



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE GUAYAQUIL**  
**CARRERA ELECTRICIDAD**

**ANÁLISIS DE CALIDAD DE LA ENERGIA ORIENTADO A DISTORCIONES  
ARMONICAS EN EL BLOQUE E DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA  
SALESIANA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero Eléctrico**

**AUTORES: CÉSAR AUGUSTO ACHILIE LASTRE**  
**CARLOS NATAHEL MOLINA AVILES**  
**TUTOR: ING. GARY OMAR AMPUÑO AVILÉS, PhD.**

**Guayaquil-Ecuador**  
**2024**

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Carlos Natahel Molina Aviles con documento de identificación N°1206210161 y César Augusto Achilie Lastre con documento de identificación N°0804447910; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

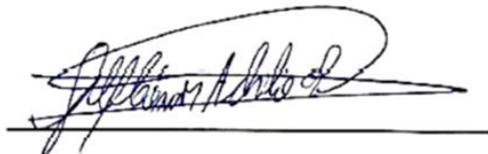
Guayaquil, 29 de febrero del año 2024

Atentamente,



Carlos Natahel Molina Aviles

1206210161



César Augusto Achilie Lastre

0804447910

## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Carlos Natahel Molina Aviles con documento de identificación No. 1206210161 y César Augusto Achilie Lastre con documento de identificación No. 0804447910, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico : “ANÁLISIS DE CALIDAD DE LA ENERGIA ORIENTADO A DISTORCIONES ARMONICAS EN EL BLOQUE E DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

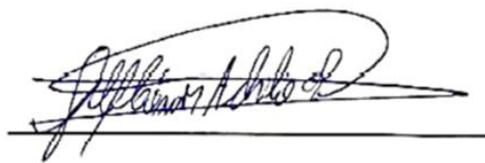
Guayaquil, 29 de febrero del año 2024

Atentamente,



Carlos Natahel Molina Aviles

1206210161



César Augusto Achilie Lastre

0804447910

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Ing. Gary Omar Ampuño Avilés con documento de identificación No. 0922639752, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “ANÁLISIS DE CALIDAD DE LA ENERGIA ORIENTADO A DISTORCIONES ARMONICAS EN EL BLOQUE E DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA”, realizado por Carlos Natahel Molina Aviles con documento de identificación No. 1206210161 y Cesar Augusto Achilie Lastre con documento de identificación No. 0804447910, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico de titulación que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 29 de febrero del 2024

Atentamente,



---

Ing. Gary Omar Ampuño Avilés

0922639752

## **DEDICATORIA**

Esta tesis se la dedico a mis padres Mariuxi y Augusto porque me han ayudado a lo largo del camino, por su apoyo incondicional y buena crianza, permitiéndome cristalizar este sueño, agradezco por sus palabras de aliento y consejos para no darme por vencido y alcanzar mis metas, a mi hermana Belén a quien con mucho cariño y estima, espero que interprete esto como una referencia e inspiración en su futuro académico, que las cosas pueden lograrse con disciplina y constancia, a Lulita mi abuela que siempre me apoyó y confió en mí, por último a Dios por permitirme cumplir este sueño y ser un Padre que me ha guiado a lo largo de la vida con amor, sabiduría y rectitud.

**César Augusto Achilie Lastre**

En dedicatoria a mi familia quienes con su soporte, cariño y consejo ayudaron a la formación de la persona que soy ahora, especial agradecimiento a mis padres que me han acompañado y con su infinita sabiduría me han guiado para ser una persona echa y derecha, por enseñarme el valor del trabajo duro, las recompensas de la perseverancia y la humildad con respeto, por aquellos que ya no están, pero han dejado una huella en mí a lo largo de mi vida. A aquellos que me inspiraron con su carácter y profesionalidad por darme la ambición de ir por más, sin más que decir solo puedo culminar diciendo que siempre estaré eternamente agradecido con todos y cada uno de ustedes.

**Carlos Natahel Molina Aviles**

## RESUMEN

En la actualidad, la búsqueda de instalaciones eléctricas más eficientes ha impulsado el aumento de procesos automatizados, lo cual conlleva al incremento de cargas no lineales, mismas que inyectan distorsiones armónicas que afectan la impedancia del sistema, causando problemas a los equipos conectados. Para asignar responsabilidades entre los consumidores y distribuidores se han creado normativas a escala global, con el fin de regular los rangos permitidos de la forma de onda de voltaje y corriente suministrado, así como la distorsión aceptable en el sistema, por lo general haciendo referencia a la normativa IEEE 519-1992.

De acuerdo con esto y la situación presentada en el Edificio “E” de la Universidad Politécnica Salesiana, es pertinente realizar un análisis de calidad de energía, por cuestiones de la presencia de un alto índice de armónicos en la red eléctrica de este, evidenciados por la falla de equipos electrónicos que han tenido una reducción significativa de su vida útil, así como el sobredimensionamiento del transformador de distribución del edificio.

Una vez llevado a cabo el muestreo con el analizador de redes Fluke 438 II, por un periodo de medición de dos días continuos, configurado para el registro de valores de voltaje, corriente, factor de potencia, desequilibrios, así como la detección de armónicos.

Mediante el uso del Software Power Log 430-II, se prosiguió con la descarga, análisis de los datos recopilados y evaluar tanto el estado de la red, como de distorsiones armónicas, estableciendo si cumplen los parámetros establecidos por la normativa.

Con el debido muestreo del edificio, se observó una alta incidencia de corrientes armónicas de entre el 20 al 30% de THDI, más aún en los armónicos de orden 5to, 7mo y 9no armónico que están fuera de los límites permitidos según normativa ARCERNNR.

Se descubrió que el factor de potencia disminuye significativamente, hasta valores de 0.65 esto entre las 23h00 y 6h00, periodo en el cual no hay actividad dentro de las instalaciones.

Se simuló el diagrama unifilar del edificio “E” en el software especializado ETAP, en donde colocó cargas no lineales como lámparas led para que las gráficas de índices de armónicos sean similares a los datos reflejados en el equipo de medición, también se puso un filtro activo paralelo a las cargas para la mitigación de armónicos de corriente donde obtuvimos una reducción importante del 27% al 1,5% de THDI.

## ABSTRACT

Currently, the search for more efficient electrical installations has driven the increase in automated processes, which leads to the increase of non-linear loads, which inject harmonic distortions that affect the impedance of the system, causing problems for connected equipment. To assign responsibilities between consumers and distributors, regulations have been created on a global scale, in order to regulate the permissible ranges of the voltage and current waveform supplied, as well as the acceptable distortion in the system, usually with reference to the IEEE 519-1992 standard.

In accordance with this and the situation presented in Building "E" of the Salesian Polytechnic University, it is pertinent to carry out an analysis of power quality, due to the presence of a high harmonic index in the electrical network of the latter, evidenced by the failure of electronic equipment that has had a significant reduction in its useful life. as well as the oversizing of the building's distribution transformer.

Once sampling has been carried out with the Fluke 438 II network analyzer, for a measurement period of two continuous days, configured for the recording of voltage, current, power factor, imbalance values, as well as harmonic detection.

Through the use of the Power Log 430-II Software, we continued with the download, analysis of the data collected and evaluated both the state of the network and harmonic distortions, establishing if they comply with the parameters established by the regulations.

With the proper sampling of the building, a high incidence of harmonic currents of between 20 and 30% of THDI was observed, even more so in the harmonics of the 5th, 7th and 9th harmonic order that are outside the limits allowed according to ARCERNNR regulations.

It was discovered that the power factor decreases significantly, to values of 0.65 between 11:00 p.m. and 6:00 a.m., a period in which there is no activity within the facilities.

The one-line diagram of the building "E" was simulated in the specialized ETAP software, where nonlinear loads were placed as LED lamps so that the harmonic index graphs are similar to the data reflected in the measuring equipment, an active filter parallel to the loads for the mitigation of current harmonics was also placed where we obtained a significant reduction from 27% to 1.5% of THDI.

## PREFACIO

La propagación de cargas no lineales debido al uso de computadoras, lámparas fluorescentes normales y compactas, entre otros, en edificios comerciales tiene efectos desfavorables en la calidad suministro eléctrico, el rendimiento y la eficiencia en general de las redes de distribución, debido a que estas cargas inyectan armónicos en las redes. Estos efectos adversos se conocen desde la década de 1980 y los estudios realizados que tratan de estos temas son abundantes. La incidencia de los armónicos en la red eléctrica provoca anomalías, que a su vez producen mayor consumo, calentamiento de equipos y caídas de tensión [1].

Estas cargas sustraen corrientes no sinusoidales del suministro y conducen a una distorsión del voltaje y a su vez afectan el consumo eficiente de la energía y la "Power Quality, PQ". Estos equipos electrónicos son fundamentales en la generación de frecuencias armónicas en los sistemas de potencia. Tomando en cuenta que, las frecuencias armónicas siempre han estado presentes en los sistemas de energía, es necesario el monitoreo del suministro eléctrico, la cuantificación, la identificación para la resolución de problemas y mitigación de las contrariedades de la calidad de la energía. Las investigaciones de calidad de la energía a menudo requieren el uso de instrumentación de precisión para poder plantear las posibles soluciones [2].

Analizando el caso de estudio realizado en la universidad de la ciudad del Cabo [3] en cual fue focalizado en el quinto piso del edificio Menzies el cual consta de 35 oficinas y tres grandes laboratorios de cómputo. Al realizar las mediciones de calidad de energía que se registraron con un analizador de calidad de energía HT Vega 78 desde el tablero de distribución del piso, por lo cual, se obtuvo que la perturbación armónica total a nivel de voltaje medida en el Edificio Menzies fue mayor alcanzando un máximo de 3.91% en la línea 3 y un mínimo de 2.69% en la línea 2. La mayor distorsión se debe a la mayor cantidad de no- cargas lineales conectadas a la red del piso. Esto fue provocado por la conexión de cargas como lámparas fluorescentes lo cual aumenta el contenido de armónicos. Sin embargo, con las PC es todo lo contrario. Los niveles armónicos son decrecientes cuando se conectan PCs sucesivas que podrían ser el resultado de efectos de diversidad

Al igual que este caso la Universidad Politécnica Salesiana también cuenta con un edificio comercial el cual concentra el mayor número de laboratorios técnicos de las carreras Eléctrica,

Electrónica, Mecatrónica y Automotriz, cuyos laboratorios cuentan con equipos que generan un elevado índice de armónicos por sus cargas no lineales.

Como última referencia se tiene que la mayoría de los edificios construidos en la década de los 60s a 70s presentan actualmente una sobrecarga debido a una creciente de equipos electrónicos reemplazando cargas convencionales como la iluminación entre otras máquinas, además provocando una disminución del factor de potencia, para llegar a la solución de esta problemática conlleva una fuerte inversión económica utilizando filtros para poder mitigar los armónicos en la red [4].

## ÍNDICE

<b>CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....</b>	<b>ii</b>
<b>CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.....</b>	<b>iii</b>
<b>CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....</b>	<b>iv</b>
<b>1 Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1 Planteamiento del Problema.....	1
1.2 Justificación.....	1
1.3 Objetivos .....	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos .....	2
<b>2 Marco Teórico Referencial.....</b>	<b>3</b>
2.1 Calidad de Energía. ....	3
2.2 Definición de los Armónicos.....	4
2.3 Clasificación de los armónicos.....	4
2.4 Corriente fundamental.....	4
2.5 Magnitudes de Distorsión en Voltaje y corriente.....	5
2.6 Corriente RMS o eficaz.....	5
2.7 Voltaje RMS o Eficaz .....	5
2.8 Tasa de distorsión armónica en corriente THDI (Total Harmonic Distortion) .....	6
2.9 Distorsión de demanda total .....	6
2.10 Cargas Lineales y no lineales .....	7
2.11 Distorsión de demanda total .....	7
2.12 Triángulo de potencias .....	8
2.13 Pérdidas de Energía Eléctrica.....	9

Carga Resistiva.....	9
Carga Inductiva.....	10
Carga Capacitiva.....	11
2.14 Pérdidas <b><i>I<sup>2</sup>R</i></b> .....	11
2.15 Efecto Joule .....	11
2.16 Fuentes de perturbaciones Armónicas.....	12
2.17 Efectos de la inyección de armónicos en la red eléctrica.....	12
2.18 Efectos de los Armónicos en los Transformadores.....	12
2.19 Costes Técnicos.....	14
2.20 Transformador Trifásico .....	14
2.21 Partes de un transformador.....	14
2.22 Funcionamiento del Transformador trifásico.....	15
2.23 Condiciones de Resonancia.....	15
2.24 Resonancia paralela.....	16
2.25 Niveles de armónicos Permitidos Según las Normativas dispuestas por el ARCERNNR. .....	17
2.25.1 Distorsión Armónica de Voltaje.....	18
2.25.2 Límites admisibles de distorsiones armónicos de Tensión.....	18
2.25.3 Distorsión armónica de corriente.....	19
2.25.4 Límites admisibles de distorsiones armónicas de Corriente.....	20
2.26 Dimensionamiento físico del transformador.....	20
2.27 Filtro Armónico.....	21
2.27.1 Filtro Armónico Pasivo.....	21
2.27.2 Filtro Armónico Activo.....	22
2.27.3 Filtro armónico híbrido.....	23
<b>3 Área de Estudio .....</b>	<b>25</b>
3.1 Distribución del edificio.....	26

3.2	Diseño del tablero principal .....	28
3.3	Diseño de cada tablero de distribución .....	28
3.4	Diagrama Unifilar del Bloque E de la Universidad Politécnica Salesiana. ....	30
3.5	Dimensiones físicas del transformador .....	31
3.6	Plano civil eléctrico del cuarto de transformador del Bloque “e” .....	32
3.7	Datos de placa del transformador .....	33
3.8	Demanda Facturable.....	33
<b>4</b>	<b>Descripción de los Equipos de medición y softwares de estudio.....</b>	<b>34</b>
4.1	Analizador de redes Fluke 438 II .....	34
4.1.1	Características del equipo .....	35
4.2	Fluke Power Log 430 II. ....	36
4.2.1	Herramientas del Programa. ....	37
4.3	Descarga de datos recopilados por el Analizador Fluke 438. ....	44
4.3.1	Acceso a los archivos de memoria Fluke 438 II.....	45
<b>5</b>	<b>Metodología Y Desarrollo .....</b>	<b>46</b>
5.1	Método analítico para dimensionamiento de la disipación del transformador.....	46
5.2	Cálculo de la elevación de la temperatura en el transformador .....	46
5.3	Dimensionamiento del cuarto de transformador. ....	49
5.4	Procedimientos para realizar el estudio de la calidad de energía del edificio.....	50
5.5	Instalación del Equipo de medición .....	51
5.6	Cálculo del factor K. ....	54
<b>6</b>	<b>Análisis de resultados obtenidos.....</b>	<b>55</b>
6.1	Voltaje de Línea- neutro por cada fase.....	56
6.2	Voltaje de Línea - Línea.....	57
6.3	Corriente por fase incluyendo la corriente por neutro.....	58
6.4	Frecuencia y desequilibrio .....	59
6.4.1	Frecuencia del Sistema .....	59

6.4.2 Desequilibrio de Tensión.....	60
6.4.3 Desequilibrio de Corrientes. ....	61
6.5 Factor de Potencia (FP).....	62
6.6 Energías activas reactivas y aparentes .....	63
6.7 Armónicos tensión.....	64
6.8 Armónicos de corriente .....	65
6.9 Cálculos Y dimensionamiento del Filtro armónico.....	65
6.10 Simulación de la red Eléctrica del Edificio “E” de la Universidad Politécnica Salesiana. .....	68
<b>7 Conclusiones y Recomendaciones.....</b>	<b>70</b>
7.1 Conclusiones. ....	70
7.2 Recomendaciones.....	71
7.3 Anexos.....	72
<b>Bibliografía. ....</b>	<b>74</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Pirámide de la calidad de energía [5] . . . . .	3
Figura 2. Proceso distorsión armónica [8]. . . . .	4
Figura 3. Onda fundamental [9]. . . . .	5
Figura 4. Carga lineal. La corriente y la tensión siempre son iguales a lo largo de la línea de su impedancia. . . . .	7
Figura 5. Carga no lineal de una resistencia controlada por SCR en la que la corriente y el voltaje no son proporcionales . . . . .	7
Figura 6. Triángulo de potencias [12]. . . . .	8
Figura 7. Triángulo de potencia, con presencia de armónicos [12] . . . . .	9
Figura 8. Gráfica ondas de Voltaje y corriente de una carga netamente Resistiva [11]. . . . .	10
Figura 9. Gráfica ondas de voltaje y corriente de una carga inductiva [11]. . . . .	10
Figura 10. Gráfica de ondas de Voltaje y corriente de una carga Inductiva [11]. . . . .	11
Figura 11. Efecto joule en una cocina eléctrica observándose la incandescencia de tono rojo. . . . .	12
Figura 12. Relación reducción de la capacidad de transformadores y carga no lineal alimentada. . . . .	13
Figura 13. Diagrama unifilar de una planta industrial con cargas lineales y no lineales [11]. . . . .	16
Figura 14. Límites de distorsión de voltaje y corriente IEEE 519-1992 [15]. . . . .	17
Figura 15. Implementación de un Filtro de armónicos Pasivo [18]. . . . .	21
Figura 16. Implementación de un filtro de armónicos Activo [18]. . . . .	22
Figura 17. Interpretación visual del funcionamiento de un filtro activo en serie [19]. . . . .	23
Figura 18. Diagrama de compensación de un filtro activo en paralelo [20]. . . . .	23
Figura 19. Diagrama de conexión de un filtro híbrido en serie [20]. . . . .	24
Figura 20. Diagrama de conexión de un filtro híbrido en paralelo. . . . .	24
Figura 21. Ubicación del edificio E Universidad Politécnica Salesiana, sede Guayaquil, imagen tomada con Google Earth. . . . .	25
Figura 22. Diagrama unifilar eléctrico del Bloque “E” . . . . .	30
Figura 23. Cuarto de transformador Edificio E, Universidad Politécnica Salesiana, sede Guayaquil. . . . .	31
Figura 24. Plano Civil eléctrico en 3D del cuarto de transformador del Bloque “E”. . . . .	32
Figura 25. Plano Civil eléctrico en 2D del cuarto de transformador de Bloque “E”. . . . .	32

Figura 26. Datos de placa del transformador de 750 KVA, edificio E Universidad Politécnica Salesiana. ....	33
Figura 27. Registro de consumo de potencia aparente del transformador [23]. ....	34
Figura 28. Analizador de redes Fluke 438 II [24]. ....	35
Figura 29. Pantalla de bienvenida del Fluke Power Log 430 II. ....	36
Figura 30. Menú desplegable de la opción Ficheros del Programa Fluke Power Log 430 II. ....	37
Figura 31. Pantalla de inicio del Fluke Power Log 430 II. ....	38
Figura 32. Herramientas de análisis de datos del Fluke Power Log 430 II. ....	38
Figura 33. Despliegue de la opción “Resumen” del Fluke Power Log 430 II. ....	39
Figura 34. Ejemplo de la opción “Tabla” en el Fluke Power Log 430 II. ....	40
Figura 35. Ejemplo de las gráficas de “Voltaje y Corriente vs Tiempo” del Software Power Log 430 II. ....	40
Figura 36. Ejemplo de las gráficas obtenibles en la Opción “Estadísticas” obtenidas del Software Power Log 430 II. ....	41
Figura 37. Ejemplo de las Gráficas obtenibles en la opción “Frecuencia/Desequilibrio” obtenidas del Software Power Log 430 II. ....	42
Figura 38. Ejemplo de las gráficas obtenibles de la opción “Potencia” permite visualizar PF, DPF y VAR obtenidas del Software Power Log 430 II. ....	42
Figura 39. Ejemplo de las gráficas obtenibles en la opción “Energía” se visualizan parámetros como: KWh, KVARh y KVAh del Software Power Log 430 II. ....	43
Figura 40. Gráficas de la Opción armónicos de tensión y corriente obtenidas del Software Power Log 430 II. ....	44
Figura 41. Ejemplo de las gráficas obtenibles de la opción armónicos en “Potencia” del Software Power Log 430 II. ....	44
Figura 42. Menú de transferencia de datos Tarjeta SD Fluke 430 obtenidas del Software Power Log 430 II. ....	45
Figura 43. Termostato del transformador de 750 KVA del edificio E Universidad Politécnica Salesiana. ....	49
Figura 44. Diagrama de conexión del analizador de redes al transformador. ....	51
Figura 45. Ingreso al curto de transformador para instalación del equipo de medición Fluke 438 II. ....	52
Figura 46. Lecturas en tiempo real valores de potencia activa, reactiva, aparte y factor de potencia en el momento que se realizó la instalación del equipo de medición. ....	53

Figura 47. Valores de armónicos de corriente al momento que se realizó la instalación del Equipo de medición. ....	53
Figura 48. Valores de Armónicos de voltaje al momento que se realizó la instalación de equipo de medición. ....	53
Figura 49. Voltaje de Línea-Neutro por fase. ....	56
Figura 50. Voltaje de Línea- línea ....	57
Figura 51. Corriente por cada fase incluyendo el neutro. ....	58
Figura 52. Frecuencia del sistema. ....	59
Figura 53. Gráfica de desequilibrio de Voltajes. ....	60
Figura 54. Gráfica de desbalance de corrientes. ....	61
Figura 55. Diagrama de Factor de potencia. ....	62
Figura 56. Energías activas, reactiva y aparente. ....	63
Figura 57. Armónicos de tensión. ....	64
Figura 58. Armónicos de corriente. ....	65
Figura 59. Filtro activo paralelo modelo AFQe-4WF-200C marca Circutor [30]. ....	67
Figura 60. Diagrama Unifilar de la red Eléctrica del Edificio "E". ....	68
Figura 61. Gráfica de la onda fundamental del Edificio "E" Afectada por los Armónicos 5to y 7mo. ....	69
Figura 62. Simulación de cargas no lineales en el edificio sin el filtro Armónico Activo. ....	69
Figura 63. Simulación de cargas no lineales en el edificio con el uso del filtro Armónico Activo. ....	70

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Límites máximos de armónicos de voltaje (% del voltaje nominal) [16]. ....	19
Tabla 2. Niveles máximos de distorsión armónica de corriente [16]. ....	20
Tabla 3. Tabla de transformadores Trifásicos 15 a 2000 KVA [26]. ....	47
Tabla 4. Dimensiones del cuarto de transformador [21]. ....	50

# **1 INTRODUCCIÓN**

## **1.1 Planteamiento del Problema.**

La falta de un estudio profundo de la calidad de la energía orientado específicamente a distorsiones armónicas conlleva a la mala gestión y deficiencia de la calidad de energía provocando fallos en los equipos de un edificio, sobre todo en edificaciones multipropósito con gran variedad de laboratorios. Para esto se tomó como caso de estudio el Bloque E de la Universidad Politécnica Salesiana, puesto que se ha observado un problema recurrente relacionado con las distorsiones armónicas presentes en el suministro eléctrico, al realizar la levantamiento de información del cuarto de transformador se pudo evidenciar un severo calentamiento provocado por la elevada temperatura del transformador, evidenciando la presencia de corrientes parasitas y/o armónicas, que sumadas al posible mal dimensionamiento del transformador provoca una considerable cantidad de pérdidas en forma de calor.

## **1.2 Justificación**

Con este proyecto se aportará a la mejora de la calidad de la energía del bloque E y permitirá que los equipos que se encuentran en las instalaciones cumplan con su tiempo de vida útil, aportará una experiencia significativa en el uso de este tipo de equipos tan sensibles, los cuales realizan el muestreo de una instalación eléctrica con los que se observa los ciclos de trabajo en una industria o zona comercial, en los cuales puede haber picos de consumo de potencia, corrientes elevadas, sobrevoltajes en fin un sin número de variables que deben ser consideradas al hacer este tipo de estudios. El análisis de la calidad de la energía se ha convertido en un tema prioritario en el sector industrial y comercial, para evitar grandes pérdidas energéticas y económicas que afectaría a las producciones de las empresas y sus instalaciones.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

- Analizar la calidad de la energía en el edificio E de la Universidad Politécnica Salesiana mediante el analizador de redes Fluke 438 II para el muestreo del nivel de armónicos del edificio.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Obtener los parámetros asociados al análisis y registro de los datos de potencia, energía, armónicos y perturbaciones mediante el uso de instrumentación especializada en calidad de energía con el fin de visualizar el estado de las instalaciones.
- Simular el diseño de un filtro de armónico, mediante el uso de softwares para observar el comportamiento de la red eléctrica del edificio.
- Proponer una solución factible para la edificación, mediante las simulaciones en software especializado, con la finalidad de mitigar la cantidad de armónicos.

## 2 MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

### 2.1 Calidad de Energía.

La calidad de energía eléctrica hace referencia al suministro energético de equipos y dispositivos con condiciones adecuadas para el mantenimiento y funcionamiento sin perjudicar su rendimiento ni provocar fallas en sus dispositivos. Esto depende de la estabilidad del voltaje, frecuencia y continuidad del servicio en los sistemas eléctricos. Para lo cual, es necesario realizar pruebas técnicas en los bancos de transformadores o tableros de distribución con el fin de recopilar información para posteriormente evaluar la situación energética del edificio [5].

La mala calidad de energía ocurre cuando se presentan perturbaciones como variaciones de voltaje, interrupciones y armónicos en sistemas eléctricos. Gran parte de los problemas en la calidad de energía están relacionados con las instalaciones eléctricas, no con el suministro eléctrico [5].

Existen dos tipos básicos de problemas en la calidad de energía, aquellos que causan interrupciones en cargas eléctricas o circuitos completos, y aquellos que provocan pérdidas en el funcionamiento de equipos eléctricos y el sistema de suministro eléctrico como se muestra en la figura 1 [6].



Figura 1. Pirámide de la calidad de energía [5].

Fuente: Los autores.

