



**UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE LAS AMÉRICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**ANÁLISIS DE ARMÓNICOS DENTRO DE RED  
HOSPITALARIA**

**HOSPITAL CALDERÓN GUARDIA**

**TORRE MÉDICA**

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL  
GRADO DE BACHILLERATO EN INGENIERÍA  
ELECTROMECAÁNICA**

**ELABORADO POR**

**DIEGO ARMANDO SIBAJA VARGAS**

**SAN JOSÉ 2023**

### **Dedicatoria**

Quiero primeramente dar gracias a Dios por esta oportunidad y su misericordia en todo momento, este trabajo está dedicado a mi madre Yamileth Vargas Elizondo un ejemplo de fe y superación, eres la mejor.

## Contenido

Resumen Ejecutivo.....	10
<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>11</b>
Planteamiento del problema.....	12
Objetivos .....	12
Objetivo general.....	12
Objetivos específicos.....	12
Justificación.....	13
Antecedentes nacionales.....	14
Antecedentes internacionales.....	25
Limitaciones.....	34
<b>CAPÍTULO II: MARCO REFERENCIAL.....</b>	<b>34</b>
Marco teórico.....	34
Definición de calidad.....	35
Definición de Armónico.....	36
El origen de los problemas en las redes eléctricas.....	37
Impacto sobre los transformadores.....	39
Factor K en transformadores.....	42
Impacto sobre equipo electrónico.....	43
Análisis espectral.....	47
Tasas de Distorsión Armónica THDU Y THDI.....	48
Secuencias de los armónicos.....	50
Directa.....	50
Inversa.....	50
Homopolar.....	50

Flicker.....	52
Termografía.....	54
Filtro pasivo.....	56
Filtro Activo.....	58
Legislación .....	59
Soluciones de armónicos presentes en el mercado.....	65
<b>CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO.....</b>	<b>82</b>
Enfoque.....	82
Fuentes.....	82
Análisis de la calidad de energía en dos transformadores.....	83
Literatura.....	84
Boletines técnicos .....	84
Antecedentes.....	84
Normas.....	84
Variables.....	84
Instrumentos .....	85
<b>CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>85</b>
Análisis transformador TXD4.....	86
Análisis transformador TXD4B.....	99
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONE.....</b>	<b>115</b>
Conclusiones .....	115
Recomendaciones.....	119
Datos técnicos de filtros.....	120
<b>CAPÍTULO VI: PROPUESTA.....</b>	<b>123</b>
<u>Ubicación de filtro.....</u>	<u>126</u>

<u>Tipo de filtro.....</u>	<u>127</u>
Referencias.....	130
Anexos.....	132

## Figuras

Figura 1: Gráfica de las magnitudes de las armónicas de voltaje línea 1.....	15
Figura 2: Gráfica de las magnitudes de las armónicas de corriente línea 1.....	16
Figura 3: Gráfica de las magnitudes de las armónicas de voltaje línea 2.....	17
Figura 4: Gráfica de las magnitudes de las armónicas de corriente línea 2.....	18
Figura 5: Gráfica de las magnitudes de las armónicas de voltaje línea 3.....	19
Figura 6: Gráfica de las magnitudes de las armónicas de corriente línea 3.....	20
Figura 7: Distorsión armónica de tensión.....	22
Figura 8: Perfil de distorsión armónica de tensión.....	23
Figura 9: Distorsión armónica de corriente.....	23
Figura 10: Perfil de distorsión armónica de corriente.....	24
Figura 11: Datos por fase.....	26
Figura 12: Niveles de armónicos.....	26
Figura 13: Datos con filtrado simple.....	26
Figura 14: Datos con filtrado doble.....	27
Figura 15: Comparación de datos.....	28
Figura 16: Solución propuesta para baja tensión.....	29
Figura 17: Distorsión armónica bajo voltaje.....	30
Figura 18: Distorsión armónica medio voltaje .....	30
Figura 19: Datos obtenidos en medición.....	32
Figura 20: Espectro de armónicos de corriente.....	33
Figura 21: Impedancia condensador.....	45
Figura 22: Ejemplo armónico 5to.....	46
Figura 23: Gráfica porcentual .....	47
Figura 24: Tipos de armónicos .....	48
Figura 25: Compensador activo de armónicos .....	58

Figura 26: Tabla de distorsión armónica .....	59
Figura 27: Límites recomendados de armónicos de voltaje .....	64
Figura 28: Límites recomendados de armónicos de voltaje .....	65
Figura 29: Filtro TDK .....	67
Figura 30: Filtro matrix AP .....	72
Figura 31: Filtro matrix serie E .....	74
Figura 32: Filtro matrix ONE .....	76
Figura 33: Filtro Schneider .....	79
Figura 34: Filtro Eaton HCU2.....	81
Figura 35: Colocación de analizador .....	86
Figura 36: Transformador TXD4 45 KVA .....	87
Figura 37: Evidencia calentamiento en pared .....	88
Figura 38: Termografía externa transformador TXD4.....	89
Figura 39: Ubicación de transformador TXD4B.....	90
Figura 40: Termografía núcleo transformador TDX4.....	90
Figura 41: Termografía conectores transformador TDX4.....	91
Figura 42: Tabla datos termografía transformador TDX4 .....	91
Figura 43: Gráfica flicker .....	93
Figura 44: Armónicos de voltaje transformador TDX4.....	95
Figura 45: Armónicos de corriente TXD4.....	97
Figura 46: <i>Transformador TXD4B</i> .....	100
Figura 47: Termografía conectores transformador TXD4B .....	101
Figura 48: Termografía núcleo TXD4B .....	102
Figura 49: Tabla datos termografía.....	102
Figura 50: Ubicación transformador TDX4B.....	103
Figura 51: Mediciones de armónicos de voltaje (TDX4B).....	104

Figura 52: Mediciones de armónicos de corriente (TDX4B).....	106
Figura 53: Resumen de datos d armónicos.....	108
Figura 54: Potencia de transformador TDX4B.....	109
<u>Figura 55: Corriente RMS transformador TDX4B.....</u>	<u>110</u>

**Ecuaciones**

1.....	31
2.....	37
3.....	37
4.....	39
5.....	41
6.....	41
7.....	42
8.....	48
9.....	48
10.....	50
11.....	51
12.....	51
13.....	57
14.....	57
15.....	58
16.....	59
17.....	61
18.....	62

## **Resumen Ejecutivo.**

Los armónicos eléctricos son distorsiones provocadas por cargas no lineales conectadas a la red eléctrica, como pueden ser computadoras, luces led, variadores de frecuencia, en síntesis, todo aquel equipo en el cual exista un cambio de voltaje de AC a DC lo que se encuentra en la gran mayoría de equipos electrónicos. Este fenómeno en muchas ocasiones es ignorado y puede generar grandes problemas, los cuales se abordarán en este estudio.

Este proyecto en particular estará enfocado, en analizar los armónicos que pueden presentarse en el área de cuidados intensivos de la red del Hospital Calderón Guardia, realizando un análisis a dos transformadores, el TXD4 45KVA que alimenta dos circuitos de luces y el TXD4B 30KVA conectado a un circuito de tomacorrientes, todas cargas no lineales, ambos ubicados en el cuarto piso del edificio y así poder identificar esos, por así llamarlos, puntos calientes en la red. Para este fin, se utilizará un analizador de calidad de energía marca Fluke mod. Fluke-435-2 propiedad del hospital y se contará con la colaboración del ingeniero eléctrico del mismo centro. La idea es realizar las mediciones de los transformadores por un periodo de siete días por transformador, que es lo recomendado por el fabricante del equipo, para poder obtener datos más fiables, los resultados obtenidos se compararán con lo que indica la norma actual ART-NT-SUCAL emitida por la ARESEP, la IEEE 519, con el fin de poder determinar la mejor solución.

Además, como complemento se realizará un análisis termográfico a ambos transformadores, con el propósito de determinar su estado general.

## **CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN**

La Torre Médica o también llamada Emergencias del Hospital Dr. Rafael Ángel Calderón Guardia es un edificio de cuatro pisos y un sótano; en el sótano se encuentra toda la parte electromecánica del edificio, en el primer piso el área de emergencias, en el segundo piso medicinas, el tercer piso corresponde a neurociencias y el cuarto piso, el cual será objeto del presente estudio, al área de unidad de cuidados intensivos (UCI). Todos cuentan con gran cantidad de equipo electrónico, el cual puede variar según el tipo de atención brindada. Al realizar una entrevista al Ing. Carlos Núñez Vega, encargado de la parte eléctrica del hospital, este menciona que el transformador TXD4 (45KVA) está presentando altas temperaturas, las cuales, se sospecha que podrían estar siendo generadas por armónicos eléctricos. Por tal motivo, se optó por realizar este estudio en el cuarto piso, además de considerarse un área crítica debido al tipo de unidad que se encuentra en él (UCI).

Al realizar la consulta a los encargados de activos del hospital, estos indican que en esta área se cuenta con 170 unidades de equipos electrónicos de tipo portátil, lo cual indica voltajes de AC y DC de alimentación y otros fijos pero con parte de control DC tales como: electrocardiógrafo, desfibrilador, microcomputador, monitores de signos vitales, equipos de rayos x, camas hospitalarias, (se detallan en anexo) para la atención directa e indirecta de los pacientes internados, cuyo valor ronda los 861 884 055, 57 colones y son equipos sumamente sensibles eléctricamente. Pero más allá de la parte económica, lo importante es lo que cada uno de estos equipos representa, el resguardo de una vida y por eso se considera de suma importancia su correcto funcionamiento y cuidado.

El 9 de abril del año 2022 se tuvo que realizar una reparación en el banco de capacitores de la subestación de toda la torre, en la cual solo estaban funcionando dos de cuatro etapas; se realizó trabajo de mantenimiento, pero no se determinó la causa del problema, el cual podría haberse debido a sobrecarga en los capacitores, ya que como se verá más adelante, es un efecto de armónicos en la red eléctrica, por lo cual, el siguiente estudio toma mayor importancia.

### **Planteamiento del problema**

Utilizando el equipo de medición, se determinará la presencia de armónicos dentro de la red hospitalaria (4to piso Torre Médica) del Hospital Dr. Rafael Ángel Calderón Guardia y de encontrarlas, se determinará la mejor opción de sistema de filtrado existente en el mercado, para solucionar el problema y así proteger y extender la vida útil de los equipos.

### **Objetivos**

#### **Objetivo general.**

Análisis y solución al problema de armónicos en el cuarto piso de la Torre Médica del Hospital Rafael Ángel Calderón Guardia. Se pretende determinar la calidad de la energía eléctrica disponible, con el fin de resguardar los equipos médicos del área, los cuales son indispensables para el resguardo de la vida humana.

#### **Objetivos específicos.**

1. Realizar un análisis exhaustivo de los transformadores TXD4 y TXD4B de la red eléctrica hospitalaria, ubicados en el cuarto piso del Hospital Rafael Ángel Calderón Guardia, para determinar la presencia de alteraciones eléctricas.
2. Determinar la calidad de la energía, al conocer la cantidad de contaminación que generan los equipos de índole hospitalaria, en el área en que se encuentren conectados.

3. Determinar cuáles son los puntos con mayor incidencia de armónicas eléctricas y así poder tomar las decisiones más acertadas en cuanto a la solución del problema.
4. Analizar y proponer las soluciones existentes en el mercado, que mejor satisfagan las necesidades encontradas en este estudio.
5. Estimar la viabilidad económica, para que el proyecto se pueda llevar acabo.

### **Justificación**

Este proyecto de investigación se realiza con la intención de analizar y comprender de manera ampliada, el tema las distorsiones armónicas en la calidad de energía eléctrica y el impacto que estas pueden tener en una subred e incluso en la red eléctrica en general.

Con el incremento en el desarrollo tecnológico, surge la necesidad de crear conciencia sobre este fenómeno que se encuentra presente, pero que en la mayoría de ocasiones no se logra asociar a fallos por la falta de conocimiento, este trabajo está dirigido a analizar el comportamiento de dicho fenómeno en una parte de la red hospitalaria (cuarto piso Hospital Dr. Rafael Calderón Guardia) con el fin de conocer los problemas que puede ocasionar y determinar soluciones. También se pretende, que este trabajo sirva como punto de partida para más análisis, ya sea en los otros pisos de la Torre Médica, como también en las otras torres y hospitales del país en general, para así poder salvaguardar los equipos médicos, que son de suma importancia en la atención de los ciudadanos costarricenses.

### **Antecedentes nacionales.**

INSTITUCIÓN: Universidad Internacional de las Américas.

TÍTULO: *Soluciones para mitigar los armónicos causados por los variadores de frecuencia en la red eléctrica industrial.*

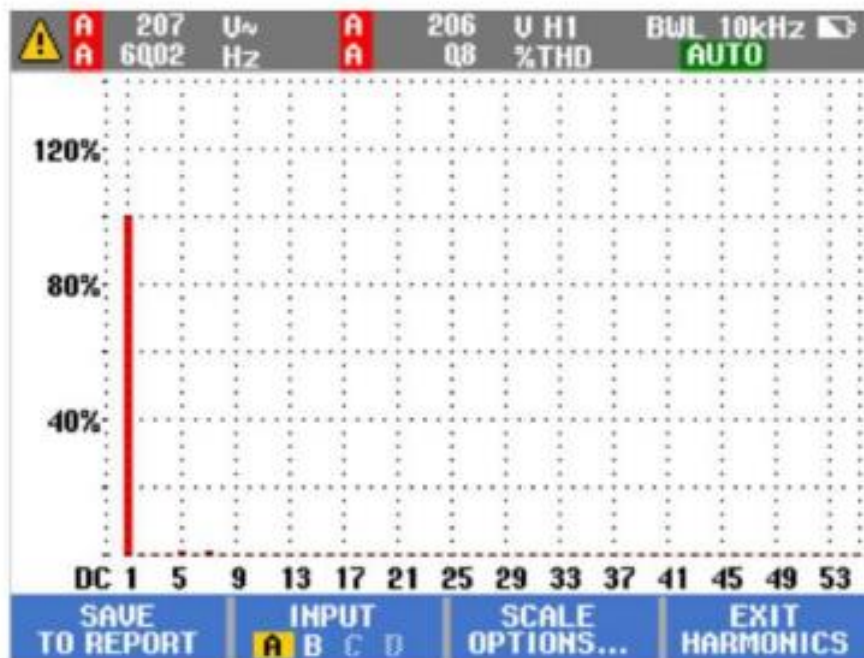
AUTOR: Juan Ignacio Monje Alvarado.

FECHA: abril de 2021.

En esta tesis, aunque está enfocada en los variadores de frecuencia, el señor Juan Ignacio hace muy buen análisis de armónicos dentro de dos redes eléctricas industriales, una de ellas en una empresa farmacéutica en Panamá y el segundo caso en Bristone. Además, en mi caso no estoy exento de que este fenómeno también se presente en la red hospitalaria, debido a que hoy en día muchos equipos, por no decir todos, incluyen variadores de frecuencia para controlar velocidades o con el fin de economizar energía.

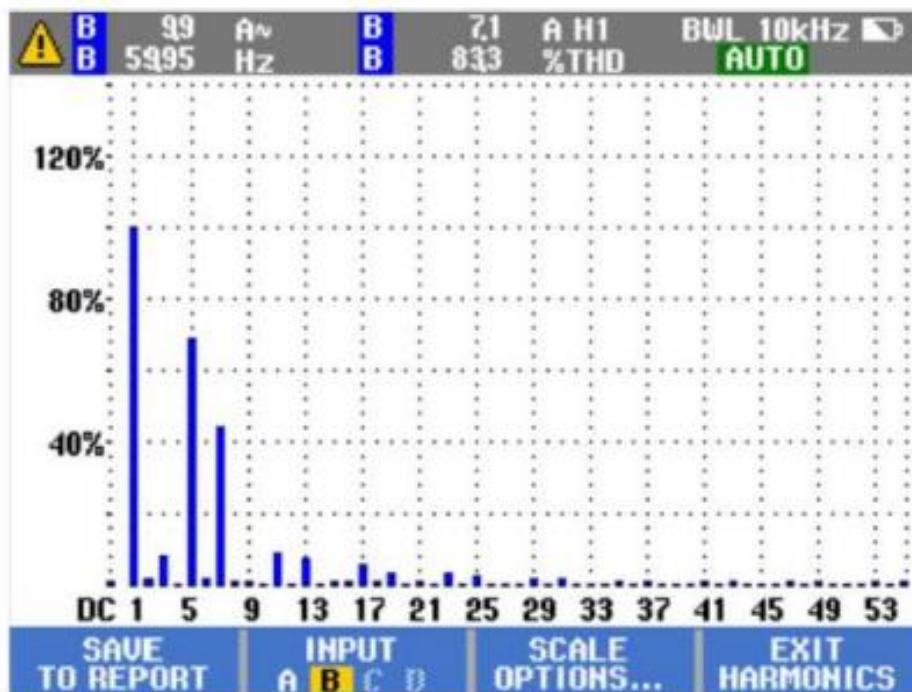
Caso 1 resultados voltajes y corrientes L1

Figura 1: Gráfica de las magnitudes de las armónicas de voltaje en función de la frecuencia línea 1.



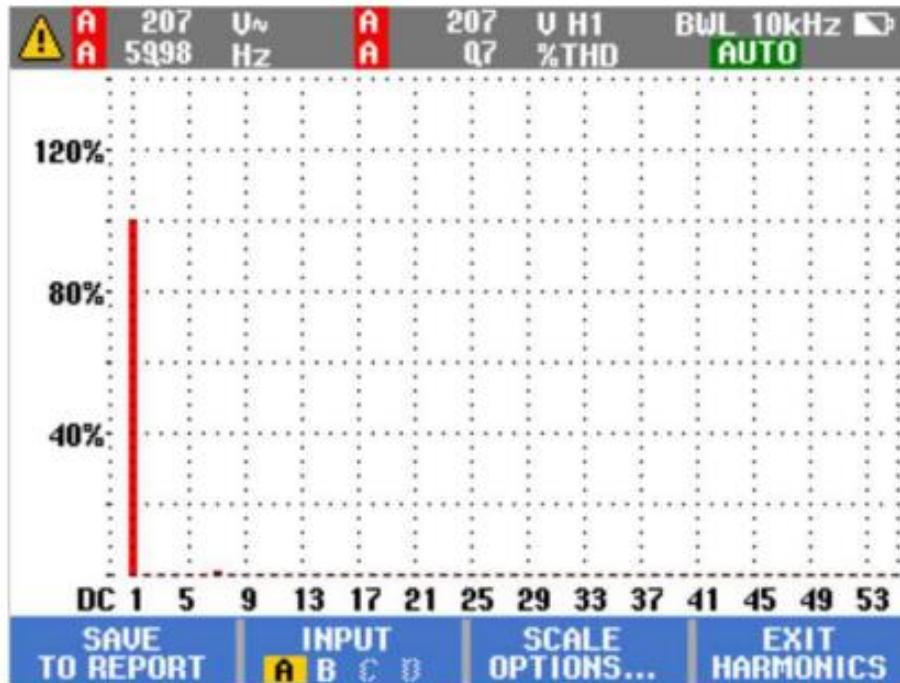
Fuente: Elvatron (2020).

Figura 2: Gráfica de las magnitudes de las armónicas de corriente en función de la frecuencia línea 1.



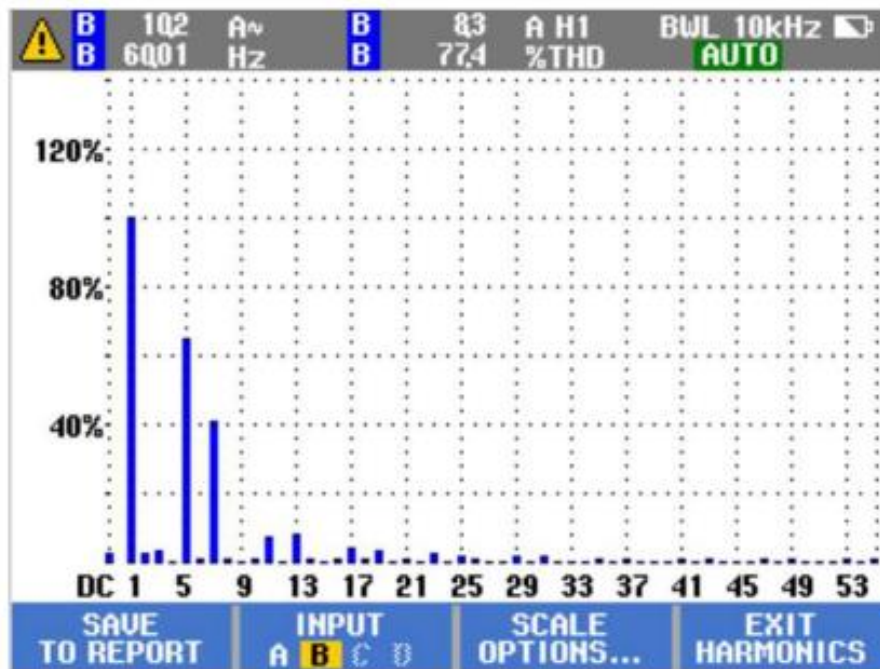
Fuente: Elvatron (2020).

