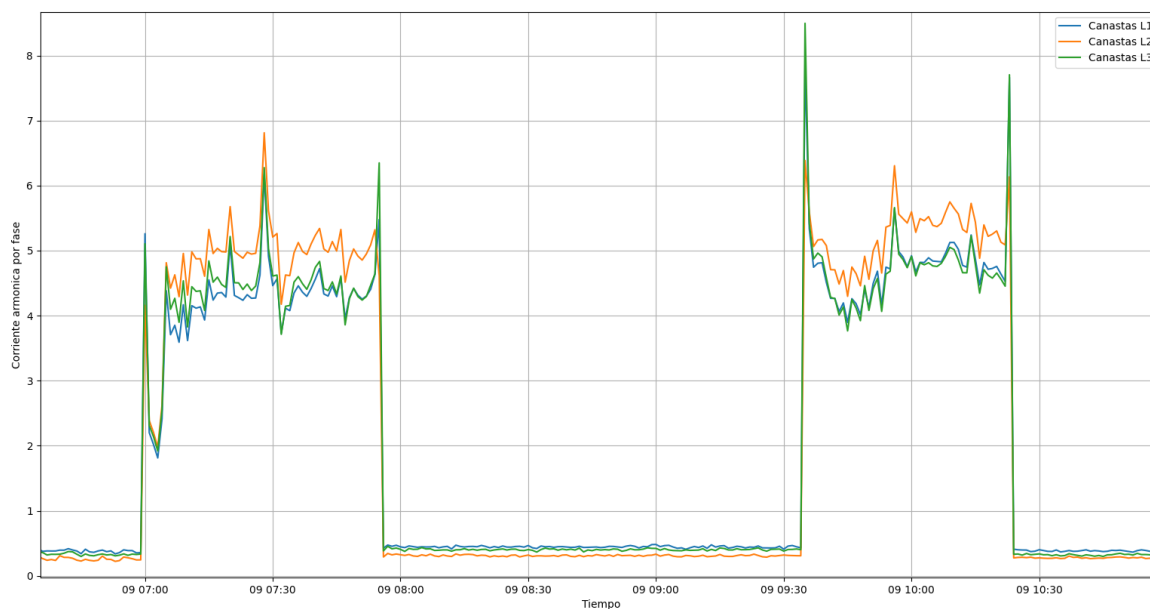


Fig.11. Corriente armónica lava canastas.

Las fig.10 y fig.11 representan la corriente armónica por cada una de las fases del lava canastas. La fig.10 muestra un plano total de la medición con unos determinados picos, los picos se dan cuando se hace el proceso de lavado, el proceso de lavado se realiza en tiempos determinados. En la fig.11 se evidencia que cuando no hay lavado, los armónicos son prácticamente cero, luego se elevan bruscamente cuando inicia el proceso y se mantiene de forma constante hasta que finaliza. El aporte de corriente durante el proceso por cada una de las fases debido a los armónicos ronda entre 0A y 10A; los valores picos que se presentan en las gráficas no tienen un comportamiento continuo, se podría decir que son valores anómalos en comparación con los demás.

La siguiente explicación aplica para las figuras [12-17], la carga del compresor tiene un motor con una demanda de 60 HP, es controlado por un variador de velocidad y la carga caldera tienen una gran cantidad de motores que son controlados por variadores de velocidad. Los motores tienen una particularidad con la frecuencia, a medida que se aumenta la frecuencia por encima de la frecuencia fundamental del motor tienden a disminuir la corriente, entre más grande sea la frecuencia mayor será la pérdida de corriente. Lo anterior, se debe a que el núcleo se empieza a desmagnetizar con el aumento de la frecuencia, haciendo que los motores disminuyan el par mecánico o torque, situación no deseada y es una de las razones de utilizar los variadores de velocidad. Los variadores de velocidad se encargan de aumentar el torque con la tensión y la frecuencia de manera proporcional con el fin de mantener el torque constante. En la fig.13 se logra ver dicho comportamiento; tiene un primer momento en el cual la amplitud de la señal de corriente toma unos picos muy superiores y a su vez muy inferiores; en un segundo momento se logra ver que la amplitud de la corriente se mantiene en un estado más estable en comparación con el momento 1. El momento 1 se da en horarios en los cuales las cargas asociadas se encuentran en una producción mínima, es decir, a partir de las (6 pm a 6 am), el momento 2 se da en horario laboral (6 am a 6 pm).