El estudio de la disposición del suministro eléctrico es factible tanto para las compañías eléctricas distribuidoras, así como para los clientes, al permitir el análisis de problemas y encontrar adecuadas resoluciones factibles. Cargas no senoidales, conmutaciones, manejos de cambio de carga y deterioros en equipos pueden causar mala calidad en el sistema eléctrico.

Estas fallas generan costos adicionales de energía y paradas de operación, a su vez incrementa su ineficiencia, lo que la convierte en un tema crítico a abordar [7].

## 2.2 Definición de los Armónicos

Los componentes armónicos representan voltajes o corrientes que siguen patrones sinusoidales que se expresan como múltiplos enteros de la frecuencia fundamental en la cual opera el sistema eléctrico. La forma alterada de la onda es desglosada en la combinación de la señal de frecuencia base y sus múltiplos. La deformación armónica tiene su origen en las cargas no lineales presentes en los dispositivos dentro de un sistema de energía. La cantidad de armónicos presentes se evalúa utilizando un valor llamado Tasa de Distorsión Armónica (THD) [8].

Dando como resultado lo mostrado a continuación en la figura 2:

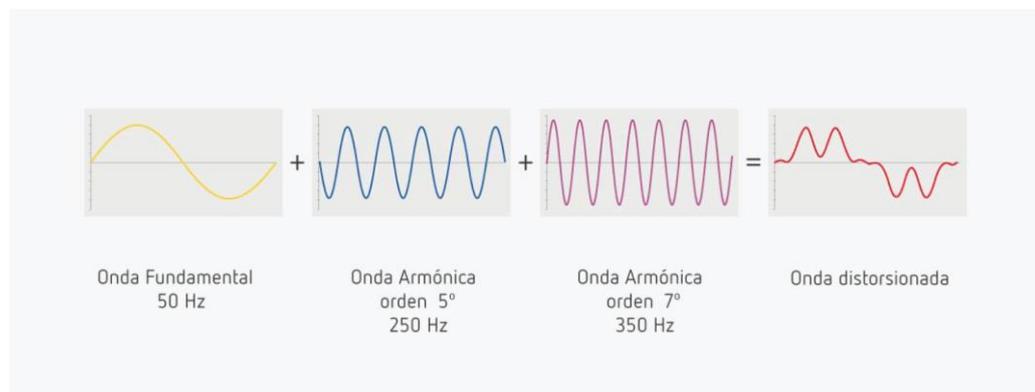


Figura 2. Proceso distorsión armónica [8].

Fuente: Los autores.

## 2.3 Clasificación de los armónicos

- **Armónicos pares:** Son los armónicos donde la frecuencia fundamental va con un número entero par, es decir, 2,4,6 etc.
- **Armónicos impares:** Son armónicos los cuales son frecuencias que se enuncian como múltiplos desiguales de la frecuencia base, como 3, 5, 7, 9 y 11.

## 2.4 Corriente fundamental

La corriente que fluye a través de un circuito o sistema, abarcando tanto la corriente activa como la reactiva a la frecuencia estándar del sistema, que usualmente es de 50 o 60 Hz, excluyendo cualquier corriente armónica adicional.

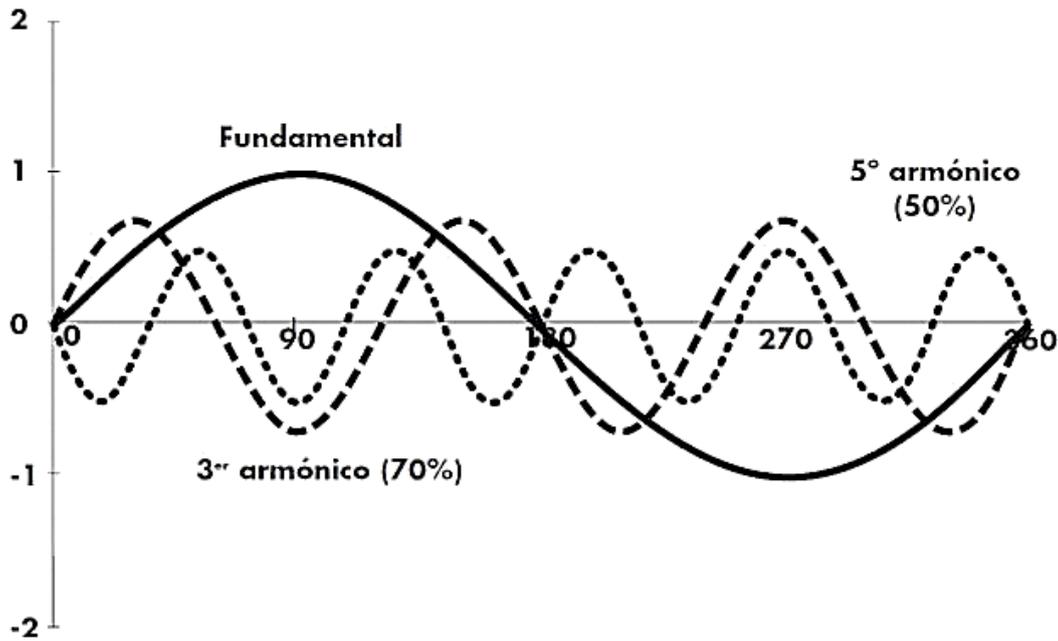


Figura 3. Onda fundamental [9].

Fuente: Los autores.

## 2.5 Magnitudes de Distorsión en Voltaje y corriente

Para medir el nivel de las perturbaciones en una señal, se deben establecer medidas específicas que indiquen su tamaño y disponer de herramientas de medición apropiadas. A continuación, se proporcionan las siguientes fórmulas:

## 2.6 Corriente RMS o eficaz

Se define como la corriente total que atraviesa la red eléctrica, encerrando tanto la corriente activa, reactiva y armónica. Donde  $I_h$  se define como la corriente del orden del armónico y  $h$  se comprende como el orden del armónico presente en la red.

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$$

## 2.7 Voltaje RMS o Eficaz

El voltaje RMS es una forma de expresar un voltaje variable en términos de un valor equivalente de voltaje continuo, es una magnitud que figura el valor efectivo de un voltaje variable. Donde  $V_h$  se define como el voltaje del orden del armónico y  $h$  se comprende como el orden del armónico presente en la red.

$$V = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2}$$

## 2.8 Tasa de distorsión armónica en corriente THDI (Total Harmonic Distortion)

Porcentaje que señala la proporción de corriente armónica residual con respecto a la corriente fundamental que fluye a través de un circuito o sistema [10]. El THD se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$TDH = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100$$

Donde  $V_h$  se define como el voltaje del orden del armónico,  $h$  se comprende como el orden del armónico presente en la red e  $I_1$  se comprenden como la corriente fundamental del sistema

## 2.9 Distorsión de demanda total

Se trata de la proporción entre la corriente armónica y la capacidad máxima de carga de corriente. Este criterio de medida establece los niveles aceptables de perturbaciones en la corriente, según lo definido en la regulación IEEE 519.

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} * 100\%$$

TDD= Distorsión de demanda total

$I_h$ = Magnitud de la armónica individual

$h$ = Orden armónico

$I_L$ = La máxima demanda de corriente básica de carga, se determina tomando el promedio máximo mensual de la demanda de corriente durante los últimos 12 meses, o puede ser estimada.

## 2.10 Cargas Lineales y no lineales

Una carga lineal es una carga que, al aplicarse voltaje, su representación de señal de corriente es prácticamente idéntica, con diferencia de que se encuentra desplazado su ángulo en el tiempo

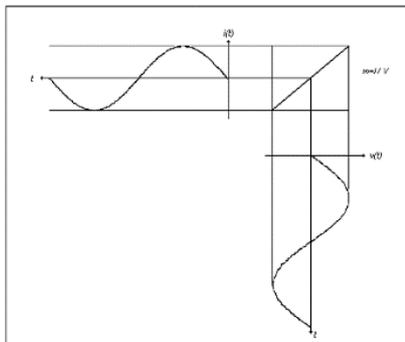


Figura 4. Carga lineal. La corriente y la tensión siempre son iguales a lo largo de la línea de su impedancia.

Fuente: Los autores.

En el caso de las Cargas no lineales, cambian su valor de impedancia según el voltaje aplicado, debido a esto, el espectro de onda de la corriente no va a ser sinusoidal.

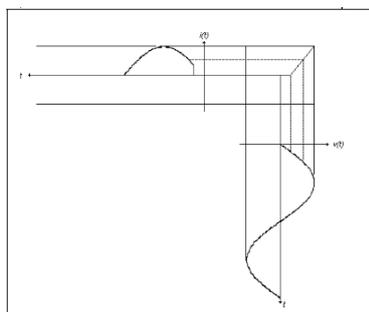


Figura 5. Carga no lineal de una resistencia controlada por SCR en la que la corriente y el voltaje no son proporcionales

Fuente: Los autores.

## 2.11 Distorsión de demanda total

Cuando se llevan a cabo mediciones de armónicos en redes eléctricas, es típico observar altos niveles de DTH en casos de baja carga. Estos niveles generalmente no son relevantes para el desempeño de los dispositivos, ya que la energía distorsionada circulante también es baja. Para una evaluación precisa de estas circunstancias, se introduce el concepto de TDD, que define los márgenes aceptables de distorsión de corriente de acuerdo con la normativa IEEE 519 [11].

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} * 100\%$$

$I_h$  = Magnitud de la armónica individual

h= Orden armónico

$I_L$ = La demanda máxima de la corriente principal de carga se determina como el promedio máximo mensual de la solicitud de corriente durante los últimos 12 meses, o puede ser aproximada.

## 2.12 Triángulo de potencias

Para fundamentar dichos conceptos mencionados anteriormente, es importante recordar el triángulo de potencias en el cual:

S: Potencia Aparente

Q: Potencia Reactiva

P: Potencia Activa

En la gráfica mostrada anteriormente observamos que la P se encuentra en el eje real, la Q en el eje imaginario y la S es la resultante.

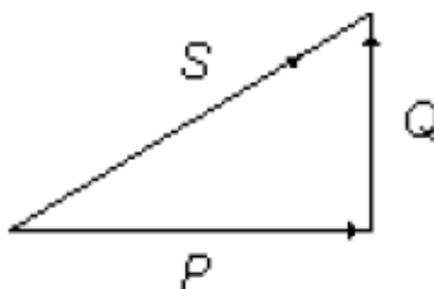


Figura 6. Triángulo de potencias [12].

Fuente: Los autores.

Esta expresión es utilizada para calcular el factor potencia para efectos de facturación, este sistema funciona cuando es un sistema lineal, cuando no exista distorsión armónica.

Con la existencia de muchas cargas no lineales, las cuales van a generar muchos armónicos de corriente, que con el tiempo distorsionarán las ondas de voltaje, no obstante; el triángulo de potencias con la presencia de armónicos provoca la aparición del vector desplazamiento mostrado a continuación:

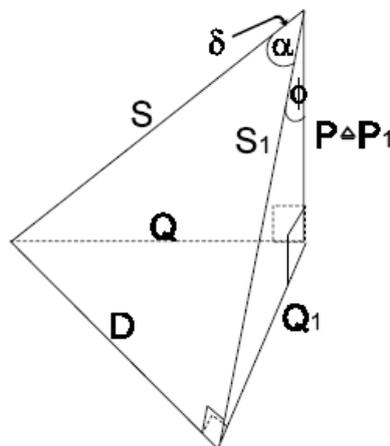


Figura 7. Triángulo de potencia, con presencia de armónicos [12]

Fuente: Los autores.

Es importante mencionar que al haber presencia de armónicos en el circuito eléctrico, debe ser representados en el triángulo de potencia como el Vector desplazamiento y que interpretado de la siguiente manera en la relación de potencias como:

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

$$S_1^2 = P^2 + Q_1^2$$

$$Q^2 = Q_1^2 + D^2$$

$$S^2 = S_1^2 + D^2$$

$$S^2 = P^2 + Q_1^2 + D^2$$

### 2.13 Pérdidas de Energía Eléctrica

Para empezar a instituir las diferentes tipologías de pérdida de energía es necesario identificarlos con los tipos de carga las cuales pueden ser:

#### Carga Resistiva.

Son aquellas cargas en las que la tensión y la corriente se encuentran en fase debido a la presencia de una resistencia en donde se convierte la energía eléctrica en energía lumínica o calorífica mas no en movimiento, como ejemplo lámparas incandescentes, secadores, etc.

Debido a esto tenemos un factor de potencia igual a uno.

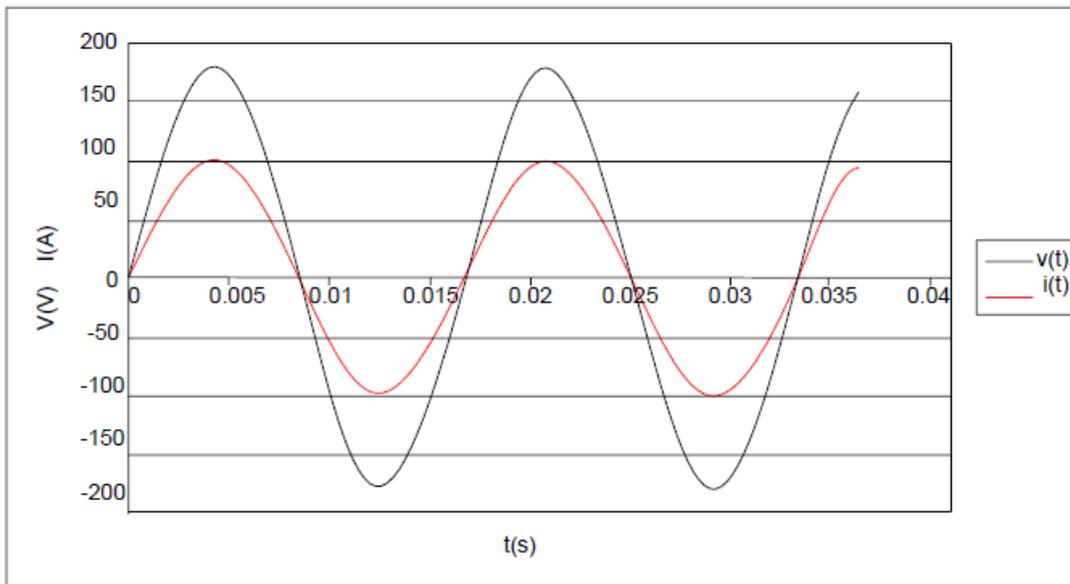


Figura 8. Gráfica ondas de Voltaje y corriente de una carga netamente Resistiva [11].

Fuente: Los autores.

### Carga Inductiva

En el caso de las cargas inductivas estas utilizan la energía eléctrica para la creación de campos magnéticos que interactúan entre sí para crear un movimiento o trabajo, como motores eléctricos, además en el caso de estas cargas no disipan la energía produciendo un atraso de la corriente con respecto al voltaje cómo es posible visualizar a continuación en la Figura 9.

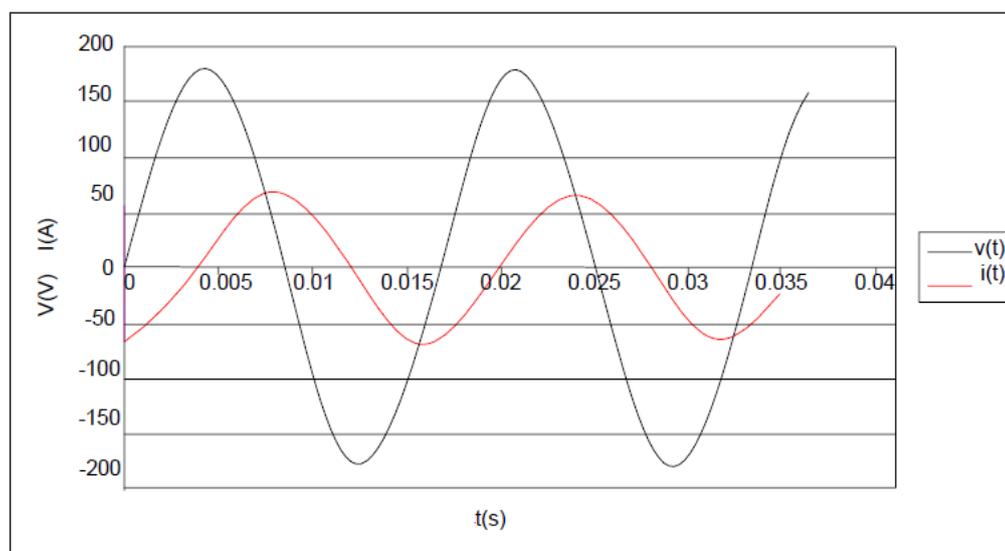


Figura 9. Gráfica ondas de voltaje y corriente de una carga inductiva [11].

Fuente: Los autores.

### Carga Capacitiva.

Son cargas que representan la incidencia de condensadores en la red, los cuales suministran de energía a la red, este desfase hace que la corriente de la carga supere el voltaje, provocando que una corriente se encuentre adelantada al voltaje.

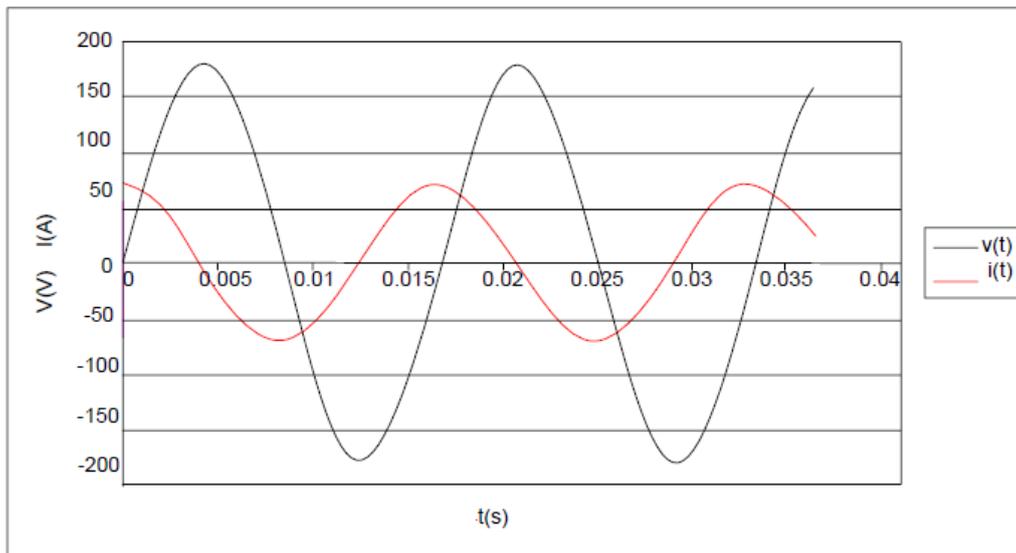


Figura 10. Gráfica de ondas de Voltaje y corriente de una carga Inductiva [11].

Fuente: Los autores.

### 2.14 Pérdidas $I^2R$

Es un hecho de que, al incrementar la corriente eficaz con la incidencia de los armónicos, los desgastes por energía serán mayor, según la siguiente ecuación:

$$P = RI^2RMS = R * (I^2RMS1 + I^2RMS2 + I^2RMS3 \dots \dots)$$

$$P = RI^2RMS1 + R * (I^2RMS2 + I^2RMS3 + \dots)$$

Dichas pérdidas son visibles con el sobrecalentamiento de los instrumentos y cableado, en particular, al acudir el cuarto de transformador del edificio E para realizar un levantamiento de información presentó un severo calentamiento en el cuarto lo que indica que están existiendo muchas pérdidas por el efecto Joule.

### 2.15 Efecto Joule

Es un fenómeno inalterable en el que se establece que si por un conductor pasa corriente eléctrica parte de esa energía se va a transformar en calor, por los choques internos de los átomos del conductor provocando la elevada temperatura de este [13].



*Figura 11. Efecto joule en una cocina eléctrica observándose la incandescencia de tono rojo.*

*Fuente: Los autores.*

### **2.16 Fuentes de perturbaciones Armónicas**

Las causas de los armónicos del sistema de potencia pueden ser grandes fuentes de perturbación conectadas a la red o agregadas cargas no lineales más pequeñas que tienen características correlacionadas. Estas perturbaciones pueden decaer con la distancia desde su fuente, pero también puede amplificarse dependiendo de la configuración de la red [11].

### **2.17 Efectos de la inyección de armónicos en la red eléctrica.**

La contaminación armónica en una red rara vez afecta significativamente a consumidores, sin embargo, tiene una confiabilidad y una implicación de costos sustancial para la infraestructura de la red, causando un sobrecalentamiento tanto en equipos como conductores, lecturas incorrectas del medidor y pares oscilantes en generadores.

La propagación armónica y su ubicación dependen de la topología y la impedancia específica de la red. La reconciliación de los resultados con el modelo de topología de malla es necesaria para evaluar el impacto de perturbaciones armónicas a nivel del sistema. Esto conduce a una mejor gestión y planificación de la red, así como a la implementación de restricciones apropiadas en futuros estándares normativos y códigos de red [11].

### **2.18 Efectos de los Armónicos en los Transformadores.**

Comúnmente en los transformadores, la capacidad máxima se fija en señales sinusoidales de tensiones balanceadas y corrientes que no sobrepasen el 0.5% de distorsión armónica total (THD), manteniendo una medida específica que cumpla con el límite de aumento de temperatura. Estos criterios se detallan en la placa de identificación. A lo largo de su operación,

los transformadores de potencia enfrentan tensiones térmicas, eléctricas y mecánicas que afectan su sistema de aislamiento de papel y aceite. El aumento excesivo de la temperatura, la presencia de oxígeno y humedad, junto con las tensiones eléctricas, son los principales agentes que aceleran este proceso de deterioro. Los esfuerzos mecánicos, derivados de la magnetización del núcleo y los cortocircuitos, así como los ácidos y residuos producidos por la descomposición del aceite, se consideran factores secundarios. La degradación gradual del sistema aislante de papel y aceite eventualmente conduce a la avería del transformador de potencia.

Las corrientes derivadas de armónicos producen un incremento extra de temperatura en las bobinas de los transformadores debido al aumento de pérdidas provocadas por corrientes de Foucault, las cuales dependen tanto de la corriente efectiva en circulación como del cuadrado de la frecuencia de la señal. Cuando alimentan cargas no lineales, se debe considerar una capacidad reducida en relación con su capacidad nominal, siguiendo el estándar ANSI/IEEE C.57.110. Aunque la distorsión en la tensión provoca la aparición de pérdidas agregadas en el núcleo, su impacto es mínimamente relevante.

En la situación de nuestro caso de estudio, el incremento de la temperatura en los transformadores que alimentan cargas no lineales, incluso si operan con una corriente de carga por debajo de su capacidad nominal, los expone a posibles fallos anticipados [11].

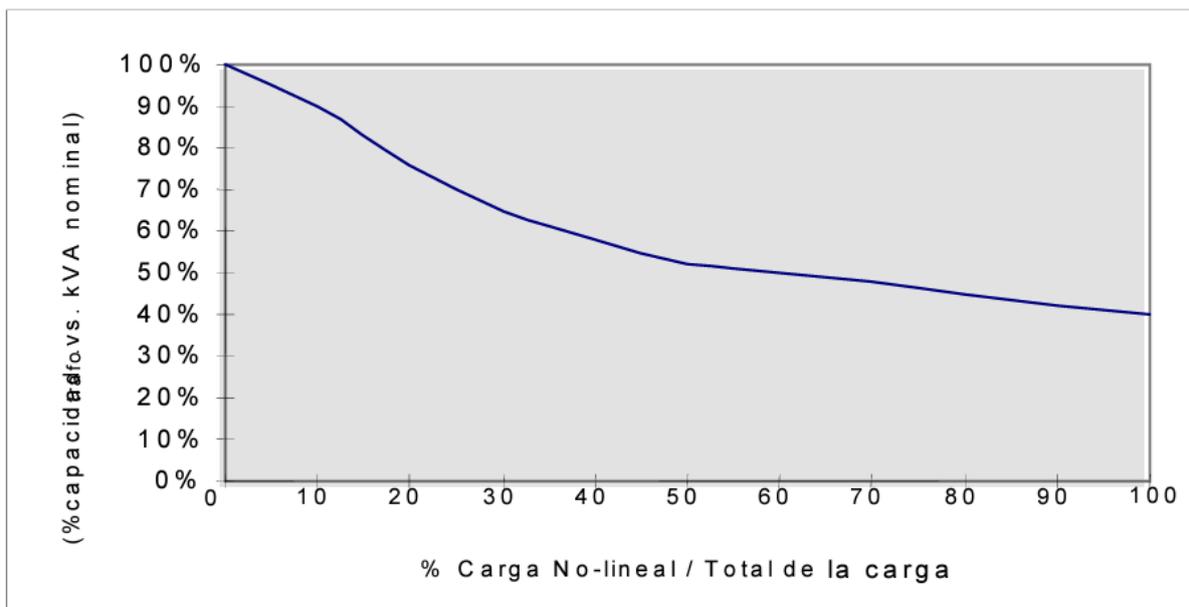


Figura 12. Relación reducción de la capacidad de transformadores y carga no lineal alimentada.

Fuente: Los autores.

La potencia efectiva del transformador se disminuye hasta el 50% de su capacidad nominal cuando alrededor del 70% de su carga consiste en dispositivos no lineales, especialmente en transformadores de 440/220V que alimentan completamente equipos electrónicos. Sin embargo, en transformadores de distribución, esta disminución es menos drástica gracias a la anulación de los armónicos en cargas diferentes [11].

### 2.19 Costes Técnicos

Los armónicos, aunque pueden parecer inofensivos a simple vista, estos pueden generar una serie de costes técnicos significativos en una red eléctrica. Algunos de estos costes técnicos incluyen:

- Perdidas de potencias por efecto Joule en líneas de distribución eléctrica
- Sobre carga de alteradores.
- Sobre carga en instalaciones eléctricas.
- Inhabilitación de los transformadores.
- Perdidas eléctricas en máquinas magnéticas.
- Incremento de corrientes parasitas y perdidas de histéresis.

### 2.20 Transformador Trifásico

Son componentes eléctricos para la distribución de la energía eléctrica, sirven para aumentar o disminuir el voltaje alterno, sin modificar su potencia [14].