Figura 3: Gráfica de las magnitudes de las armónicas de voltaje en función de la frecuencia línea 2



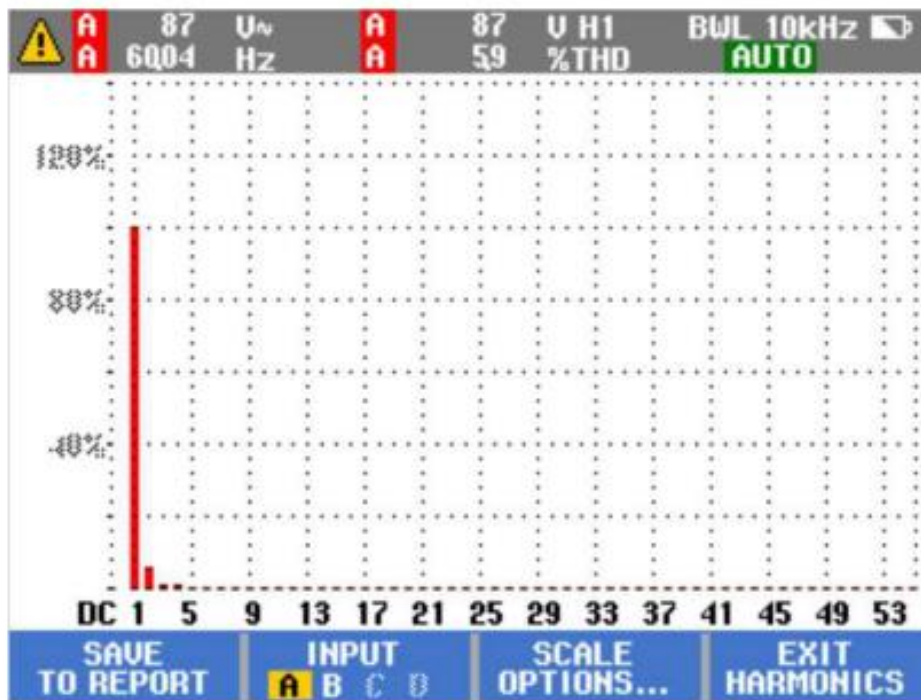
Fuente: Elvatron (2020).

Figura 4: Gráfica de las magnitudes de las armónicas de corriente en función de la frecuencia línea 2.



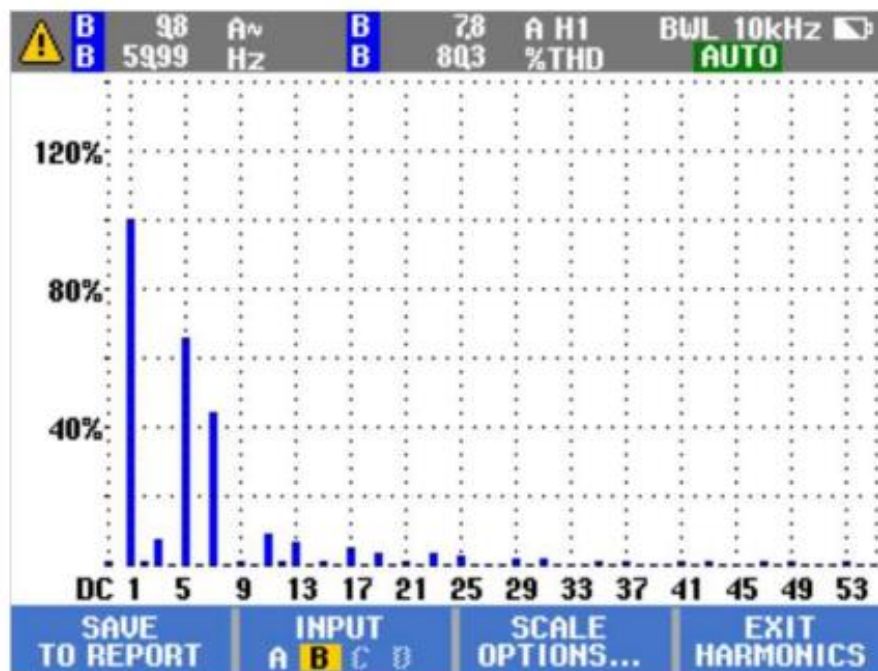
Fuente: Elvatron (2020).

Figura 5: Gráfica de las magnitudes de las armónicas de voltaje en función de la frecuencia línea 3



Fuente: Elvatron (2020).

Figura 6: Gráfica de las magnitudes de las armónicas de corriente en función de la frecuencia línea 3



Fuente: Elvatron (2020).

INSTITUCIÓN: INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA ESCUELA DE  
INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

TÍTULO: *Estudio de calidad de energía eléctrica en la instalación de Laboratorios  
Stein, Costa Rica.*

AUTOR: Luis Alejandro Brenes Hernández

FECHA: 2018.

En esta tesis, realizada por un estudiante del Instituto Tecnológico de Costa Rica, este realizó un análisis de la energía eléctrica suministrada por Junta Administrativa del Servicio Eléctrico Municipal de Cartago (JASEC) la cual provee energía a la empresa STEIN. Además de realizar un análisis dentro de la empresa, ya que esta ha presentado problemas con sus equipos, lo cual produce un efecto directo en su producción, sin dejar de lado el problema de costos que este problema genera.

El estudio realizado es muy completo, pero en particular, estará centrado en la parte del análisis de armónicas.

Figura 7: Distorsión armónica de tensión

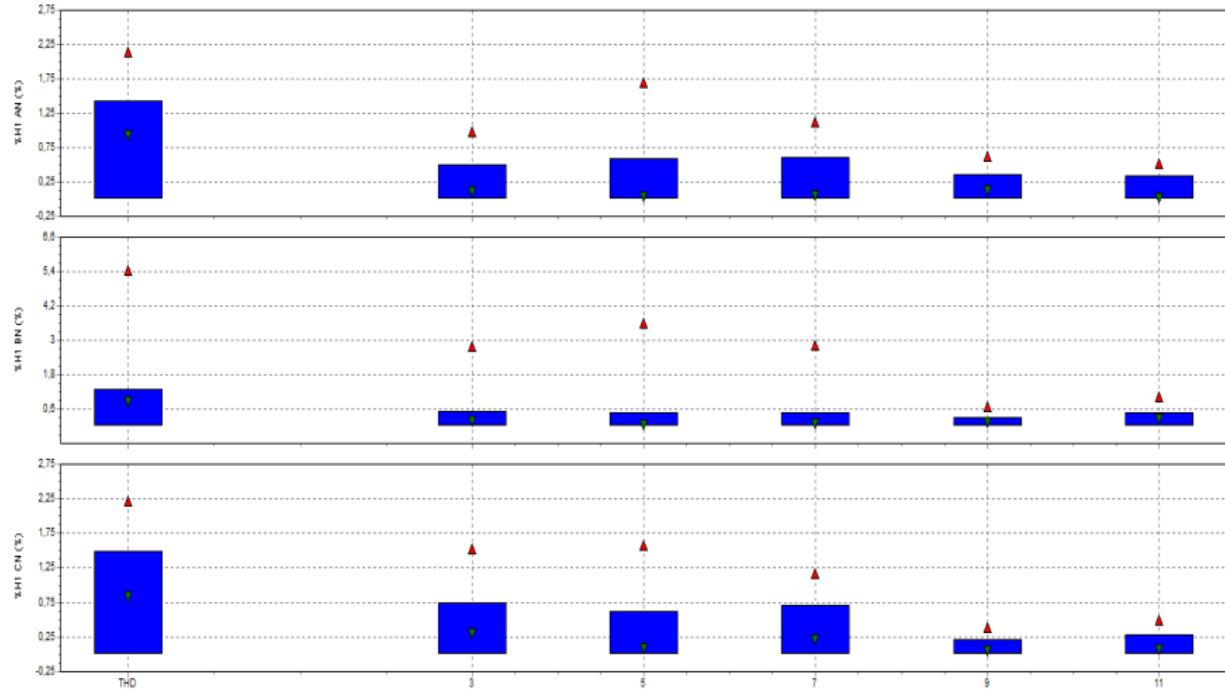


Figura 8: Perfil de distorsión armónica de tensión

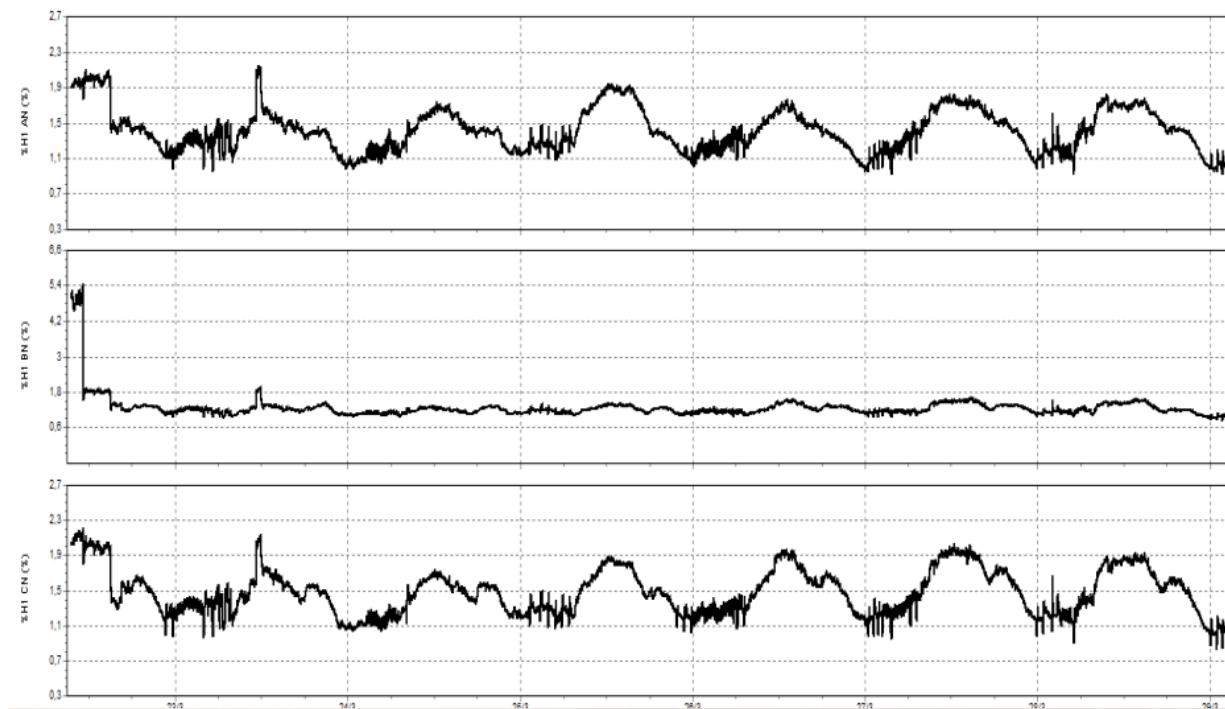


Figura 9: Distorsión armónica de corriente

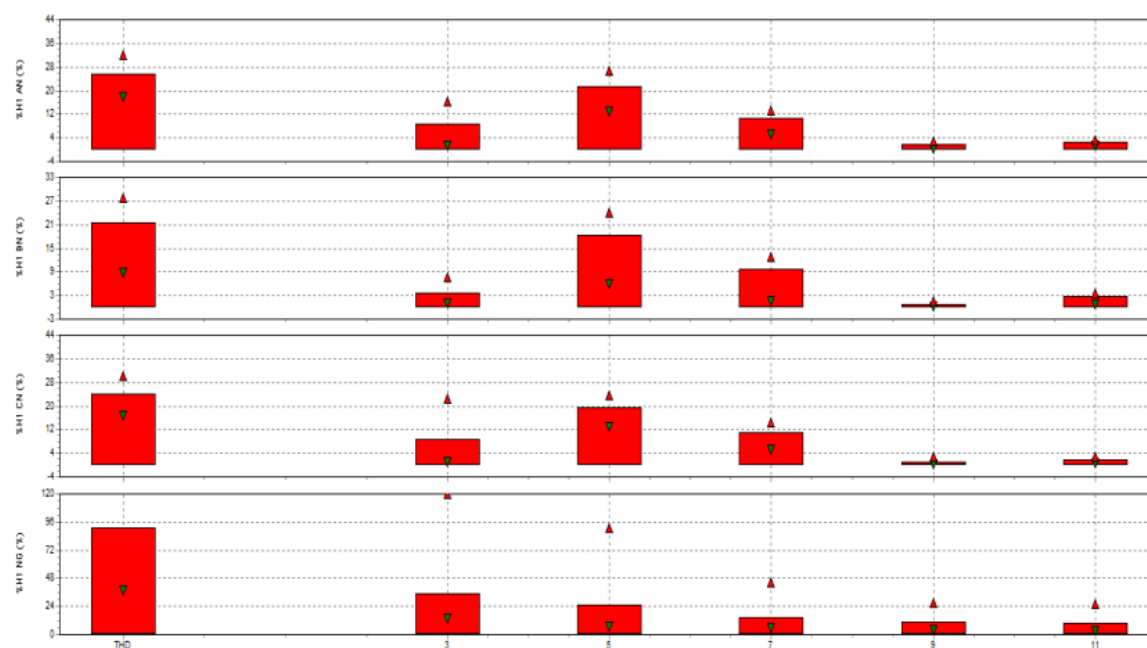
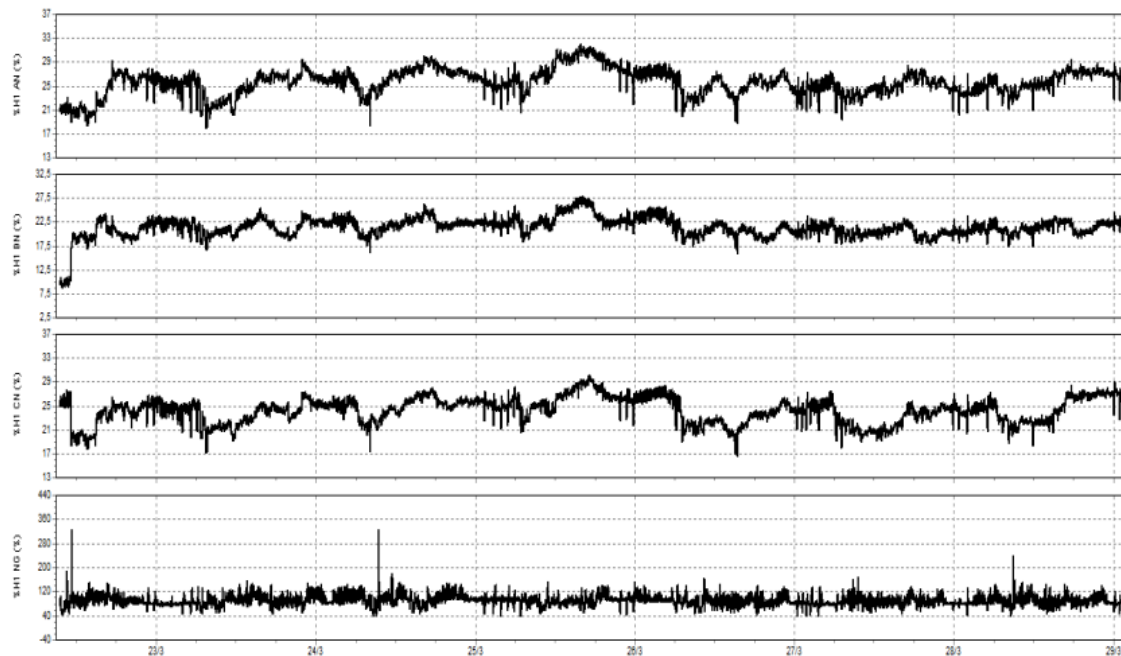


Figura 10: Perfil de distorsión armónica de corriente



INSTITUCIÓN: Instituto Tecnológico de Costa Rica

TÍTULO: *Diagnóstico de la calidad de la energía y evaluación de las instalaciones eléctricas en la Represa Hidroeléctrica Pirrís.*

AUTOR: Esteban Josué Araya Porras

FECHA: 2017.

En esta tesis el estudiante Josué Araya Porras realizó un análisis de calidad de energía en las instalaciones de la represa Pirrís ya que se estaban presentando problemas con equipos de muestreo, así como también en variadores de frecuencia y un transformador, por lo cual supusieron que podría ser debido a los altos niveles de armónicos dentro de la red.

Dicho análisis se realizó en dos partes, la primera mediante un estudio de la calidad de energía suministrada, en la cual determinaron niveles de armónicos, más altos que los permitidos por la norma AR-NT-SUCAL-2015, IEEE-1159-2009 e IEEE-519-1992 y segundo realizando una inspección interna de los equipos donde se encontraron falsos contactos en terminales y malas conexiones a tierra, lo que contribuye a tener una baja calidad de energía.

### **Antecedentes Internacionales**

INSTITUCIÓN: Universidad Técnica del Norte.

TÍTULO: *Propuesta técnica para la atenuación del fenómeno de resonancia de la Subestación de Distribución La Esperanza de la empresa Eléctrica Regional Norte.*

AUTOR: Alejandro Javier Chiluisa castro

FECHA: 2021.

En este trabajo, el estudiante Javier plantea el problema de las cargas no lineales conectadas a un transformador, refiriéndose en específico a la resonancia que el fenómeno de armónicas en la red, provocaría en la subestación. En este caso puntual, tal antecedente será de gran ayuda, ya que el lugar donde se realizará el trabajo de investigación, cuenta con una subestación y banco de capacitores, elementos que el señor Javier menciona como los puntos donde los armónicos pueden provocar problemas.

Figura 11: Datos por fase.

Fase	A				B				C			
Frec. (Hz)	60	180	300	420	60	180	300	420	60	180	300	420
Módulo V (V)	6771,68	305,00	263,10	103,50	6781,00	306,10	263,40	103,60	6780,80	305,60	264,00	103,60
IHD (%)	0,00	4,50	3,89	1,53	0,00	4,51	3,88	1,53	0,00	4,51	3,89	1,53
THD (%)	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20

Fuente: Autor (Cymdist)

Figura 12: Niveles de armónicos

kV L-N	3er.(%)	5to. (%)	7mo.(%)	9no.(%)	11avo. (%)	THD (%)
6,77	4,50	3,89	1,53	0,66	0,50	6,20
6,78	4,51	3,88	1,53	0,66	0,50	6,20
6,78	4,51	3,89	1,53	0,66	0,50	6,20

Fuente: Autor (Cymdist)

Figura 13: Datos con filtrado simple

ID de nodo	kV L-N	3er. (%)	5to. (%)	7mo. (%)	9no. (%)	11avo. (%)	THD (%)
2143-A	6,81	1,55	2,78	1,42	0,62	0,73	3,61
2143-B	6,82	1,55	2,77	1,42	0,62	0,73	3,61
2143-C	6,82	1,55	2,77	1,42	0,62	0,74	3,61

Fuente: Autor (Cymdist)

Fase	A				B				C			
Frec. (Hz)	60	180	300	420	60	180	300	420	60	180	300	420
Módulo V (V)	6810,65	105,60	189,00	96,78	6819,83	105,60	189,20	96,96	6819,78	105,60	189,20	96,98
IHD (%)	0,00	1,55	2,78	1,42	0,00	1,55	2,77	1,42	0,00	1,55	2,77	1,42
THD (%)	3,61	3,61	3,61	3,61	3,61	3,61	3,61	3,61	3,61	3,61	3,61	3,61

Fuente: Autor (Cymdist)

Figura 14: Datos con filtrado doble

kV L-N	3er. (%)	5to. (%)	7mo. (%)	9no. (%)	11avo. (%)	THD (%)
7,47	0,98	0,55	0,84	0,44	0,60	1,59
7,48	0,98	0,55	0,84	0,44	0,60	1,59
7,48	0,98	0,55	0,84	0,44	0,60	1,59

Fuente: Autor (Cymdist)

Fase	A				B				C			
Frec. (Hz)	60	180	300	420	60	180	300	420	60	180	300	420
Módulo V (V)	7469,54	73,10	40,81	62,58	7476,08	73,12	40,82	62,62	7478,74	73,12	40,81	62,64
IHD (%)	0,00	0,98	0,55	0,84	0,00	0,98	0,55	0,84	0,00	0,98	0,55	0,84
THD (%)	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59

Fuente: Autor (Cymdist))

Figura 15: Comparación de datos

	<b>RESONANCIA PRESENTE</b>	<b>SIMPLE SINTONÍA</b>	<b>DOBLE SINTONIA</b>	<b>TENSIÓN IDEAL</b>
<b>VOLTAJE (kV)</b>	6,77	6,87	7,48	7,96
<b>MEJORA (%)</b>		1,26	8,92	
<b>THD (%)</b>	6,20	3,61	1,59	
<b>TENSIÓN IDEAL (%)</b>	85,05	86,31	93,97	100

Fuente: Autor

INSTITUCIÓN: Universidad Técnica del Norte.

TÍTULO: *Propuesta de disminución de la distorsión armónica total de voltaje en los alimentadores primarios x1 y x2 de la Subestación El Chota.*

AUTOR: Víctor Alejandro Cruz Ponce

FECHA: 2022.

En esta tesis, al igual que en la anterior, el principal objetivo es realizar un análisis exhaustivo de las armónicas presentes en una red de distribución, la cual cuenta con dos alimentadores de media y baja tensión, las cuales han aumentado considerablemente, debido al incremento de cargas no lineales a la red de distribución eléctrica y cita algunos problemas que este fenómeno puede representar tales como:

- Destrucción de condensadores por sobretensión.
- Destrucción de cables por sobretensión.
- Operación incorrecta de relés de protección.
- Calentamiento de motores de inducción.
- Oscilaciones mecánicas en motores y generadores.
- Errores de medición de energía activa y reactiva. Interferencias con sistemas de comunicación.
- Aumento de pérdidas.

Cabe mencionar, que la red planteada en este proyecto es de larga distancia, por lo cual, en la propuesta de la solución del problema Víctor propone la utilización de dos filtros, a una distancia de 1km aproximadamente entre cada uno, como se muestra en la siguiente imagen y así realizar un mejor filtrado de armónicos, observando los resultados en baja tensión, con un solo filtro es suficiente, pero en media tensión, los armónicos continúan con niveles mayores que los permitidos, por lo cual es necesario colocar el segundo.