El primer momento tiene una amplitud mayor de corrientes en comparación con el momento dos a pesar de que esté en el horario de la noche. Lo anterior, se debe a que en horario laboral los variadores de velocidad tienen los motores con una velocidad mayor, lo que implica una frecuencia mayor y en consecuencia se cae la corriente por la desmagnetización del núcleo de los

motores, pero manteniendo el torque con la tensión y frecuencia. Esto se percibe principalmente en el compresor y en el totalizador

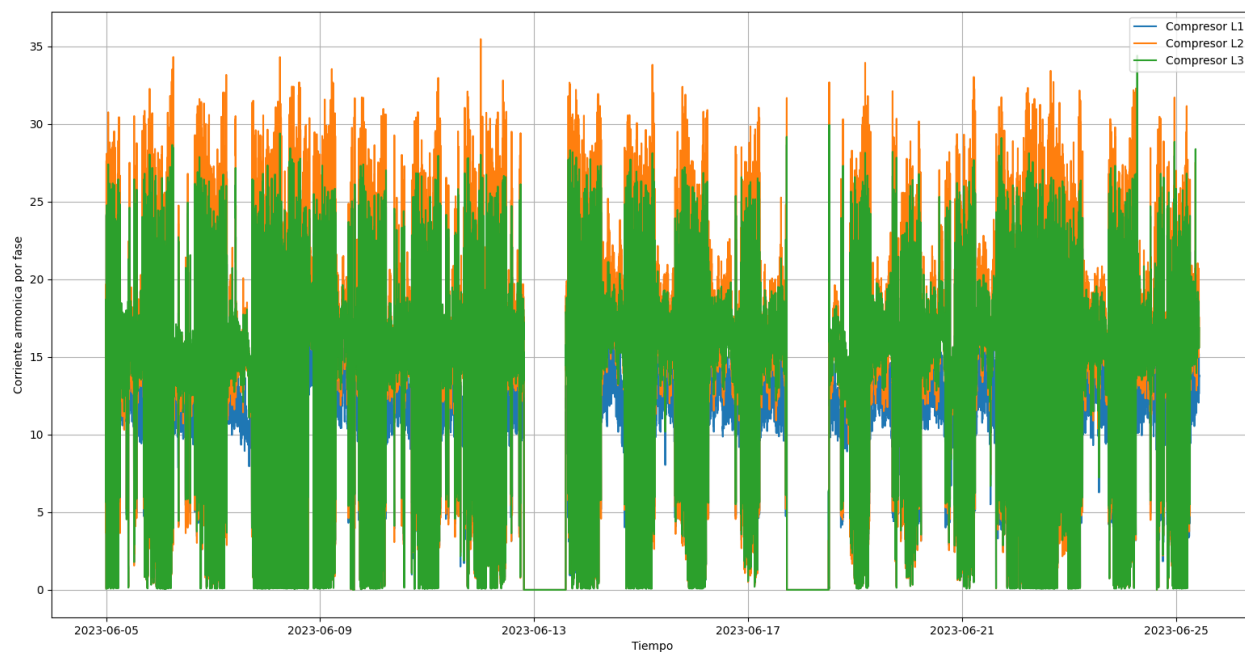


Fig.12. Corriente armónica compresor.