### 2.21 Partes de un transformador

- **Núcleo:** Ubicado en el interior del transformador es en donde se crean los campos magnéticos producidos por lo devanados.
- **Bobinas:** Son un conjunto de espiras hechas por hilos de cobre enrollados alrededor del núcleo, a su vez, de ser las encargadas de producir el cambio de voltaje; según el número de vueltas que tenga. Entre mayor sea el número de espiras mayor va a ser el voltaje inducido.
- **Aislantes:** Todos los componentes mencionados anteriormente, se encuentran separados entre sí por aislantes, para evitar cualquier tipo de cortocircuito al interior del transformador.
- **Tanque:** Es el depósito que protege a los devanados y núcleo de factor externos, aparte de contener el líquido refrigerante.

- **Reguladores de tensión:** Son los encargados de modificar la tensión de salida que ofrece el transformador, modificando el número de vueltas para proporcionar el voltaje requerido según la demanda.
- **Respiradores:** Mantiene seco el aceite del transformador y elimina la humedad de las bolsas de aire.
- **Aceite:** Sus funciones principales son aislamiento y refrigeración. Como aislante evita que se produzcan cortocircuito y arcos eléctricos demasiados grandes que pueden afectar el funcionamiento del elemento. Como refrigerante transportando el calor del núcleo y de los bobinados [14].

### **2.22 Funcionamiento del Transformador trifásico.**

El transformador opera conforme a la ley de inducción de Faraday, que establece que cuando un conductor de cobre atraviesa un campo magnético, se produce un voltaje inducido. En resumen, el voltaje inducido en un circuito cerrado es proporcional a la tasa de cambio en el tiempo del flujo magnético que atraviesa una superficie con el circuito cerrado como límite [14].

### **2.23 Condiciones de Resonancia**

Una condición resonante es cuando un sistema cambia de inductivo a capacitivo o viceversa, provocando problemas como corrientes elevadas y sobre tensiones lo cual disminuye el tiempo de vida útil de los elementos eléctricos [11].

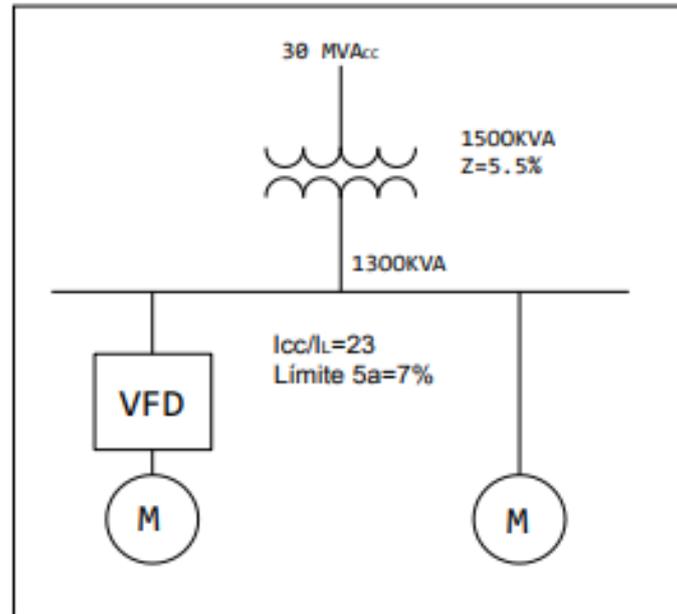


Figura 13. Diagrama unifilar de una planta industrial con cargas lineales y no lineales [11].

Fuente: Los autores.

Cuando no hay capacitores conectados en el sistema eléctrico, la corriente se distribuye entre sus componentes sin modificar su relación, aunque la cantidad variará dependiendo de sus respectivas características de conductividad, sin ocasionar un incremento excesivo en las corrientes armónicas. Los inconvenientes más destacados en los sistemas eléctricos con perturbación armónica surgen al instalar capacitores para mejorar el factor de potencia en presencia de cargas no lineales considerables. Una tensión con armónicos que alimenta a bancos de capacitores provoca un aumento en su corriente, debido a que la impedancia disminuye con la señal. A continuación, se expone la fórmula de la reactancia capacitiva.

$$X_C = \frac{1}{2\pi FC}$$

La amplitud del aumento de la corriente RMS en comparación con la corriente fundamental depende del nivel de armónicos presente en la frecuencia de la tensión.

$$\frac{I_{RMS}}{I_1} = \sqrt{1 + 9\left(\frac{V_3}{V_1}\right)^2 + 25\left(\frac{V_5}{V_1}\right)^2 + \dots}$$

## 2.24 Resonancia paralela

Se produce cuando un capacitor y una bobina conectados en paralelo, al estar conectados se crea una frecuencia resonante máxima y una corriente muy pequeña.

## 2.24 Norma IEEE 519 1992

Esta normativa establece que los armónicos provocados por la presencia de cargas no lineales producidas por el aumento de la utilización de variadores de frecuencia en la red eléctrica a nivel industrial, a lo cual su principal función es limitar los niveles de distorsión armónica en valores de tensión y corriente [15].

<b>Low-Voltage System Classification and Distortion Limits</b>			
	<b>Special Applications<sup>1</sup></b>	<b>General System</b>	<b>Dedicated System<sup>2</sup></b>
Notch Depth	10%	20%	50%
THD (voltage)	3%	5%	10%
Notch Area ( $A_N$ ) <sup>3</sup>	16 400	22 800	36 500

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

<b>Current Distortion Limits for General Distribution Systems (120 V Through 69.000V)</b>						
Maximun Harmonic Current Distortion in Percent of $I_L$ Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
$I_{sc}/I_L$	<11	11<h<17	17<h<23	23<h<35	35<h	TDD
<20 <sup>+</sup>	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:**  
 $I_{sc}$  = Maximun short-circuit current at PCC.  
 $I_L$  = Maximun demand load current (fundamental frequency component) at PCC.

Figura 14. Límites de distorsión de voltaje y corriente  
IEEE 519-1992 [15]

Fuente: Los autores.

## 2.25 Niveles de armónicos permitidos según las normativas dispuestas por el ARCERNR.

Para mantener la estabilidad en el sistema eléctrico, es fundamental estandarizar límites en los niveles de distorsión que son aceptables para los consumidores como para los proveedores de energía. La interacción entre el usuario y el proveedor de energía es esencial, ya que la empresa puede solicitar al usuario que reduzca cualquier interferencia en el sistema de transmisión y distribución, mientras que el usuario tiene el derecho de exigir un suministro de energía con la menor cantidad de interferencia posible [16].

### 2.25.1 Distorsión Armónica de Voltaje.

Para evaluar se tomará el orden del armónico de voltaje individual y total de acuerdo con las siguientes expresiones.

$$V_{h,k} = \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} V_{h,k}^2}$$

$$DV_{h,k} = \frac{V_{h,k}}{V_{h,1}} * 100\%$$

$$THD_k = \left[ \frac{1}{V_{h,1}} \sqrt{\sum_{h=2}^{50} V_{h,k}^2} \right] * 100\%$$

Donde:

$V_{h,k}$  = Armónica de Voltaje  $h$  en el intervalo  $k$  de 10

$V_{h,1}$  = Valor eficaz (Rms) de la armónica de voltaje  $h$  medido cada 3 segundos

$DV_{h,k}$  = Factor de distorsión individual de voltaje de la armónica  $h$  (Para  $h=2,3\dots 50$ ) en el intervalo  $k$  de 10 minutos.

$THD_k$  = Factor de distorsión armónica total de voltaje

$V_{h,1}$  = Valor eficaz (rms) de la componente fundamental de voltaje en el punto de medición

### 2.25.2 Límites admisibles de distorsiones armónicas de tensión.

Los límites máximos de voltaje de la distorsión armónica individual y total:

Nivel de voltaje	Factor de distorsión armónica individual (%)	T.H.D (%)
Bajo Voltaje	5.0	8.0
Medio Voltaje	3.0	5.0
Alto Voltaje (Grupo 1)	1.5	2.5
Alto Voltaje (Grupo 2)	1.0	1.5

Tabla 1. Límites máximos de armónicos de voltaje (% del voltaje nominal) [16].

Fuente: Los autores.

THD en porcentaje del valor de la componente fundamental en voltaje:

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + V_5^2 + \dots}}{V_1} \times 100\%$$

### 2.25.3 Distorsión armónica de corriente

A continuación, se va a evaluar la distorsión armónica individual de corriente y la distorsión de demanda total:

$$I_{h,k} = \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} (I_{h,i})^2}$$

$$DI_{h,k} = \frac{I_{h,k}}{I_{h,1}} \times 100\%$$

$$TDD_k = \left[ \frac{1}{I_{h,1}} \sqrt{\sum_{h=2}^{50} (I_{h,k})^2} \right] \times 100\%$$

Donde:

$I_{h,k}$  = Armónica de corriente h en el intervalo k de 10 minutos.

$I_{h,i}$  = Valor eficaz (rms) de la armónica de corriente h (para h=2, 3... 50) medido cada 3 segundos (para i= 1,2,3... 200).

$DI_{h,k}$  = Factor de distorsión individual de corriente de la armónica  $h$  (para  $h= 2,3 \dots 50$ ) en el intervalo  $k$  de 10 minutos.

$TDD_k$  = Factor de distorsión de demanda total (armónicos de corriente).

$I_{h,1}$  = Valor eficaz (rms) de la componente fundamental de corriente (60Hz).

#### 2.25.4 Límites admisibles de distorsiones armónicas de corriente.

La distorsión armónica individual de corriente y distorsión de demanda están establecidos en la siguiente tabla:

Nivel máximo de armónicos impares <sup>a</sup> (% de la corriente máxima de demanda)						
$I_{cc}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	$TDD$
$<20^b$	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
$100 < 1000$	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
$>1000$	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Tabla 2. Niveles máximos de distorsión armónica de corriente [16].

Fuente: Los autores.

#### 2.26 Dimensionamiento físico del transformador.

La gestión térmica en los transformadores es crucial para preservar su vida útil. La pérdida de energía y la conversión en calor dentro del sistema puede causar un aumento significativo de la temperatura, afectando la longevidad del transformador. El estándar IEC60076-2 establece que la vida útil estimada del transformador está directamente relacionada con la temperatura del punto caliente.

Para controlar esta temperatura y prevenir un envejecimiento acelerado del aislamiento, se emplean líquidos aislantes que absorben el calor generado por las partes activas del transformador (como el núcleo y los devanados). Estos líquidos luego disipan el calor al entorno circundante, generalmente mediante radiadores que transfieren el calor al aire.

Es crucial tener un modelo preciso del radiador o al menos realizar cálculos precisos de la disipación total de calor a través de este, ya que contribuye directamente a minimizar los daños totales y a mantener la temperatura del punto caliente dentro de límites seguros. Un diseño

eficiente del radiador es esencial para asegurar una disipación efectiva del calor generado por el transformador.

La correlación entre el incremento de temperatura y la tasa de envejecimiento térmico del aislamiento es fundamental para determinar la vida útil del transformador. Al monitorear y controlar la temperatura del punto caliente, se puede mitigar el riesgo de daños y maximizar la longevidad del equipo.

En el caso del transformador del Edificio E, el cual cuenta con una capacidad de 750 KVA, cuenta con una refrigeración Tipo OA (Sumergido en aceite y Aire Natural), no concentramos en los radiadores de disipación por aire natural. Específicamente a sus dimensiones necesarias para para una correcta disipación de calor [17].

### 2.27 Filtro Armónico.

Filtro armónico es un generador de cargas no líneas con la finalidad de contrarrestar o reducir ya sean los armónicos de voltaje y corriente, mejorando así la calidad de la energía, a su vez también cumplen la funcionalidad de mejorar el factor de potencia entre otros parámetros.

Los filtros armónicos se pueden clasificar en:

#### 2.27.1 Filtro Armónico Pasivo.

Los filtros pasivos se caracterizan por ser inductancias y condensadores que, al ser conectados según el circuito resonante, se sintonizan para mitigar armónicos específicos, generalmente entre el 5to, 7mo y 11vo armónico respectivamente

Sin embargo, la implementación de esta clase de filtros conlleva un estudio detallado de las particularidades de la instalación, debido a que por sus limitantes tecnológicas pueden provocar condiciones de resonancia desfavorables, al tener una corriente nominal plenamente dependiente de la distorsión existente [18].

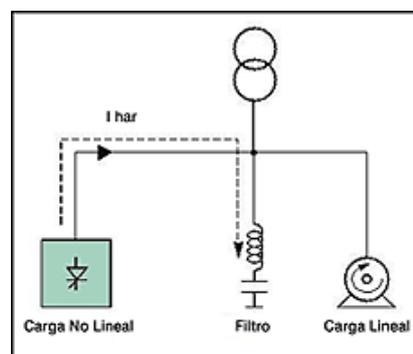


Figura 15. Implementación de un Filtro de armónicos Pasivo [18].

Fuente: Los autores.

Dentro de las Ventajas de un filtro armónico tenemos:

- Reducción de sustancial de los armónicos de tensión y corriente.
- Reducción del calentamiento en el transformador de distribución
- Bajo costo de instalación
- Reducción de la carga del transformador
- Mejoramiento del factor de potencia

### 2.27.2 Filtro Armónico Activo.

El filtro activo se comprende como un equipo de electrónica de potencia, el cual mediante el uso de sensores realiza mediciones de la corriente de línea, obtenido la magnitud y ángulo para contrarrestarlas inyectando una corriente de misma magnitud, pero con ángulo opuesto.

A diferencia de los filtros pasivos, estos no requieren de un análisis exhaustivo de las frecuencias específicas para funcionar, al tener la capacidad de autorregularse, adaptándose a cualquier tipo de carga y mitigando desde cualquier orden o rango de armónico ya sea del orden 2 al 25, o desde el orden 2 al 50, todo dependiendo del compensador usado[18].

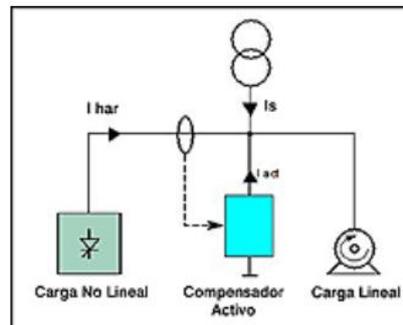


Figura 16. Implementación de un filtro de armónicos Activo [18].

Fuente: Los autores.

#### 2.27.2.1 Filtro de armónicos en serie.

Este tipo de filtros tiene la finalidad de mitigar corrientes armónicas producidas por distorsiones del voltaje del sistema eléctrico como es visible a continuación en la figura 17.

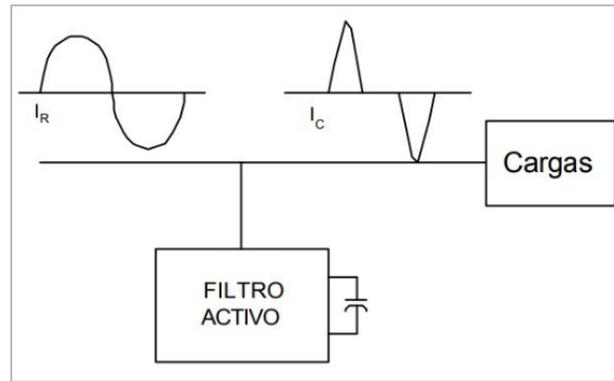


Figura 17. Interpretación visual del funcionamiento de un filtro activo en serie [19].

Fuente: Los autores.

### 2.27.2.2 Filtro armónico activo en paralelo.

Este filtro activo con una configuración en paralelo se encarga de reducir las distorsiones armónicas de corriente producidas directamente por cargas no lineales, inyectando u absorbiendo flujos de corriente según corresponda, como en la figura 18.

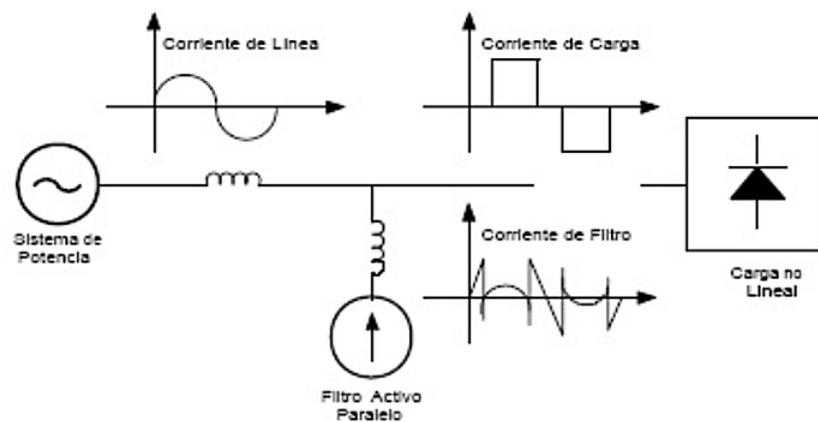


Figura 18. Diagrama de compensación de un filtro activo en paralelo [20].

Fuente: Los autores.

### 2.27.3 Filtro armónico híbrido.

Esta clase de filtros resulta de la combinación de un filtro activo junto con uno pasivo, ya que permite reducir tanto del tamaño como de los costos técnicos de implementación.

Sus aplicaciones comúnmente derivan de las de un filtro pasivo, es decir, para niveles de potencia ya sea alta o media, pero que además de requerir la funcionalidad de mitigar y reducir el nivel de armónicos, realizando la compensación de energía reactiva.

De entre sus aplicaciones destacan:

### 2.27.3.1 Filtro híbrido en serie

Se caracteriza por componerse de un filtro activo en serie con la impedancia de la fuente y el filtro pasivo conectado en paralelo con la carga como se observa en la figura 19.

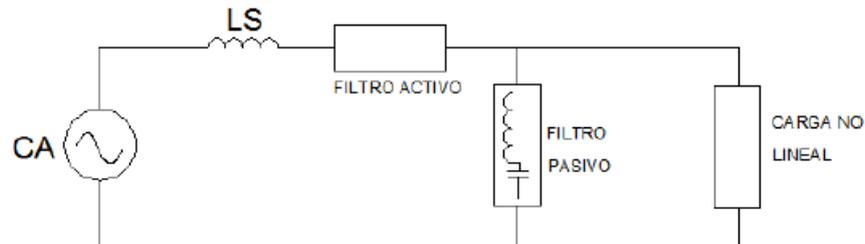


Figura 19. Diagrama de conexión de un filtro híbrido en serie [20].

Fuente: Los autores.

De entre sus principales ventajas destaca:

- Regulación de los armónicos de voltaje de la carga
- Regulación de Voltaje
- Mitigación de Flickers y micro cortes de voltaje

### 2.27.3.2 Filtro Híbrido en Paralelo:

Esta versión del filtro paralelo híbrido incluye un filtro activo y uno pasivo que se conectan en serie antes de unirse en paralelo con la carga no lineal, como se ilustra en el diagrama de la figura 20.

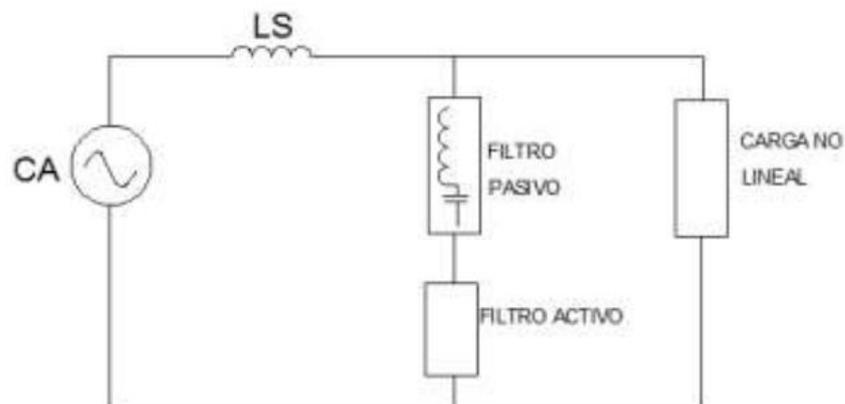


Figura 20. Diagrama de conexión de un filtro híbrido en paralelo.

Fuente: Los autores.

De entre sus Principales ventajas destacan:

- Reducción de los armónicos de corriente.
- Corrección del factor de potencia.
- Mitigación de la corriente del neutro.

### 3 ÁREA DE ESTUDIO

El estudio de la calidad de la energía se realizó en la Universidad Politécnica Salesiana, sede Guayaquil. Concretamente en el bloque E del campus Centenario ubicada en calle Robles 107 y Chambers al sur de la ciudad de Guayaquil, Ecuador, a continuación, se muestra la imagen satelital del edificio:



Figura 21. Ubicación del edificio E Universidad Politécnica Salesiana, sede Guayaquil, imagen tomada con Google Earth.

El equipo fue conectado al bushin de baja tensión del transformador de 750 KVA exclusivo del bloque E.

Se escogió este bloque como área de muestreo debido a la concentración de laboratorios y salas de cómputo que albergan equipos con cargas no lineales que afectan al sistema eléctrico por la presencia de armónicos.

Con este estudio de calidad de la energía se analizó el comportamiento y presencia de armónicos de mayor incidencia en el edificio, además de la comparación con método analítico en contrastación con el termostato del transformado, dichos cálculos se presentarán en la sección 4.

### **3.1 Distribución del edificio**

El edificio está distribuido de la siguiente manera:

#### **Subsuelo**

- Laboratorio de hidráulica
- Laboratorio de neumática
- Laboratorio manufactura aditiva
- Laboratorio maquinaria pesada
- Laboratorio equipos manuales
- Laboratorio ingeniería en mantenimiento
- Laboratorio vehículos eléctricos e híbridos
- Laboratorio sistemas de inyección
- Laboratorio tren de fuerza motriz

#### **Planta Baja**

- Taller de mecánica
- Ascensor principal

#### **Mesanina**

- Laboratorio autotrónico
- Laboratorio CNC- FAB

**Piso 1**

- Laboratorio Comunicaciones inalámbricas
- Laboratorio comunicaciones ópticas
- I.P.T
- Laboratorio de cómputo E2
- CPI y robótica
- Prototipado
- Laboratorio de cómputo E1
- Laboratorio electricidad del automóvil

**Piso 2**

- Laboratorio de alta tensión
- Laboratorio de máquinas eléctricas
- Laboratorio de protecciones eléctricas
- Laboratorio de generación
- Laboratorio de termodinámica
- Laboratorio de SEP
- Laboratorio de transformadores
- Laboratorio de instalaciones industriales

**Piso 3**

- Laboratorio fabricación textil
- Automatización industrial II
- Laboratorio Metrología
- Laboratorio cómputo E5
- Laboratorio cómputo E4
- Laboratorio Sistemas de arranque y carga
- Laboratorio electrónico de potencia
- Laboratorio de cómputo I
- Laboratorio Sensores y actuadores
- Laboratorio control automático
- Redes industriales y Scada

## **Piso 4**

- Dirección de carrera de electricidad
- Laboratorio electrónico digital
- Laboratorio de cómputo E8
- Laboratorio electrónico analógica
- Laboratorio de telemática
- Laboratorio telecomunicaciones
- Laboratorio de idiomas extranjeras
- Laboratorio de computación avanzada
- Laboratorio fisiología
- Laboratorio de física
- Laboratorio automatización industrial

### **3.2 Diseño del tablero principal**

En este caso en particular, luego del transformador trifásico de 750 KVA que abastece de energía al edificio E viene el tablero de distribución en donde tenemos un breaker principal de 2500 AMP a 600V, el cual tiene ciertas derivaciones correspondientes para cada uno de los pisos, a continuación, se va a mencionar los elementos que contiene el TD- principal:

- 2 breakers de 3P-250 A
- 1 breaker de 3P- 400 A
- 6 breakers de 3P-160 A, cada uno según el piso que va a alimentar
- 8 breakers de 3P-63 A
- 1 breakers 3P-80 A

### **3.3 Diseño de cada tablero de distribución**

#### **Sótano**

- Breaker principal 3P-160 A
- 2 breaker de 3P-50 A
- 2 breaker de 3P-20 A
- 3 breaker de 3P-40 A
- 1 breaker de 3P-80 A
- 5 breaker de 3P-32 A
- 2 breaker de 3P-100 A

**Piso 1**

- Breaker principal 3P-160 A
- 3 breaker de 3P-100 A
- 9 breaker de 3P-32 A
- 2 breaker de 3P-20 A
- 2 breaker de 3P-50 A

**Piso 2**

- Breaker principal 3P-160 A
- 2 breaker de 3P-125 A
- 3 breaker de 3P-100 A
- 5 breaker de 3P-40 A
- 2 breaker de 3P-63 A
- 1 breaker de 3P-160 A
- 2 breaker de 3P-20 A

**Piso 3**

- Breaker principal 3P-160 A
- 4 breaker de 3P-100 A
- 8 breaker de 3P-40 A
- 2 breaker de 3P-20 A
- 1 breaker de 3P-63 A
- 1 breaker de 3P-50 A

**Piso 4**

- Breaker principal 3P-160 A
- 10 breaker de 3P-40 A
- 1 breaker de 3P-63 A
- 2 breaker de 3P-20 A
- 1 breaker de 3P-100 A
- 1 breaker de 3P-50 A



### 3.5 Dimensiones físicas del transformador

El transformador se encuentra ubicado en la zona lateral del edificio E de la UPS, según la normativa de CNEL EP las dimensiones del cuarto deben de ser de 3.5m x 3.5m cuando es un transformador trifásico, como en este caso [21].