Figura 16: Solución propuesta para baja tensión



Fuente: Autor

Figura 17: Distorsión armónica bajo voltaje.

DISTORSION ARMÓNICA TOTAL EN BAJO VOLTAJE					
LADO DE BAJA	ARMÓNICOS (%)	1 FILTRO (%)	2 FILTROS (%)	LIMITE DE THDv (%)	DISTANCIA (Km)
X1T28	8.57	4.02	4.02	8.0	37
X1T5548	7.04	5.69	3.66	8.0	30
X1T257	6.99	5.64	3.61	8.0	22
X1T233	4.61	3.74	2.36	8.0	20
X1T476	3.05	2.47	1.53	8.0	18
X1T5583	3.05	2.47	1.53	8.0	18
X1T218	3.09	3.49	2.21	8.0	14
X1T509	4.30	2.51	1.56	8.0	14
X1T398	1.42	1.25	1.20	8.0	12

Fuente: Autor

Figura 18: Distorsión armónica medio voltaje

DISTRORSION ARMÓNICA TOTAL EN MEDIO VOLTAJE					
LADO DE MEDIA	ARMÓNICOS (%)	1 FILTRO (%)	2 FILTROS (%)	LIMITE DE THDv (%)	DISTANCIA (Km)
X1T28	8.79	4.12	4.12	5.0	37
X1T5548	7.22	5.83	3.75	5.0	30
X1T257	7.18	5.80	3.72	5.0	22
X1T233	4.73	3.83	2.43	5.0	20
X1T476	3.13	2.54	1.57	5.0	18
X1T5583	3.13	2.54	1.57	5.0	18
X1T218	3.21	3.58	2.27	5.0	14
X1T509	4.42	2.62	1.64	5.0	14
X1T451	3.21	2.54	1.64	5.0	12
X1T398	3.22	2.54	1.64	5.0	12
X1T5270	2.44	1.98	1.22	5.0	8

Fuente: Autor

INSTITUCIÓN: Universidad Nacional del Centro del Perú

TÍTULO: *Reducción de las perturbaciones armónicas para la corrección del factor de potencia en la red de distribución eléctrica de Chipao - Ayacucho*

AUTORES: Durán, Hidalgo Hilario; Nilo Kelvin

FECHA: 2021.

En este trabajo de investigación el estudiante plantea una problemática en la calidad de energía (factor de potencia) en redes eléctricas con problemas de armónicas, lo cual supone un costo por el bajo aprovechamiento de la corriente eléctrica, el tema planteado es de mucha importancia, ya que en el lugar donde se realizó el estudio existe un banco de capacitores, para corregir este problema, pero si se logra relacionar estos, al mejorar los niveles de armónicas, directamente se mejora el del factor potencia basado en la siguiente fórmula.

$$FPT = \frac{P}{S} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + TDHI^2}} = \cos \phi \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + TDHI^2}}$$

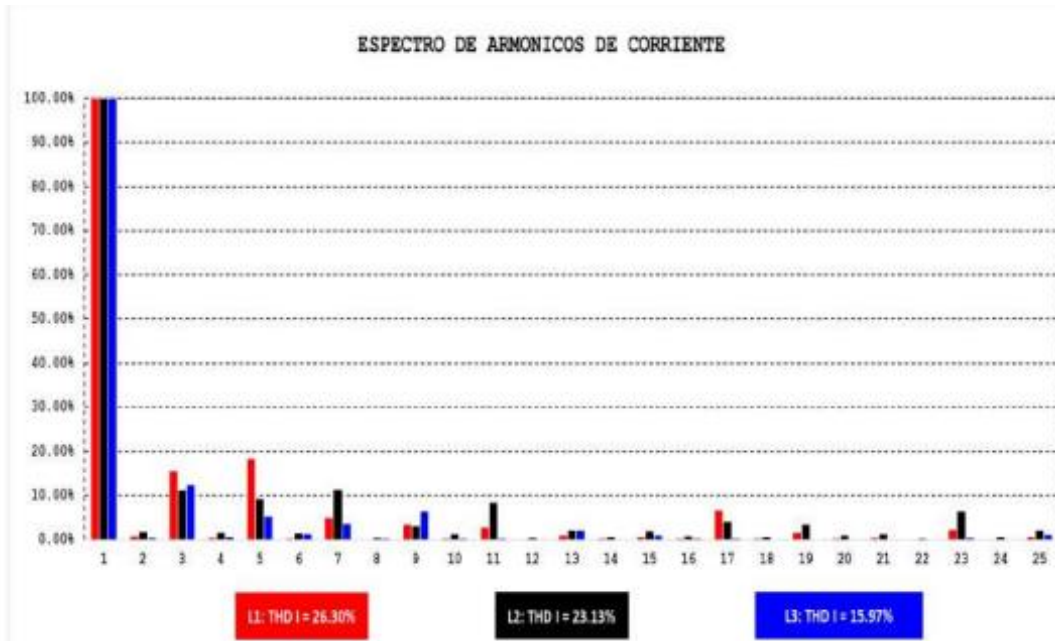
(1)

Figura 19: Datos obtenidos en medición

			SED 91027 75kVA 22.9/0.38/0.22kV			SED 91029 37.5kVA 22.9/0.38/0.22kV		
			L1	L2	L3	L1	L2	L3
1	P	kW	18.13	15.27	15.93	7.31	9.21	6.51
2	Q	kVAR	12.42	8.60	9.80	5.01	5.19	3.81
3	S	kVA	21.98	17.53	18.71	8.86	10.57	7.54
4	Vrms	V	222.55	224.28	223.70	221.80	220.89	222.45
5	Irms	A	98.76	78.15	83.62	39.95	47.84	34.36
6	IIrms	A	95.51	76.14	82.57	37.82	46.34	32.38
7	FPd		0.85	0.89	0.86	0.87	0.90	0.92
8	FPt		0.82	0.87	0.85	0.82	0.87	0.87
9	THDI	%	26.30	23.13	15.97	34.03	25.65	35.51
10	THDeq I	%	22.71			31.84		

Fuente: Elaboración propia

Figura 20: Espectro de armónicos de corriente



## **Limitaciones**

- Al tratarse de un centro médico, hay límites claramente establecidos que se deben respetar, como por ejemplo, no se pueden realizar pruebas, aislando cargas específicas.
- La cantidad de tiempo que requiere el analizador, en un solo punto, para obtener la información, es muy extensa, por lo cual, no se podrían realizar mediciones, en todos los transformadores del edificio.
- De surgir algún inconveniente en un área y que sea necesaria la utilización del equipo, esto tendrá prioridad.
- El equipo queda expuesto en cuartos eléctricos donde cierto personal tiene acceso, por lo que existe una pequeña posibilidad de alteración de los datos.

## **CAPÍTULO II: MARCO REFERENCIAL**

### **Marco teórico**

Sin duda alguna, los armónicos eléctricos, de tensión o intensidad de corriente se han convertido en la actualidad, en un parámetro cuya gestión y control se hace imprescindible, especialmente, para prevenir la posible aparición de problemas, que como se verá posteriormente, están asociados a su presencia en la red eléctrica.

Gestionar y controlar los armónicos eléctricos es fundamental, para evitar que surjan diversos problemas en la red de electricidad.

Los armónicos son un fenómeno presente, en todas las redes, los cuales existen en cargas de tipo no lineales y pueden ocasionar una serie de problemas dentro del mismo sistema eléctrico, el poder detectarlos conlleva un análisis minucioso y con equipo especializado. Entre

los problemas que se pueden mencionar se encuentran: sobrecarga en el neutro; recalentamiento en los transformadores, lo cual afecta su histéresis y por ende su eficiencia; afectar o dañar equipo sensible acortando su vida útil, variaciones de voltaje lo cual podría llevar a activaciones de protecciones eléctricas.

Para esta parte del trabajo se va a recopilar información de investigaciones sobre este fenómeno y también explicar términos para que el lector pueda tener un concepto general del tema y así comprender la finalidad de este estudio.

### **Definición de calidad**

“Propiedad o conjunto de propiedades inherentes a una cosa, que permiten apreciarla como igual, mejor o peor que las restantes de su especie”. (*Diccionario de la Real Academia*, 1E acepción)

Calidad: Concepto asociado a un producto o servicio certificado, por cumplir con alguna de las normas de garantía de la calidad (acepción técnico-comercial).

Calidad del servicio eléctrico: es el conjunto de características técnicas y comerciales, propias del suministro eléctrico, exigibles por los consumidores y por los entes reguladores.

¿Qué espera el cliente de la energía eléctrica que se le suministra? Se pueden dar las siguientes tres respuestas igualmente importantes:

- La menor cantidad y tiempo de cortes.
- Calidad del servicio técnico.
- El nivel de tensión más adecuado.
- Calidad del producto técnico.

- La mejor atención posible.
- Calidad del servicio comercial.

Pinto, R. E. (2020). <https://elibro.net/es/ereader/bibliouia/174425?page=16>.

## **Armónicos**

¿Qué es un armónico?

Para definirlo es necesario remontarse, viajar a principios del siglo XIX, cuando el matemático Jean Baptiste Fourier determinó que cualquier forma de onda periódica (que se repite cada cierto tiempo) puede descomponerse en una suma de senoidales simples, de diferentes frecuencias y amplitudes, que se denominan armónicos.

## **Análisis de Fourier**

El teorema de Fourier dice que toda onda periódica no sinusoidal puede ser descompuesta como la suma de ondas sinusoidales, mediante la aplicación de la serie de Fourier, siempre y cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- Que la integral a lo largo de un periodo de la función sea un valor finito.
- Que la función posea un número finito de discontinuidades en un periodo.
- Que la función posea un número finito de máximos y mínimos en un periodo.

Cualquier función  $F(x)$  con periodo  $2\pi$  tiene su representación en series de Fourier de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Y = F(X) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cdot \text{sen}(nx) + B_n \cdot \text{cos}(nx)]$$

(2)

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F(x) dx$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(x) \text{sen}(nx) dx$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(x) \text{cos}(nx) dx$$

$$[A_n \text{sen}(nx) + B_n \text{cos}(nx)] = R_n = \text{sen}(nx + \Phi_n)$$

$$R_n = \sqrt{(A_n^2 + B_n^2)}$$

$$\Phi_n = \tan^{-1}\left(\frac{B_n}{A_n}\right)$$

(3)

Fuente: IEB S.A.

José Dariel Arcila jdarcila@ieb.com.co INGENIERÍA ESPECIALIZADA S.A.

<http://www.ieb.com.co>

### **El origen de los problemas en las redes eléctricas**

A efectos prácticos, son estas últimas, que corresponden a los armónicos triples, las que implican una mayor problemática en las redes eléctricas por el hecho de que al estar en fase se suman entre ellas. Así, en redes de cuatro hilos, tres fases y neutro, con un número significativamente alto de cargas monofásicas electrónicas (ordenadores, o computadores, y receptores similares), al no anularse entre ellos, se suman en el conductor de neutro.

Por consiguiente, si se supone una red con 50 A de corriente armónica de orden 3 por cada fase, en el conductor de neutro se tendrá directamente 150 A de corriente de armónico 3.

Esto conlleva un riesgo de sobrecarga en dicho conductor de neutro, tanto en nivel de disparo de protecciones térmicas, como de seccionamiento del neutro. Ello provocaría la situación más adversa, por el importante desequilibrio de las tensiones de alimentación de las cargas que ocasionaría, que podría derivar en graves averías de los equipos, conectados en ese momento por sobretensión.

Los problemas también surgen de manera habitual en los transformadores de potencia que alimentan la instalación. Si estos han de suministrar, además de la corriente fundamental asociada a la potencia activa, corrientes armónicas no productivas (es decir, que no son útiles), sus pérdidas pueden ser tan elevadas que causen que la calidad de la tensión que se suministra sea pobre, con altos niveles de THD (U). Este hecho afectaría el funcionamiento de las cargas alimentadas. En el caso más extremo, incluso se produciría un exceso de temperatura en el transformador que puede derivar en su destrucción, por eso resulta de mucha utilidad, realizar un análisis termográfico, si se sospecha de la presencia de corrientes armónicas.

## **Impacto sobre los transformadores**

Para Harper (2006):

Los transformadores se diseñan para entregar la potencia requerida a las cargas conectadas con un mínimo de cargas operando a la frecuencia fundamental, la distorsión armónica de la corriente en particular y también la de voltaje, contribuyen en forma significativa al calentamiento para diseñar un transformador de potencia que pueda trabajar con frecuencias mayores que la fundamental. El diseñador debe hacer distintas variantes en el diseño, como, por ejemplo, usar cables continuos transpuestos en lugar de conductores sólidos y también ampliar el número de ductos de enfriamiento. (p.92)

Existen tres efectos que resultan de incrementar el calentamiento en los transformadores, cuando la corriente de la carga incluye componentes armónicas.

### **1. Valor eficaz de la corriente.**

Según Harper (2006):

“Si el transformador está dimensionado solo para potencia en KVA de la carga, las corrientes armónicas pueden hacer que el valor eficaz de corriente sea mayor que su capacidad, lo que traerá como consecuencia un incremento en las pérdidas en los conductores.  $RI^2$ ” (p. 93)

Donde:

$$RI^2 = \text{Pérdidas por efecto Joule (W)}.$$

(4)

## **2. Pérdidas por corrientes circulantes.**

Según Harper (2006):

Estas son las corrientes reducidas en un transformador y causadas por el flujo magnético, fluyen en el devanado, en el núcleo y en otras partes conductoras sujetas al campo magnético del transformador, causando un calentamiento adicional. Esta componente de las pérdidas del transformador se incrementa con el cuadrado de la frecuencia de la corriente, produciendo las corrientes circulantes, por lo que viene a ser una componente muy importante de las pérdidas del transformador para el calentamiento por las armónicas. (p. 93)

## **3. Pérdidas en el núcleo**

De acuerdo con Harper (2006)

El incremento en las pérdidas del núcleo en la presencia de armónicas depende básicamente del efecto de las armónicas sobre el voltaje aplicado y el diseño del núcleo del transformador. Un incremento en la distorsión del voltaje puede incrementar las corrientes circulantes en las laminaciones del núcleo, el impacto neto de esto tendrá dependencia del grueso de las laminaciones del núcleo y de la calidad del acero, el incremento en estas pérdidas no es tan crítico como el de las corrientes circulantes. Si se considera que las pérdidas totales tienen dos componentes, una por efecto Joule y la otra por corrientes circulantes (PEC) (p. 93).

Ecuación: Fórmula para pérdidas en el núcleo del transformador

$$PL = P_{EC} * RI^2$$

(5)

Fuente: El ABC de la calidad de la energía eléctrica (2001).

Donde:

PL = Pérdidas en el núcleo (W).

PEC = Pérdidas por corrientes circulantes (W).

$RI^2$  = Pérdidas por efecto Joule (W).

Las pérdidas  $RI^2$  son directamente proporcionales al valor eficaz de la corriente, en cambio, las corrientes circulantes son proporcionales al cuadrado de la corriente y la frecuencia. (Harper, 2006, p. 93)

Ecuación: Fórmula para pérdidas por corrientes circulantes en el transformador

$$P_{EC} = K_{EC} * I^2 * h^2$$

(6)

Fuente: El ABC de la calidad de la energía eléctrica (2001).

Donde:

$P_{EC}$  = Pérdidas por corrientes circulantes (W).

$K_{EC}$  = Constante de proporcionalidad.

I= Corriente (A)

h= Frecuencia (Hz)

### Factor K en transformadores

Este es un parámetro relevante, en la evaluación del envejecimiento prematuro de los devanados del transformador, debido al calor disipado en forma de pérdidas en cobre y en el núcleo, debido a componentes espectrales de la corriente. Dado que el factor K tiene en cuenta el parámetro de frecuencia, se considera el método más preciso para estimar el contenido armónico de cargas, no lineales para la especificación de transformadores de distribución.

Los transformadores de factor K están contruidos de modo que cuanto mayor sea el factor K, mayor será el contenido de armónicos que pueden manejar sin calentamiento adicional. K = 1 sería un transformador convencional no apto para trabajar en entornos armónicos a potencia nominal.

El factor K es entonces un índice que determina los cambios que deben sufrir los transformadores convencionales para que puedan manejar adecuadamente las pérdidas adicionales de hierro y cobre que impondrán las corrientes armónicas, particularmente cuando operan a potencia nominal (De la Rosa, 2006, pp. 175-176).

Ecuación: Fórmula del factor K de transformado

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$$

(7)

Fuente: El ABC de la calidad de la energía eléctrica (2001).

Donde:

$K$  = K-factor.

$h$  = Armónica “n”.

$I_h$  =Corriente Armónica (A).

Otro aspecto esencial es la afectación que la presencia de armónicos eléctricos puede provocar en las protecciones diferenciales contra corrientes de fuga. Es imprescindible utilizar relés diferenciales adecuados para garantizar la correcta protección en estas redes. En este sentido, el uso de diferenciales tipo B para todos aquellos receptores que incorporen una conversión CA/CC en su funcionamiento (como son los variadores de velocidad, SAI's, rectificadores o cargadores de vehículos eléctricos) se hace no solo esencial, sino obligatorio.

En cuanto a la existencia de altos niveles de distorsión armónica en tensión en la red, se pueden relacionar con problemas que aparecen en equipos electrónicos “sensibles”. En este caso, la mala calidad de la tensión de suministro puede causar, su mal funcionamiento en relación con *resets*, interferencias, errores de cálculo, etc.

### **Impacto sobre equipo electrónico**

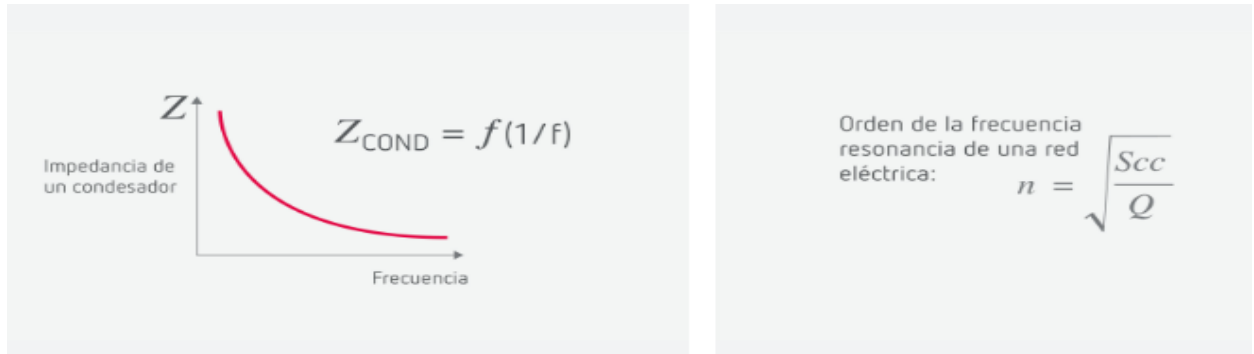
Chapman (2001) comenta el problema generado por los armónicos en los equipos electrónicos, los cuales en su diseño detectan el paso por cero, de la siguiente forma: este detector ayuda a activar semiconductores que generalmente manejan cargas inductivas, las cuales, al activarse a cero voltios, reducen la generación de perturbaciones transitorias, reduciendo las interferencias electromagnéticas. Cuando en la fuente de alimentación están

presentes armónicos o perturbaciones transitorias, el ritmo de variación de la tensión por el punto de paso por cero se hace más rápido y más difícil de identificar, lo que provoca un funcionamiento errático. De hecho, hay varios puntos de paso por cero en cada semiciclo. (p. 10)

Finalmente, sin duda el problema más conocido y frecuente es la problemática entre la instalación de una batería de condensadores, para compensar energía reactiva inductiva y la existencia de armónicos eléctricos en la red.

Cabe considerar primero, cómo es la curva de impedancia de un condensador, que se puede denominar 'resistencia'. Como se puede observar en la Fig. 21 A, a mayor frecuencia, menor impedancia. Ya se sabe, que los armónicos tienen una frecuencia superior a la fundamental de la red. Por lo tanto, el condensador presenta menor resistencia a dichas frecuencias armónicas. Se convierte, en consecuencia, en un 'camino de baja impedancia' para dichas corrientes. En otras palabras, tiende a absorberlas, de manera que en redes con presencia de armónicos, los condensadores siempre están sobrecargados en un cierto nivel. Y ello provoca su deterioro a corto plazo.

Figura 21: Impedancia condensador



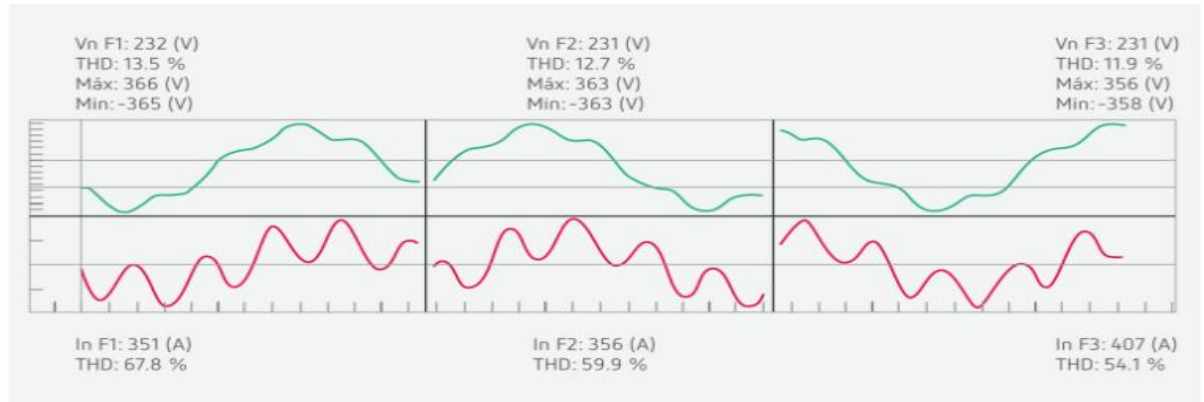
A)

B)

No obstante, no es esta sobrecarga el mayor problema que se puede generar. Lo es la posibilidad de que se produzca un fenómeno de resonancia, que implica la amplificación de las corrientes armónicas previamente existentes en la red, antes de la conexión de la batería de condensadores.