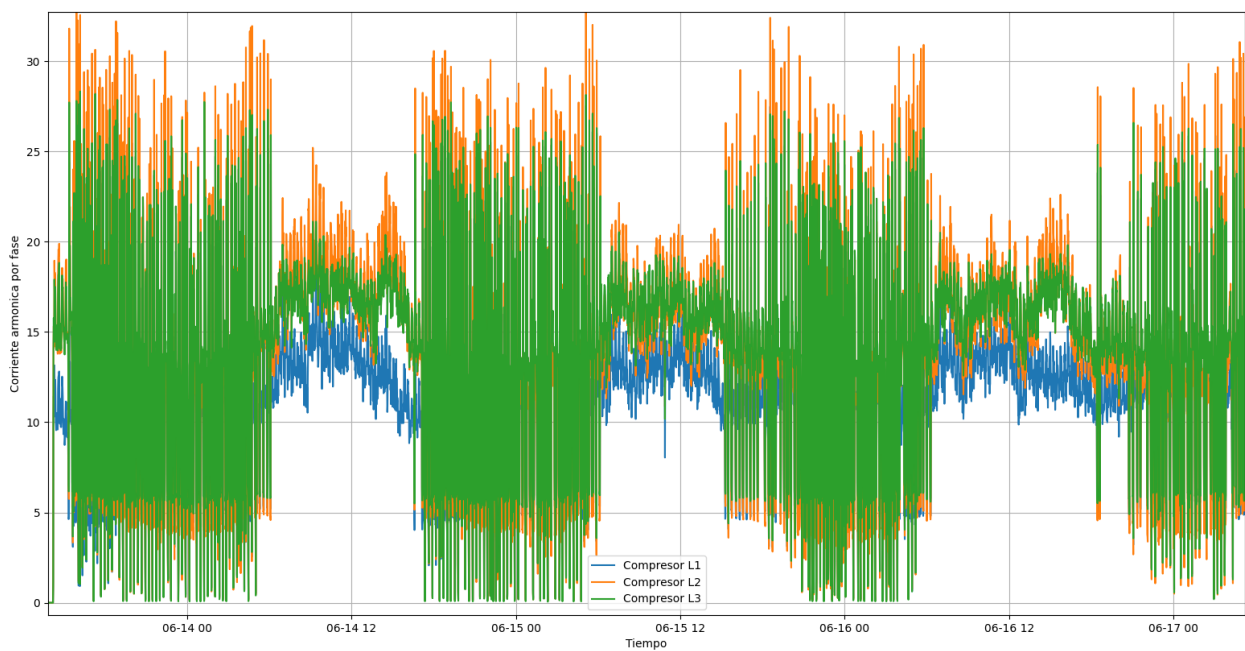


Fig.13. Corriente armónica compresor.



Fig.14. Corriente armónica caldera.

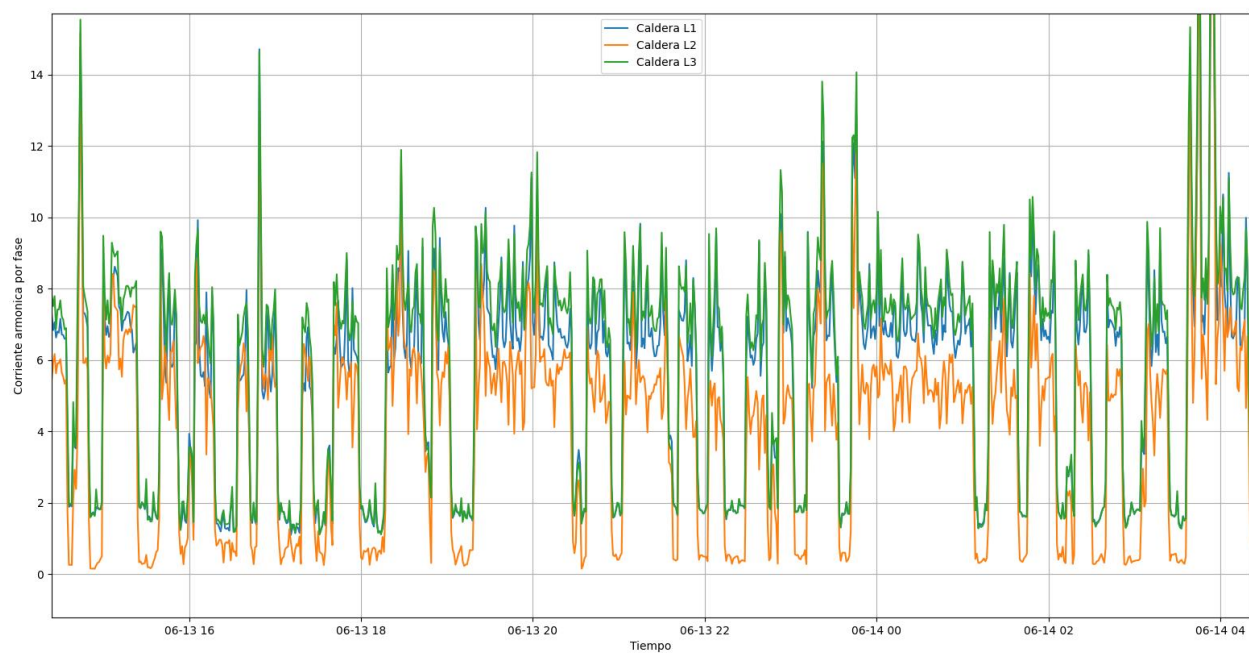


Fig.15. Corriente armónica caldera.