*Figura 23. Cuarto de transformador Edificio E, Universidad Politécnica Salesiana, sede Guayaquil.*

*Fuente: Los autores.*

### 3.6 Plano civil eléctrico del cuarto de transformador del Bloque “E”

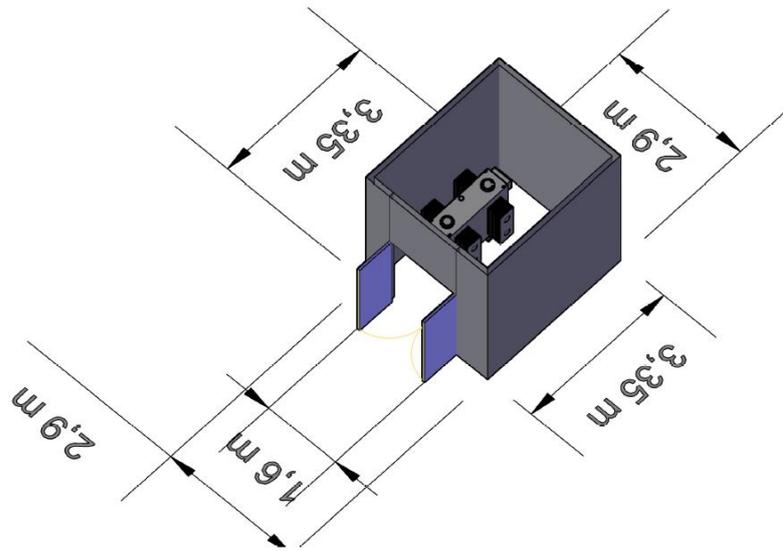


Figura 24. Plano Civil eléctrico en 3D del cuarto de transformador del Bloque “E”.

Fuente: Los autores.

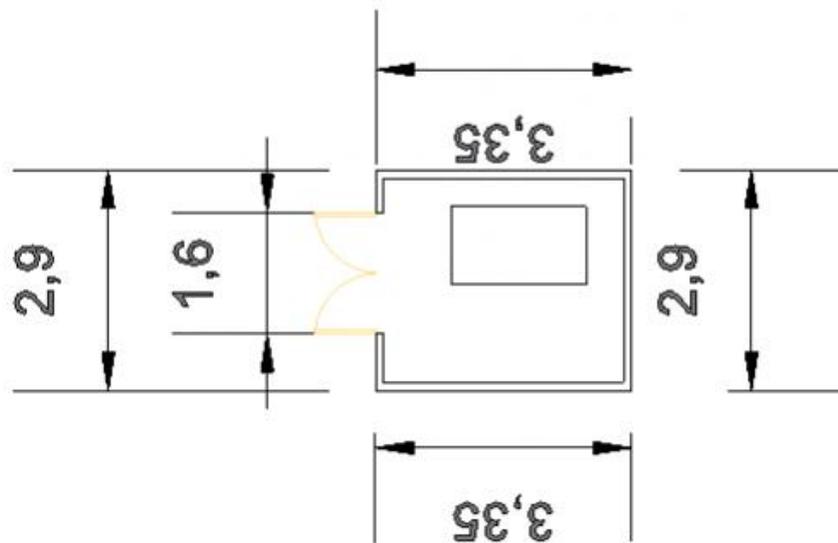
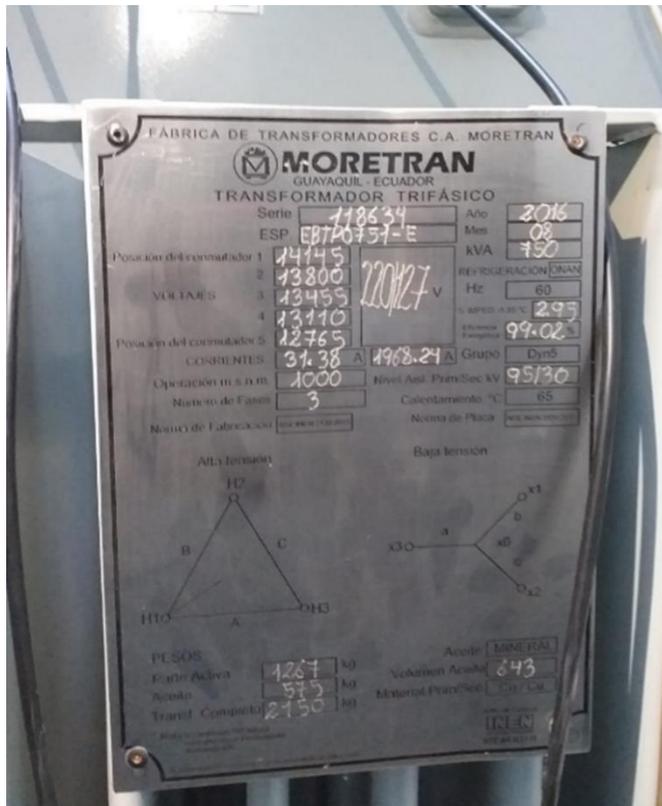


Figura 25. Plano Civil eléctrico en 2D del cuarto de transformador de Bloque “E”.

Fuente: Los autores.

### 3.7 Datos de placa del transformador



<b>Marca</b>	MORETRAN
<b>Serie</b>	118637
<b>ESP.</b>	EBTPO751-E
<b>AÑO</b>	2016
<b>KVA</b>	750
<b>V1</b>	13800
<b>V2</b>	220/127
<b>I1</b>	31,38
<b>I2</b>	1968,24
<b>HZ</b>	60
<b>Grupo</b>	DYN5

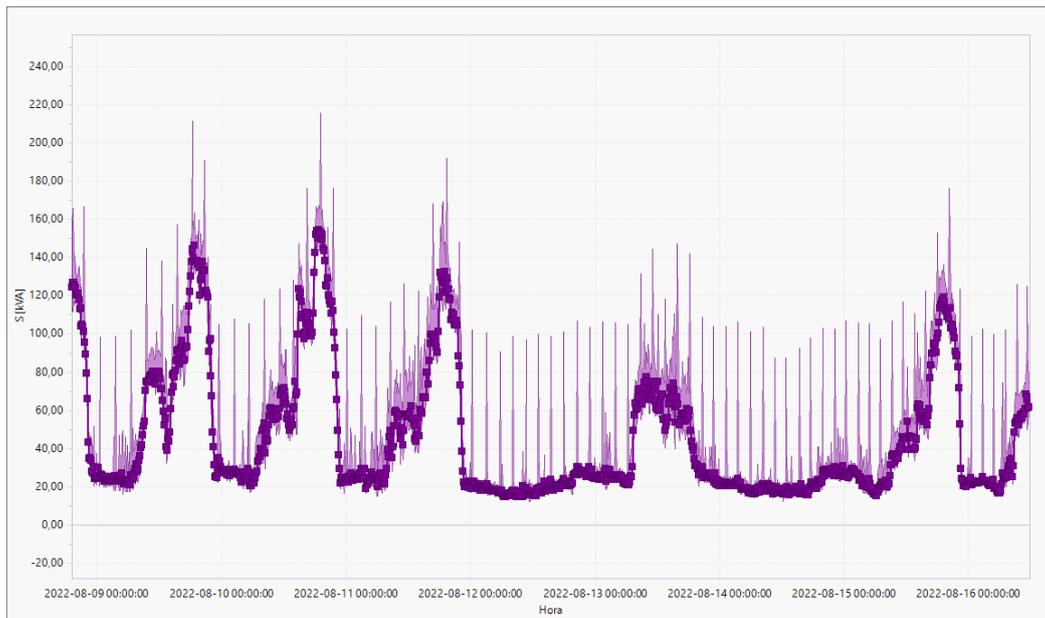
Figura 26. Datos de placa del transformador de 750 KVA, edificio E Universidad Politécnica Salesiana.

Fuente: Los autores.

### 3.8 Demanda Facturable

La demanda facturable se determina al contrastar la demanda máxima que registra el medidor con la potencia acordada por el cliente. En la mayoría de los casos, este valor no puede ser menor al 60% de la máxima demanda registrada durante los últimos 12 meses, incluido el periodo actual, salvo algunas excepciones.

Tomando en cuenta en nuestro caso de estudio, según un informe previamente realizado por la compañía Matheus Eléctricos, muestran datos tomados de la red eléctrica del edificio, de los cuales podemos observar que tenemos un consumo máximo de 150.3 KVA en el horario de 19:00 h, concluyendo que solo se está utilizando el 20% del transformador, funcionando de forma ineficiente y teniendo una multa por parte de CNEL EP por no cumplir con el rubro de demanda instalada, provocando pérdidas económicas anuales a la universidad [22].



*Figura 27. Registro de consumo de potencia aparente del transformador [23].*

*Fuente: Los autores.*

## **4 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN Y SOFTWARES DE ESTUDIO.**

### **4.1 Analizador de redes Fluke 438 II**

El dispositivo de evaluación para motores y calidad de electricidad Fluke 438-II combina las funcionalidades de medición mecánica para motores eléctricos con las avanzadas capacidades de análisis de calidad eléctrica que se encuentran en los analizadores Fluke 435-II. Esto permite llevar a cabo mediciones y análisis rápidos y simples de parámetros eléctricos y mecánicos esenciales, tales como potencia, componentes armónicas no lineales, desbalances tanto de tensiones como en corrientes, velocidad del motor y potencia mecánica. Para motores que se adhieren a las normas NEMA o IEC, el dispositivo 438-II utiliza los datos proporcionados en la placa de características del motor para realizar cálculos de los parámetros mecánicos [24].



Figura 28. Analizador de redes Fluke 438 II [24].

Fuente: Los autores.

#### 4.1.1 Características del equipo

- Calcula la potencia y la eficiencia mecánica de forma directa, prescindiendo de sensores mecánicos; simplemente requiere la conexión de los cables de entrada.
- Realiza mediciones de parámetros de potencia eléctrica, como voltaje, corriente, energía activa, energía aparente, factor de potencia, distorsión armónica y desequilibrios, para reconocer aspectos que afectan la eficiencia del motor.
- Identifica y señala inconvenientes vinculados con el suministro eléctrico, incluidas variaciones, picos repentinos, transitorios, armónicos y desequilibrios.
- Utiliza la tecnología de captura de datos PowerWave para recopilar rápidamente información RMS valiosa, mostrando medios ciclos y formas de onda que permiten comprender el funcionamiento de sistemas eléctricos (como arranques de generadores, conmutaciones en sistemas de alimentación ininterrumpida, entre otros).
- Ofrece la capacidad de registrar formas de onda durante ciclos completos de 100/120 ciclos (50/60 Hz) de los eventos detectados en todos los tipos de análisis, sin requerir configuraciones adicionales.
- Funciona en el modo de captura automática de transitorios, permitiendo la obtención de datos de forma de onda a una velocidad de 200 ks/s en todas las fases simultáneamente, con una capacidad de hasta 6 kV.
- Realiza automáticamente el cálculo del factor de desclasificación del motor según las pautas establecidas por las normativas NEMA/IEC [24].

## 4.2 Fluke Power Log 430 II.

Aunque el analizador de redes por sí mismo permite un amplio estudio de los parámetros de una red eléctrica, es necesario profundizar en los datos del equipo. Por lo cual, se requiere el uso del Power Log 430 II que se va a describir a continuación:

El Power Log 430 II es un software especializado en el control y descarga de información de analizadores de redes eléctricas de la marca FLUKE, para facilitar el manejo de los datos sin necesidad del equipo en cuestión.

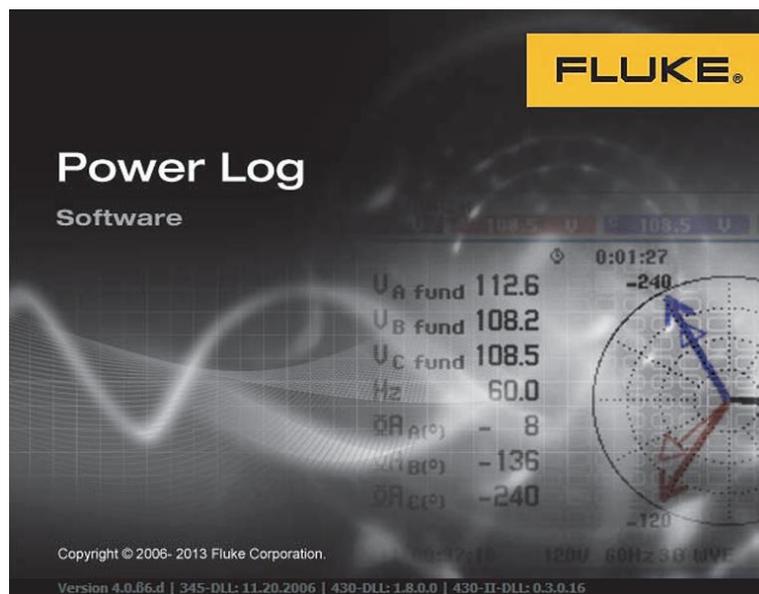


Figura 29. Pantalla de bienvenida del Fluke Power Log 430 II.

Fuente: Los autores.

## 4.2.1 Herramientas del Programa.

### 4.2.1.1 Herramienta para descarga de información.

En la pantalla de inicio contamos con diversas herramientas para la administración de archivos entre los más destacados tenemos las opciones como:

- **Fichero:** Permite descargar, Apertura, Guardar o Exportar datos previamente cargados o almacenado en el ordenador, también cuenta con la opción de imprimir informes o capturas de pantallas.

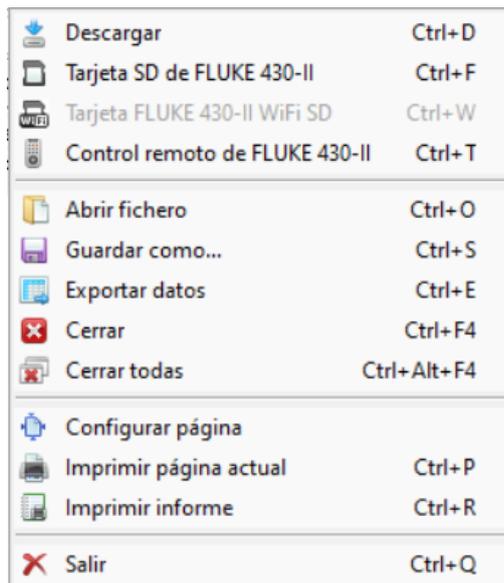


Figura 30. Menú desplegable de la opción Ficheros del Programa Fluke Power Log 430 II.

Fuente: Los autores.

- **Tarjeta SD Fluke 430 II:** Esta herramienta permite descargar archivos directamente desde la Tarjeta SD del analizador sin necesidad de conectarlo vía USB al ordenador.
- **Descargar Datos Registrados:** Esta opción nos permite descargar los datos recopilado por el analizador mediante una conexión USB al analizador

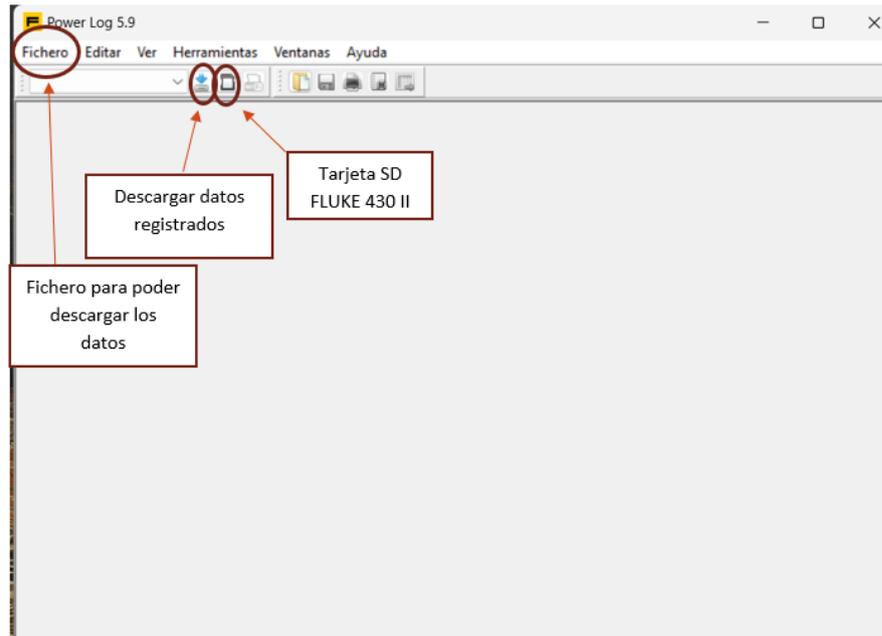


Figura 31. Pantalla de inicio del Fluke Power Log 430 II.

Fuente: Los autores.

#### 4.2.1.2 Herramientas de administración de archivos.

Luego de realizar el estudio de los datos recopilados por el analizador se desplegarán nuevas herramientas dependiendo del número de parámetros previamente seleccionados en el equipo, cabe resaltar que las opciones pueden variar dependiendo que se haya buscado analizar con el instrumento de medición, en nuestro caso de estudio de armónicos, se enfatizó en parámetros de armónicos, desequilibrios y potencias, así como los valores comúnmente estudiados como son tensión y corriente.

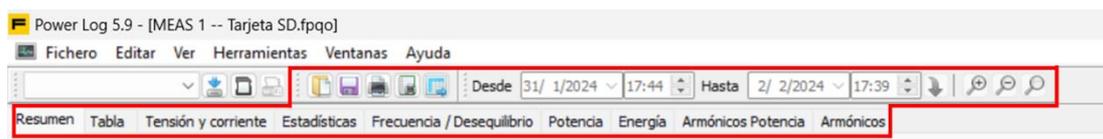


Figura 32. Herramientas de análisis de datos del Fluke Power Log 430 II.

Fuente: Los autores.

Dentro de las principales herramientas tenemos:

- **Resumen:** Esta opción despliega un menú detallando información tanto del instrumento como del software, además de un resumen de la medición, registros, eventos y escalas con las cuales el instrumento realizado el barrido de información.

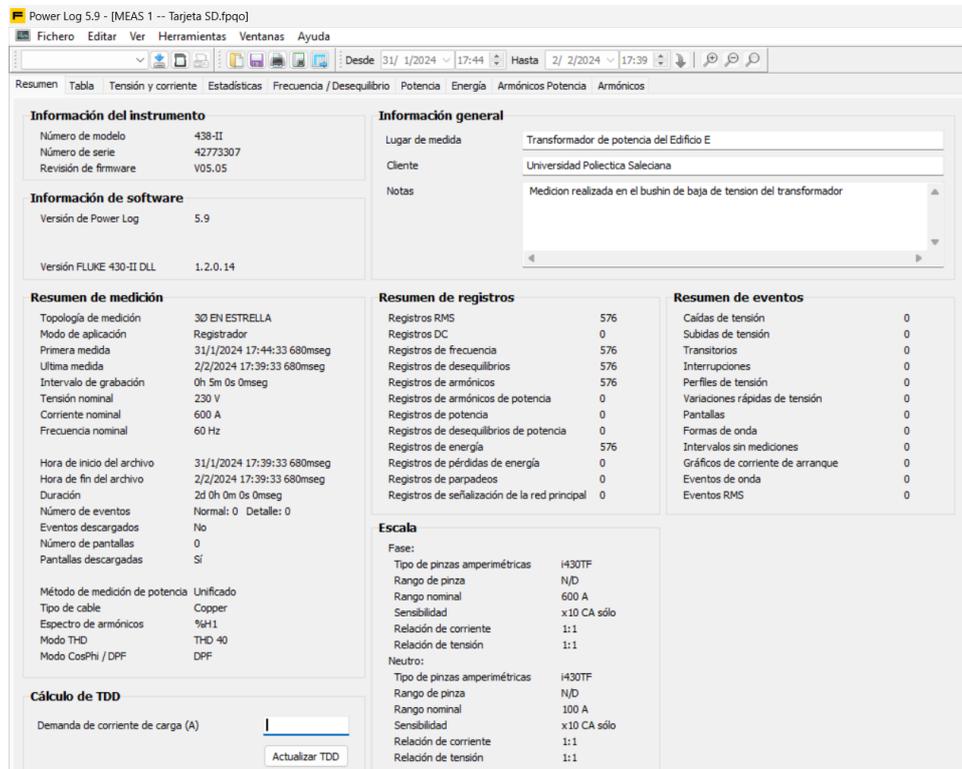


Figura 33. Despliegue de la opción “Resumen” del Fluke Power Log 430 II.

Fuente: Los autores.

- **Tabla:** Esta opción muestra un récord de todas las mediciones categorizadas junto con las fechas y horas en las que se realizó cada muestreo, en escalas de mínimo, medio y máximo, además de darnos un total en cada categoría.

Fecha	Función	BN(V) / B(A) Med	BN(V) / B(A) Max	BN(V) / B(A) Min	BN(V) / B(A) Med	BN(V) / B(A) Max	BN(V) / B(A) Min	BN(V) / B(A) Med	BN(V) / B(A) Max	BN(V) / B(A) Min	Total Min	Total Med	Total Max
31/1/2024 17:44:33 680mseg	Vrms ph-ph	226,06 V (f)	227,01 V (f)	221,34 V (f)	222,68 V (f)	223,46 V (f)	221,34 V (f)	222,68 V (f)	223,46 V (f)	221,34 V (f)	0,69% (f)	0,88% (f)	1,06% (f)
31/1/2024 17:44:33 680mseg	Arms	410,8 A (f)	442 A (f)	396,6 A (f)	410,1 A (f)	441 A (f)	396,6 A (f)	410,1 A (f)	441 A (f)	396,6 A (f)	0% (f)	0,01% (f)	0,01% (f)
31/1/2024 17:44:33 680mseg	Frecuencia										3,14% (f)	4,34% (f)	5,18% (f)
31/1/2024 17:44:33 680mseg	Desequilibrio Vn										2,95% (f)	3,29% (f)	3,97% (f)
31/1/2024 17:44:33 680mseg	Desequilibrio Vz												
31/1/2024 17:44:33 680mseg	Desequilibrio Az												
31/1/2024 17:44:33 680mseg	THD V	1,76 % (f)	1,88 % (f)	1,89 % (f)	1,95 % (f)	2,05 % (f)	1,88 % (f)	1,95 % (f)	2,05 % (f)	1,88 % (f)	188,1 % (f)	211,55 % (f)	
31/1/2024 17:44:33 680mseg	THD A	26,44 % (f)	27,28 % (f)	24,74 % (f)	26,9 % (f)	27,48 % (f)	24,74 % (f)	26,9 % (f)	27,48 % (f)	24,74 % (f)	73,96 % (f)	92,33 % (f)	105,97 % (f)
31/1/2024 17:44:33 680mseg	THD W	0,21 % (f)	0,24 % (f)	0,14 % (f)	0,22 % (f)	0,25 % (f)	0,14 % (f)	0,22 % (f)	0,25 % (f)	0,14 % (f)			
31/1/2024 17:44:33 680mseg	Energía Activa		4,31 kWh (f)			4,27 kWh (f)			4,27 kWh (f)				13,27 kWh (f)
31/1/2024 17:44:33 680mseg	Energía Aparente		4,46 kWh (f)			4,43 kWh (f)			4,43 kWh (f)				13,75 kWh (f)
31/1/2024 17:44:33 680mseg	Energía Reactiva		5,00 VARh (f)			155,00 VARh (f)			155,00 VARh (f)				30,00 VARh (f)
31/1/2024 17:44:33 680mseg	Factor de Potencia	0,97	0,97	0,96	0,96	0,97	0,96	0,96	0,97	0,96	0,96	0,96	0,97
31/1/2024 17:44:33 680mseg	DPF	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
31/1/2024 17:44:33 680mseg	Potencia Reactiva	0,06 kvar	0,68 kvar	-2,22 kvar	-1,86 kvar	-0,56 kvar	0,06 kvar	0,68 kvar	-2,22 kvar	-1,86 kvar	-0,42 kvar	0,36 kvar	3,18 kvar
31/1/2024 17:44:33 680mseg	Vrms ph-n	130,32 V (f)	130,89 V (f)	128,91 V (f)	129,64 V (f)	130,13 V (f)	128,91 V (f)	129,64 V (f)	130,13 V (f)	128,91 V (f)	0,22 V (f)	0,23 V (f)	0,24 V (f)
31/1/2024 17:44:33 680mseg	Corriente Fundamental	397,2 A	429 A	382,8 A	396 A	427,6 A	382,8 A	396 A	427,6 A	382,8 A	28,6 A	32,6 A	40,2 A
31/1/2024 17:49:33 680mseg	Vrms ph-ph	225,89 V (f)	226,93 V (f)	220,31 V (f)	222,61 V (f)	223,7 V (f)	220,31 V (f)	222,61 V (f)	223,7 V (f)	220,31 V (f)	40,5 A (f)	45 A (f)	61,2 A (f)
31/1/2024 17:49:33 680mseg	Arms	448 A (f)	498,1 A (f)	404,8 A (f)	443,1 A (f)	497,9 A (f)	404,8 A (f)	443,1 A (f)	497,9 A (f)	404,8 A (f)			
31/1/2024 17:49:33 680mseg	Frecuencia												
31/1/2024 17:49:33 680mseg	Desequilibrio Vn												
31/1/2024 17:49:33 680mseg	Desequilibrio Vz												
31/1/2024 17:49:33 680mseg	Desequilibrio Az												
31/1/2024 17:49:33 680mseg	THD V	1,91 % (f)	2,09 % (f)	1,93 % (f)	2,08 % (f)	2,27 % (f)	1,91 % (f)	2,09 % (f)	2,27 % (f)	1,91 % (f)	139 % (f)	196,98 % (f)	240,76 % (f)
31/1/2024 17:49:33 680mseg	THD A	27,08 % (f)	27,84 % (f)	25,21 % (f)	27,81 % (f)	28,23 % (f)	25,21 % (f)	27,81 % (f)	28,23 % (f)	25,21 % (f)	53,86 % (f)	87 % (f)	110,98 % (f)
31/1/2024 17:49:33 680mseg	THD W	0,23 % (f)	0,26 % (f)	0,18 % (f)	0,24 % (f)	0,26 % (f)	0,18 % (f)	0,24 % (f)	0,26 % (f)	0,18 % (f)			
31/1/2024 17:49:33 680mseg	Energía Activa		8,99 kWh (f)			8,86 kWh (f)			8,86 kWh (f)				27,57 kWh (f)
31/1/2024 17:49:33 680mseg	Energía Aparente		9,31 kWh (f)			9,21 kWh (f)			9,21 kWh (f)				29,60 kWh (f)
31/1/2024 17:49:33 680mseg	Energía Reactiva		55,00 VARh (f)			283,00 VARh (f)			283,00 VARh (f)				158,00 VARh (f)
31/1/2024 17:49:33 680mseg	Factor de Potencia	0,96	0,97	0,96	0,96	0,97	0,96	0,96	0,97	0,96	0,96	0,96	0,97
31/1/2024 17:49:33 680mseg	DPF	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
31/1/2024 17:49:33 680mseg	Potencia Reactiva	0,6 kvar	1,08 kvar	-2,12 kvar	-1,54 kvar	-0,52 kvar	0,6 kvar	1,08 kvar	-2,12 kvar	-1,54 kvar	0,12 kvar	1,96 kvar	3,72 kvar
31/1/2024 17:49:33 680mseg	Vrms ph-n	130,23 V (f)	130,85 V (f)	128,11 V (f)	128,57 V (f)	130,16 V (f)	128,11 V (f)	128,57 V (f)	130,16 V (f)	128,11 V (f)	0,22 V (f)	0,23 V (f)	0,26 V (f)
31/1/2024 17:49:33 680mseg	Corriente Fundamental	432,4 A	480,8 A	390,2 A	427,2 A	480 A	390,2 A	427,2 A	480 A	390,2 A	27,2 A	34 A	54 A

Figura 34. Ejemplo de la opción “Tabla” en el Fluke Power Log 430 II.