Se debe considerar entonces, el parámetro conocido como la frecuencia de resonancia del sistema (Fig. 21 B), que relaciona la potencia de cortocircuito en el punto de conexión de la batería de condensadores, a la red con la potencia en kvarC de la propia batería. Este valor indica el orden del armónico, o sea, orden 5, 7, 11... que podría amplificarse al conectarse los condensadores a la red, ocasionando su amplificación.

Figura22: Armónico 5



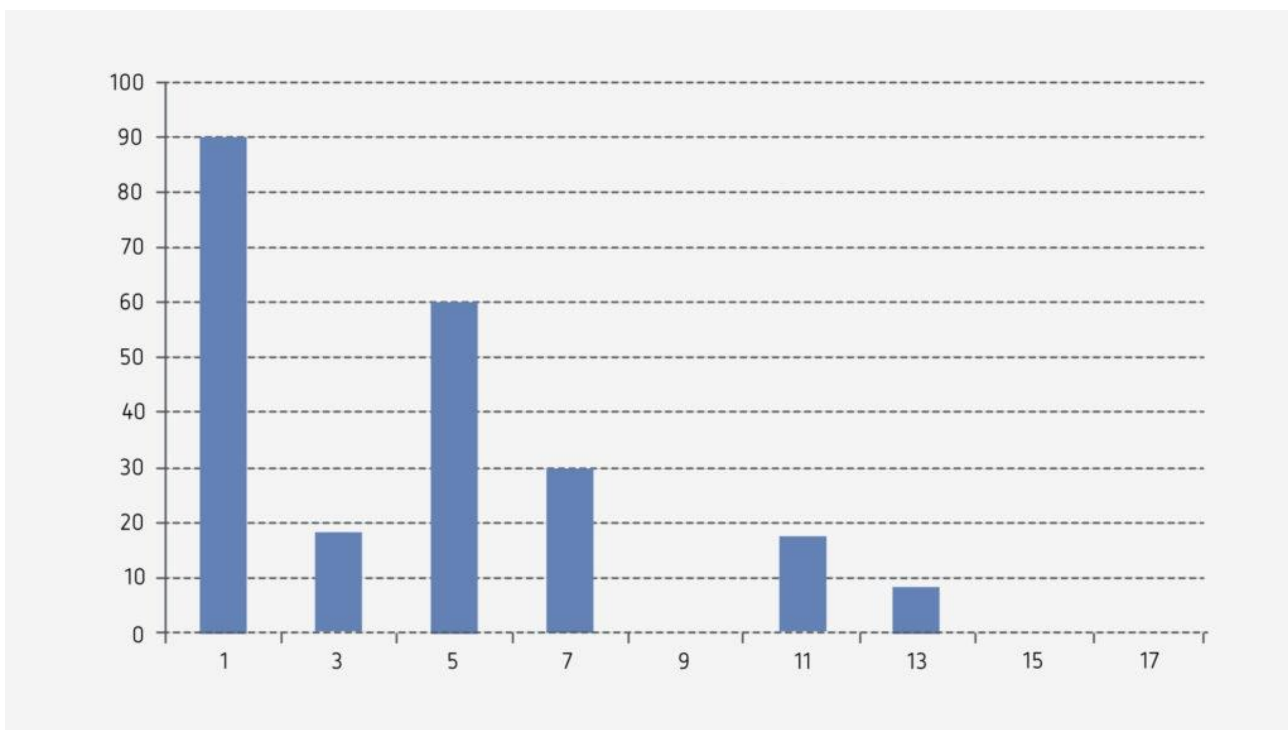
En el ejemplo de la Fig. 10, aparece una clara resonancia en el armónico 5°. Simplemente se deben contar los cinco ‘picos’ que aparecen en un ciclo.

Por lo tanto, se dividen las cargas eléctricas entre aquellas que consumen una corriente puramente fundamental, las cuales se denominarán cargas lineales, como son los motores de inducción o cargas puramente resistivas; y las que consumen una fundamental más otras corrientes armónicas, que se conocerán como cargas no lineales o distorsionantes. Entre ellas, los variadores de velocidad o frecuencia, los equipos electrónicos monofásicos o las luminarias tipo LED. En resumen, todas aquellas cargas en las que alguna etapa de su funcionamiento implica, una conversión de corriente alterna a corriente continua.

Fuente: Circutor

### Espectro armónicos descomposición frecuencia amplitud valor.

Figura 23: Gráfica magnitud armónica



Para analizar el contenido armónico de la red eléctrica, se utilizará la descomposición en frecuencia o lo que se conoce como su espectro. O sea, la amplitud, o valor de cada orden armónico.

Así, para redes con predominancia de cargas trifásicas, habitualmente los más importantes serían el 5, 7, 11 y 13, en este orden decreciente de magnitud. Y en el caso de redes de cuatro hilos, con una importante presencia de cargas monofásicas alimentadas entre fase y neutro y también estarían presentes, además de los anteriores, los armónicos 3°, 9° y 15°, siendo en este caso generalmente el 3° el más significativo.

Las magnitudes que habitualmente se utilizarán, para evaluar los niveles de armónicos en la red, son las denominadas tasas de distorsión armónica, *Total Harmonic Distortion* en inglés, THD (U) para la tensión y THD (I) para la corriente, que representa el porcentaje de la tensión o corriente armónica, la cual se calcula a partir del valor RMS, o suma cuadrática de los valores de cada frecuencia, respecto al valor de la fundamental. Estas tasas permitirán, determinar la severidad de la distorsión armónica en la red, y si existe la necesidad de aplicar medidas correctivas.

#### Tasas de Distorsión Armónica

$$THDI = \frac{\sqrt{U_3^2 + U_5^2 + U_7^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \cdot 100\%$$

(8)

$$THDI = \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2 \dots + I_n^2}}{I_1} \cdot 100\%$$

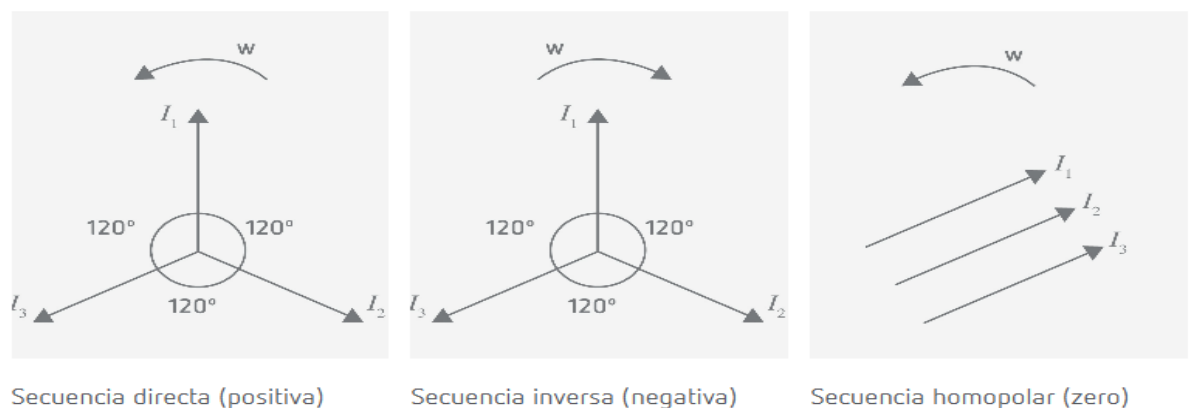
(9)

THD U THD I tensión corriente armónicos *Total Harmonic Distortion*.

Un aspecto importante por considerar es, que como se ha determinado, son las cargas no lineales o distorsionantes las que generan armónicos de corriente, y el hecho de que circulen por los cables de distribución dichas corrientes armónicas provoca caídas de tensión a las diferentes frecuencias armónicas. Esto supone la aparición de tensiones armónicas, o sea, que distorsionan la tensión, incrementando así el valor del THD (U). Por lo tanto, las tasas de THD (I) y THD (U) serán siempre valores que se deberán analizar de manera conjunta, cuando se plantee la necesidad de solucionar algún tipo de problemática asociada a los armónicos eléctricos en la red.

Otra importante particularidad de los armónicos eléctricos es, el hecho de que presentan diferentes secuencias de fase. Pueden ser directas, inversas u homopolares, también conocidas como de secuencia cero.

Figura 24: Tipos de secuencias armonicas



## Secuencias

### Secuencia directa

En el sistema vectorial con secuencia directa se encuentra que primero pasa el vector de la fase L1, a continuación el de la fase L2 y por último el de la fase L3. Esta secuencia corresponde también a la componente fundamental.

Tendrán esta secuencia los armónicos eléctricos que cumplan la expresión:

$$h = 3 * K + 1$$

(10)

donde «h» es el orden del armónico y «K» es un número entero desde 0.

Por tanto, con esta secuencia se tendrían los armónicos de orden 7, 13 o 19.

El principal efecto que producen los armónicos de secuencia directa en tensión es sobre los motores, donde generan un campo giratorio en el mismo sentido de la componente fundamental, y por ende, acelera el motor.

### Secuencia inversa

En el sistema vectorial con secuencia inversa, se encuentra que primero pasa el vector de la fase L1, a continuación el de la fase L3 y por último el de la fase L2. Esta secuencia es contraria a la componente fundamental.

Tendrán esta secuencia los armónicos eléctricos que cumplan la expresión:

$$h = 3 * K - 1$$

$$(11)$$

donde «h» es el orden del armónico y «K» es un número entero desde 0.

Por tanto, con esta secuencia se tendrían los armónicos de orden 5, 11 o 17.

El principal efecto que producen los armónicos, de secuencia inversa en tensión, es sobre los motores, donde generan un campo giratorio de sentido contrario de la componente fundamental, y por tanto hará de freno sobre el motor.

### **Secuencia homopolar**

En el sistema vectorial con secuencia homopolar se encuentra, que los vectores de la fase L1, L2 y L3 rotan en la misma dirección y sentido a la vez.

Tendrán esta secuencia los armónicos eléctricos que cumplan la expresión:

$$h = 3 * K$$

$$(12)$$

donde «h» es el orden del armónico y «K» es un número entero desde 0.

Por tanto, con esta secuencia se tendrían los armónicos de orden 3, 9 o 15.

El principal efecto que producen, los armónicos de secuencia homopolar en corriente, es sobre el conductor de neutro por el cual retornan sumándose. Dicho de otra forma, si hay 10 A de tercer armónico por fase, por el neutro va a retornar 30 A, aun estando el sistema perfectamente equilibrado lo cual podría generar un sobrecalentamiento; esto se puede determinar por medio de una termografía.

Fuente: Secuencia de los armónicos eléctricos - Francesc Fornieles

### ***Flicker***

El parpadeo (*flicker*) es un fenómeno asociado a la calidad de energía, relacionado con la onda de tensión, donde se tiene la impresión subjetiva de pequeñas variaciones de su valor -no tan considerables como los sags- son también de importancia. Es un fenómeno no simétrico, lo cual quiere decir que puede ser diferente en todas las fases. Se percibe como pequeños cambios en las salidas de iluminación como lámparas y bombillos, en oficinas, viviendas o industria, lo que causa inestabilidad de la onda luminosa. Las fuentes de dichos eventos pueden ser de corta duración como arranques de motores, uso de máquinas de soldadura o bien, de larga duración, como hornos de arco o de inducción o funcionamiento continuo de cargas provenientes de motores de alta potencia con cargas pulsantes.

Es un fenómeno posible de visualizar por el ojo humano, principalmente cuando se presenta a frecuencias menores a los 9 Hz, que puede generar problemas de deterioro de equipo electrónico como computadoras, PLC, equipo de comunicación, y físicamente puede llegar a irritar el ojo. Para su estudio, se trata de caracterizar su percepción mediante instrumentos de medición, que posean el nivel de percepción visual de un observador promedio, pero que sea suficientemente representativo. De esta manera se han realizado experimentalmente en laboratorios, curvas que relacionan, para determinada fluctuación de tensión, la amplitud para la cual el *flicker* se hace perceptible y la frecuencia de este. En general, las fluctuaciones de tensión generadas por cargas causantes de disturbios, poseen características variables en el tiempo y es necesario fijar un periodo de observación considerado significativo, además de evaluar en modo estadístico, la variación de la sensación instantánea en el mismo periodo. La norma AR NT SUCAL 2015 de la ARESEP establece, tomando en cuenta el IEEE Std 1453-

2015, que durante el 95% del tiempo, por un periodo de siete días consecutivos, el nivel de severidad de parpadeo ligado a fluctuaciones de tensión de largo plazo (Plt) debe ser menor que 1%. En el análisis de los parpadeos se identifican dos variables principales: el parpadeo de corto plazo (Pst), que se refiere a la severidad de los parpadeos durante periodos de 10 minutos, como la intensidad de sensación provocada por el *flicker* no depende solo de su nivel, sino también de su persistencia, se hace referencia a la curva de frecuencias acumuladas, que indica el porcentaje de tiempo de observación, en el cual, el nivel de *flicker* ha superado un valor asignado. Esta curva sirve como base para obtener el parámetro de 53 severidad del *flicker*, indicado con el símbolo Pst. En este punto es necesario relacionar el valor de severidad del *flicker* con una curva límite para las fluctuaciones de tensión, más allá de la cual, deben considerarse intolerables.

El segundo, es el parpadeo de largo plazo (Plt) que se refiere a la severidad de las fluctuaciones durante un periodo de dos horas empleando 12 valores sucesivos de Pst, debido a que existen equipos los cuales poseen un ciclo de funcionamiento mucho más amplio, y que no se pueden representar fácilmente mediante los parpadeos de corto plazo.

## **Termografía**

Si se habla de termografía, se debe hacer de los infrarrojos. La luz infrarroja está en medio del espectro visible y las microondas del espectro electromagnético. Su fuente principal de radiación es el calor y la radiación térmica.

Todos los objetos emiten radiación infrarroja, incluso un trozo de hielo. Aunque cuanto más caliente sea un objeto, más radiación emitirá.

La termografía es una técnica que permite medir las temperaturas, a distancia de un objeto sin tener que tocarlo. Esta capta la intensidad de la radiación y permite observar, si un sistema eléctrico está emitiendo calor invisible a los ojos y que puede ocasionar un problema mayor.

Gracias a una cámara de termografía, es posible medir la temperatura de un circuito eléctrico de un punto concreto, puesto que por cada píxel de imagen captada se convierte en una medición única y permite comprobar si existe alguna emisión de calor.

La termografía en electricidad es un estudio, que da resultados con mucha rapidez y eficacia sin gran coste, ayuda a prevenir averías costosas y pérdidas de tiempo, en la búsqueda de electricidad o calor en un circuito eléctrico.

Las cámaras de termografías, que se utilizan para realizar termografías eléctricas, son herramientas no invasivas y que permiten diagnosticar el estado de los componentes e instalaciones eléctricas, aunque sean de diferentes tensiones.

Se trata de un método de mantenimiento preventivo eléctrico, mediante el que se detectan problemas en la fase temprana, para corregirlos y evitar que se agraven o que resulte más costosa su reparación.

Las ventajas de tomar mediciones con una cámara de termografía a un circuito eléctrico son:

La termografía en electricidad mide en tiempo real, los puntos de calor de una zona concreta.

No se necesita contacto directo con la zona, ni manipulación de esta.

Proporciona una imagen bidimensional, que contiene información de la temperatura medida y permite visualizar diferentes puntos a la vez.

También ofrece patrones térmicos y tendencias de la corriente eléctrica.

Se trata de una cámara que se puede instalar en diferentes procesos productivos, sin tener que modificarlos.

Se mejora la inspección de calidad, realizada por los técnicos en redes de tensión eléctrica, puesto que se obtiene información de una onda no visible para el ojo humano.

Se obtiene un mapeado completo del circuito eléctrico por medio de la termografía, en la que serán visibles todas las zonas y piezas, de modo que se consigue visualizar defectos de manera fiable.

Al conocer estos beneficios de usar la termografía en electricidad, se da gran importancia a tener controlado el sistema eléctrico con base en el estudio termográfico, ya que se podrá acceder a elementos que se encuentran en la instalación y conocer el lugar exacto de la anomalía.

Detectar diferencias de temperatura, en la instalación eléctrica, ayudará a trabajar con criterio antes de hacer una reforma o solucionar un problema en el sistema.

Gracias a la radiación emitida, por el circuito eléctrico, es posible conocer las diferentes causas de la anomalía. **Las causas más comunes de puntos calientes en un sistema eléctrico** son:

**Sobrecalentamiento por malos contactos:** Es muy frecuente que en las instalaciones eléctricas exista un mal contacto entre conductores y componentes eléctricos. Esta anomalía de manera continuada puede subir la temperatura, hasta llegar a destruir algunos de los elementos.

**Carga excesiva de los componentes eléctricos y conductores:** El termógrafo determina cuál es la sobrecarga de estos elementos y permite identificar un patrón de las temperaturas. De esta manera, se comprueba el estado del componente sin tener que tocar manualmente el circuito.

**Desequilibrio de fases:** Mediante una inspección termográfica, se pueden conocer las diferentes fases de tensiones e intensidades en sistemas trifásicos.

En resumen, las cámaras infrarrojas permiten realizar una inspección termográfica de calidad y eficaz en tiempo real, encontrando diferentes anomalías del circuito eléctrico. Si se piensa hacer la revisión de una vivienda o negocio, es importante contactar con el equipo adecuado. Fuente: Melfosur Soluciones Energéticas

### **Filtros pasivos sintonizados**

Para Harper (2001): “Un filtro lineal está compuesto de componentes lineales, tales como inductores y capacitores, estos dejan pasar la frecuencia eléctrica básica y atenúan otras

frecuencias, las cuales pueden presentarse en forma de ruido” (p. 106). Es usado en aplicaciones de una alta relación no lineal con el sistema, para eliminar corrientes armónicas.

Por otra parte, según Square (1994): “Los filtros se ajustan a un armónico específico, como el 5°, 7°, 11°, etcétera. Además, los filtros de sintonizados de armónicos proporcionan una verdadera corrección del factor de potencia de distorsión. Los filtros se pueden diseñar para varias cargas no lineales o para una carga individual”. (p. 8).

De la Rosa (2006) indica que: Debido a que los filtros pasivos siempre brindan compensación reactiva en un grado dictado por el tamaño de potencia y el voltaje del banco de capacitores utilizado, de hecho, pueden diseñarse con el doble propósito de proporcionar la acción de filtrado y compensar el factor de potencia al nivel deseado. Si se utiliza más de un filtro, por ejemplo, conjuntos de ramas 5 y 7 o 11 y 13, será importante recordar que todos ellos proporcionarán una cierta cantidad de compensación reactiva. (p. 94)

La mejor ubicación para colocar un filtro pasivo sintonizado es, cerca de la carga generadora de armónicos.

### **Fórmulas**

$$kVAR = kW(\tan(\varnothing_{inicial}) - \tan(\varnothing_{final}))$$

(13)

$$kVAR = 2\pi fCV^2$$

(14)

$$2\pi f sintonizado = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

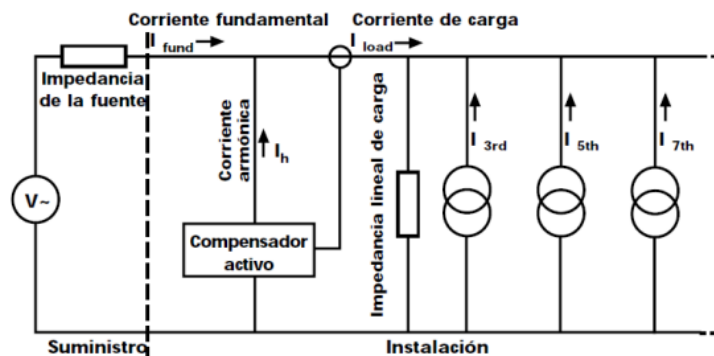
(15)

### Filtro Activo

De acuerdo con Karve (2001):

El filtro activo es un dispositivo conectado en paralelo. Un transformador de intensidad mide el contenido de armónicos de la corriente de carga y controla un generador de corriente que produce una réplica exacta de los mismos de signo opuesto, que es enviada a la fuente de alimentación en el ciclo siguiente. Como la corriente armónica es compensada por el filtro activo, sólo la corriente fundamental procede de la fuente de alimentación. (p. 2)

Figura 25: Compensador activo de armónicos



## **Legislación.**

La Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP) es una institución pública, creada por medio de la Ley 7593 en 1996, con el fin de armonizar las necesidades de los usuarios o consumidores con los intereses de los prestadores y velar, por que estos servicios se brinden de forma óptima (calidad, continuidad, oportunidad, confiabilidad y precio).

### **AR-NT-SUCAL: Supervisión de la calidad del suministro eléctrico en baja y media tensión. Artículo 12. Tensiones armónicas**

En condiciones normales de explotación, para cada período de siete días consecutivos, el 95 % de los valores eficaces de cada tensión armónica promediados en 10 minutos, no debe sobrepasar el 3% del valor de tensión nominal. Además, la tasa de distorsión armónica total de la tensión (TDA) suministrada (comprendidos todos los armónicos hasta el orden 20) no debe sobrepasar el 5%.