Fig.16. Corriente armónica tablero principal.

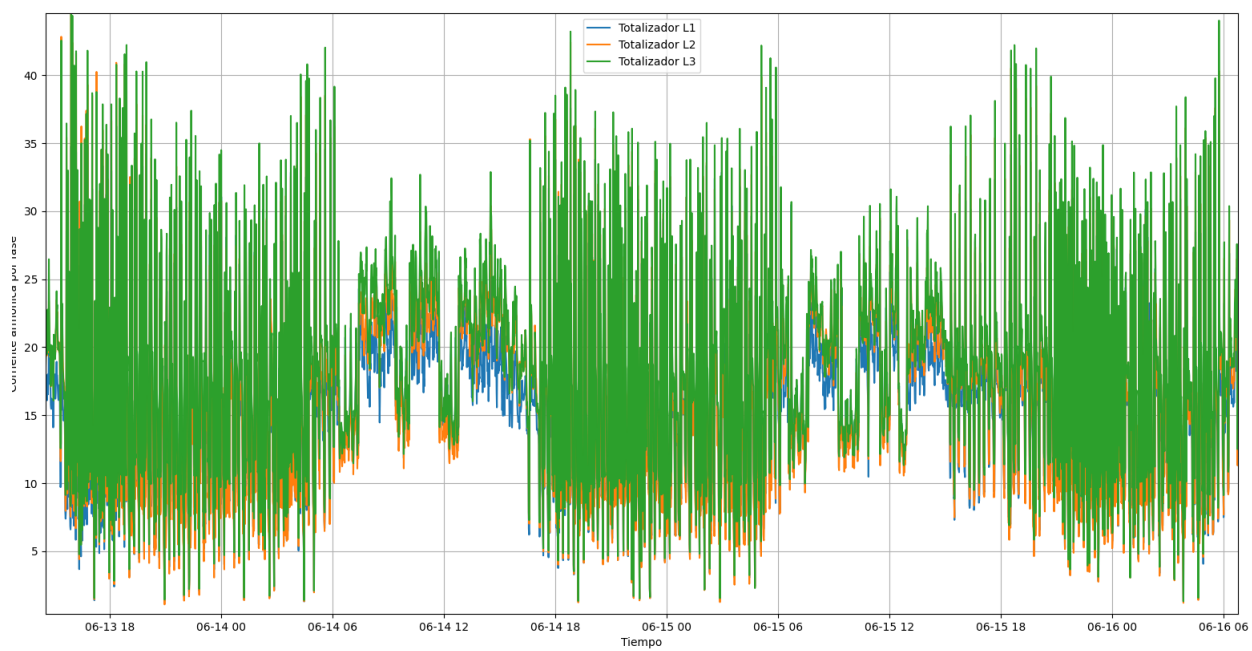


Fig.17. Corriente armónica tablero principal.

Cálculo del Filtro de Armónicos

Se realizó el cálculo del filtro de armónicos en el tablero principal considerando todos los armónicos debidos a cada una de las cargas. Los valores de tasa de distorsión armónica que se emplearon para realizar el cálculo del filtro de armónicos son correspondientes a la posición exacta donde se da el máximo pico no atípico de corriente RMS, comparando cada una de las medidas del totalizador, en este caso se contó con la ayuda del programa python. Se realizó la grafica completa en cada uno de los punto y con ella se determinó el punto de corriente más alta.