Fuente: Los autores.

- **Tensión y Corriente:** En la figura 35 nos presenta una gráfica de voltaje y corriente vs tiempo en patrones de máximo, medio y mínimo con los colores rojo, azul y verde respectivamente, además del número de eventos transcurridos durante la medición realizada entre el 31 y 2 de febrero.

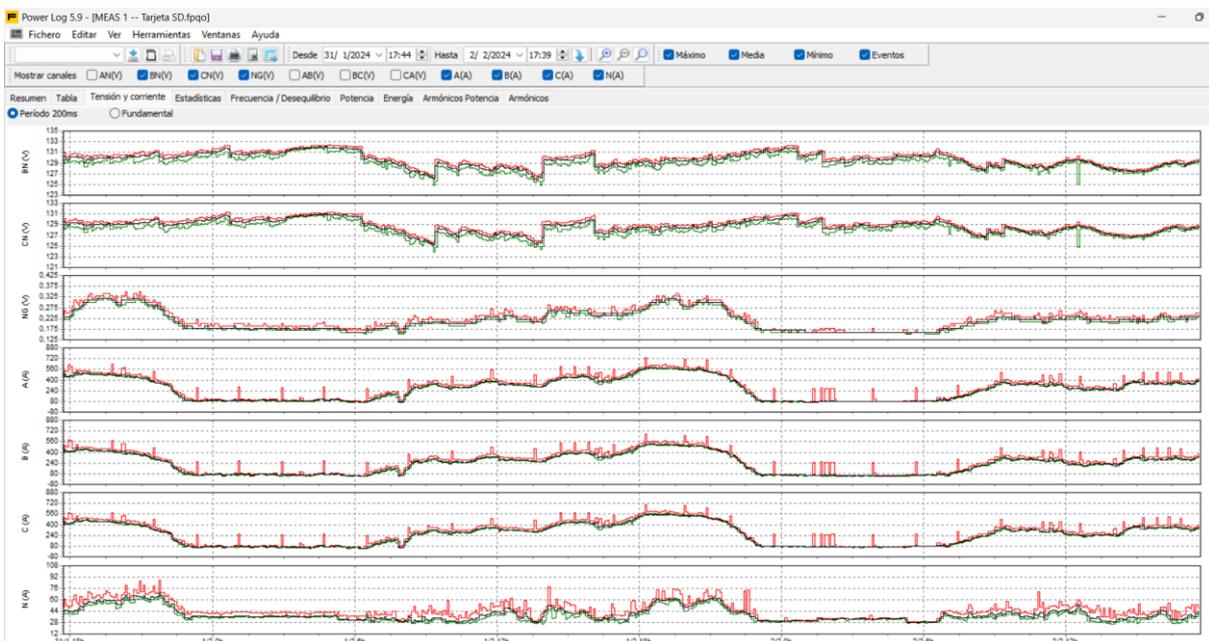


Figura 35. Ejemplo de las gráficas de “Voltaje y Corriente vs Tiempo” del Software Power Log 430 II.

Fuente: Los autores.

- **Estadística:** En la figura 36 nos permite visualizar las gráficas con los datos recopilados por el analizador para observar el comportamiento de los parámetros en una red eléctrica, en este caso observa los valores mínimos de la corriente fundamental de la fase A, en el periodo de tiempo mencionado anteriormente.

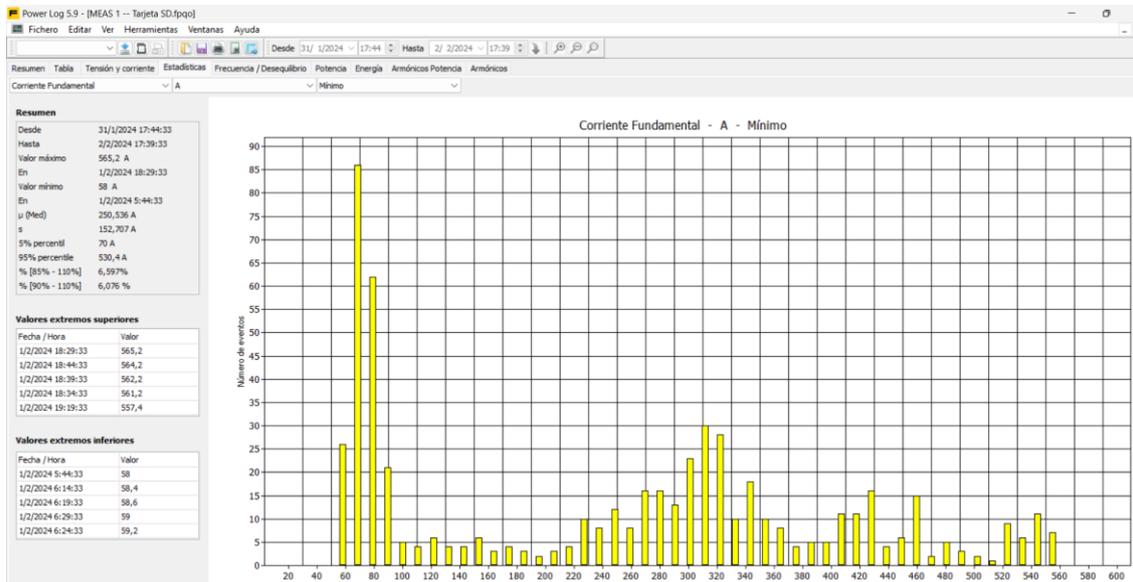


Figura 36. Ejemplo de las gráficas obtenibles en la Opción “Estadísticas” obtenidas del Software Power Log 430 II.

Fuente: Los autores.

Ahora las herramientas las específicas que dependen de los parámetros escogidos previamente a la medición son en nuestro caso:

- **Frecuencia / Desequilibrio:** En la figura 37 nos permite obtener el porcentaje de desequilibrio en tensión y frecuencia además de observar el comportamiento de la frecuencia durante el periodo establecido con anterioridad.

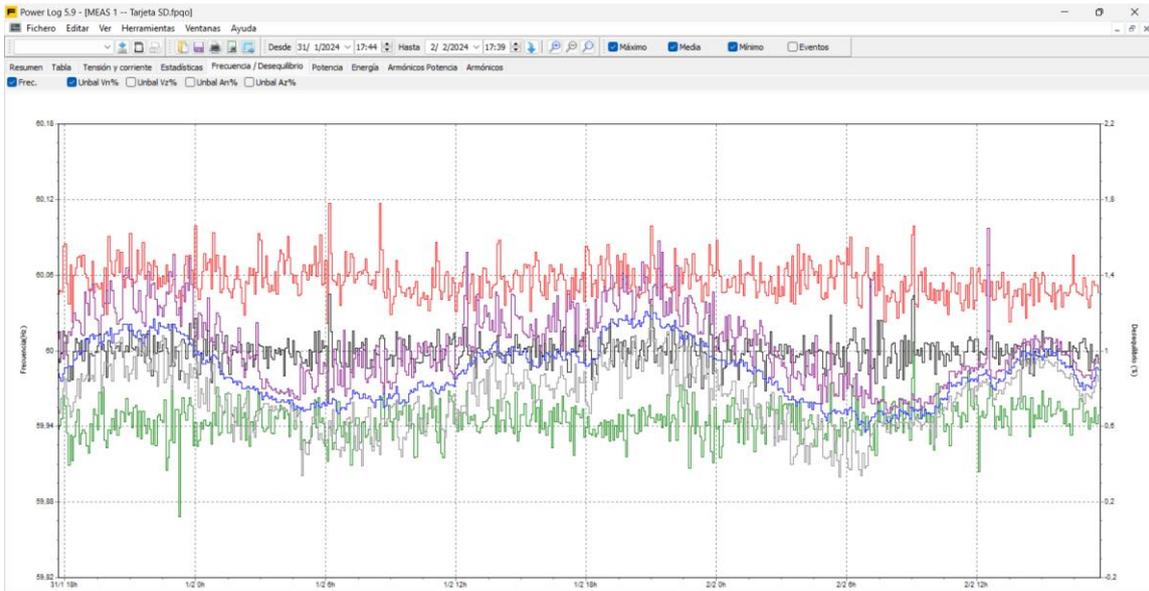


Figura 37. Ejemplo de las Gráficas obtenibles en la opción “Frecuencia/Desequilibrio” obtenidas del Software Power Log 430 II.

Fuente: Los autores.

- **Potencia:** En la figura 38 nos presenta las alternativas para ver las gráficas de VAR, PF y DPF con los colores rojo y verde respectivamente, para analizar su comportamiento durante el transcurso de la medición.

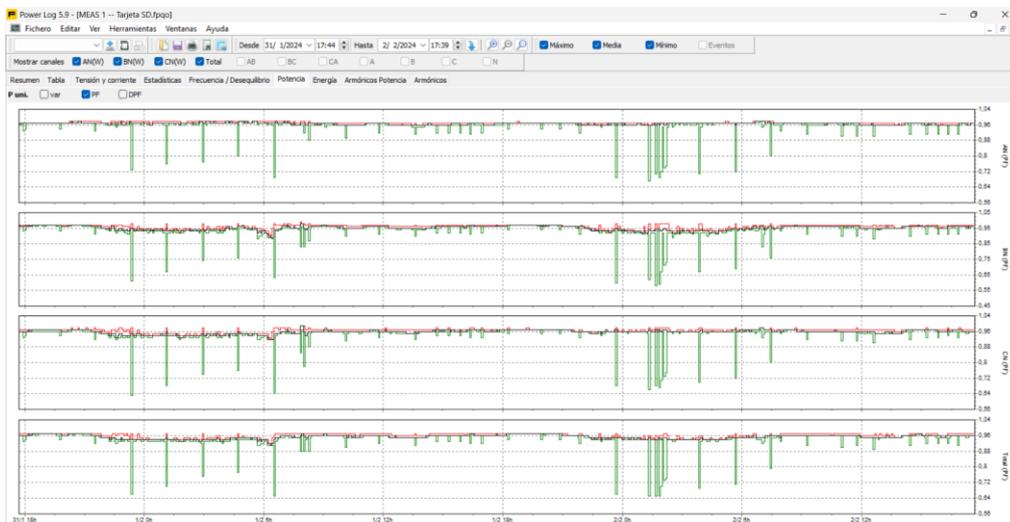


Figura 38. Ejemplo de las gráficas obtenibles de la opción “Potencia” permite visualizar PF, DPF y VAR obtenidas del Software Power Log 430 II.

Fuente: Los autores.

- **Energía:** En la figura 39 podemos analizar el consumo de los KWh, KVARh y KVAh, dichos valores cuantifican la potencia que puede soportar la red eléctrica, dichos parámetros representados por colores rojo, azul y verde, durante el periodo del 31 de enero y 2 de febrero.

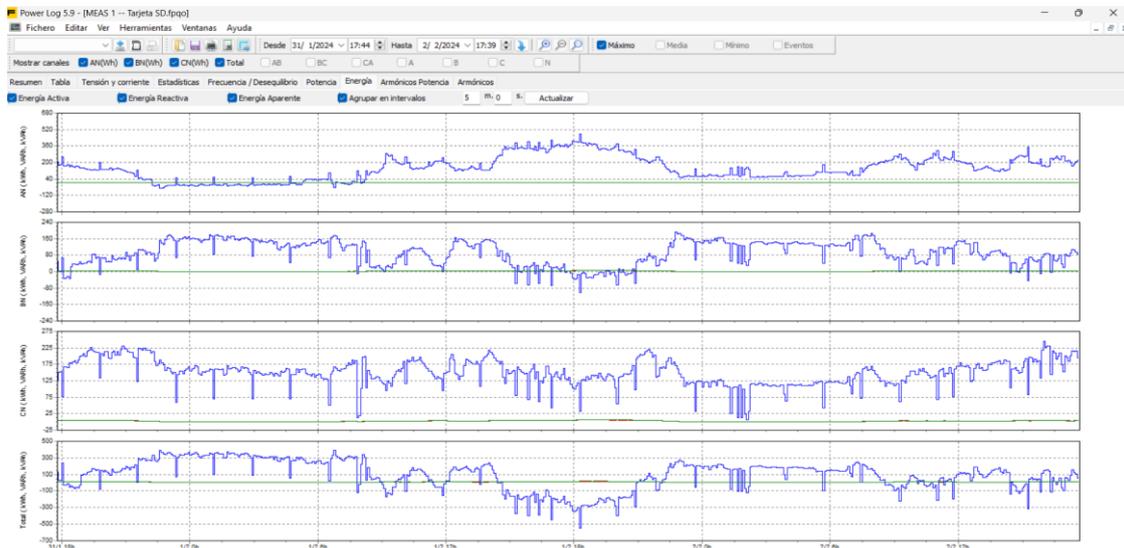


Figura 39. Ejemplo de las gráficas obtenibles en la opción “Energía” se visualizan parámetros como: KWh, KVARh y KVAh del Software Power Log 430 II.

Fuente: Los autores.

- **Armónicos (Tensión y corriente):** En la figura 40 permite observar el comportamiento de los armónicos tanto en voltaje como en corriente por fase, donde Fase A, B y C están representadas por los colores negro, rojo y verde a la vez de presentarnos los valores como un histograma o en una evolución temporal(tiempo).

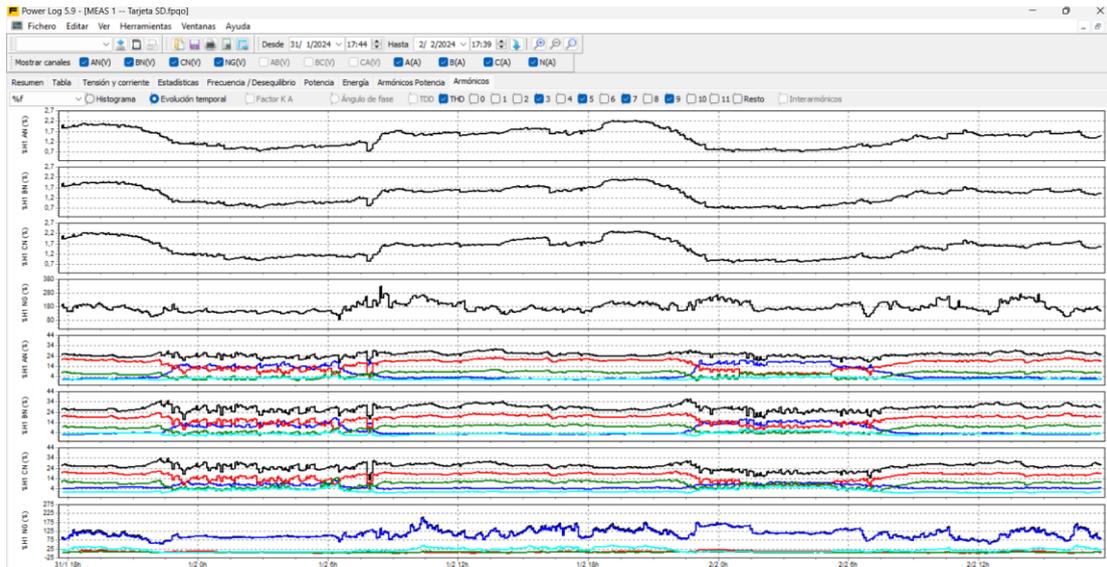


Figura 40. Gráficas de la Opción armónicos de tensión y corriente obtenidas del Software Power Log 430 II.

Fuente: Los autores.

- **Armónicos de Potencia:** En la figura 41 se observan los armónicos de potencia por fase según el orden de armónico en este caso tenemos el primer armónico durante el tiempo de barrido de datos tomados entre 31 de enero y 2 de febrero.

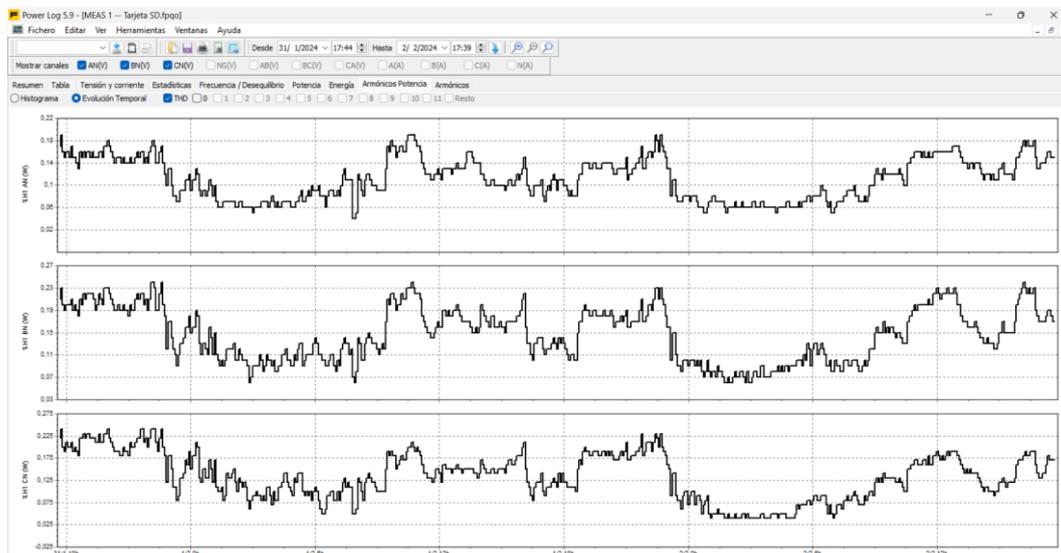


Figura 41. Ejemplo de las gráficas obtenibles de la opción armónicos en "Potencia" del Software Power Log 430 II.

Fuente: Los autores.

### 4.3 Descarga de datos recopilados por el Analizador Fluke 438.

Para la descarga de información del analizador existen dos métodos, uno que principalmente consiste en acceder a la memoria de analizador mediante un cable USB a Mini USB tipo A, y un segundo el cual implica acceder directamente a la memoria del instrumento, en nuestro caso

debido a la Ausencia del Driver controlador del dispositivo, hemos optado por la segunda opción.

### 4.3.1 Acceso a los archivos de memoria Fluke 438 II.

Para empezar, debemos extraer la memoria del Equipo en cuestión, la cual se encuentra alojada en el compartimiento de la batería del analizador, conteniendo una tarjeta de memoria SD Card en un slot alado de la batería.

Luego de conectar la tarjeta al computador, debemos acceder a la opción Tarjeta SD Fluke 430, Previamente mencionada en el Programa Power Log 430, esta desplegará un fichero en el cual debemos seleccionar la memoria con la que se está trabajando.

Tras extender un menú de pantalla podremos observar todos los archivos y pruebas realizadas que mostrara a su vez todos los parámetros registrados junto a una vista previa y el periodo transcurrido en dicha medición, todo esto es posible observar a continuación en la figura 42.

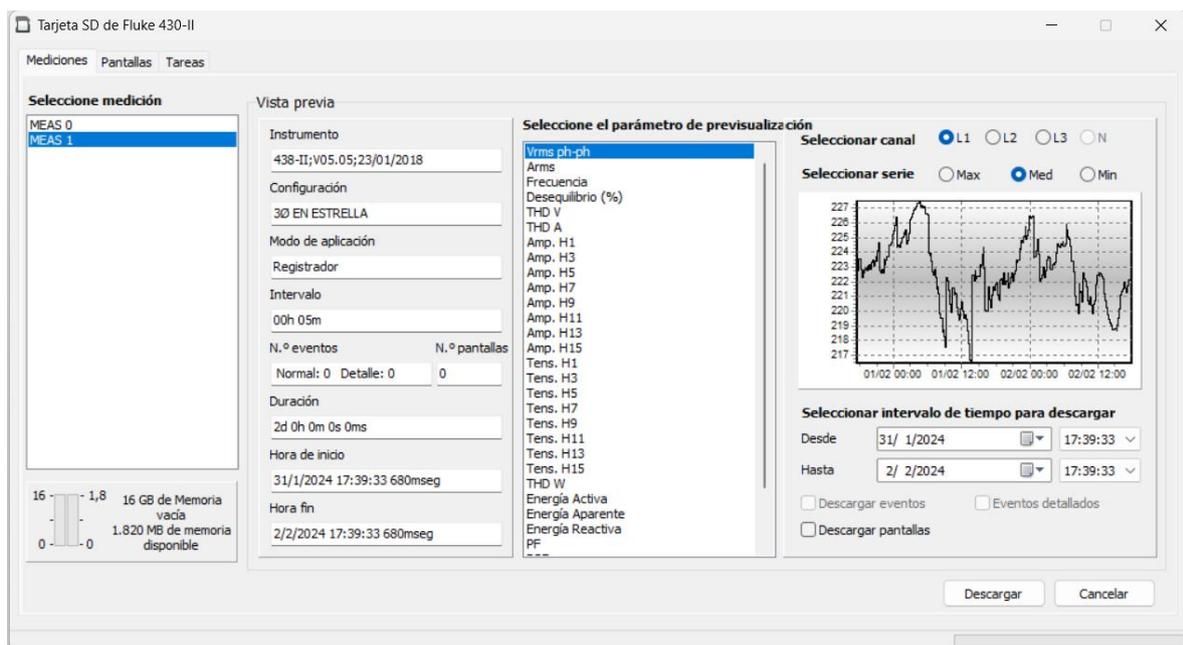


Figura 42. Menú de transferencia de datos Tarjeta SD Fluke 430 obtenidas del Software Power Log 430 II.

Fuente: Los autores.

Posteriormente podemos seleccionar que parámetros son útiles para generar un archivo Meas compatible con el programa, por último, descargamos y tendremos listo los datos para su posterior análisis.

## 5 METODOLOGÍA Y DESARROLLO

### 5.1 Método analítico para dimensionamiento de la disipación del transformador.

Para realizar el siguiente cálculo primero dimensionaremos el área total de disipación del transformador para lo cual usaremos la siguiente formula:

$$ST = 2H(W + L)[25]$$

ST: Área de transformador

H: Altura del transformador

W: Ancho del transformador

L: Largo del transformador

$$ST = 2(1.07)(0.61 + 1.06)[25]$$

$$ST = 3.57 \text{ m}^2$$

A esta área deberá sumarse el área total de los alerones de disipación del transformador

#### Área de los alerones del transformador

Largo = 0.71 m

Ancho = 0.10 m

N. alerones = 60

$$Area = (Largo * Ancho)N. Alerones * 2[25]$$

$$Area = (0.71 * 0.1)60 * 2$$

$$Area = 8.52\text{m}^2$$

$$\text{Àrea total} = 3.57\text{m}^2 + 8.52\text{m}^2 = 12.09\text{m}^2$$

Con esto tenemos que el transformador cuenta con un área de disipación de 12.09 m<sup>2</sup>

### 5.2 Cálculo de la elevación de la temperatura en el transformador

Otro elemento fundamental al realizar el análisis del transformador es el estudio de la elevación de temperatura que puede soportar, para ello se realiza el siguiente calculo:

$$Elevacion \text{ de temperatura} = \frac{Perdidas \text{ Totales}}{12.5 \times Area \text{ del Transformador}}$$

Para poder obtener las pérdidas totales del transformador recopilamos los datos de la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2115:2004, según la capacidad del transformador sus pérdidas totales residen en Cobre y en el núcleo de este, por lo que:

$$Perdidas T. = Perdidas_{CU} + Perdidas_{Nucleo} [26]$$

Según la norma NTE INEN 2115:2004, las pérdidas se rigen según la capacidad del transformador como se observa en la Tabla 3, en nuestro caso el Edificio E cuenta con un transformador de 750 KVA, teniendo pérdidas por valores de

$$Perdidas T. = 8386 W + 1453 W$$

$$Perdidas T. = 9839 W$$

POTENCIA NOMINAL (kVA)	I <sub>o</sub> (% de I <sub>n</sub> )	P <sub>o</sub> (W)	P <sub>c</sub> (W)	P <sub>t</sub> (W)	U <sub>zn</sub> (%)
15	4,4	80	313	393	3,0
30	3,6	134	514	648	3,0
45	3,6	182	711	893	3,0
50	3,4	197	776	973	3,0
60	3,2	225	903	1 128	3,5
75	2,6	266	1 094	1 360	3,5
100	2,6	330	1 393	1 723	3,5
112,5	2,6	361	1 539	1 900	3,5
125	2,6	390	1 682	2 072	3,5
150	2,4	447	1 959	2 406	4,0
160	2,5	486	2 211	2 697	4,0
200	2,1	569	2 630	3 199	4,0
225	2,1	618	2 892	3 510	4,0
250	2,1	666	3 153	3 819	4,0
300	2,0	758	3 677	4 435	4,5
350	2,0	846	4 200	5 046	4,5
400	1,9	930	4 730	5 660	4,5
500	1,7	1 090	5 770	6 860	5,0
630	1,6	1 284	7 170	8 454	5,0
750	1,6	1 453	8 386	9 839	5,0
800	1,6	1 521	8 909	10 430	5,0
1 000	1,6	1 782	11 138	12 920	5,0
1 250	1,5	2 088	13 454	15 542	6,0
1 500	1,5	2 395	15 770	18 165	6,0
1 600	1,5	2 518	16 696	19 214	6,0
2 000	1,5	3 009	20 402	23 411	6,0

Tabla 3. Tabla de transformadores Trifásicos 15 a 2000 KVA [26].