Ecuación: Fórmula para la Distorsión armónica de tensión

$$TDA = \sqrt{\sum_{h=2}^{20} (vh)^2}$$

(16)

Fuente: Documento técnico AR-NT-SUCAL (2016).

Donde:

Vh: es la amplitud relativa de la tensión armónica de orden h, en relación con la fundamental.

Vf: hasta la armónica individual número 20.

Los valores aquí señalados corresponden a los límites de tensiones armónicas de la tensión de servicio, siempre y cuando el abonado o usuario, cumpla con las condiciones de corrientes armónicas contempladas en el artículo 13.

Corrientes armónicas: las empresas eléctricas velarán por que los abonados o usuarios de tipo industrial y general, con servicios trifásicos, ajusten sus instalaciones y equipamiento con el fin de que la distorsión armónica de la corriente, en el punto de entrega, se encuentre dentro de los límites establecidos en la figura 44:

Límites de distorsión armónica de corriente para usuarios del servicio

Figura26: Tabla de distorsión armónica

<b>LÍMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE CORRIENTE PARA USUARIOS CONECTADOS EN REDES GENERALES DE DISTRIBUCIÓN.</b>				
<b>(Tensión de 120 a 69000 Volt)</b>				
$I_{sc}/I_L$	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 20$	<b>TDD</b>
<20	4.0	2.0	1.5	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	20.0

Fuente: Documento técnico AR-NT-SUCAL (2016)

Donde:

h: Orden de la armónica.

Isc: Máxima corriente de cortocircuito en el punto de entrega (punto de acople común).

IL: El valor rms de la máxima corriente activa demandada por la carga durante el período de medición.

TDA: Tasa de distorsión armónica total de la tensión.

TDD: Tasa de distorsión total de corriente, como un porcentaje de la máxima corriente activa demandada por la carga.

La tasa de distorsión total de la corriente (TDD) se calculará utilizando la siguiente fórmula:

Ecuación: Fórmula de la Distorsión de corriente total

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{20} (ih)^2}}{I_1}$$

(17)

Fuente: Documento técnico AR-NT-SUCAL (2016).

Donde:

Ih: El valor rms de la corriente activa armónica individual de orden h.

iL: El valor rms de la máxima corriente activa demandada por la carga durante el período de medición.

Notas:

1. IL debe calcularse como el promedio de la máxima corriente demandada durante los doce últimos meses precedentes. Para un sistema trifásico, iL se calcula como:

Ecuación: Fórmula para la corriente demandada

$$I_L = \frac{KW_{demanda}}{\cos \phi \cdot KV \cdot \sqrt{3}}$$

(18)

Fuente: Documento técnico AR-NT-SUCAL (2016).

Donde:

IL: Corriente activa demandada (A).

cosϕ: Factor de potencia.

kV: Voltaje de línea a línea.

2. Los valores de distorsión para las armónicas de orden par deben limitarse al 25 % de los valores para las armónicas de orden impar.
3. No se admite componente DC.

IEEE 519-2014 Prácticas recomendadas por IEEE y Requisitos para el control de armónicos en Sistemas de energía eléctrica. (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos)

### **Alcance**

Esta práctica recomendada establece metas para el diseño de sistemas eléctricos que incluyen cargas lineales y no lineales. Se describen las formas de onda de voltaje y corriente que pueden existir en todo el sistema y se establecen los objetivos de distorsión de la forma de onda para el diseñador del sistema. La interfaz entre fuentes y cargas se describe como el punto de

acoplamiento común y la observancia de los objetivos de diseño, minimizará la interferencia entre equipos eléctricos.

### **Propósito**

Esta práctica recomendada se utilizará como guía en el diseño de sistemas de potencia con cargas no lineales.

Los límites establecidos son para el funcionamiento en régimen permanente y se recomiendan para las condiciones del “peor caso”. Se pueden encontrar condiciones transitorias que excedan estos límites. En cualquier caso, los valores límite indicados en este documento son recomendaciones y no deben considerarse vinculantes en todos los casos. Debido a la naturaleza de las recomendaciones, existe cierto conservadurismo que puede no ser necesario en todos los casos.

Esta práctica recomendada, debe aplicarse en los puntos de interfaz entre los propietarios u operadores del sistema y los usuarios del sistema eléctrico. Los límites de esta práctica recomendada están pensados para su aplicación en un punto de acoplamiento común (PCC) entre el propietario u operador del sistema y un usuario, donde el PCC, generalmente, se toma como el punto en el sistema de energía más cercano al usuario, y el propietario del sistema o el operador podrían ofrecer servicio a otro usuario.

De acuerdo con IEEE 519 (2014):

Con frecuencia, para el servicio a usuarios e industriales (es decir, plantas de fabricación), a través de un transformador de servicio dedicado, el PCC se encuentra en el lado de alta tensión del transformador. Para los usuarios comerciales (parques de oficinas, centros comerciales y demás) suministrados a través de un transformador de servicio común, el PCC se encuentra comúnmente en el lado de BT del transformador de servicio.

Se proporcionan límites de distorsión de voltaje armónico para reducir los posibles efectos negativos sobre el usuario y el equipo del sistema. (p. 8)

Figura 27: Límites recomendados de armónicos de voltaje en el PCC

Bus voltage $V$ at PCC	Individual harmonic (%)	Total harmonic distortion THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5 <sup>a</sup>

Fuente: IEEE 519 (2014)

Figura 28: Límites de distorsión en corriente para sistemas entre 120 V a 69 KV

Maximum harmonic current distortion in percent of $I_L$						
Individual harmonic order (odd harmonics) <sup>a,b</sup>						
$I_{SC}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
<20 <sup>a</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	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

Fuente: IEEE 519 (2014)

### Productos disponibles en el mercado para mitigación de armónicos

#### Filtros armónicos activos y optimizadores de potencia Serie PQSine S

Además de los filtros pasivos, ahora se utilizan filtros de armónicos activos cada vez más, especialmente donde el FP está cerca de 1 y las perturbaciones armónicas cambian con frecuencia.

El filtro activo y optimizador de potencia de la serie PQSine S de TDK z elimina armónicos hasta el orden 50, ofrece compensación dinámica de VAR, equilibra la carga de forma activa en todas las fases, ofrece un alto rendimiento y tiene una topología de tres niveles: garantizar una sobrecarga integrada, protección contra sobrevoltaje y subvoltaje además de que garantiza bajos costos de ciclo de vida, gracias a un concepto modular y bajas pérdidas.

Cuanto más limpia sea su red, mayor será su beneficio; la presencia de armónicos aumenta la corriente RMS en las redes eléctricas. La circulación de corrientes armónicas, a través de la impedancia del sistema, crea armónicos de tensión que producen distorsiones de

tensión y, por tanto, deterioran la calidad de la tensión de alimentación. Esto conduce a mayores costos operativos y de energía, tiempos de inactividad de producción/proceso, sobrecalentamiento y mal funcionamiento del equipo. Los filtros de armónicos activos de la serie PQSine S de TDK se basan en lo último en tecnología de electrónica de potencia. Se instalan en paralelo a las cargas contaminantes. El filtro activo analiza la corriente de línea y sus armónicos asociados y genera una corriente de compensación que neutraliza las corrientes armónicas y crea una forma de onda casi sinusoidal (consulte la Figura 1). Figura 2: Distorsión de corriente armónica total sin filtro activo Filtro armónico activo. Figura 3: Distorsión de corriente armónica total con filtro activo. La figura 2 muestra la distorsión armónica de corriente total sin la serie AHF PQSine S. La figura 3 muestra el resultado con la serie AHF PQSine S activada, es decir, una rejilla más limpia. Además de eliminar los armónicos, el filtro activo y el optimizador de potencia de la serie AHF PQSine S también equilibran activamente las cargas en las tres fases, realizan una compensación dinámica de VAR e incluso alguna compensación transitoria. Estas características evitan la resonancia de línea y aseguran un alto rendimiento y confiabilidad. Figura 1 Principio del filtro activo: Los filtros de armónicos activos EPCOS y los optimizadores de energía ayudan a eliminar la contaminación armónica de la red, reducen los problemas de calidad de la energía y usan la energía de manera más eficiente y confiable. La contaminación armónica es un problema creciente con el uso creciente de electrónica de potencia y cargas no lineales (como unidades de velocidad variable, UPS, computadoras, servidores, televisores, etc.).

Figura 29: Datos Filtro TDK

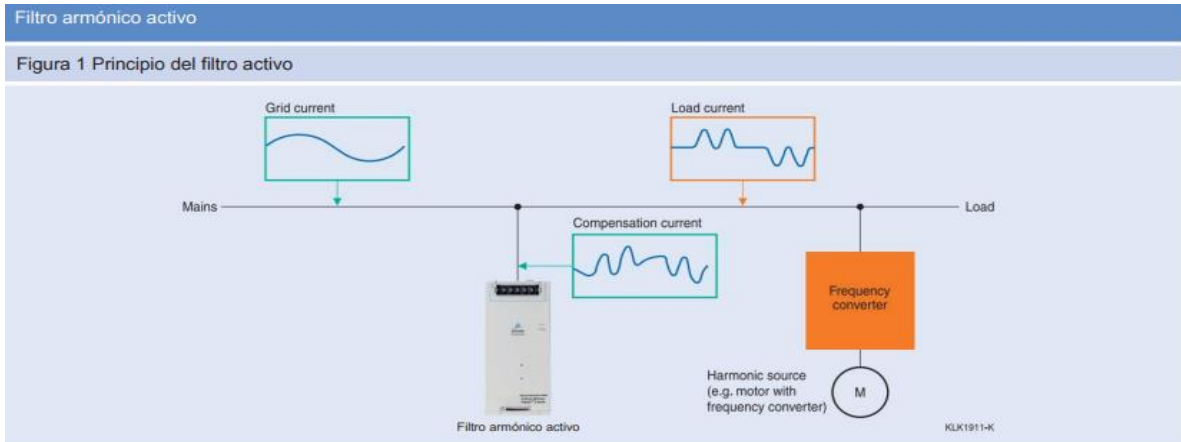


Figura 2 Distorsión de corriente armónica total sin filtro activo

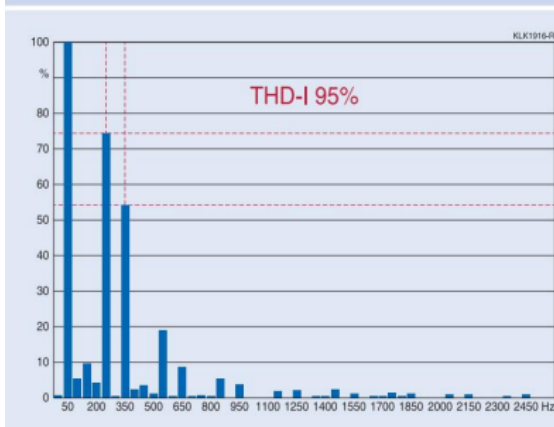
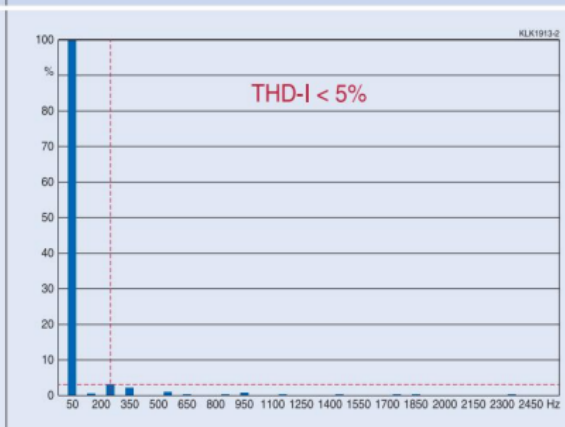
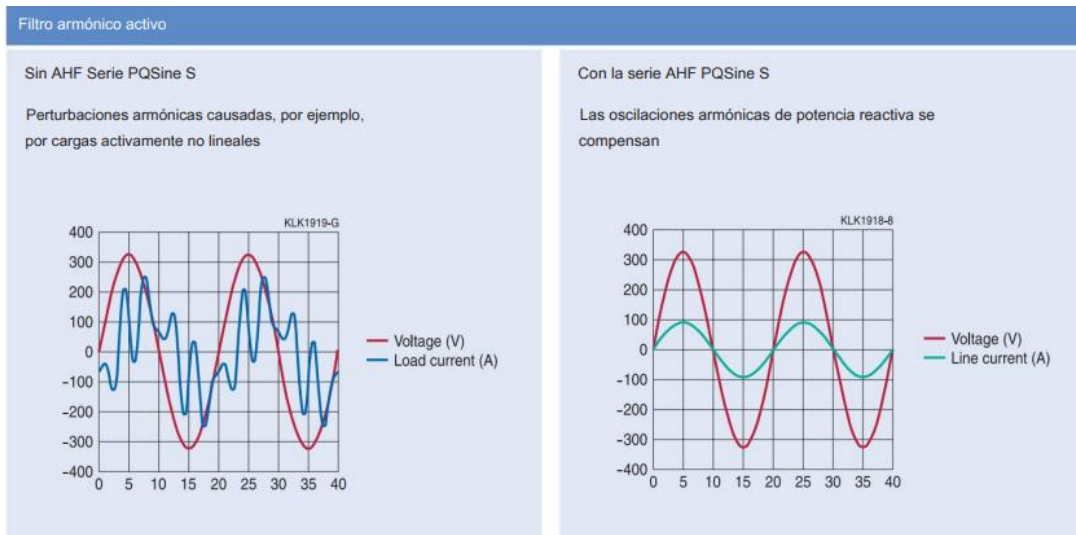


Figura 3 Distorsión de corriente armónica total con filtro activo





La serie PQSine S es un sistema de filtro armónico activo, diseñado para eliminar las oscilaciones armónicas, y en consecuencia, reducir los costos. La serie AHF PQSine S monitorea la señal actual y compensa los elementos no deseados de la corriente medida. Así, el filtro asegura la supresión de armónicos independientemente del número de cargas. También corrige el factor de potencia, mejora la eficiencia del sistema y reduce la contaminación armónica.

### Características

- Compensación de armónicos hasta el armónico 50 (seleccionable individualmente).
- Compensación de potencia reactiva ultrarrápida (inductiva y capacitiva) Equilibrio de carga entre fases y cable neutro sin carga.
- Diseño compacto, topología de 3 niveles z Sistema modular extensible.

- Detección de resonancia de red z Control digital de algoritmo FFT, algoritmo FFT inteligente, algoritmo reactivo instantáneo z Sistema Ethernet y Ethercat para interconexión.
- Operación de menú fácil de usar z Alto rendimiento y confiabilidad z Insensible a condiciones de la red.

### Aplicaciones Típicas

Supresión rápida de armónicos de corriente y potencia reactiva, p. ej., para:

- Centros de datos z Sistemas SAI z Generación de energía ecológica (p. ej., fotovoltaica y turbinas eólicas).
- Fabricación de equipos sensibles (p. ej., producción de obleas de silicio, producción de semiconductores).
- Máquinas de producción industrial z Sistemas de soldadura eléctrica.
- Máquinas para la industria del plástico (extrusoras, moldeadoras por inyección).
- Edificios de oficinas y centros comerciales (cancelación de 3er y triple armónico y descarga de conductor neutro): funciones de seguridad.
- Máxima seguridad y confiabilidad z: protección contra sobrecarga.
- Protección contra cortocircuito interno.

- Protección contra sobrecalentamiento.
- Protección contra sobrevoltaje y subvoltaje.
- Protección de puente inversor.
- Protección contra resonancia.
- Alarma de falla del ventilador.

Fuente Smart Siemens.

### **CC instrumentación industrial S.A.**

Es otra empresa que ofrece productos para la mitigación de armónicos en el país, marca Matrix, de MTS, de los cuales tres están dirigidos a sistemas de 480 V 60Hz, los cuales son los siguientes:

#### Matrix AP

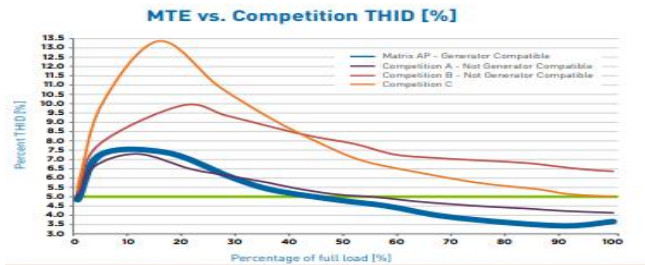
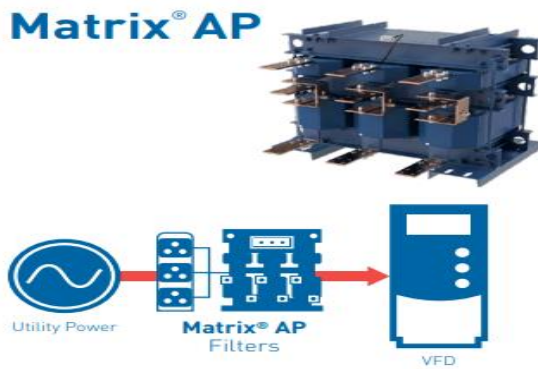
La mayoría de filtros funciona bien al 100% de carga de potencia, pero tienen bajo rendimiento en cargas inferiores, AP es diferente, porque como se sabemos, casi nadie corre a carga completa todo el tiempo.

AP es patentado adaptado pasivo en tecnología, virtualmente elimina armónico de distorsión, adaptándose a la variación fuerza cargas y entrega mejor rendimiento. THID aumenta la energía eficiencia y también permite cumplir con los requisitos de IEEE-519. Es el

único diseño que genera menos calor, es fácil de instalar, mantener y reduce el tiempo de inactividad.

El mejor en su clase es Armónico Matrix® AP. Se pueden especificar filtros para uso en la entrada de su VFD u otro rectificador de seis pulsos, fuerza suministro con la finalidad de habilitar su sistema para cumplir con los requisitos IEEE-519 para armónico distorsión, independientemente de la carga de potencia, características del patentado adaptado pasivo, tecnología para armónicos superiores, mitigación y mejor rendimiento de THID, en un rango de carga más amplio. La garantía de rendimiento de MTE proporciona tranquilidad por igualar o superar las expectativas de rendimiento, en todo momento. Se extiende servicio vida eléctrica de equipo, especialmente transformadores y motores, debido a la virtual eliminación de CEMF y el efecto piel. Alivia el sistema en cuanto a falta de tiempo por previsión de fusibles quemados y disparados, rompedores de circuitos e industria liderando tres años de garantía, porque el mejor producto merece la mejor garantía.

Figura 30: Filtro Matrix AP



Performance Specifications	
Service Load Condition	Load: 6-pulse rectifier only
Input Voltage	208 - 240V +/- 10%; 60 Hz; 3-phase 380 - 415V +/- 10%; 50 Hz; 3-phase 480V +/- 10%; 60 Hz; 3-phase 600V +/- 10%; 60 Hz; 3-phase 690V +/- 10%; 50 Hz; 3-phase
Current Range	208 - 240V: 6A - 403A (3 HP - 150 HP) 380 - 415V: 6A - 1200A (1.1 kW - 600 kW) 480V: 6A - 2300A (3 HP - 1850 HP) 600V: 6A - 786A (5 HP - 800 HP) 690V: 52A - 636A (37 kW - 450 kW)
Maximum THID	8% @ 30% load; 5% @ full load
Maximum Ambient Temperature	-40°C to +50°C open panel filter -40°C to +40°C - 45°C enclosed filter -40°C to +90°C storage
Insertion Loss @ Full Load	<5%
Efficiency	97% - 99%
Altitude Without Derating	3,300 feet above sea level
Relative Humidity	0% to 95% non-condensing
Current Rating	150% for 1 minute duration

Final product specifications subject to change at any time.

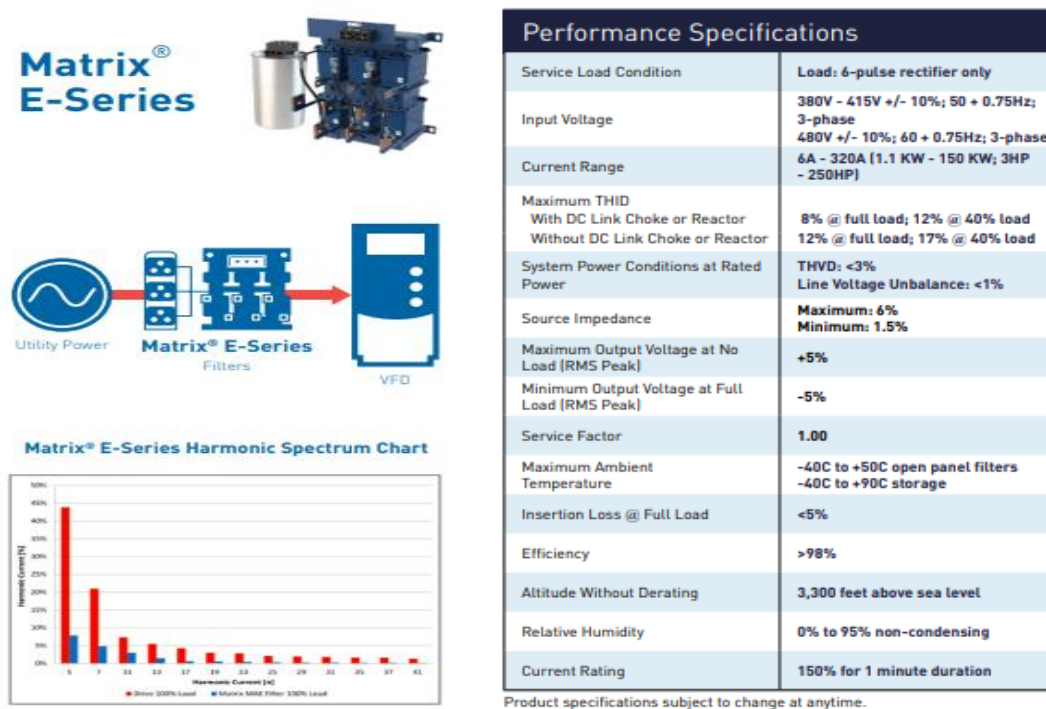
### Matrix serie E

Satisfacción básica en mitigación de armónicos, diseño flexible y compacto, fácil de integrar e instalar, se extiende calidad de vida de equipo eléctrico.