En la fig. 16 y fig. 17 el valor de corriente armónica no anormal a las demás medidas toma un máximo de 48.18 A aproximadamente por fase, entonces así.

$$I_{armonico\ fase} = 48.18 \left[\frac{A}{fase} \right]$$

Para elegir el valor de la corriente reactiva, se utilizó el valor de potencia reactiva de fase y se ve la posición exacta en la cual se dió, con el fin de tomar el valor de tensión que corresponda a esa misma posición en cada caso de la medida, como se muestra en la ecuación (17), una vez obtenido el valor más grande, este será el valor que corresponda a la corriente reactiva a tener en cuenta.

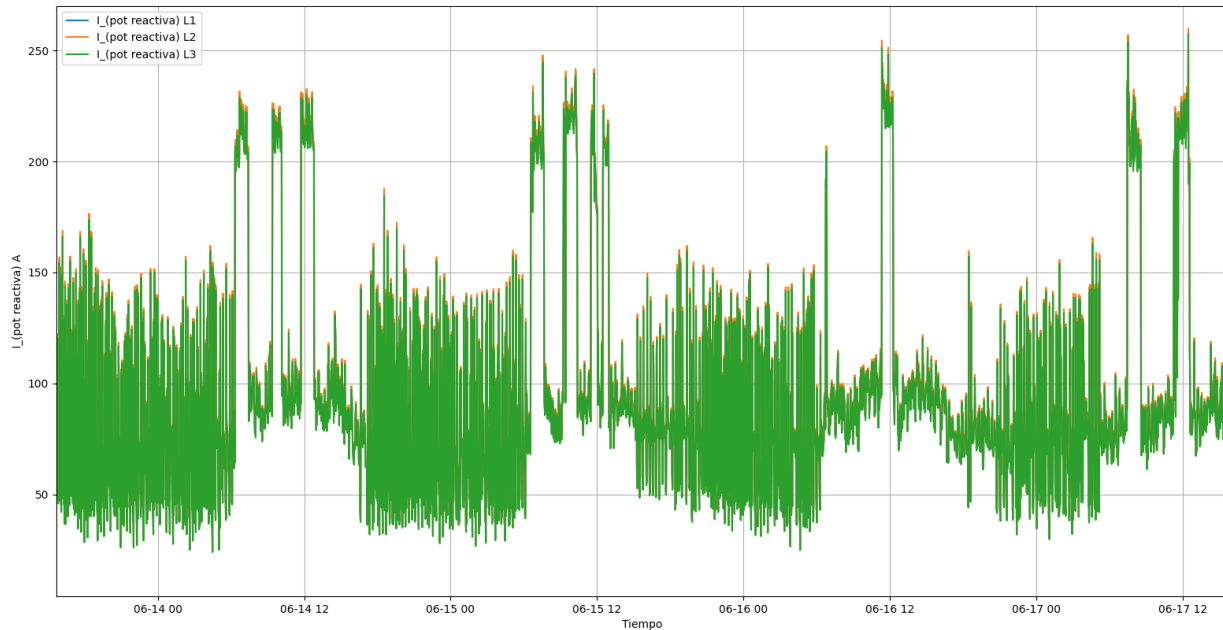


Fig.18. Corriente reactiva tablero principal.

En la figura anterior la corriente máxima perteneciente a la potencia reactiva es de 258.4A, estos son valores que se podrían decir que son atípicos si se comparan con las demás medidas como se observa en la fig.19, el valor más real estaría por 160 A, en este caso se realizó con la corriente 258.4 A para ser conservadores, además porque se logra ver una cierta periodicidad entonces así.

$$I_{pot\ reactiva} = 258.4 [A]$$

Ahora, para el cálculo de la corriente de equilibrado de fases, se debe ver la posición de la corriente por cada fase y ver el momento en que ellas tomen un mayor desequilibrio, en este punto se deben tomar los datos de medidas pertinentes, posteriormente se saca el valor medio de los valores de las figuras y se obtiene lo solicitado en la ecuación (18).



Fig.19. Corriente RMS de totalizador con mayor desequilibrio.