Fuente: Los autores.

Continuando el cálculo de la elevación de la temperatura del transformador se obtiene que:

$$Elevacion\ de\ temperatura = \frac{9839\ W}{12.5 \times 12.09m^2} [25]$$

$$Elevacion\ de\ temperatura = 65.08\ ^\circ C$$

Por lo tanto, con el cálculo realizado previamente obtenemos un resultado similar a la temperatura de placa que es de 65°C.

Por otro lado, el transformador tan solo funciona al 20% de su capacidad nominal por lo tanto sus pérdidas totales serán del

$$Perdidas_{cu}20\% = 438.35 \text{ W}$$

$$Perdidas_{nucleo} = 1453 \text{ W}$$

Por lo tanto:

$$Per_{Total} 20\% = Perdidas_{cu}20\% + Perdidas_{nucleo}$$

$$Per_{Total} 20\% = 438.35 \text{ W} + 1453 \text{ W}$$

$$Per_{Total} 20\% = 1891.35 \text{ W}$$

### **Pérdidas al cobre 20%**

$$Per. cu_{100\%} = I_{100\%}^2 * r$$

$$P_{20\%} = I_{20\%}^2 * r$$

$$\frac{P_{100\%}}{P_{20\%}} = \frac{I_{100\%}^2}{I_{20\%}^2}$$

Despejando nos queda como resultado:

$$P_{20\%} = \frac{P_{100\%}}{\frac{I_{100\%}^2}{I_{20\%}^2}} = \frac{8386 \text{ W}}{\left(\frac{1968.24 \text{ A}^2}{450 \text{ A}^2}\right)} = 438.38 \text{ W}$$

$$I_{100\%} = 1968.24 \text{ A (Dato de placa del transformador)}$$

$$I_{20\%} = 450 \text{ A (Dato obtenido del analizador)}$$

Ahora calcularemos la elevación de temperatura al 20% lo nos dará una temperatura de:

$$Elevacion \text{ de temperatura} = \frac{1891,35 \text{ W}}{12.5 \times 12.09 \text{ m}^2}$$

$$Elevacion \text{ de temperatura} = 12.51^\circ\text{C}$$

Esta sería la temperatura real del transformador, sin embargo, debido a condiciones climáticas se añade 30°C de temperatura ambiente, dando como resultado una temperatura total en el cuarto de 42.51°C. Constatando con la temperatura real del transformador del edificio dando un aproximado de 41°C. A continuación, se presenta una evidencia del cálculo realizado:



*Figura 43. Termostato del transformador de 750 KVA del edificio E Universidad Politécnica Salesiana.*

*Fuente: Los autores.*

### **5.3 Dimensionamiento del cuarto de transformador.**

Por razones de seguridad el transformador debe estar alojado en un área de acceso restringido, fuera del alcance de personal o usuarios, dentro del complejo, para esto se destina se destina un cuarto exclusivo para el transformador.

De acuerdo con el manual de instalaciones eléctricas y sistemas de medición de CNEL EP, el cuarto de transformadores debe de cumplir con requisitos técnicos como:

- Una loza de hormigón con una altura mínima de 2.5 metros estructurado para soportar una carga máxima según su utilización.
- Para evitar la corrosión de la base del transformador, se debe construir una base de hormigón de 10 cm de altura, capaz de soportar el transformador.
- El cuarto deberá tener una ventilación apropiada para mantener en su interior una temperatura que no sobrepase los 40 °C a plena carga.

- Deberá de tener una puerta de acceso con un dimensionamiento de 2 m de alto por 1 m de ancho, construida en una plancha de 1/16” de espesor, y con un elemento adecuado para la colocación de sellos de seguridad por parte de CNEL EP.
- El área de rectangular mínima será de acuerdo la capacidad del transformador, siendo en nuestro caso de estudio un transformado trifásico de 750 KVA [21].

DIMENSIONES DEL CUARTO	CAPACIDAD TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS
2.5 x 2.5m	Hasta 100 kVA (1 sólo transformador Trifásico)
3.0 x 2.5m	Hasta 150 kVA (1 sólo transformador Trifásico)
3.0 x 3.0m	Hasta 300 kVA (1 sólo transformador Trifásico)
3.5 x 3.5m	Hasta 750 kVA (1 sólo transformador Trifásico)
4.0 x 4.0m	Hasta 1,000 kVA (1 sólo transformador Trifásico)

Tabla 4. Dimensiones del cuarto de transformador [21].

Fuente: Los autores.

#### 5.4 Procedimientos para realizar el estudio de la calidad de energía del edificio

El proyecto se llevó a cabo con una medición de los parámetros de calidad de la energía en el transformador que supe la carga eléctrica del edificio “E” mediante el Fluke 438 II, principalmente focalizado en distorsiones armónicas, a su vez se utilizará software especializado para realizar un filtro armónico de acorde a las necesidades de la edificación.

A continuación, se describe el procedimiento a seguir:

1. Familiarizarse con el equipo de medición, su funcionamiento, características y configuraciones técnicas y descarga de datos.
2. Establecer el periodo de prueba en el cual se tomarán las mediciones de acorde al ciclo de trabajo del edificio E.
3. Realizar las pruebas de calidad de energía en el transformador del bloque “E” con el analizador de redes Fluke 438 II con el docente tutor.
4. Descarga de información del analizador con ayuda del software Power Log.
5. Analizar los datos recopilados en la prueba en búsqueda de distorsiones armónicas en la red y presentar el informe técnico.

6. Realizar de pruebas con los datos recopilados y presentar un modelo de filtro de armónicos de acorde a las necesidades del edificio.

### 5.5 Instalación del Equipo de medición

Para la recopilación de datos con uso del Analizador es requerido el pleno conocimiento tanto del Equipo como de la correcta instalación para una recopilación de datos efectiva.

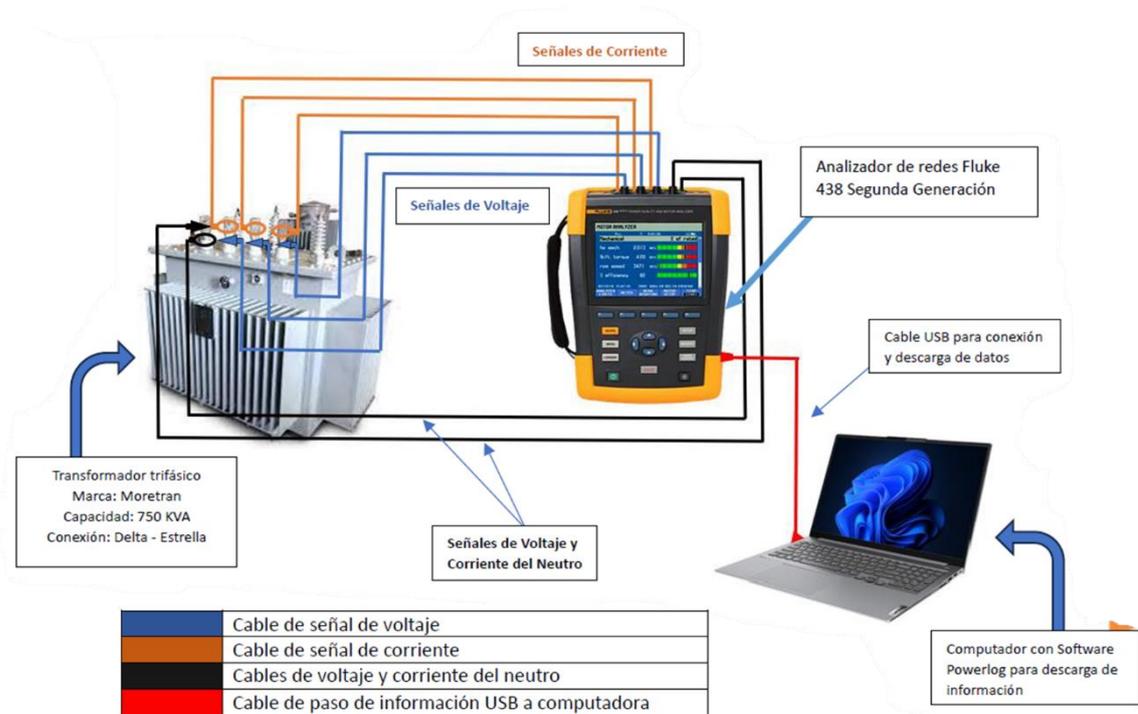


Figura 44. Diagrama de conexión del analizador de redes al transformador.

Fuente: Los autores.

El miércoles 31 de enero a las 5 pm, junto con los responsables del área de manteniendo y un docente encargado, se procedió al ingreso del cuarto de transformador del edificio “E” para la instalación del analizador de redes.

Se procedió a realizar la configuración del analizador Fluke 438 II previamente a su instalación en el transformador del edificio E, al momento de instalar el analizador se procuró configurar en la opción LOGGER, tanto el perfil de datos a analizar (tales como tensión, corrientes, armónicos, frecuencia, potencia y factor de potencia) y el periodo de medición de dos días de muestreo, junto con los parámetros se escogió la configuración del transformador (en este caso una conexión Delta-Estrella ), debido a que el caso de estudio solo involucra la red eléctrica del edificio, el instrumento se instaló en el lado de baja tensión (Conexión estrella), por último se procedió a la instalación de las pinzas y toroides que envían señales de voltaje y corriente respectivamente al analizador, cabe recalcar que para realizar las maniobras necesarias para la

instalación se usó los equipos de protección pertinentes para evitar descargas eléctricas, tales como botas y guantes dieléctricos, así como casco de protección 5H.



*Figura 45. Ingreso al curto de transformador para instalación del equipo de medición Fluke 438 II.*

*Fuente: Los autores.*

Al momento de instalar el equipo se tomaron valores en tiempo real para analizar las condiciones y estado del transformador, así como para asegurar que el instrumento realiza la lectura de los parámetros ingresados al perfil de lectura, al realizar la medición.

A lo cual se obtuvieron los siguientes resultados:

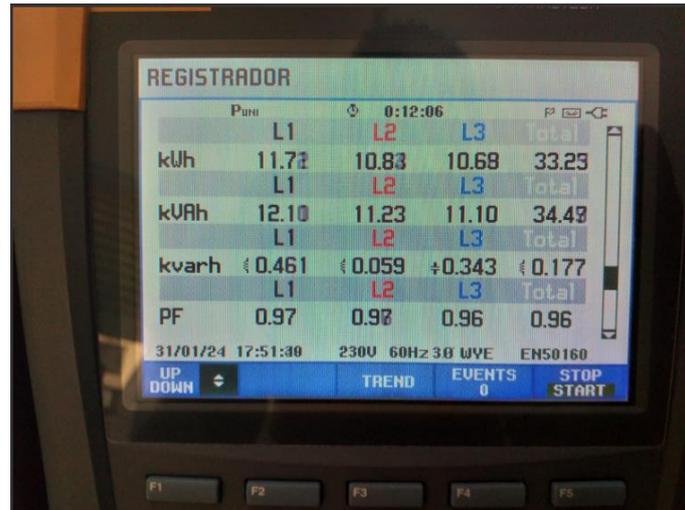


Figura 46. Lecturas en tiempo real valores de potencia activa, reactiva, aparte y factor de potencia en el momento que se realizó la instalación del equipo de medición.

Fuente: Los autores.



Figura 47. Valores de armónicos de corriente al momento que se realizó la instalación del Equipo de medición.

Fuente: Los autores.

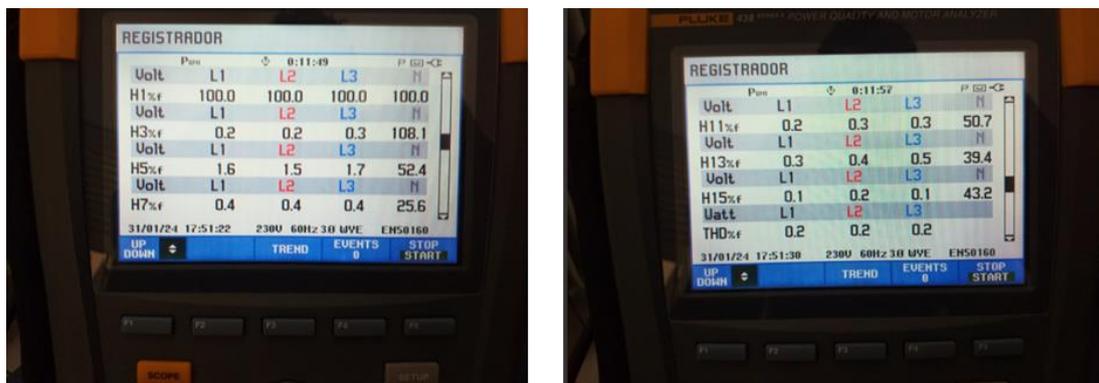


Figura 48. Valores de Armónicos de voltaje al momento que se realizó la instalación de equipo de medición.

Fuente: Los autores.

A primera vista los datos de potencias y FP están dentro de los límites establecidos por normativas del manual de instalaciones de CNEL EP, además los valores de armonios tanto de potencia como de voltaje no presentan novedades, no obstante, los armónicos de corriente pasan los límites establecidos según normativas del ARCERNNR.

### 5.6 Cálculo del factor K.

El factor K se lo conoce como un índice que es usado para delimitar la capacidad de los transformadores para resistir los efectos del calentamiento producido por cargas no lineales con efectos de armónicos [27].

El factor K dependerá de la normativa aplicada al transformador ya sea americana (IEEE) o europea (IEC), tomando esto en cuenta realizaremos la prueba con la normativa europea con valores obtenidos tras la prueba con el analizador.

Para eso usaremos la siguiente Formula:

$$K = \sqrt{1 + \frac{e}{1+e} * \left(\frac{I_n}{I}\right) * \sum_{n=2}^{n=N} n^q \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2} \quad [28]$$

Donde:

$e$  = Son las Perdidas de Foucault por corrientes sinusoidales a frecuencia fundamental, el cual puede ser proporcionado por el fabricante del transformador y suele tener un valor de 0,3

$n$  = Orden o rango del armónico.

$I$  = Este es el valor eficaz de la corriente (IRMS).

$I_n$  = Valor de la corriente del enésimo armónico.

$I_1$  = Es la corriente fundamental.

$q$  = Esta es una cifra exponencial constante que varía según los arrollamientos y la frecuencia.

Tomando valores según:

- 1.7 se aplica a transformadores con conductores circulares o de forma rectangular en bobinados de baja tensión y alta.

- 1.5 se aplica a transformadores de núcleo laminado en baja tensión.

A continuación, se presenta el cálculo realizado para encontrar el factor K:

$$K = \sqrt{1 + \frac{0,3}{1 + 0.3} \left(\frac{687.66}{729}\right)^2 * 3^{1.7} \left(\frac{28.22}{687.66}\right)^2 + 5^{1.7} \left(\frac{112.49}{687.66}\right)^2 + 7^{1.7} \left(\frac{60.77}{687.66}\right)^2 + 9^{1.7} \left(\frac{17.43}{687.66}\right)^2 + 11^{1.7} \left(\frac{52.15}{687.66}\right)^2 + 13^{1.7} \left(\frac{39.15}{687.66}\right)^2 + 15^{1.7} \left(\frac{9.8}{687.66}\right)^2}$$

$$K = 1.5073$$

Una vez hallado el factor K, procedemos analizar la capacidad del transformador, con cargas no lineales.

$$S = \frac{S(KVA)}{K} = \frac{750KVA}{1.50} = 497.57 KVA$$

Con este resultado podemos inferir de que el transformador funcionando a plena carga, en realidad está trabajando a una potencia de 497.57 KVA, siendo este la capacidad máxima a la que llegaría, por lo tanto, con este resultado concluimos que el transformador puede llegar a trabajar con una eficiencia máxima del 44% reduciendo demasiado su capacidad y generando muchas pérdidas por efecto Joule.

## 6 ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS.

A continuación, se analizará algunos de los resultados obtenidos por parte del analizador durante el tiempo de medición:

## 6.1 Voltaje de Línea- neutro por cada fase

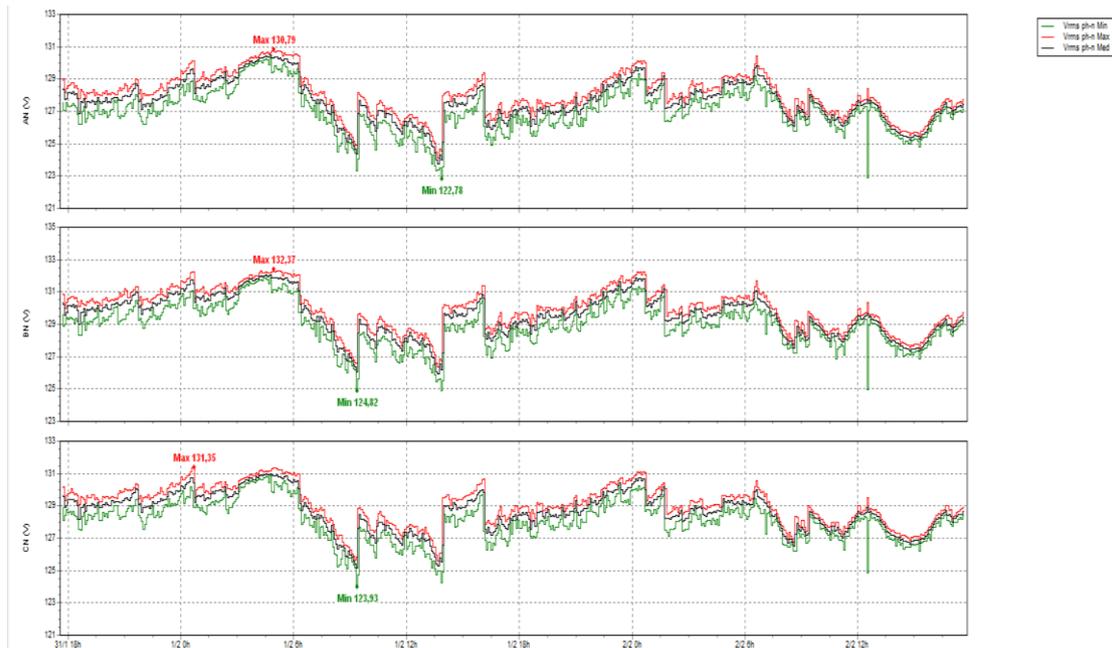


Figura 49. Voltaje de Línea-Neutro por fase.

Fuente: Los autores.

Se puede observar que los valores de tensión en cada una de las fases se encuentran dentro de valores admisibles, lo cual se refleja en el neutro porque tiene un voltaje pequeño debido a que el sistema está balanceado. A su vez tenemos un registro máximo de voltaje LN de 130.79 V y un registro mínimo de 124.15 V.

## 6.2 Voltaje de Línea - Línea

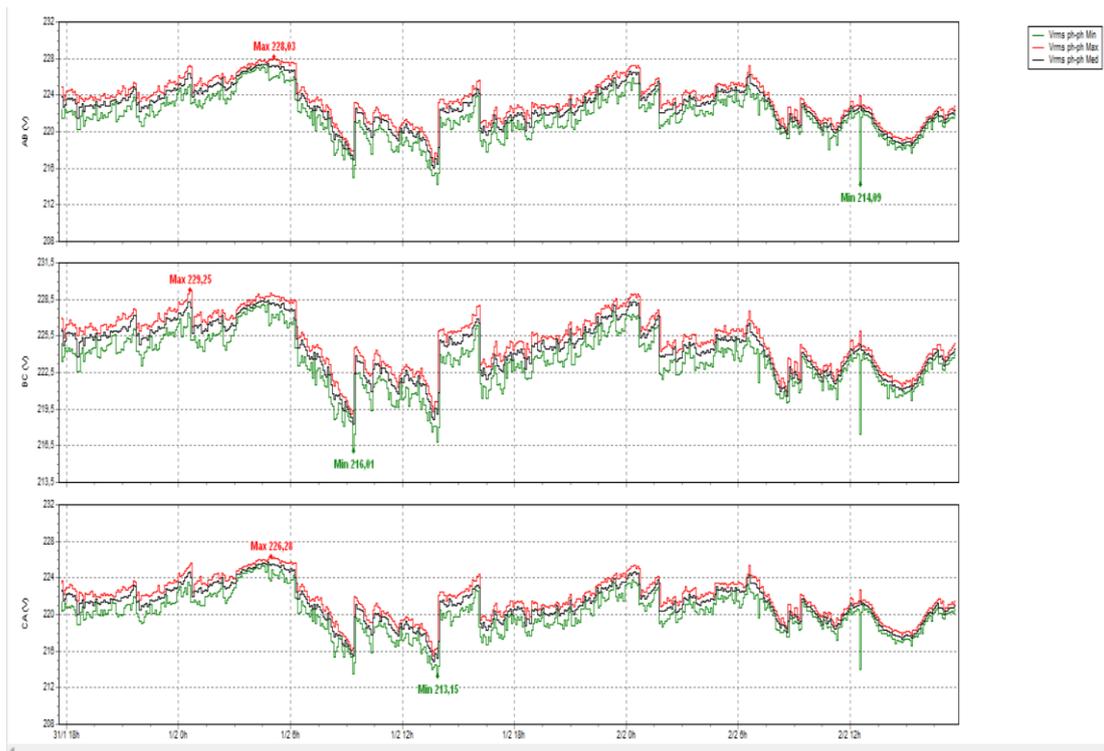


Figura 50. Voltaje de Línea- línea

Fuente: Los autores.

En lo que respecta al voltaje L-L tenemos valores aceptables que están en el rango de la normativa, no obstante, se puede observar ciertas caídas de voltaje (Una caída entre 4V y 7V aproximadamente) en determinados instantes para luego retomar a su voltaje regular, a su vez tenemos un registro máximo de voltaje de 229.25 V y un valor mínimo de 213.15 V.

### 6.3 Corriente por fase incluyendo la corriente por neutro

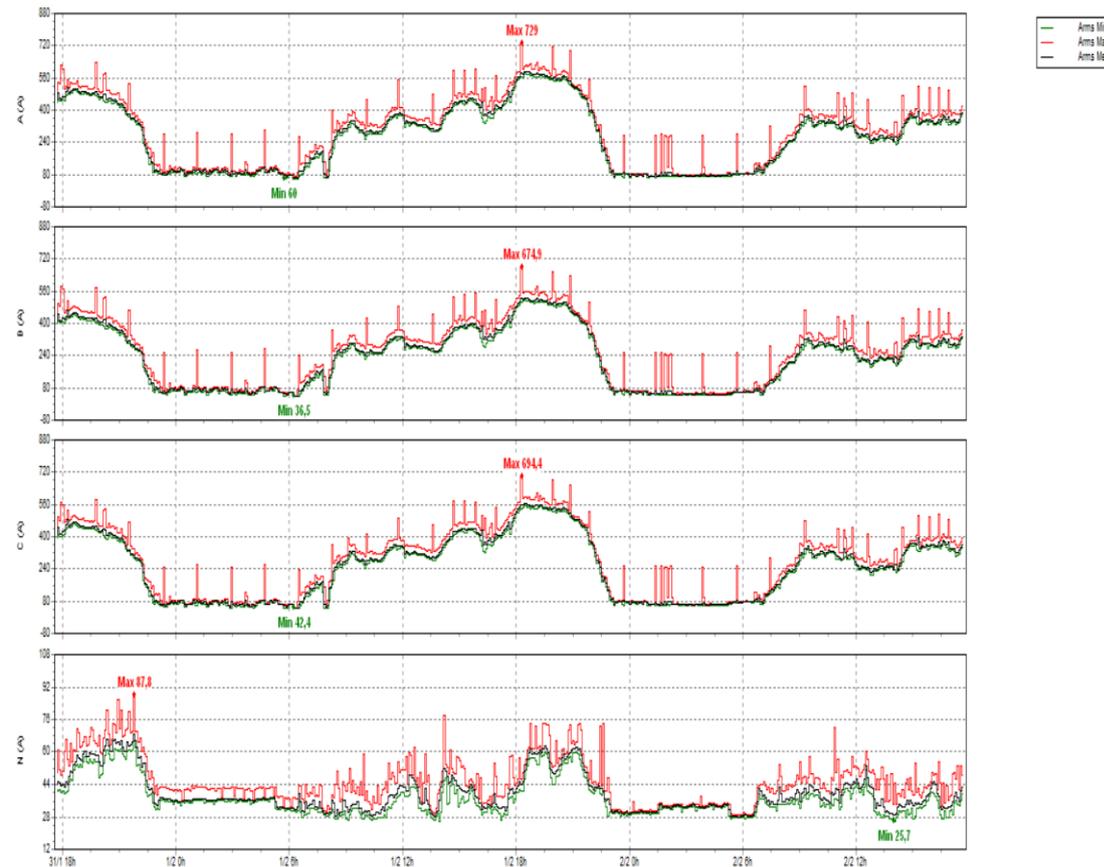


Figura 51. Corriente por cada fase incluyendo el neutro.

Fuente: Los autores.

En la gráfica de la figura 51 tenemos el comportamiento de la corriente durante el tiempo de muestreo de los datos, donde tenemos un pico máximo de corriente de 729 A y un valor mínimo de 36.5 A en las fases, mientras que, en el neutro, existe un máximo de corriente de 87.8 A y un mínimo de 25.7 A. Sin embargo, podemos visualizar el ciclo de trabajo del edificio donde en la madrugada entre las 12AM-6AM tenemos un bajo consumo de corriente porque no hay actividad dentro de las instalaciones, pero a partir de las 7AM hasta las 23:00 PM existe un gran consumo de corriente por toda la actividad que se lleva durante el día dentro del edificio.