Precio accesible: Matrix ® E-series es el último de una larga línea de filtros de MTE.

Es una solución para corregir mediciones erróneas en sensores, sobrecalentamiento por distorsiones, disparo de rompedores de circuito, componentes e inactividad generados por diversos variadores de frecuencia (VFD). El Matrix E-Series cuenta con un diseño flexible, compacto y robusto, lo cual lo hace fácil de integrar e instalar, en casi cualquier aplicación de fuerza, eficiencia y energía, reduce el tiempo de inactividad. Satisface los requisitos del 10%-15% mientras también del secundario de IEEE-519 patentado y diseñado con componentes confiables, proporciona mitigación de armónico y reducción de THID (Total Harmonic distorsión) donde se necesite. Mejora la eficiencia del sistema, extiende la vida útil de los equipos y transformadores.

Figura 31: Filtro Matrix serie E



Performance Specifications	
Service Load Condition	Load: 6-pulse rectifier only
Input Voltage	380V - 415V +/- 10%; 50 + 0.75Hz; 3-phase 480V +/- 10%; 60 + 0.75Hz; 3-phase
Current Range	6A - 320A (1.1 KW - 150 KW; 3HP - 250HP)
Maximum THID With DC Link Choke or Reactor Without DC Link Choke or Reactor	8% @ full load; 12% @ 40% load 12% @ full load; 17% @ 40% load
System Power Conditions at Rated Power	THVD: <3% Line Voltage Unbalance: <1%
Source Impedance	Maximum: 6% Minimum: 1.5%
Maximum Output Voltage at No Load (RMS Peak)	+5%
Minimum Output Voltage at Full Load (RMS Peak)	-5%
Service Factor	1.00
Maximum Ambient Temperature	-40C to +50C open panel filters -40C to +90C storage
Insertion Loss @ Full Load	<5%
Efficiency	>98%
Altitude Without Derating	3,300 feet above sea level
Relative Humidity	0% to 95% non-condensing
Current Rating	150% for 1 minute duration

Product specifications subject to change at anytime.

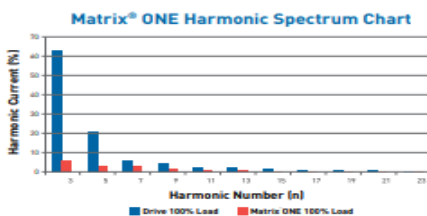
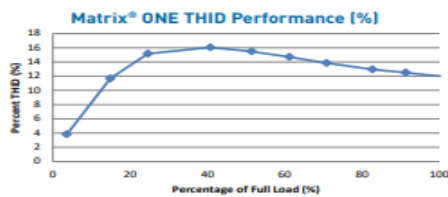
## Matrix ONE

Proporciona una confiable protección, en ambientes donde la utilidad de fuerza puede no ser óptima. MTE ha construido el Monofásico Filtro Matrix ONE con componentes apropiados para trabajar en zonas rurales, remotas áreas donde tres fases de fuerza a menudo no están disponibles. Esta patentado, la tecnología reduce los armónicos de distorsión y permite que el equipo aumente su energía eficiente y mejore el rendimiento general de THID. El Matrix ONE está diseñado para generar menos calor y reducir en el sistema los tiempos de inactividad.

Es fácil de instalar y mantener. La fase única Matrix ONE produce la protección que se necesita para extender la vida útil del equipo, la Fase Única Filtro Matrix ONE se utiliza para producir una mitigación del armónico para su variador de frecuencia u otro monofásico, cuenta con fuerza de aplicaciones patentada y diseño elaborado con confiables componentes, proporciona mitigación de armónicos y reducción de THID (Total Harmonic Distortion) la mayoría de bajo costo, es fácil de instalar y mantener. En cuanto a rendimiento, es capaz de soportar condiciones hostiles y mejora la eficiencia del sistema.

Figura 32: Filtro Matrix ONE

Performance Specifications	
Service Load Condition	Load: typically a 4-pulse rectifier
Input Voltage	240V +/- 10%; 60 +/- 0.75Hz; 1-phase 480V +/- 10%; 60 +/- 0.75Hz; 1-phase
Maximum THID	12% @ Full Load
Maximum Ambient Temperature	-40°C to +50°C open panel filters; -40°C to +40°C enclosed filters; -40°C to +90°C storage
Inrush Loss	+10% no load; -10% full load
Efficiency	97% - 99%
Altitude Without Derating	3,300 feet above sea level
Relative Humidity	0% to 95% non-condensing
Overload	150% for 1 minute duration



Fuente: CC instrumentación industrial S.

## SCHNEIDER ELECTRIC

Proporciona con AccuSine PCSn un **nuevo filtro de armónicos activo**, escalable, flexible y de alto rendimiento, que proporciona fiabilidad y eficiencia a los sistemas eléctricos incrementando el tiempo de funcionamiento, mejorando la eficiencia operacional, prolongando la vida de los equipos y mejorando la eficiencia energética.

Este nuevo filtro de armónicos Acusona PCSn ha sido diseñado basándose en la galardonada plataforma AccuSine+. Incluye como función principal la de **mitigar los armónicos y reducir las fluctuaciones de tensión**, sobre todo en edificios terciarios, industria ligera y otros entornos similares.

### **Filtro de armónicos activo AccuSine PCSn, producto clave de Ecostruxure Power**

Este filtro de armónicos AccuSine PCSn está considerado además como un producto conectado clave dentro de EcoStruxure Power, una solución que forma parte de la arquitectura IoT de sistema abierto e interoperable para edificios, redes eléctricas, industria y centros de datos de SCHNEIDER ELECTRIC, EcoStruxure.

Como principales novedades de este **nuevo filtro de armónicos AccuSine PCSn** se incluyen:

- **Mitigación activa** de armónicos, reduciendo el THDi a menos del 3%.
- **Corrección del factor** de potencia y mitigación de armónicos.
- **Equilibrado de cargas**, lo que reduce la corriente del neutro a 0, para conseguir un sistema perfectamente estable.

Respecto a las características técnicas de este filtro de armónicos Accusine PCSn, cabe destacar las siguientes:

- **Cancelación de espectro:** Del H2 al H51, discreta; totalmente seleccionable por orden armónico (amplitud y *on/off*)
- **Lazo cerrado:** < 3 % THD(i); máx. 20:1 THD(i) reducción con carga armónica de corriente superior al 50 % del valor del filtro activo AccuSine PCS+
- **Lazo abierto:** < 5 % TDD
- Se requiere una **impedancia inductiva del 3 % o mayor** para cada carga no lineal.
- **Corrección del factor de potencia:** Capacitivo (*leading*) o inductivo (*lagging*), para conseguir el  $\text{Cos } \varphi$  objetivo.
- **Equilibrado de cargas:** Inyección de corriente de secuencia negativa para equilibrar la corriente fundamental en la red como consecuencia del desequilibrio de las cargas (inherentemente también se corrige el  $\text{Cos } \varphi$ ) – **Tiempo de respuesta:** 25  $\mu\text{s}$ .
- **Tiempo de corrección armónica:** 2 ciclos.
- **Tiempo corrección reactiva:** 1/4 ciclo.
- **Temperatura de funcionamiento:** 0 °C a 40 °C.
- **Reducción de la capacidad nominal el 2 %** por cada grado centígrado hasta los 50 °C.
- **Humedad relativa:** Hasta un 95 %, sin condensación.
- **Altitud de funcionamiento:** 1000 m (Reducción de la capacidad nominal un 1 %/ cada 100m), máx. 4800 m.
- **Normativas:** cULus (UL508, CSA 22.2 N.º 14), CE Certified, ABS, Lloyds.
- **Pantalla:** 144 mm QVGA TFT 64k-color pantalla táctil

Figura 33: Filtro Schneider



Fuente: Schneider electric.

## **EATON**

Datos técnicos TD156001EN

Unidad de corrección de armónicos (HCU2)

Descripción del Producto

Los filtros de armónicos activos HCU2 de Eaton están diseñados para proporcionar corrección dinámica de armónicos mediante la inyección activa de las corrientes en un sistema de distribución eléctrica para cancelar todo el espectro de corrientes armónicas en el punto de conexión.

### Ventajas

- Se puede dimensionar para cumplir con niveles específicos de corrección de armónicos.

### Cumplimiento de los niveles recomendados por IEEE 519:

- Diseñado para evitar la sobrecarga.
- El diseño escalable se puede expandir sin afectar el rendimiento.
- Amplio espectro de cancelación para una protección robusta (2° a 51° armónico).
- Ayuda a mejorar el factor de potencia para maximizar la eficiencia.
- Instalación más fácil y económica que los filtros pasivos, ya que el diseño de filtro activo reduce la necesidad de estudios de ingeniería detallada.
- HMI proporciona un control completo a través de una interfaz basada en iconos

### Características, ventajas y funciones:

- Acción rápida.
- ULT 508/ CSAT C22.2 No. 14 listado.
- 208–240 V, 380–480 V  $\pm 10\%$ , 600 V y 690 V

### Con autotransformador:

- Frecuencia de 50/60 Hz  $\pm 3$  Hz.
- Rango de temperatura de funcionamiento 0 °C a +40 °C.
- NEMAT 1, NEMA 2, NEMA 12, IP31, IP54 y montaje en chasis

### Versiones disponibles:

- Montaje en pared (diseños NEMA 1).

- De pie (NEMA 2, NEMA 12, IP31 e IP54).
- Capacidad de salida: autolimitada al 100 % de la corriente nominal.
- Capacidad correctiva: <5 % TDD y desplazamiento casi unitario.

Factor de potencia

Nota: Requiere al menos un reactor de línea de entrada en serie del 3 % delante de cada carga no lineal.

- Pantalla táctil HMI a color.
- Se han minimizado las pérdidas de calor. Esto da como resultado una operación más baja en costos y requisitos reducidos para el enfriamiento de la sala de equipos.

Figura 34: Filtro Eaton HCU2

---

## Harmonic correction unit (HCU2)



Harmonic correction units (HCU2)

Fuente: Eaton.

### **CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO.**

En esta parte se presentan los pasos por seguir en su orden secuencial, puntos específicos como tipo de enfoque, fuentes, variables e instrumentos utilizados durante la investigación.

#### **Enfoque**

El tipo de enfoque será mixto, ya que lo conformará una parte cuantitativa que son los valores obtenidos durante las mediciones y otra cualitativa. Esta última constará de la información recopilada, la cual integrará un marco referencial, que será la base para determinar los tipos de problemas presentes y las soluciones que mejor se adaptan a la necesidad encontrada.

En un plazo no menor a siete días, permanecerá conectado el analizador marca Fluke mod. Fluke-435-2 al transformador TXD4 de 45KVA del circuito de luces, luego de este tiempo se procederá a desconectar el equipo y extraer los datos de la tarjeta de memoria en la computadora del Ing. Carlos Núñez Vega. Posterior a ello, se procederá a conectar el segundo transformador TXD4B, el cual alimenta los circuitos de la unidad de cuidados intensivos (UCI) y permanecerán conectados por el mismo plazo de siete días. El tercer transformador, que se encuentra en el cuarto piso, no será objeto de este estudio, ya que el área que alimenta se encuentra actualmente desocupada.

#### **Fuentes**

Para llevar a cabo este estudio, se cuenta con diferentes fuentes para obtener información, entre las cuales están:

#### **Análisis de la calidad de energía en dos transformadores**

Transformadores TXD4 y TXD4B, ubicados en el cuarto piso de la Torre Médica del Hospital Dr. Rafael Ángel Calderón Guardia, información que se obtendrá en un plazo no menor que siete días por transformador, para obtener la mayor cantidad de información posible.

## **Literatura**

Autores como Pinto, R. E. (2020). *Calidad de la energía eléctrica*. Córdoba, Argentina y Jorge Sarmiento Editor – Universitas, Meléndez, Herraiz y Colomer (2005).

## **Boletines técnicos**

Se recopilará información de diferentes empresas como Circutor, Schindler, Eaton y Siemens entre otras dedicadas a la solución de este fenómeno, tanto nacionales con internacionales.

## **Antecedentes**

Los antecedentes mencionados en el capítulo 1, serán tomados en cuenta como fuente de información. Entre las universidades que se tomaron en cuenta están la Universidad Internacional de las Américas, el Instituto Tecnológico de Costa Rica, la Universidad de Costa Rica, la Universidad Técnica del Norte y la Universidad Nacional del centro de Perú

## **Normas**

ARESEP SUCAL, la cual es la norma vigente en temas de calidad de energía e indica los valores mínimos de variables de calidad de energía, los cuales se deben cumplir en una red industrial.

En temas de armónicos variable en estudio, este proyecto se basa en la IEEE 519, la cual es una recomendación técnica para el buen diseño eléctrico en temas de armónicos.

## **Variables**

- Detonantes de armónicos en la red eléctrica.
- Efectos de los armónicos en la red eléctrica.
- Filtros disponibles en el mercado y su fabricante.

## **Instrumentos**

Los instrumentos utilizados serán un analizador marca Fluke mod. Fluke-435-2 también se utilizará una cámara termográfica de la misma marca modTi450pro.

## **CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Se colocó el analizador en el transformador TXD4 de 45KVA, el cual en un principio el Ing. Carlos Núñez Vega indicó que estaba mostrando altas temperaturas y se sospechaba que podría estar presentando problemas de armónicos, por encima de los valores permitidos, como se indica en la información recabada en el marco teórico. Este transformador alimenta dos tableros de 30 circuitos cada uno, que a su vez alimentan las luminarias del cuarto piso, por lo cual también se obtiene información de *flicker*.

El equipo de medición se programa para realizar mediciones cada treinta segundos, para un total de 20160 datos obtenidos.

## Análisis transformador TXD4

Figura 35: Colocación de analizador



Fuente: Propia.

Figura 36: Datos transformador TXD4

**SORGEI<sup>®</sup> THREE PHASE GENERAL PURPOSE TRANSFORMER**

CAT NO: 45T3H KVA: 45

H.V.: 480 H.V. AMPS: 54 Hz: 60 %IZ: 6.2

L.V.: 208Y/120 L.V. AMPS: 125 WT: 330 CLASS: AA

220 DEGREE C INS SYSTEM, 150 DEGREE C RISE

STYLE NO: 33749-17212-082

DATE CODE: 0225.1 TYPE: SQ ENCLOSURE: TYPE 2 24TS22C

**JUMPER CONNECTIONS**

TAP	VOLTS
1	504
2	492
4	468
5	456
6	444
7	432

LISTED POWER TRANSFORMER

MADE IN MEXICO

⚠ DANGER	⚠ PELIGRO	⚠ DANGER
<p><b>HAZARD OF ELECTRIC SHOCK, BURN OR EXPLOSION</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• This equipment must be installed and serviced only by qualified electrical personnel.</li> <li>• Turn off all power supplying this equipment before working on or inside equipment.</li> <li>• Always use a properly rated voltage sensing device to confirm power is off.</li> <li>• Repaire all covers, doors, and covers before turning on power to this equipment.</li> <li>• Failure to follow these instructions will result in death or serious injury.</li> </ul>	<p><b>PELIGRO DE DESCARGA ELECTRICA QUEMADURAS O EXPLOSION</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Solamente el personal de mantenimiento electrico especializado debera instalar y prestar servicio de mantenimiento a este equipo.</li> <li>• Desenergice el equipo antes de realizar cualquier trabajo en el.</li> <li>• Siempre utilice un dispositivo detector de tension adecuado para confirmar la desenergizacion del equipo.</li> <li>• Antes de energizar el equipo, verifique a colocar todos los dispositivos, las puertas y los frentes.</li> <li>• El incumplimiento de estas precauciones podra causar la muerte o lesiones serias.</li> </ul>	<p><b>RISQUE D'ELECTROCUTION, DE BRULURES OU D'EXPLOSION</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• L'installation et l'entretien de cet appareil ne doivent etre effectués que par du personnel qualifié.</li> <li>• Coupez l'alimentation de l'appareil avant d'y travailler.</li> <li>• Utilisez toujours un dispositif de detection de tension à valeur nominale appropriée pour s'assurer que l'alimentation est coupée.</li> <li>• Réparez tous les dispositifs, les portes et les couvercles avant de remettre l'appareil sous tension.</li> <li>• Si ces précautions ne sont pas respectées, cela entraînera la mort ou des blessures graves.</li> </ul>

**TYPE 3 & 3R, WHEN PROVIDED WITH HOOD CATALOG NO. WS363.**

43006-187-01

TO BE IN ACCORDANCE WITH THE NATIONAL ELECTRICAL CODE, ARTICLE 450.9 AND UL 1561, THE TRANSFORMER VENTILATION OPENINGS MUST HAVE A MINIMUM CLEARANCE OF 6 INCHES TO WALL OR OTHER OBSTRUCTIONS.

43006-198-01

Fuente: Propia

Figura 37: Evidencia calentamiento en pared



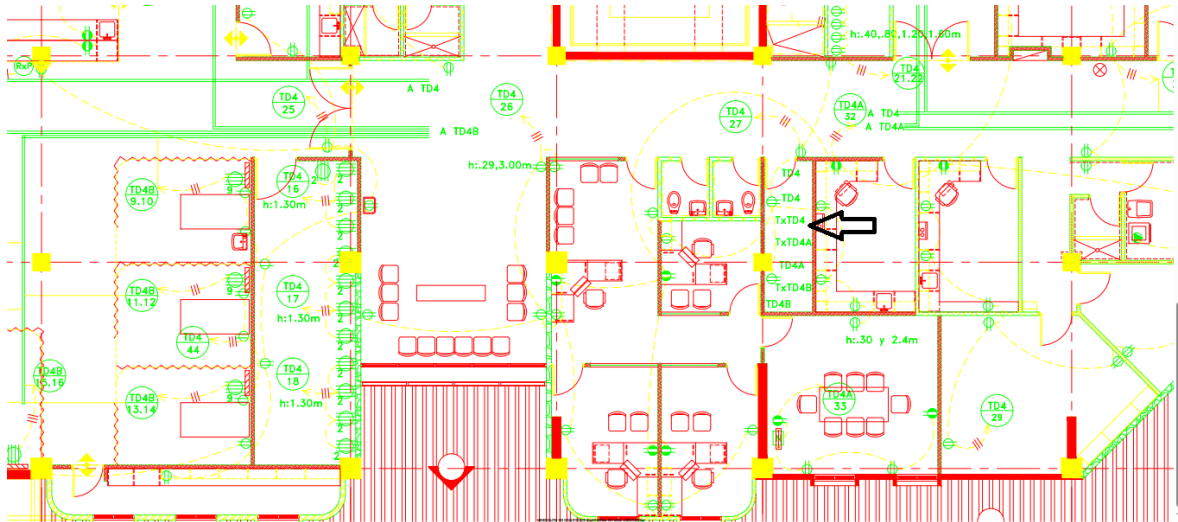
El día que se procede a colocar equipo de medición (Fluke-435-2) se realizan tomas de termografías con equipo Fluke Ti400; en la carcasa marcó una temperatura de 52 Celsius.

Figura 38: Toma de termografía externa Transformador TXD4



Fuente: propia

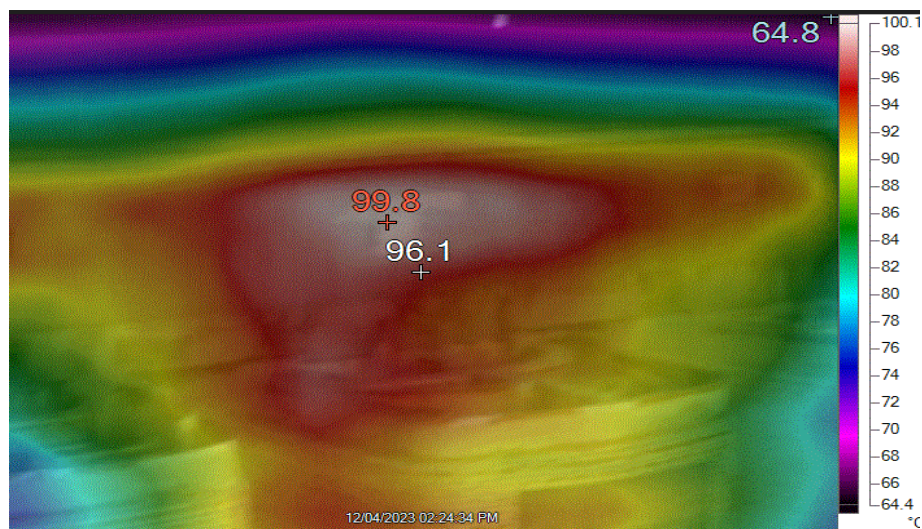
Figura 39: Ubicación en plano



Fuente: Propia

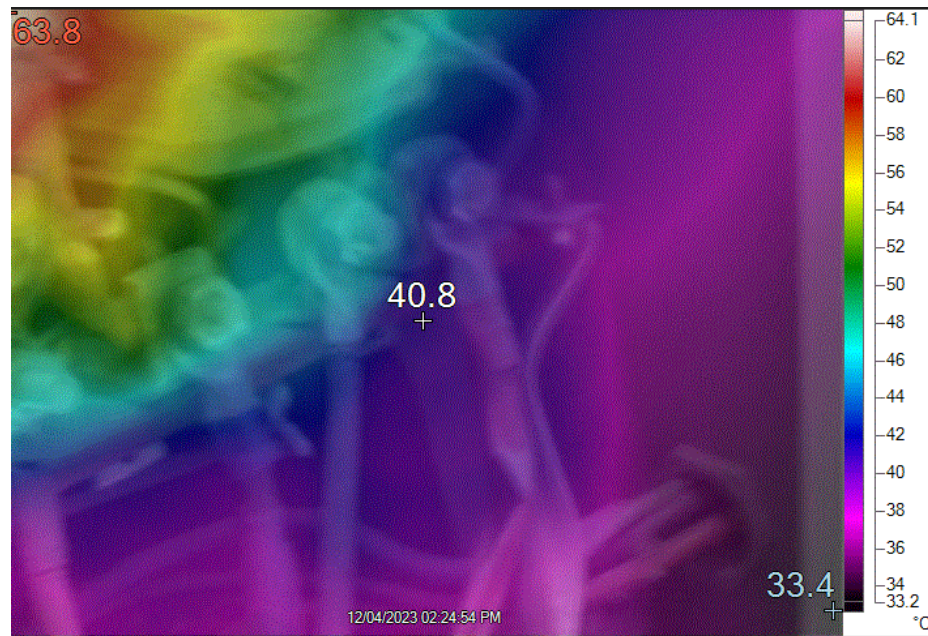
**Resultados termografías transformador TXD4**

Figura40: Termografía de núcleo



Fuente: Ingeniería y Mantenimiento HCG.