En la fig.20 se logra ver cuando las corrientes por fase RMS tienen el mayor desequilibrio y así obtener la corriente de equilibrado por fases, estos valores por fase son 193.46 A + 170.4 A + 168.8 A, entonces así.

$$I_{\text{equilibrado de fases}} = \text{valor mas grande entre } \begin{cases} I_{\text{media}} - I_{\text{minima}} \\ I_{\text{maxima}} - I_{\text{media}} \end{cases} [A] \quad (18)$$

$$I_{\text{media}} = \frac{193.46 \text{ A} + 170.4 \text{ A} + 168.8 \text{ A}}{3} = 177.5533 [A]$$

$$I_{\text{media}} - I_{\text{minima}} = 177.5533 - 168.8 = 8.7533 \text{ A}$$

$$I_{\text{maxima}} - I_{\text{media}} = 193.46 - 177.5533 = 15.9066 \text{ A}$$

En este caso el valor mas grande es de 15.9066 A, entonces este es el valor que tomaremos. Ahora si se reemplaza en la ecuación (16) se obtienen los siguiente:

$$I_{\text{filtro activo}} = \sqrt{48.18^2 + 254.8^2 + 15.905533^2} = 259.8 \left[\frac{A}{\text{fase}} \right]$$

Los equipos de filtros de armónicos vienen 3 o 4 hilos, esto depende si se tienen cargas monofásicas que estén contribuyendo a los armónicos, es decir que si no se tienen cargas monofásicas que aporten armónicos no es necesario un filtro de 4 hilos, no haría falta el neutro N. Si se pretende que este funcione para cualquier caso se debe colocar un filtro de 4 hilos.

VI. ANÁLISIS

Una vez realizado lo contemplado en la metodología y observando cada una de las cargas de manera independiente, se logra ver que hay una alta contribución de armónicos debido a los motores de inducción y a los variadores de velocidad que estas tienen. Cuando se hace el mismo análisis en el totalizador este presenta una tasa de distorsión armónica aproximadamente entre el 60-70% con respecto a la corriente fundamental, para una corriente de armónicos máxima aproximada de 48.18A por fase. Cuando se analiza estos valores con respecto a la capacidad de transformador, se ve que el transformador está funcionando cerca al 28.39% de su capacidad nominal, entonces si se mantiene el mismo tipo de carga a medida que este se acerque a su capacidad nominal la corriente armónica será mayor y puede lograr afectar al sistema en su debido momento.

VII. CONCLUSIONES

La subestación la caldera tiene cargas con una alta tasa de distorsión armónica, especialmente el compresor y caldera. Para eso es necesario colocar un filtro de armónico enfocado en cada carga o de manera completa dado que tiene en consideración las demás cargas.

Se debe tener en cuenta que el porcentaje de la tasa de distorsión armónica dado en porcentaje es un valor con respecto a la corriente fundamental y no a la corriente RMS, dado que se podría dar una mala interpretación de la información.

Se debe tener en cuenta que los valores atipicos que se presentan en el porcentaje de la tasa de distorsion armonica probablemente se deban a caidas de corriente o voltaje fundamental dado que la ecuacion tiene en el denominador dichas variables, se puede ver en las ecuaciones (13) y (14), por tal razon no se toman esos datos atipicos al momento de realizar el calculo del filtro de armonicos.

Al momento de elegir un filtro de armonicos se debe considerar su capacidad para adaptarse, en este caso los filtros activos pueden ser más eficientes en la corrección de armónicos en comparación con los filtros pasivos en algunas situaciones, dado que funcionan para cualquier armonico y no en un armonico puntual.

REFERENCIAS

- [1]. E. A. Góngora Mendoza, “análisis de la calidad de la energía en la subestación la caldera”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2023.
- [2]. G. Reyes Calderón, Armónicas en sistemas de distribución de energía eléctrica, Monterrey: Universidad Autónoma de Nuevo León, 1996. [En línea]. Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/7622/1/1020115478.PDF>. [Accedido: 26-ago-2023].
- [3]. J. C. Read, "The Calculation of Rectifier and Invertor Performance Characteristics". IEEPt 11, 1945.
- [4]. IEEE Standard 519 - 1992. Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. 1993
- [5]. W. M Grady; G. T. Heydt; A. A. Mahmoud; R. D. Schultz "System Response to Harmonics" EH0221 - 2/84, IEEE 1984.
- [6]. S. Carrasquilla Becerra, Análisis de armónicos en redes residenciales, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/46da6066-1b95-4923-98aa-4c168ed8ec14/content>. [Accedido: 26-ago-2023].
- [7]. IEEE Standard 519 - 1992. Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. 1993