## 6.4 Frecuencia y desequilibrio

### 6.4.1 Frecuencia del Sistema

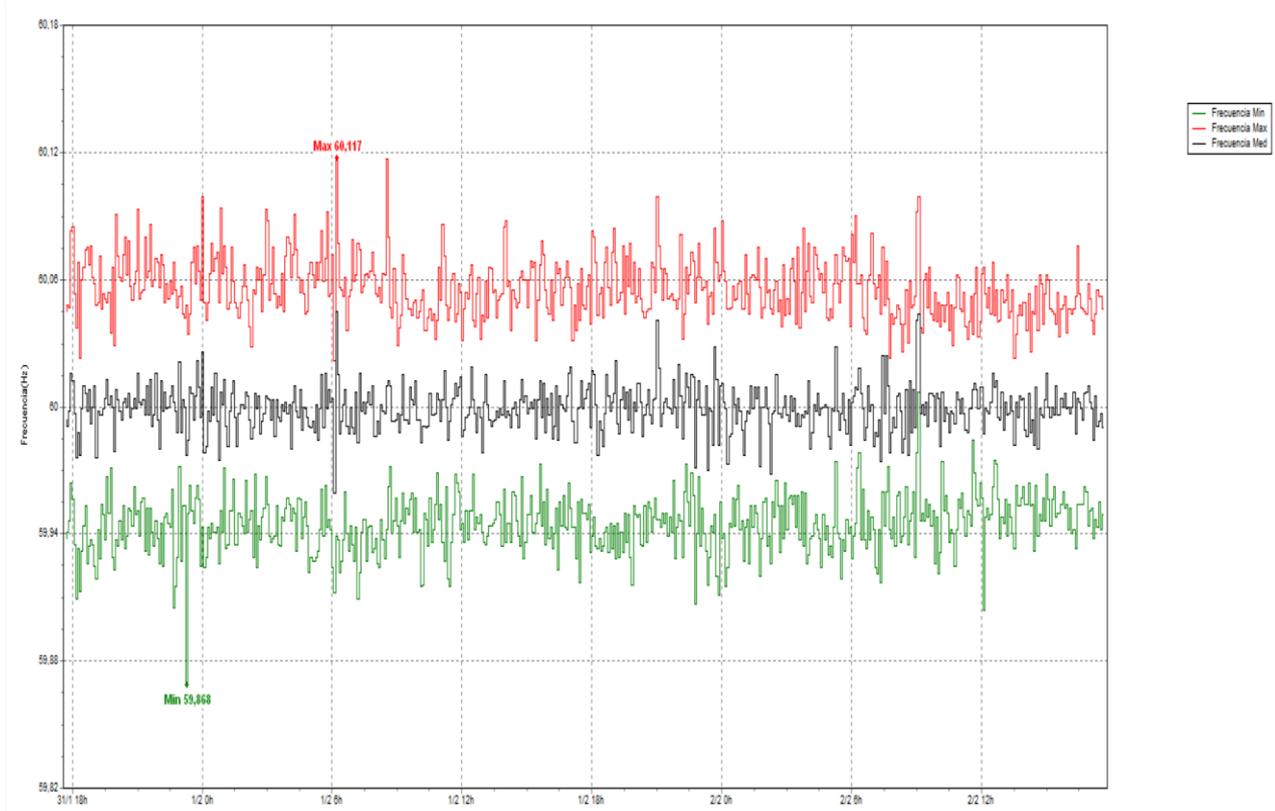


Figura 52. Frecuencia del sistema.

Fuente: Los autores.

Podemos observar que la frecuencia no tiene una caída considerable para afectar al sistema eléctrico de la instalación, la cual se encuentra dentro de los valores admisibles, en el cual el valor máximo de frecuencia es de 60.11 Hz y un mínimo de 59.86 Hz como se muestra en la figura 52.

Mantener la frecuencia eléctrica estable dentro de los rangos predeterminados es crucial para asegurar un suministro de energía continuo y fiable. Además, esta estabilidad es fundamental para garantizar el funcionamiento óptimo de los dispositivos conectados al sistema eléctrico, previniendo posibles daños y asegurando una operación eficaz en todas las actividades.

En conclusión, la evaluación de la frecuencia eléctrica demuestra que no existe una caída considerable que pueda afectar perjudicialmente al sistema eléctrico de la instalación. La frecuencia se mantiene dentro de los parámetros normativos, lo cual brinda tranquilidad con respecto a la integridad y efectividad operativa del sistema eléctrico en cuestión.

## 6.4.2 Desequilibrio de Tensión

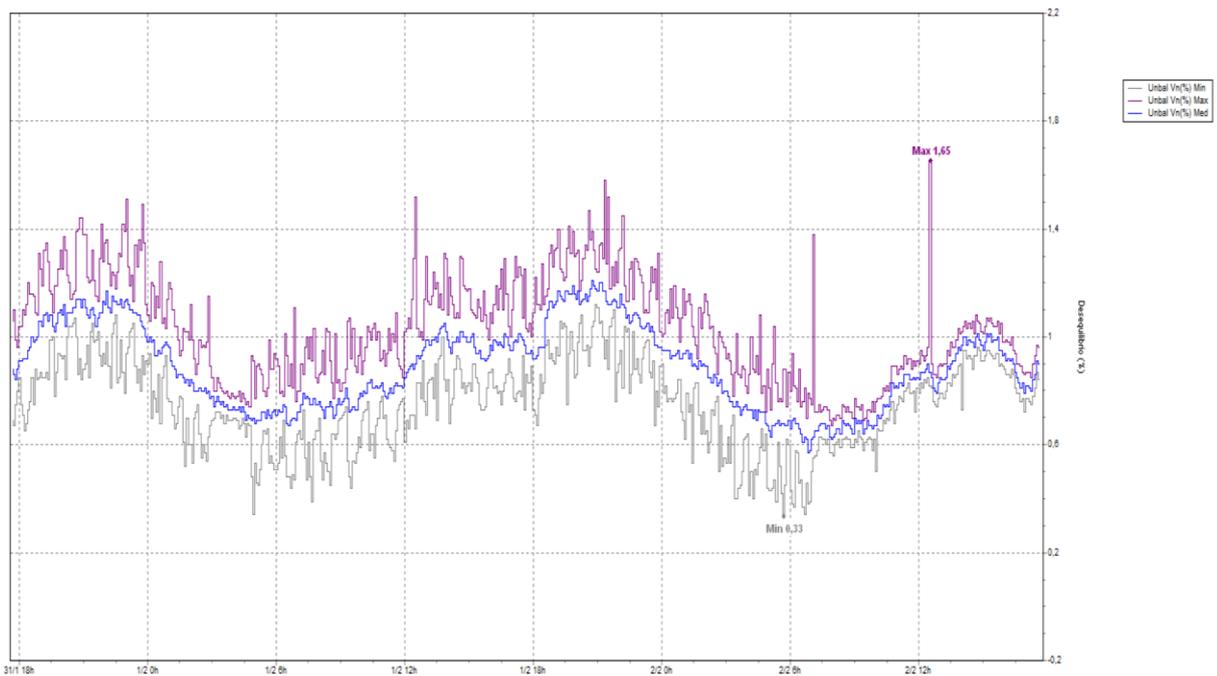


Figura 53. Gráfica de desequilibrio de Voltajes.

Fuente: Los autores.

En este caso, tenemos el desequilibrio de voltaje entre línea y neutro donde tenemos registro de un desbalance máximo de 1.65% que decrece hasta un mínimo de 0.33% como se observa en la figura 53, lo cual se encuentra dentro rango admisible según la norma IEC 61000-4-30 en donde se permite hasta un desbalance recomendado del 2% [29].

### 6.4.3 Desequilibrio de Corrientes.

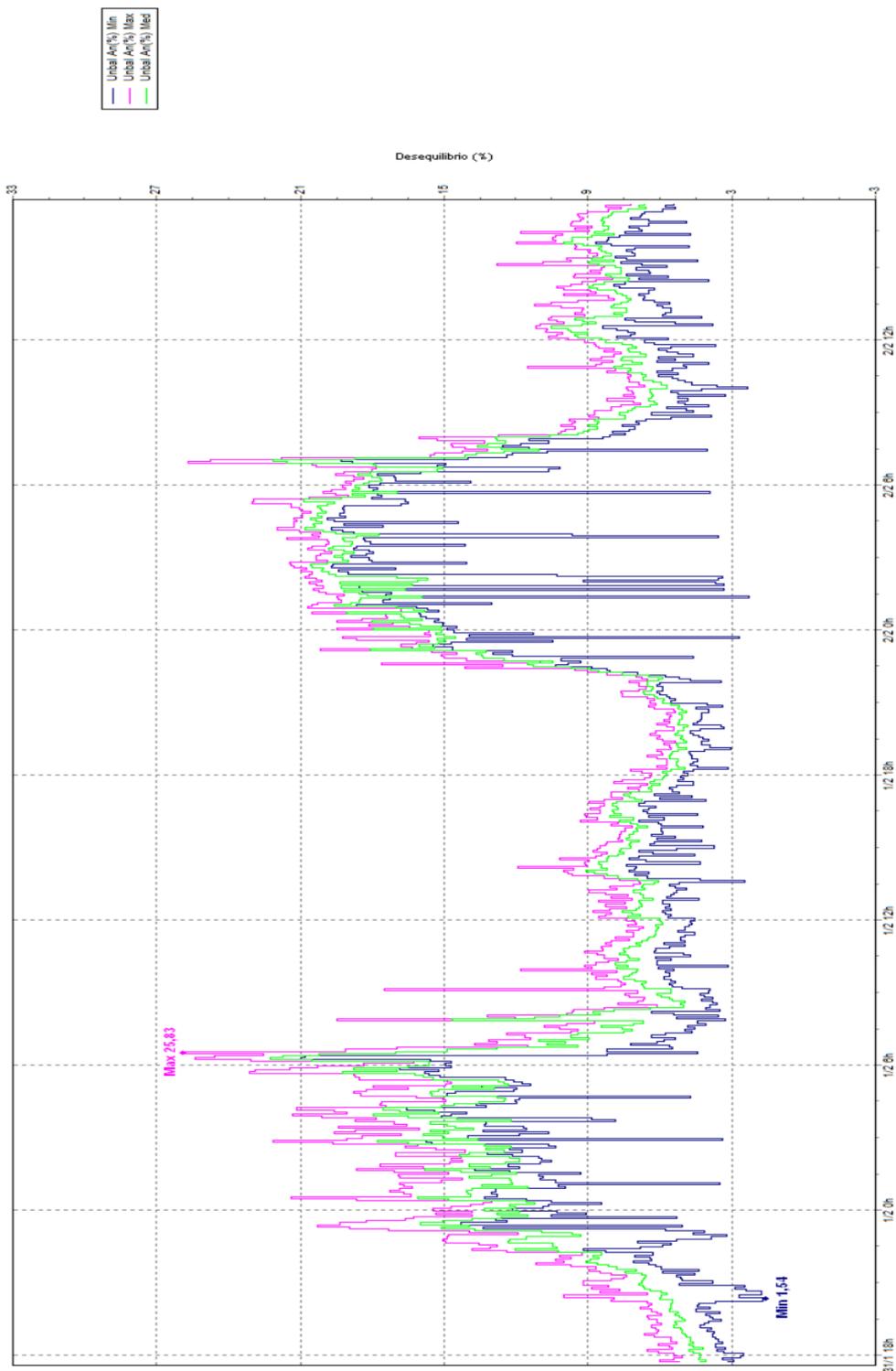


Figura 54. Gráfica de desbalance de corrientes.

Fuente: Los autores.

De forma general no existe un porcentaje admisible de desbalance de corrientes, ya que solo se establecen para límites de tensión netamente a transformadores trifásicos, en nuestro caso

argumentamos un desbalance de corrientes que puede llegar máximo a 25.84 % y reducirse hasta un máximo de 1.54 % como se puede observar en la figura 54.

### 6.5 Factor de Potencia (FP)

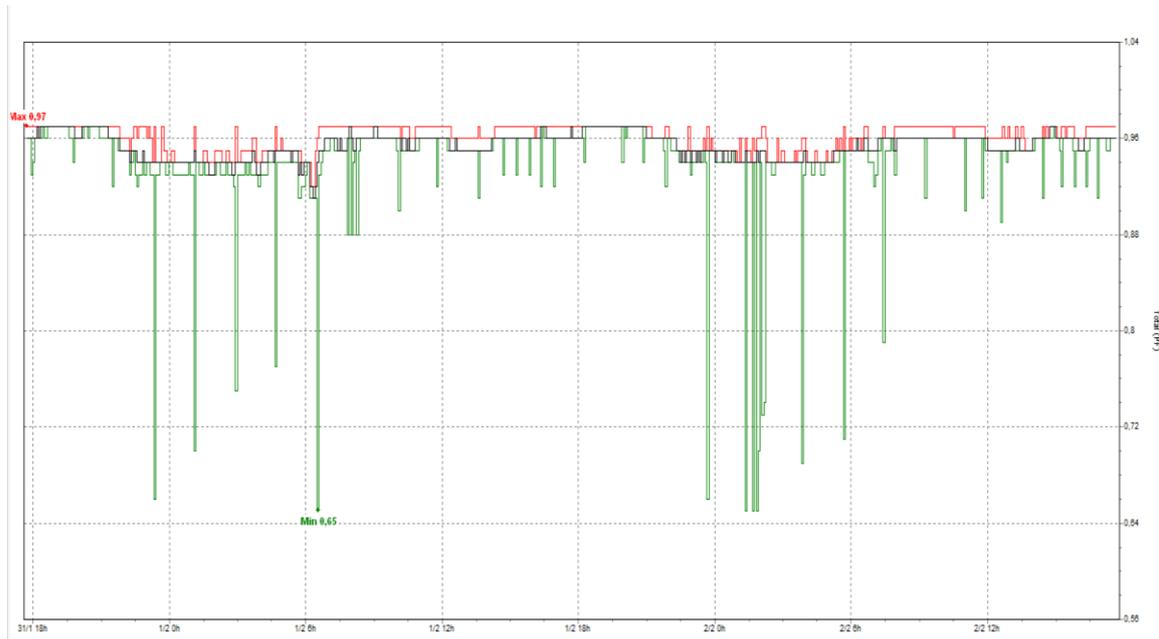


Figura 55. Diagrama de Factor de potencia.

Fuente: Los autores.

En la gráfica 55 podemos observar el comportamiento del factor de potencia, donde se evidencia una disminución considerable del mismo hasta valores de 0.65 desde la 12 AM-6AM periodo en el cual no hay actividad dentro de la institución, sin embargo el FP se encuentra en valores aceptables durante las horas laborables desde las 7AM- 23PM, llegando hasta un valor máximo de 0.97.

Según el manual para instalación de acometidas y sistemas de medición de consumidores de CNEL EP establece que el factor de potencia debe ser mínimo de 0.92 si el FP de la instalación llega a ser inferior al valor mencionado anteriormente CNEL EP procederá aplicar una penalización por bajo factor de potencia [12].

## 6.6 Energías activas reactivas y aparentes

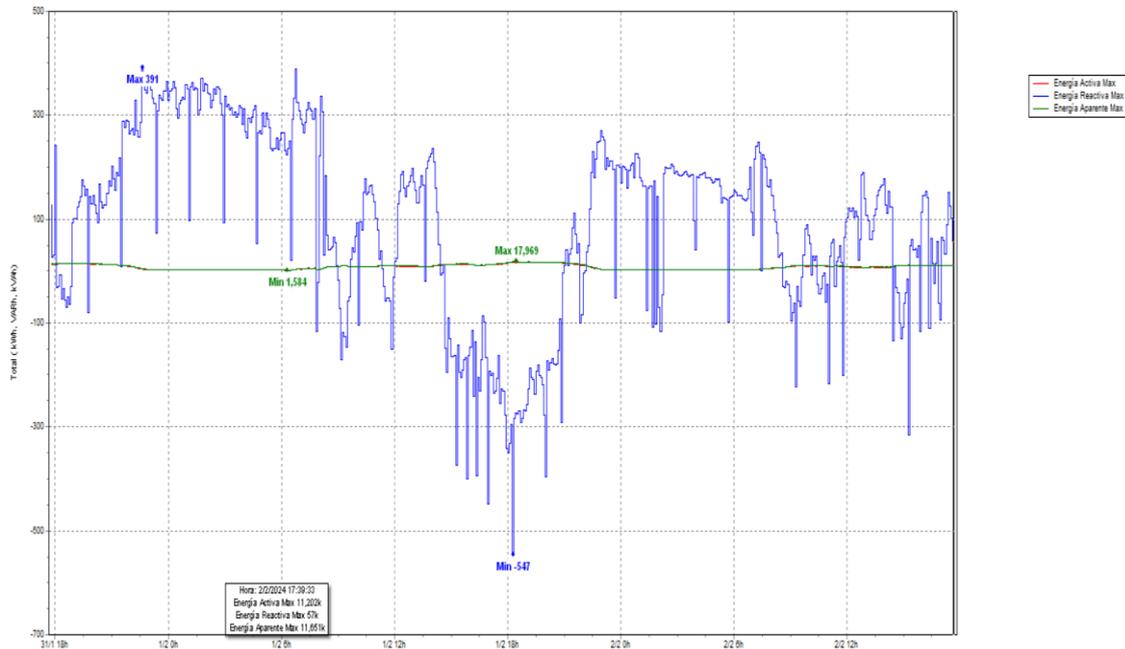


Figura 56. Energías activas, reactiva y aparente.

Fuente: Los autores.

En esta gráfica podemos observar que se consume principalmente energía reactiva porque el transformador se encuentra trabajando prácticamente en vacío (funciona al 20%), contamos con un valor máximo de kvarh de 391 KVARh en un periodo de 12AM-6AM cuando no hay actividad dentro de la instalación, y el resto del día laborable trabaja con “normalidad,” no obstante gran parte de la energía que se está produciendo es para la creación de campo magnéticos ;por lo cual, inferimos de que existe una predominancia de cargas inductivas dentro de la instalación.

## 6.7 Armónicos tensión

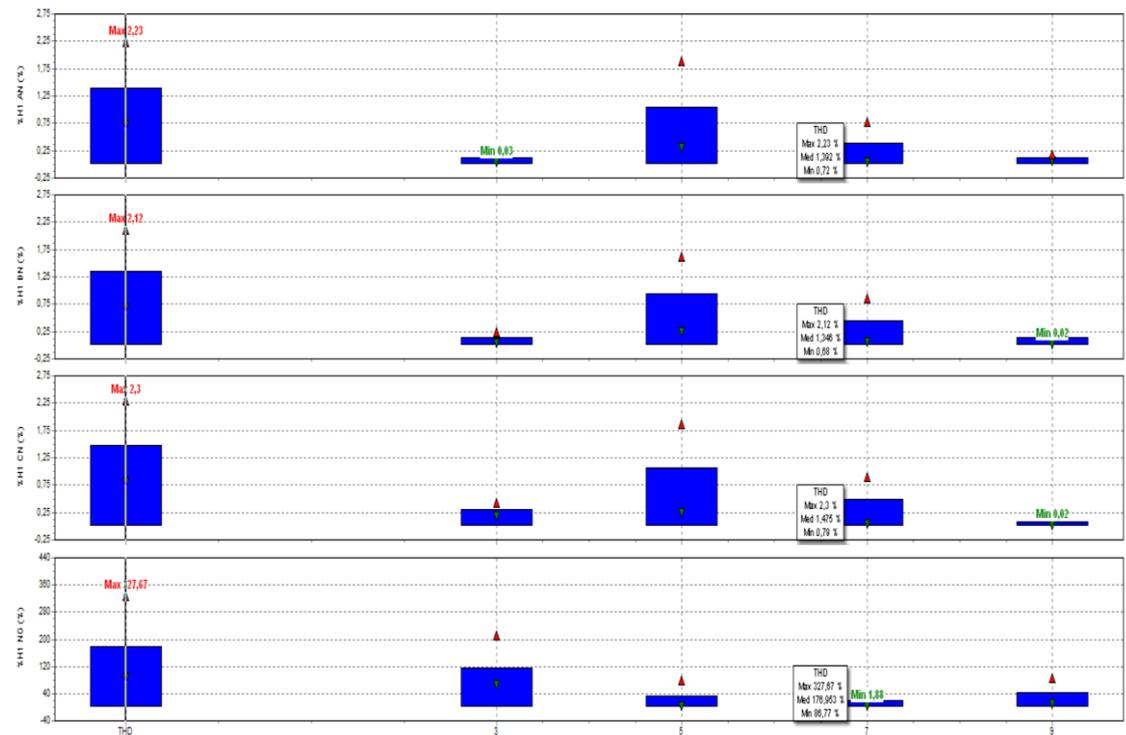


Figura 57. Armónicos de tensión.

Fuente: Los autores.

Los valores de THD de voltajes en las fases se encuentran en valores aceptables, según lo establecido en la normativa (basándose en la tabla 1) donde sus valores son menores al 8%, sin embargo, encontramos que el THD del neutro se encuentra con un valor máximo de 327.67% lo cual es demasiado y no se encuentra dentro de los límites establecidos por la normativa.

## 6.8 Armónicos de corriente

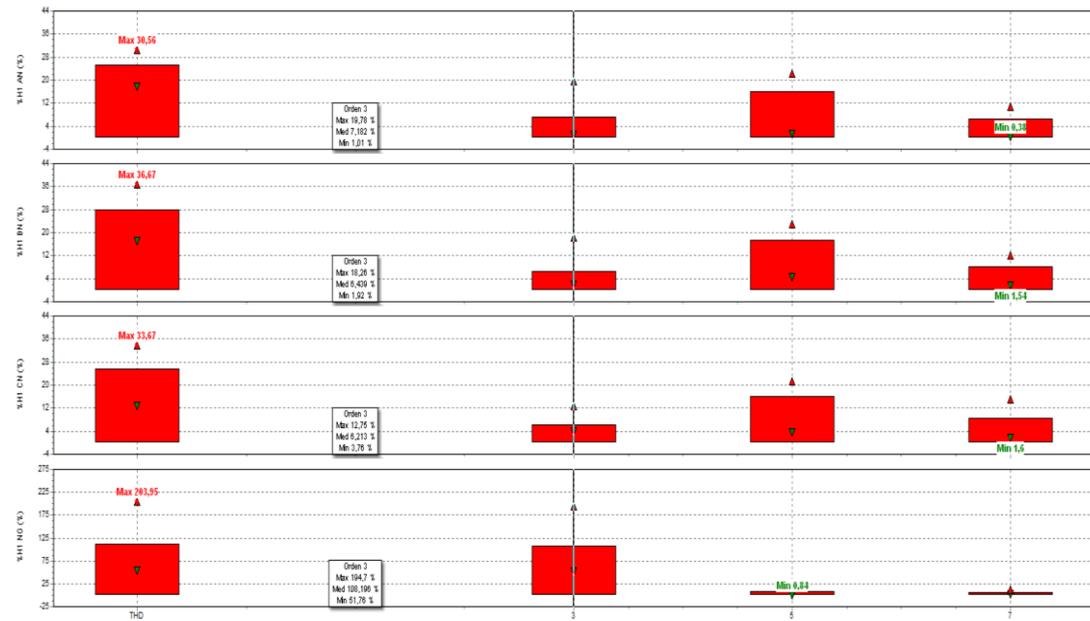


Figura 58. Armónicos de corriente.

Fuente: Los autores.

Los datos de THD de corriente se encuentran fuera por lo establecido en la normativa (basado en la tabla 2) en este caso nos encontramos con valores máximos de 30.56%, 36.67%, 33.67% (por cada fase) y de 203.95% en el neutro, es evidente que la mayor cantidad de armónicos se lo está llevando el neutro conocido como armónicos homopolares, podemos visualizar una incidencia fuerte de los armónicos 3, 5, 7, 11 y 13, para concluir es necesario la instalación de un filtro activo para la mitigación de los armónicos mencionados con anterioridad para tener una buena calidad de la energía en el edificio y garantizar la confiabilidad del sistema eléctrico.

## 6.9 Cálculos Y dimensionamiento del Filtro armónico.

Debido a la frecuente presencia de armónicos en la instalación, hemos decidido emplear un filtro armónico activo conectado en paralelo con la carga. Esto se debe a que los únicos armónicos que superan los límites permitidos por la normativa IEEE 519 - 1992, son los de corriente, para esto el filtro en cuestión se encargara de contrarrestar o reducir en mayor medida estas perturbaciones en la red, mediante la inyección o absorción de la corriente según sea necesario [30].