Figura41: Termografía conectores de conexión



Fuente: Ingeniería y Mantenimiento HCG.

Figura 42: Tabla de datos termografía

#### Información de la imagen

Temperatura promedio	87,4°C
Rango de la imagen	64,8°C a 99,8°C
Modelo de cámara	Ti400
Tamaño de sensor IR	320 x 240
Número de serie de la cámara	Ti400-13090192
Fabricante	Fluke Thermography
Descripción de la lente	FLK-LENS/TELE2
Hora de la imagen	12/04/2023 14:24:34
Distancia al objetivo	0,91m

#### Marcadores de la imagen principal

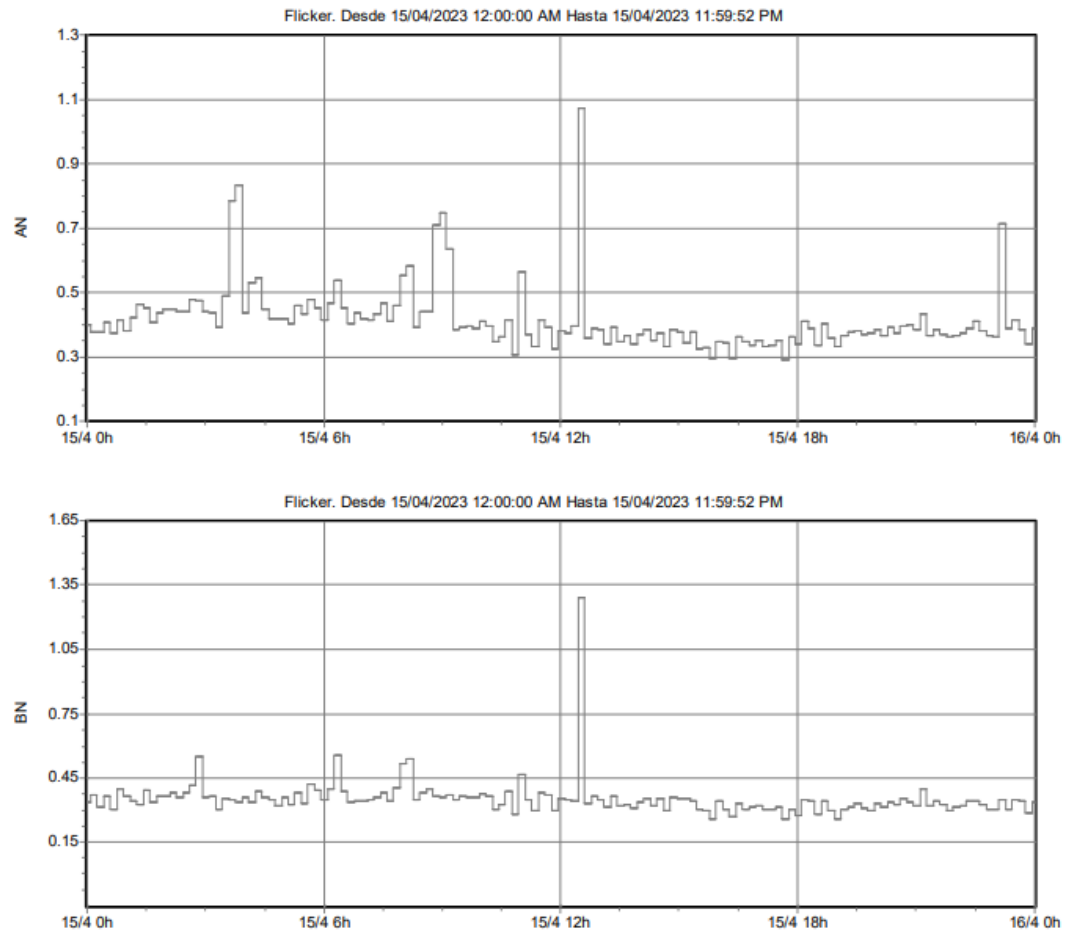
Nombre	Temperatura	Emisividad	Segundo plano
Punto central	96,1°C	0,95	23,0°C
Caliente	99,8°C	0,95	23,0°C
Frío	64,8°C	0,95	23,0°C

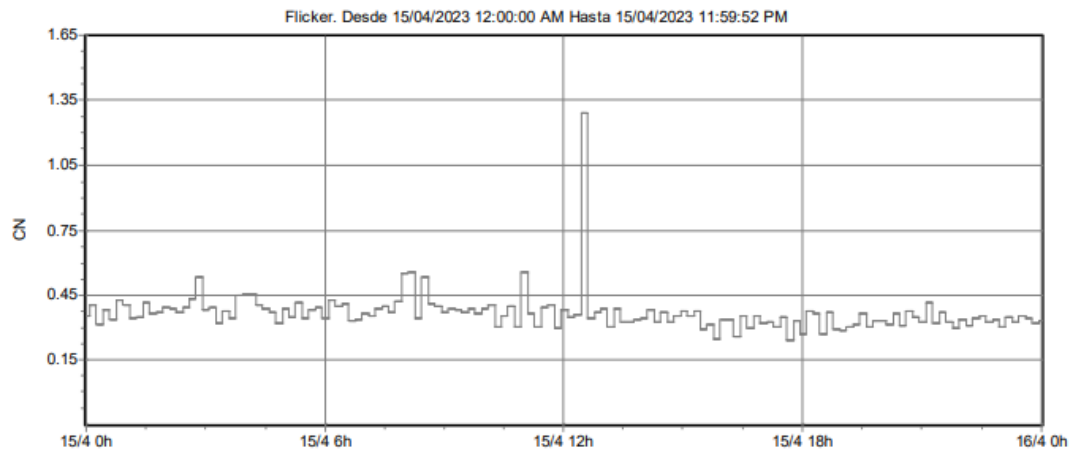
Fuente: Ingeniería y Mantenimiento HCG

Según datos del fabricante, el transformador puede soportar hasta 150 grados Celsius, por lo cual, la temperatura está lejos de llegar al rango máximo como para indicar algún tipo de problema, se revisan los datos de instalación para corroborar una adecuada ubicación, el fabricante indica que el área donde se ubica debe ser ventilada, en lo cual se observaron deficiencias. Además, según resultados, en los tornillos de conexión no se presentan temperaturas altas, lo que podría indicar problemas de falso contacto. En los anexos se agrega la tabla de datos del transformador TXD4 45KVA marca SQUARE D mod. 45T3H.

## *Flicker* Transformador TXD4

Figura 43: Gráficas *Flicker*



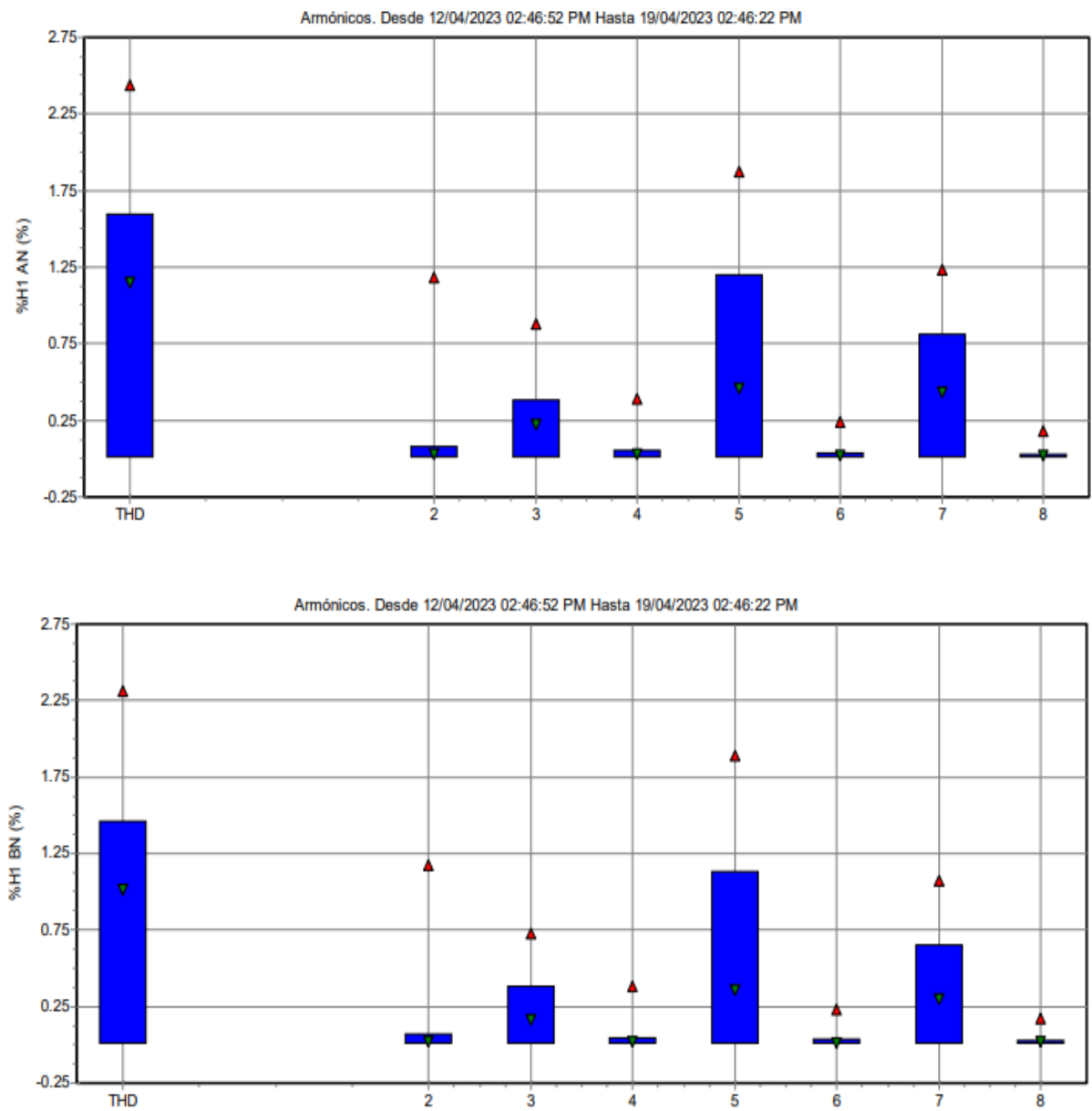


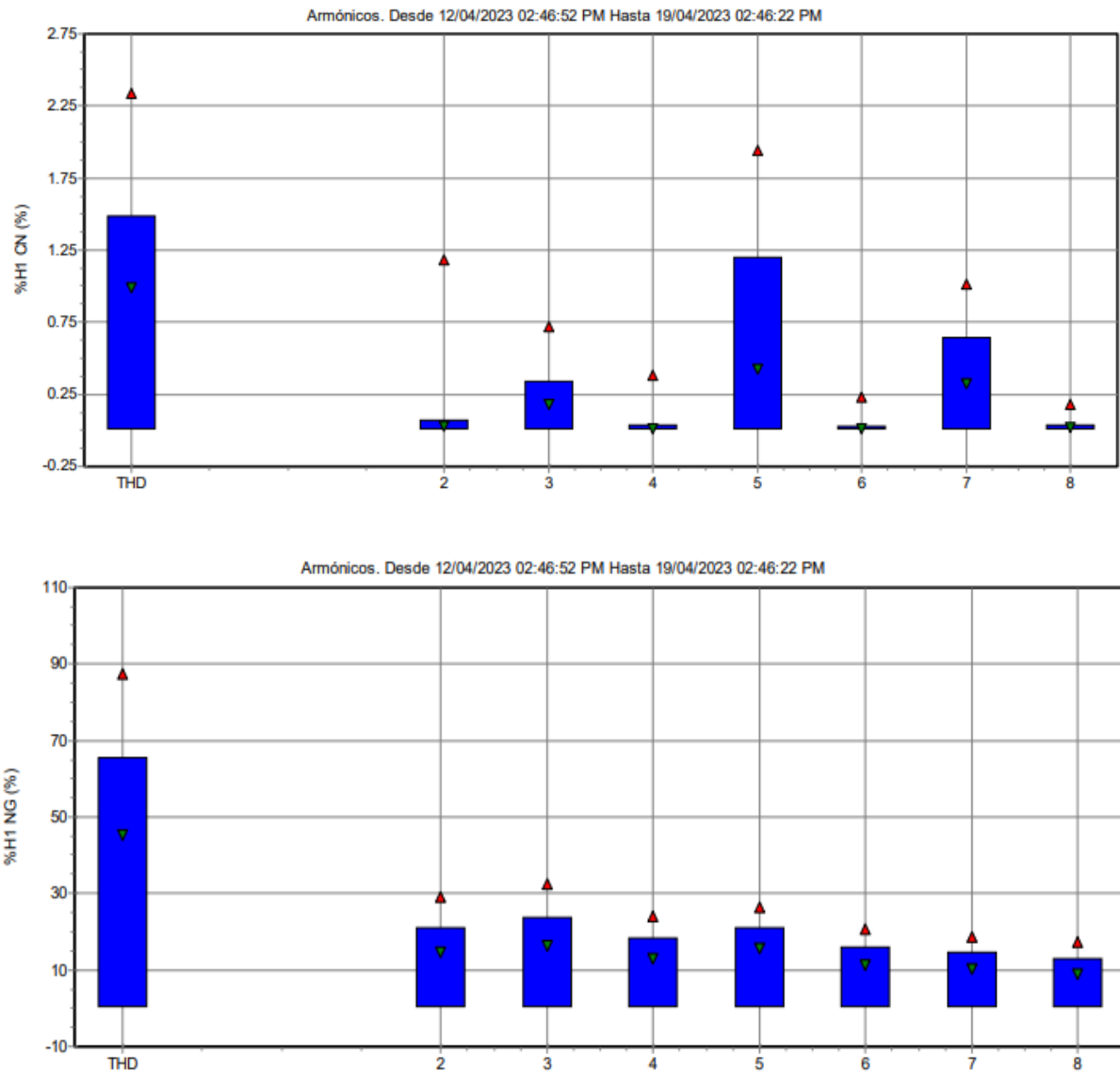
Fuente: Ingeniería y Mantenimiento HCG

Según lo indicado en el marco teórico, se puede observar la severidad de las fluctuaciones tomando 12 valores Pst por dos horas, los datos obtenidos no sobrepasan el 1%, lo que indica que no se están presentando problemas de esta índole.

## Resultados de mediciones eléctricas transformador TXD4

Figura 44: Armónicos en voltaje (TXD4)



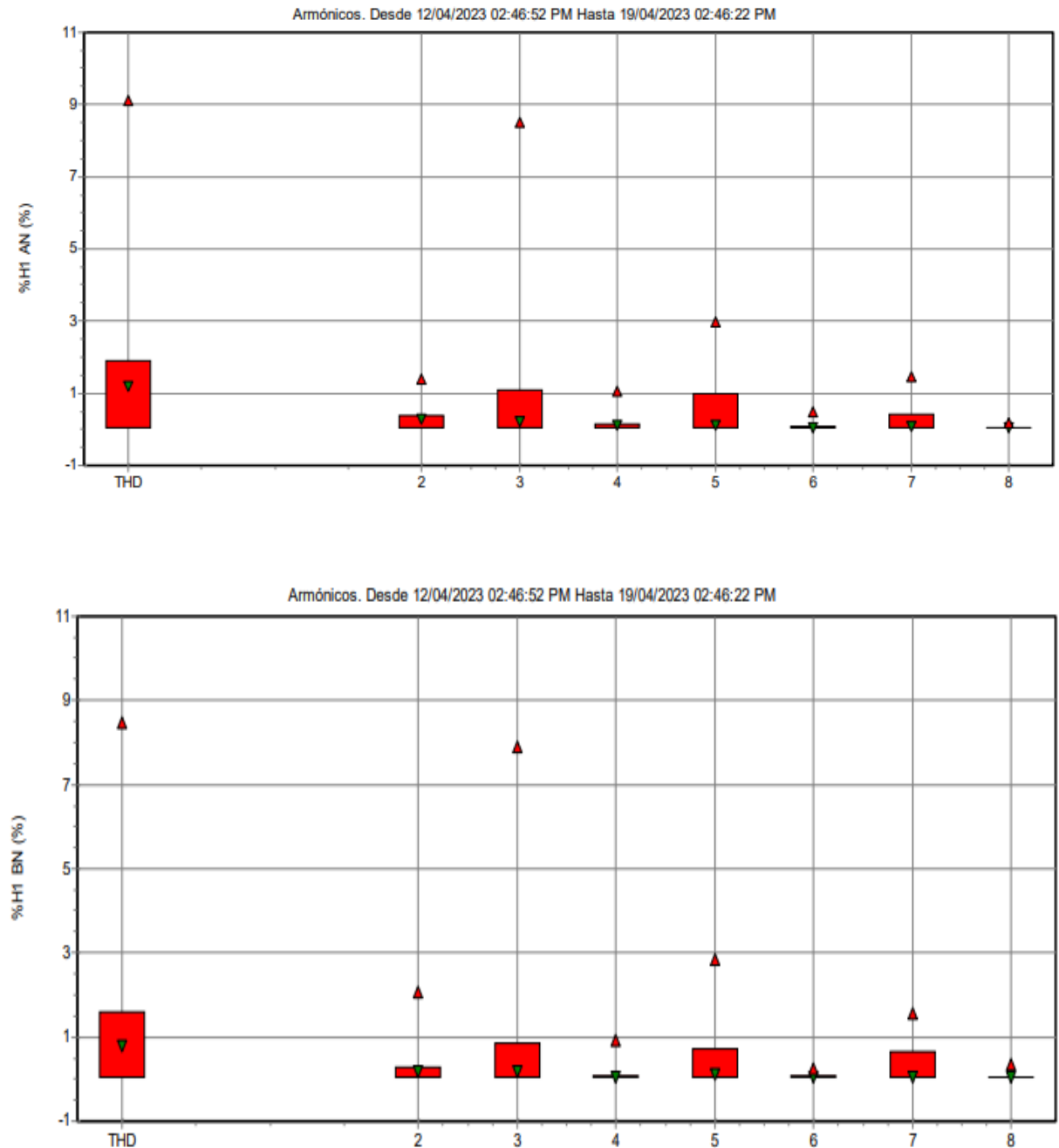


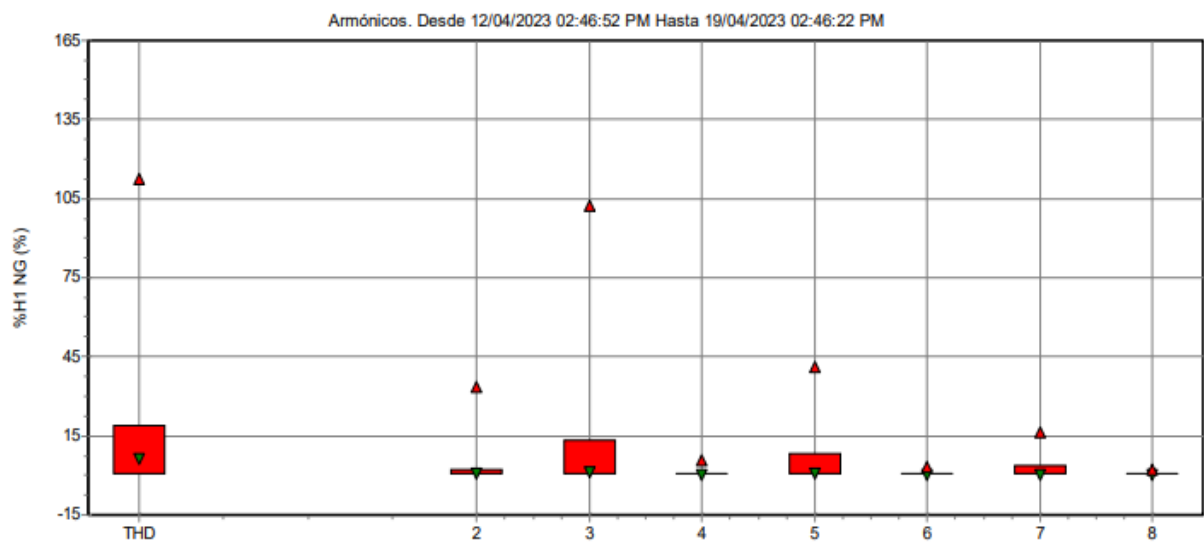
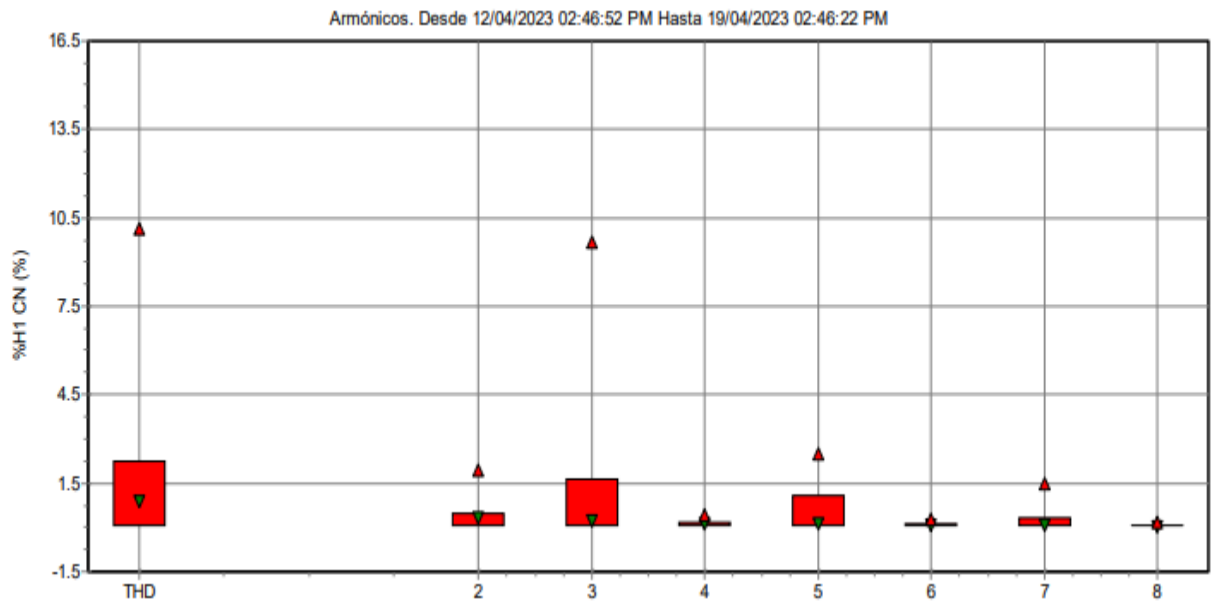
Fuente: Ingeniería y Mantenimiento HCG

Como se puede observar en las mediciones anteriores, en los armónicos de voltaje presentes predominan los 3, 5 y 7, lo cual, según información obtenida, indica presencia con

predominancia del tipo monofásicas en dicho circuito, pero todas por debajo del 3%, lo cual no representa un problema por estar por debajo del rango permitido.