A continuación, el primer paso para el dimensionamiento es hallar la potencia de cortocircuito mediante la siguiente formula:

$$S_{CC} = \frac{\text{Potencia del transformador (KVA)}}{X_{\%}}$$

Donde:

$S_{CC}$  = Potencia de Cortocircuito

KVA = Potencia Aparente del Transformador

$X_{\%}$  = Impedancia de transformador

En nuestro caso contamos con un transformador con una capacidad de 750 KVA y la impedancia de 2,95 % especificado en los datos de placa del transformador dándonos como resultado:

$$S_{CC} = \frac{750 \text{ KVA}}{0.0295} = 25423.728 \text{ KVA}$$

Una vez calculado este valor debemos de hallar la Relación de Cortocircuito (RSC) que se comprende como la relación de la corriente de cortocircuito en la red (ISC) y la corriente nominal de las cargas no lineales (ICNL), lo cual se interpreta como:

$$R_{SC} = \frac{I_{SC}}{I_{CNL}} = \frac{P_{SC}}{P_{CNL}} [30]$$

Para realizar este cálculo hicimos uso de la potencia de cortocircuito en la red, así como de las potencias nominales de las cargas no lineales con un valor de 325 KVA, previamente medidas con el analizador de redes obteniendo como resultado:

$$R_{SC} = \frac{25423.728 \text{ KVA}}{325 \text{ KVA}} = 78,2268$$

Continuando con el dimensionamiento, se debe hallar el factor de sobrecarga del filtro o SFh mediante la siguiente expresión:

$$SFh = 1.1 + \left( \frac{2 - 1,1}{100 - 20} * (100 - R_{SC}) \right) [30]$$

$$SFh = 1.1 + \left( \frac{2 - 1,1}{100 - 20} * (100 - 78.2268) \right) = 1.3449$$

Para culminar realizamos el cálculo de la corriente nominal del filtro, basándonos en el manual de equipos de la marca Circutor donde:

$$I_{AFQ} = SFh * I_1 * THDI [30]$$

Donde:

$I_{AFQ}$  = Corriente Nominal del Filtro

$SFh$  = Factor de Sobrecarga del Filtro

$I_1$  = Corriente de carga o Fundamental

THDI = Distorsión Total de Armónicos de Corriente

Los datos de la corriente fundamental y el THDI son sacados directamente del analizador de redes, con esto procedemos:

$$I_{AFQ} = 1.3449 * 686 A * 36.62\% = 337.86 A$$

Este valor se interpreta como la corriente eficaz (IRMS), por últimos realizamos el cálculo de la corriente Pico para escoger el modelo del filtro activo de armónicos:

$$I_{Pico} = \frac{I_{rms}}{\sqrt{2}} = \frac{337.86 A}{\sqrt{2}} = 238.90 A$$

Con este resultado obtenido la opción más adecuada para mitigar las perturbaciones de la red, según el manual de usuario para filtros activos en paralelo de la marca Circutor, por su principal característica de mitigar varios armónicos así como cumplir con normativas IEEE que son bajo las cuales realizamos el análisis en cuestión, una vez mencionado esto, es viable el uso de un filtro modelo AFQe-4WF-200C tomando en cuenta que cumple con las especiaciones calculadas, se selecciono



Modelo	3 Hilos (L1, L2, L3)	4 Hilos (L1, L2, L3, N)	Modulo Protección	Funcionamiento	
				Maestro	Esclavo
AFQe-3WF-200C	✓	-	✓	✓	-
AFQe-4WF-200C	-	✓	✓	✓	-

Figura 59. Filtro activo paralelo modelo AFQe-4WF-200C marca Circutor [30].

Fuente: Los autores.

### 6.10 Simulación de la red Eléctrica del Edificio “E” de la Universidad Politécnica Salesiana.

Como paso final realizamos la simulación del funcionamiento de la red eléctrica del edificio, simulando algunas de las cargas no lineales presentes en la instalación, que se asemejan a las obtenidas en el registro echo con el analizador de redes.

Para esto es esencial realizar el esquema del diagrama unifilar del edificio, con el cual llevar a cabo la simulación, en este caso haremos el uso del software ETAP 2020.

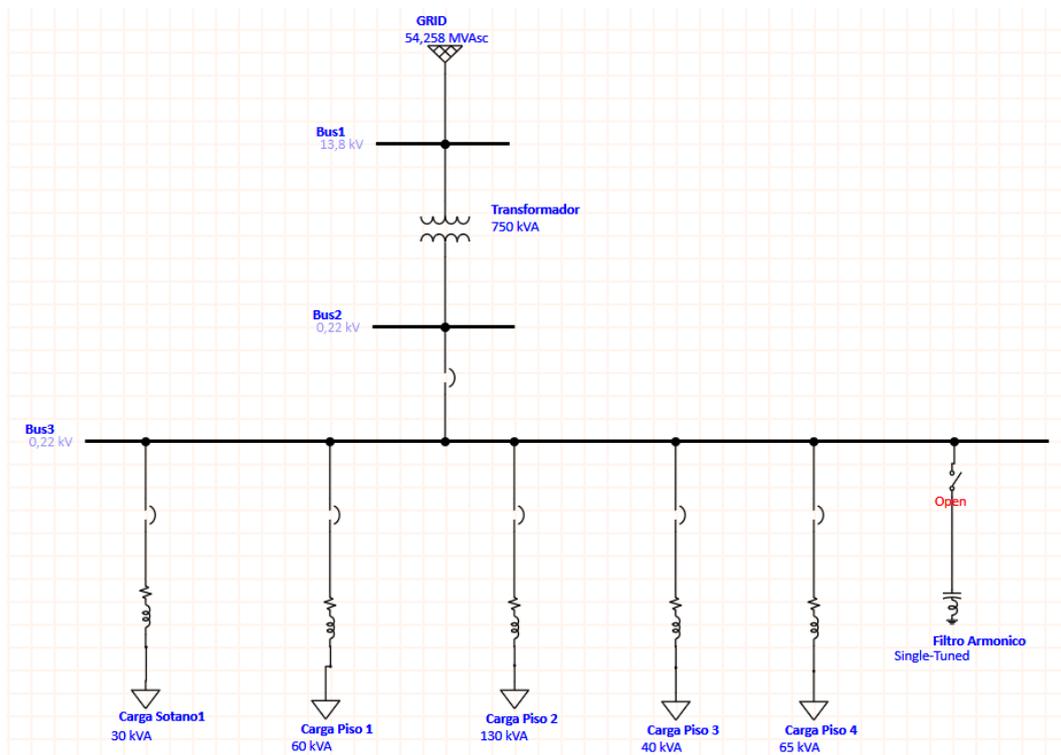


Figura 60. Diagrama Unifilar de la red Eléctrica del Edificio “E”.

Fuente: Los autores.

De acuerdo con los resultados del analizador los armónicos con mayor incidencia del quinto y séptimo orden, lo cual al instalar las cargas armónicas en la simulación sin el uso del filtro podemos obtener los siguientes resultados:

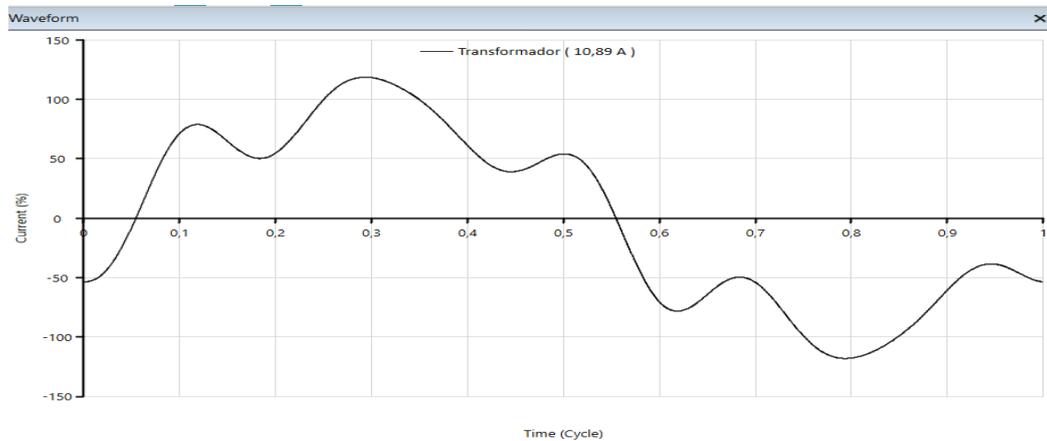


Figura 61. Gráfica de la onda fundamental del Edificio "E" Afectada por los Armónicos 5to y 7mo.

Fuente: Los autores.

Tras realizar la simulación se puede observar la presencia de perturbaciones en la onda fundamental debido a la presencia de armónicos, mediante el uso de cargas no lineales cercanas a los valores medidos por el analizador.

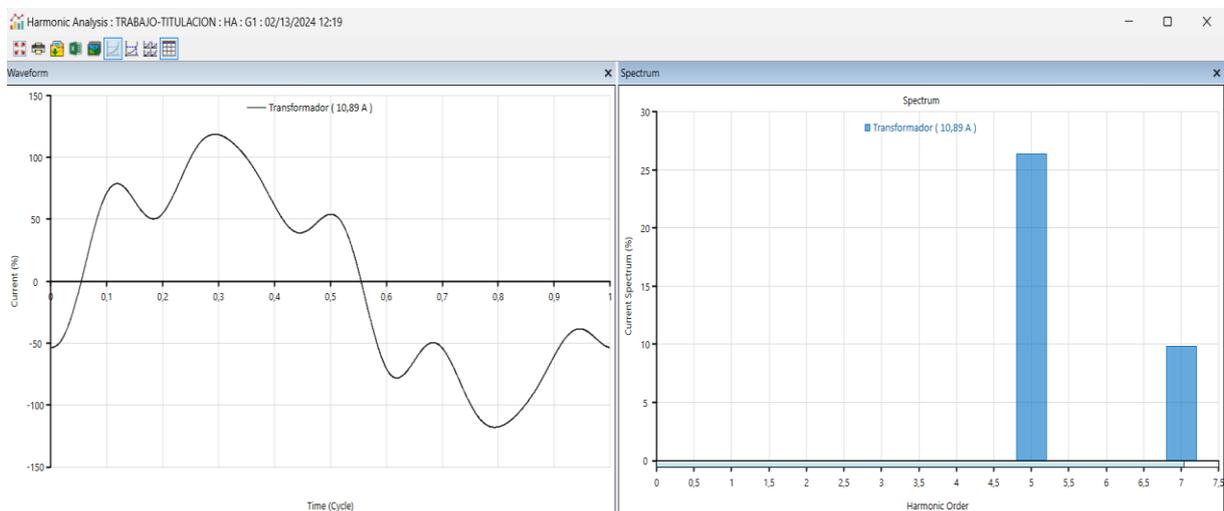


Figura 62. Simulación de cargas no lineales en el edificio sin el filtro Armónico Activo.

Fuente: Los autores.

Luego de conectar el filtro activo podemos observar que la onda fundamental del transformador adquiere sus propiedades sinusoidales, debido a la mitigación de un porcentaje significativo de los armónicos antes presentes en la red eléctrica del edificio.

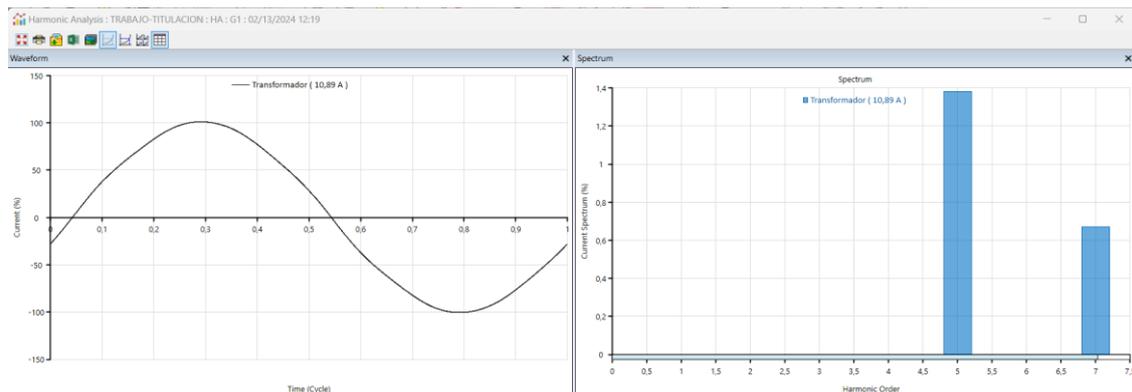


Figura 63. Simulación de cargas no lineales en el edificio con el uso del filtro Armónico Activo.

Fuente: Los autores.

Con esto se concluye que el uso de un filtro armónico Activo en paralelo, contribuye al mejoramiento de la calidad de energética de las instalaciones, previniendo tanto las fallas como del envejecimiento prematuro de los equipos como el transformador, luminarias led, equipos de cómputo, etc.

## 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 Conclusiones.

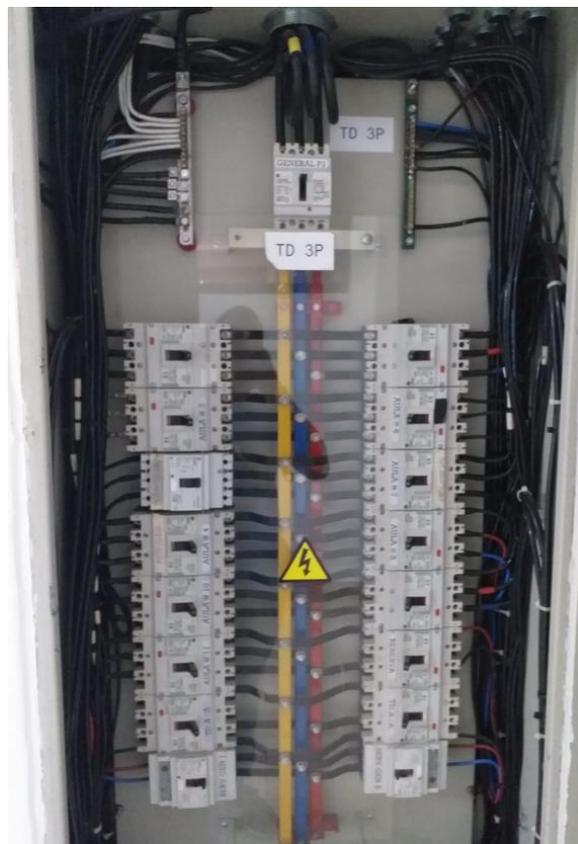
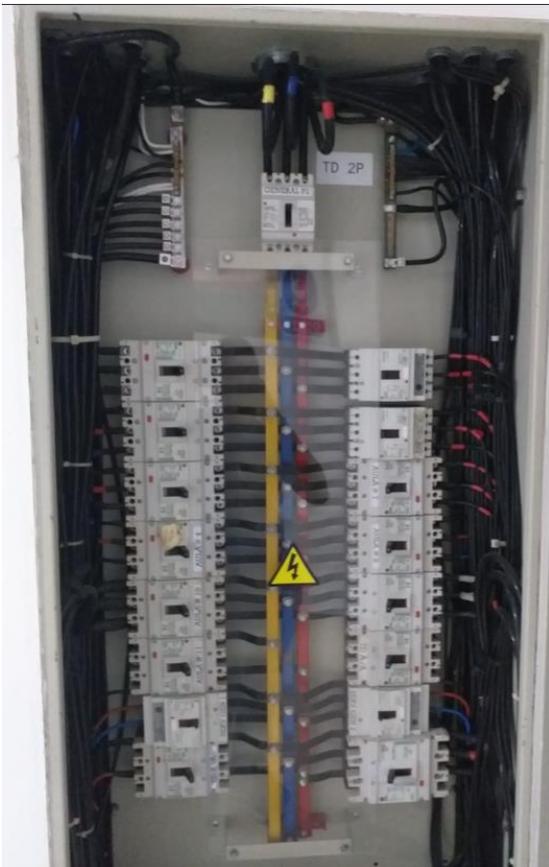
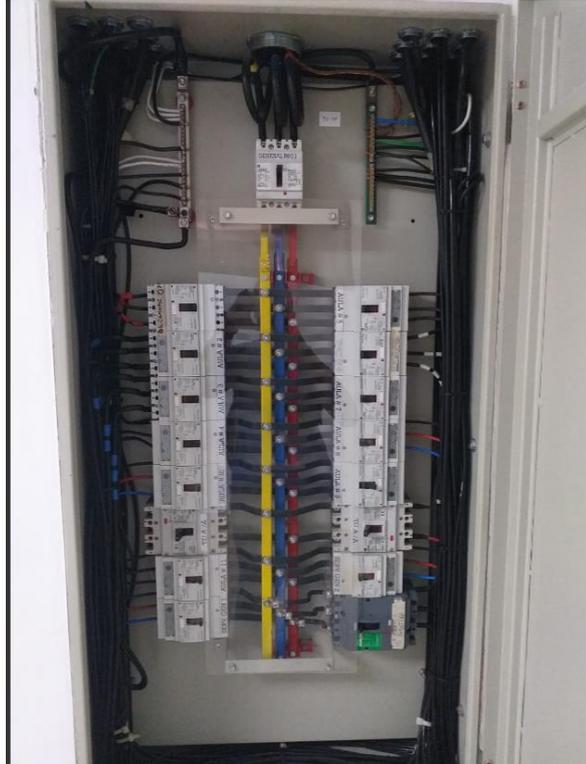
- Se observó mediante los datos tomados mediante el uso del analizador de redes Fluke 438 II, hemos observado que el transformador de la institución (Edición E) el cual, aunque con una capacidad de 750 KVA, solo trabaja al 20 % de su capacidad nominal, lo cual evidencia el sobredimensionamiento del transformador, contribuyendo a la ineficiencia del transformador.
- Se realizó el cálculo del factor K con el cual obtuvimos una reducción de la capacidad nominal del 44 %, en caso de que el transformador llegara a funcionar más haya de estos valores sobrepasaría la temperatura máxima de soporte del transformador, de 65 °C.
- Se concluyó que los únicos armónicos incidentes en la red solo los armónicos de corriente, precisamente los del orden 3ro, 5to, 7mo, 11vo y 13vo, a lo cual para contrarrestar es propicio la instalación de un filtro activo con conexión en paralelo a la carga.
- Se simuló con ayuda del software especializado (ETAP) donde se observó el comportamiento de la red eléctrica con y sin el uso del filtro, lo cual demuestra que se pueden mitigar de forma efectiva los armónicos de la red, mejorando la calidad de la energía.

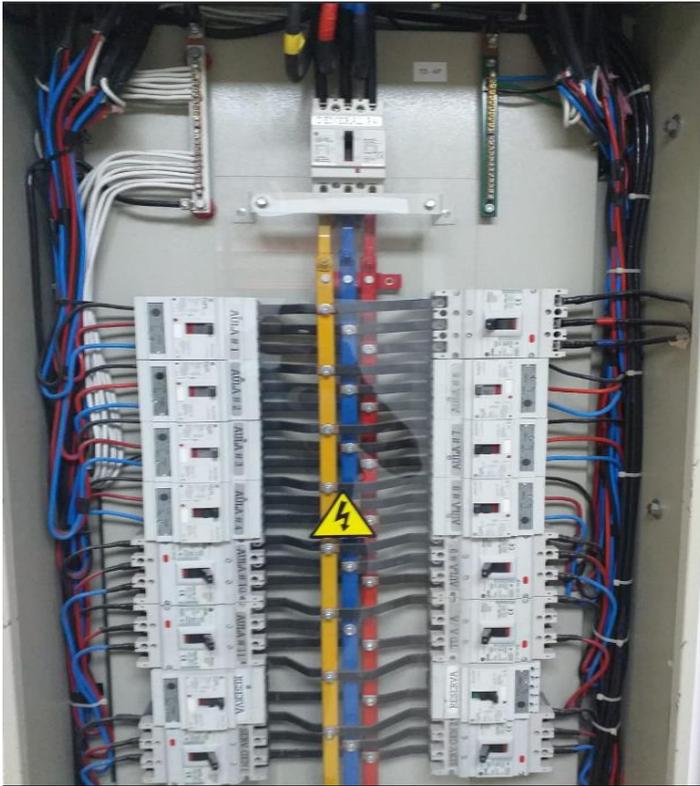
## 7.2 Recomendaciones.

- Se recomienda el reacondicionamiento del cuarto de transformador, con mejores sistemas de ventilación, ya que, debido a las elevadas temperaturas del transformador, este podría presentar desgaste prematuro, pérdida de aislamiento y reducción de su vida útil.
- En base a los cálculos realizados con el manual de dimensionamiento de filtros armónicos de la marca Circutor recomendamos el uso de un filtro activo de esta marca con su modelo AFQe-4WF-200C con una conexión en paralelo.
- Recomendamos verificar el estado del termostato del transformador, ya que este no corrobora que la temperatura interna del transformador este de acorde a los valores reales.
- Se recomienda el realizar un estudio de compensación se reactiva, a razón de los datos recopilados por el analizador de redes, donde se pudo observar caídas del factor de potencia hasta valores 0.65 en múltiples ocasiones dentro del rango de las 23:00 hasta las 6:00.

### 7.3 Anexos.

#### Anexo 1: Tablero de Distribución respectivo a cada piso:





*Gráficos de los Paneles de distribución secundarios de cada piso y cuarto de transformador del Edificio "E" de la universidad Politécnica Salesiana.*

*Fuente: Los autores.*

**BIBLIOGRAFÍA.**

- [1] T. Mathwai, K. Awodele, and A. Ojo, “Power Quality Evaluation of Electrical Loads in a Typical Commercial Building,” in *2020 International SAUPEC/RobMech/PRASA Conference*, IEEE, Jan. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/SAUPEC/RobMech/PRASA48453.2020.9041007.
- [2] M. Izhar, C. M. Hadzer, S. Masri, and S. Idris, “An investigation on harmonic level, current & voltage distortion and associated power for three phase four wire distribution system in a USM Electrical & Electronic Engineering Department building,” *National Power Engineering Conference, PECon 2003 - Proceedings*, pp. 371–378, 2003, doi: 10.1109/PECON.2003.1437477.
- [3] T. Mathwai, K. Awodele, and A. Ojo, “Power quality evaluation of electrical loads in a typical commercial building,” *2020 International SAUPEC/RobMech/PRASA Conference, SAUPEC/RobMech/PRASA 2020*, Jan. 2020, doi: 10.1109/SAUPEC/ROBMECH/PRASA48453.2020.9041007.
- [4] Jih-Sheng Lai and T. Key, “Effectiveness of harmonic mitigation equipment for commercial office buildings,” in *IAS '96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting*, IEEE, pp. 2244–2250. doi: 10.1109/IAS.1996.563886.
- [5] Téllez E, “Programa de Ahorro de Energía: Calidad de la Energía,” in *ponencia presentada en Cuarto Seminario Nacional de Watergy México*, 2007.
- [6] IEEE Standard 1159, *Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality a Status Update*. 1995.
- [7] Abreu A, *Calidad de Potencia Eléctrica en Redes de Distribución*. Venezuela: Enelven, 2005.
- [8] SEBASTIAN CARRASQUILLA BECERRA, “ANÁLISIS DE ARMÓNICOS EN REDES RESIDENCIALES,” PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA , UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA , Pereira, 2017.
- [9] “Armónicos: Costes de inversión por el sobredimensionamiento.” Accessed: Feb. 27, 2024. [Online]. Available: <https://agremia.com/armonicos-industrial/>

- [10] “Clasificación estándar de armónicos IEC61000-3-2 - LISUN.” Accessed: Nov. 25, 2023. [Online]. Available: <https://es.lisungroup.com/news/technology-news/iec61000-3-2-harmonic-standard-classification.html>
- [11] Ing. Eugenio Téllez Ramírez, “Distorsion Armonica,” Puebla, Mexico, 2010.
- [12] Arconel, “Factor de potencia,” in *PLIEGO TARIFARIO PARA LAS EMPRESAS ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN*, Enero-Diciembre 2020., Arconel, Ed., Ecuador, 2019, p. 19.
- [13] German Santamaria Herrnaz, “Electrotecnia ,” in *Electrotecnia*, 5th ed., Editorial Editex, Ed., 2009, pp. 35–36.
- [14] Stephen J. Chapman, *Maquinas elèctricas*, 5ta ed. Mexico D.F, 2012.
- [15] Ignacio contreras, “Armónicos y la norma IEEE 519 1992,” *Revista Electro Industria*, Chile, Aug. 2006.
- [16] ARCERLNR, *Regulacion-002-20* ARCERLNR. Ecuador: <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/>, 2020.
- [17] S. C. Zhao, X. Zhang, Q. Liu, M. Wilkinson, M. Nergo, and M. Daghray, “Effect of Thermal Conduction on Transformer Radiator CFD Modelling,” in *2020 8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, IEEE, Oct. 2020, pp. 242–245. doi: 10.1109/CMD48350.2020.9287231.
- [18] Rafael Vásquez, “Filtrado de Armónicos ¿Cómo decidir entre la opción de filtro activo, compensador activo o filtro híbrido ?,” *Revista Electro Industria*, Santiago de Chile, Nov. 2003.
- [19] Universidad de Sevilla, “Clasificación de filtros ,” Sevilla.
- [20] Alfonso Alzate Gómez, Duberney Murillo Yarce, and Ricardo León Silva Cárdenas, *Prototype for harmonic compensation in three phase systems*, vol. 20. 2017.
- [21] CNEL.Ep, “MANUAL PARA LA INSTALACIÓN DE LA ACOMETIDA Y SISTEMA DE MEDICIÓN A LOS CONSUMIDORES DE CNEL EP ,” in *MANUAL PARA LA INSTALACIÓN DE LA ACOMETIDA Y SISTEMA DE MEDICIÓN A LOS CONSUMIDORES DE CNEL EP*, Guayas, 2022, pp. 36–37.

- [22] “Glosario - CNEL EP.” Accessed: Feb. 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.cnelep.gob.ec/glosario/>
- [23] MATHEUS ELECTRICOS, “Informe Técnico Análisis de Potencia, armónicos y perturbaciones de red en el sistema trifásico de distribución Bloque E - UPS Sede GYE,” Guayaquil, 2022.
- [24] Fluke Corporation, “Analizador de motor y de calidad eléctrica Fluke 438-II,” Descripción general del producto: Analizador de motor y de calidad eléctrica Fluke 438-II.
- [25] Anna University, “Design of Electrical Machines - EE6604,” Design of Tank and Tubes - Transformers.
- [26] Q. -Ecuador and P. Edición, “INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN NUEVOS TRIFÁSICOS. VALORES DE CORRIENTE SIN CARGA, PÉRDIDAS Y VOLTAJE DE CORTOCIRCUITO”.
- [27] Juan Miguel Astorga Gómez, Rodrigo Alfonso Aróstica Córdova, and Yuri Antonio Iriarte Salinas, “Factor K,” *Estimación del factor K en transformadores de distribución usando modelos de regresión lineal*, Bogotá, Feb. 15, 2016.
- [28] P. J. Balcells, “Aumento de tamaño y de pérdidas en los transformadores.,” El coste de los de armónicos .
- [29] Gonzalo Casaravilla and Virginia Echinope, “Desbalances - Estudio de alternativas para su estimacion,” Artículo, Universidad de la Republica, Uruguay, 2005.
- [30] Circutor, “Dimensionado de la Corriente nominal para filtro activo,” *Manual de Filtro Activo Paralelo Multifunción Circutor*. Circutor, Barcelona , pp. 40–41, 2017.