Figura 45: Armónicos de corriente (TXD4)





Fuente: Ingeniería y Mantenimiento HCG

Al igual que en las mediciones de tensión, los armónicos predominantes son de orden 3,5 y 7, pero todos por debajo del rango permitido, con lo que se concluye que el transformador

TXD4 no está presentando problemas de calentamiento por el fenómeno armónico; no obstante, la sensación de alta temperatura podría estar más ligada a la ubicación de este, el cual, como se muestra en la figura 42, es un cuarto de 1,36 m por 1,70 m, sin equipo de A/C ni ningún sistema de extracción o inyección de aire.

### **Análisis en transformador TXD4B**

Como se había programado, luego de realizar los primeros análisis al transformador TXD4, se procedió a conectar el analizador al transformador TXD4B de 30 KVA, que alimenta los circuitos de tomas eléctricas de la unidad de cuidados intensivos (UCI) cuarto piso. Después de realizar las primeras mediciones, se decidió cambiar la programación del analizador, ya que en primera instancia se encontraba realizando mediciones cada 30 segundos y dando un total de 20 160 datos, por lo cual, se redujo a mediciones cada minuto, para un total de 10 080 datos. También cabe mencionar, que este al tener color dorado en etiqueta, indica que está respaldado por UPS.

Figura 46: Transformador TXD4B

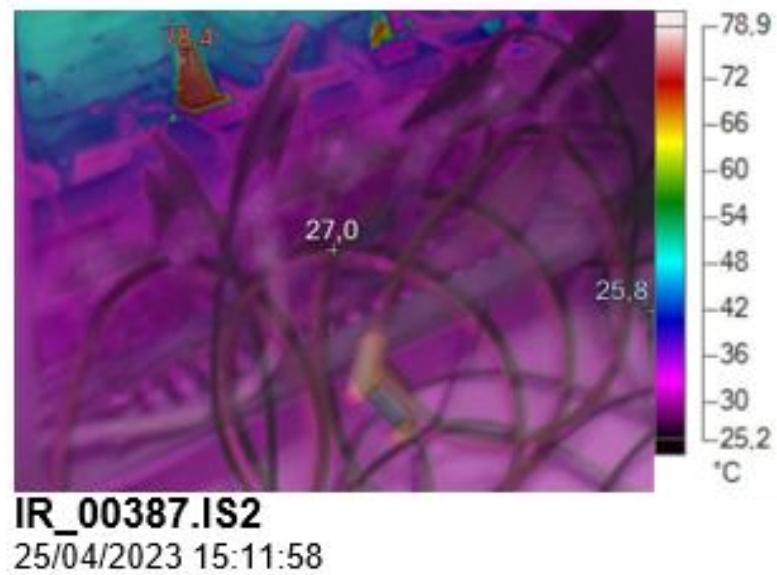


Fuente: Ingeniería y Mantenimiento HCG

## Resultados de mediciones en transformador TXD4B

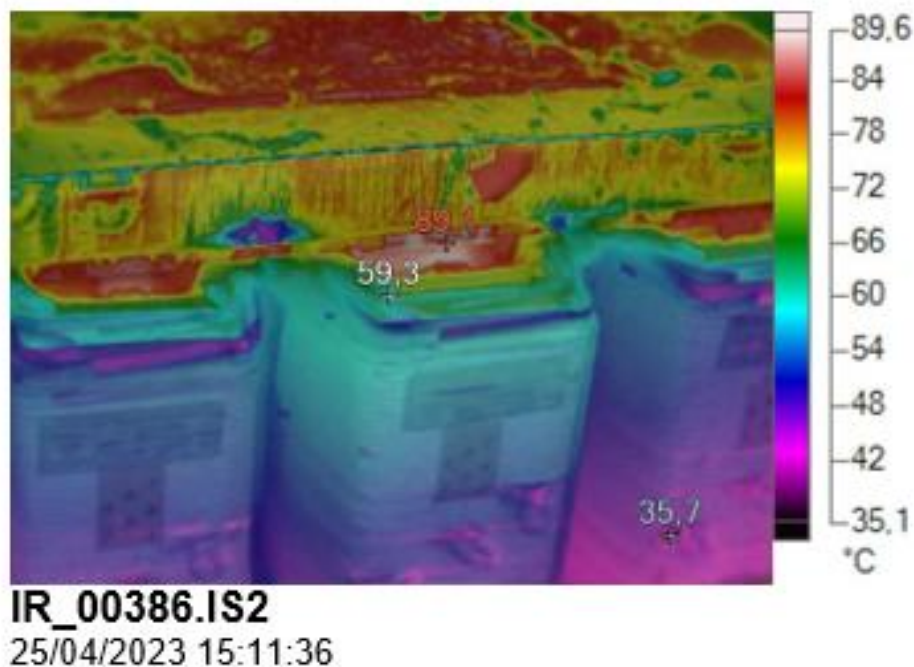
### Resultados termografías

Figura 47: Termografía puntos de conexión (TDX4B)



Fuente: Ingeniería y Mantenimiento HCG

Figura 48: Termografía núcleo (TXD4B)



Fuente: Ingeniería y Mantenimiento HCG

Figura 49: Resultados termografía (TDX4B)

**Información de la imagen**

Temperatura promedio	62,9°C
Rango de la imagen	35,7°C a 89,1°C
Modelo de cámara	Ti400
Tamaño de sensor IR	320 x 240
Número de serie de la cámara	Ti400-13090192
Fabricante	Fluke Thermography
Hora de la imagen	25/04/2023 15:11:36
Distancia al objetivo	0,68m

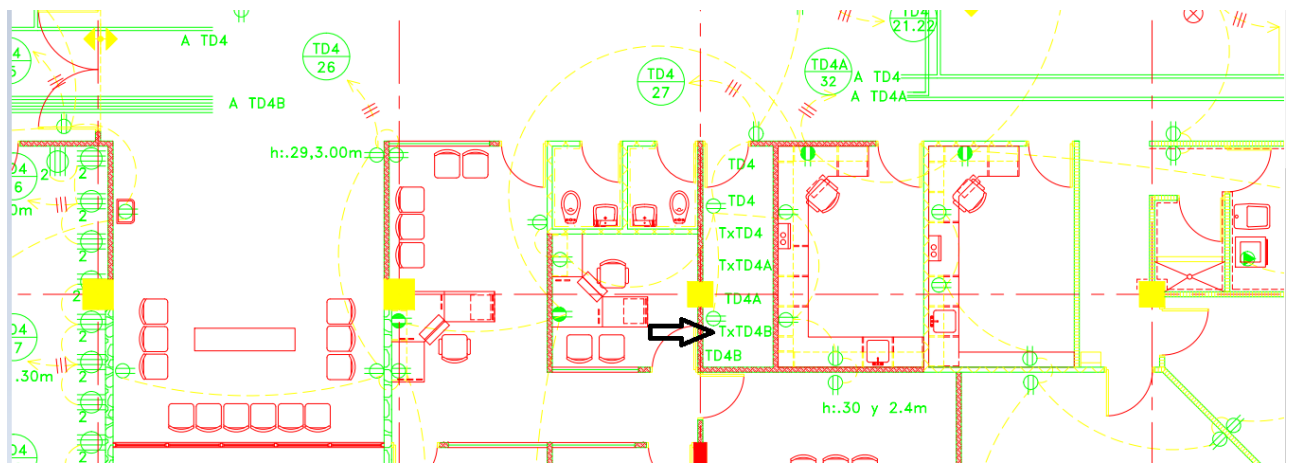
**Marcadores de la imagen principal**

Nombre	Temperatura	Emisividad	Segundo plano
Punto central	59,3°C	0,95	23,0°C
Caliente	89,1°C	0,95	23,0°C
Frío	35,7°C	0,95	23,0°C

Fuente: Ingeniería y Mantenimiento HCG

Como se puede observar, en los datos recopilados de temperaturas, al igual que el transformador TXD4 el TXD4B no presenta problemas por sobrecalentamiento.

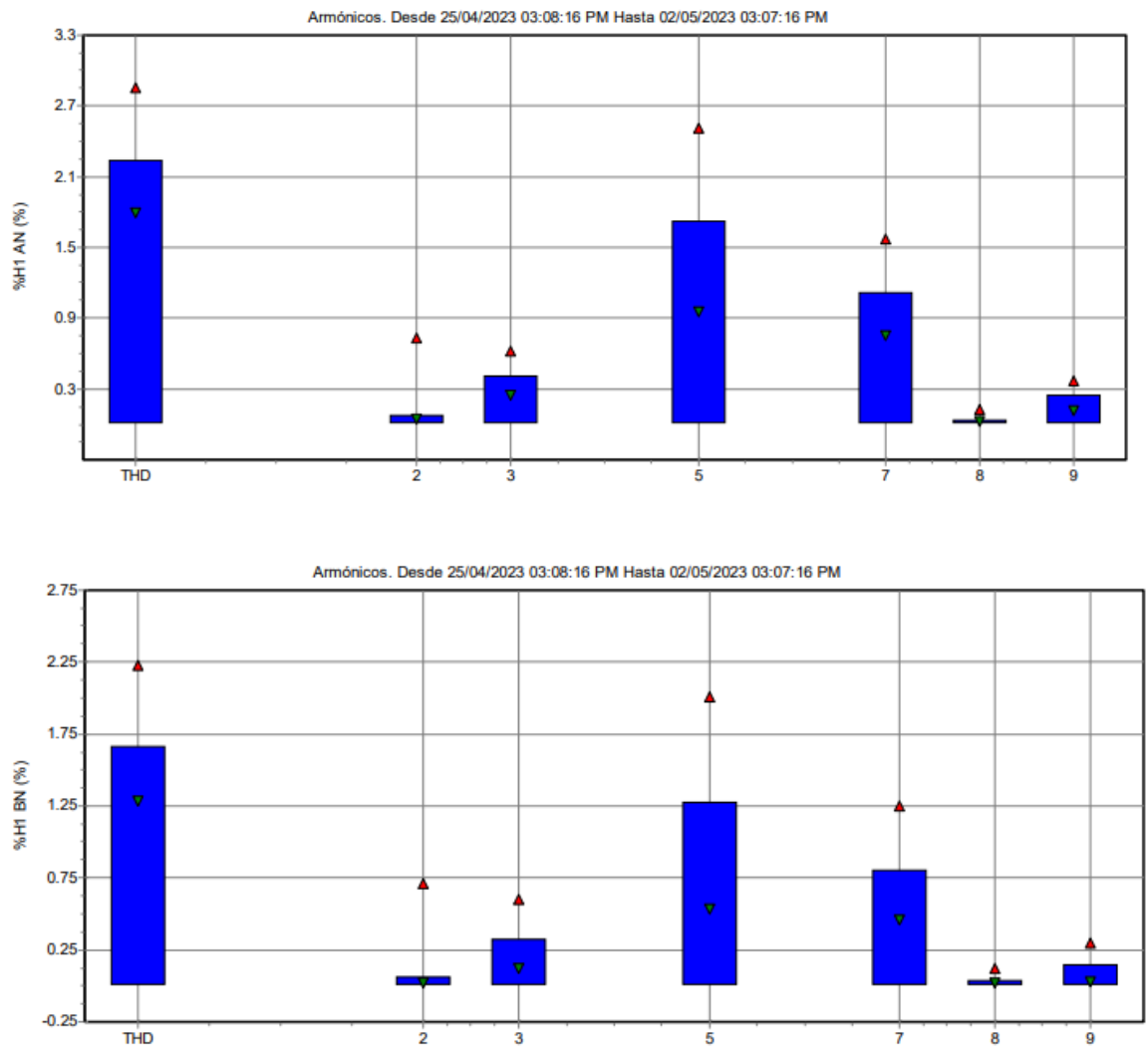
Figura 50: Ubicación transformador TXD4B

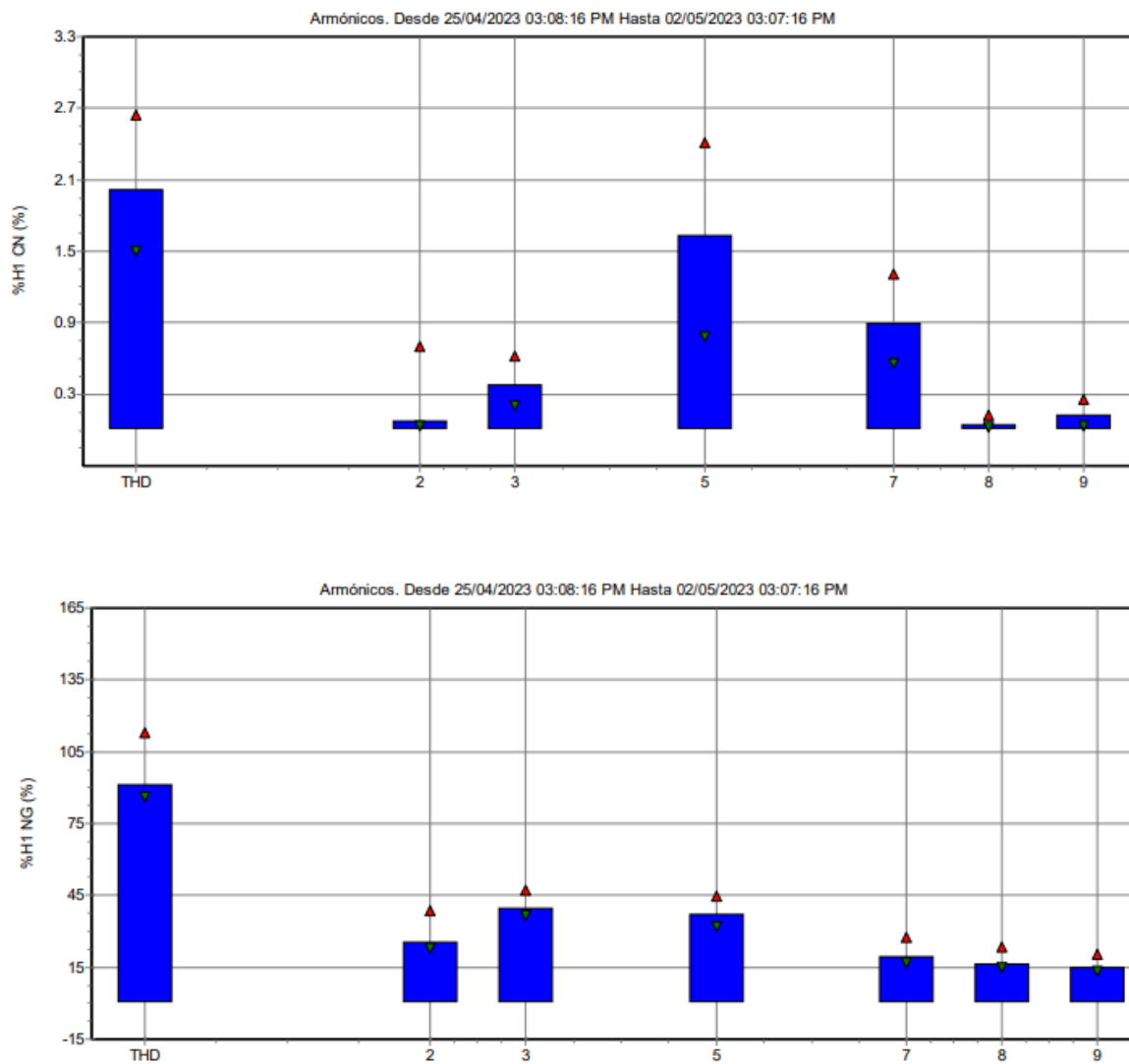


Fuente: Ingeniería y Mantenimiento HCG

Resultados de mediciones en transformador TXD4B

Figura 51: Mediciones de armónicos en voltaje (TDX4B)

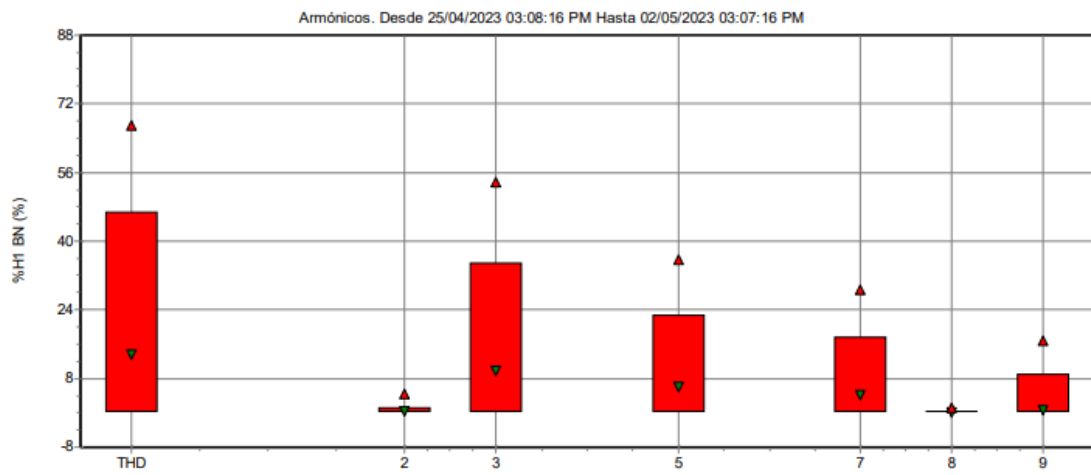
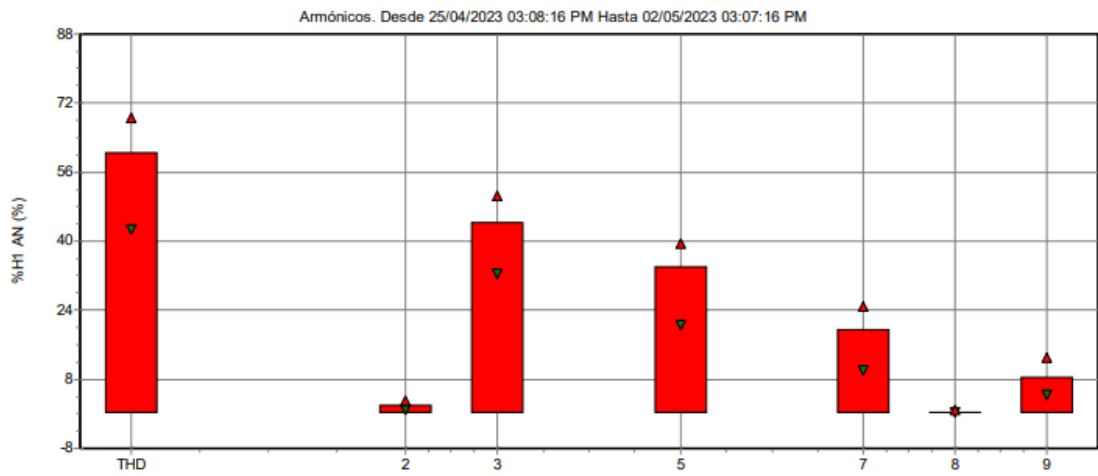


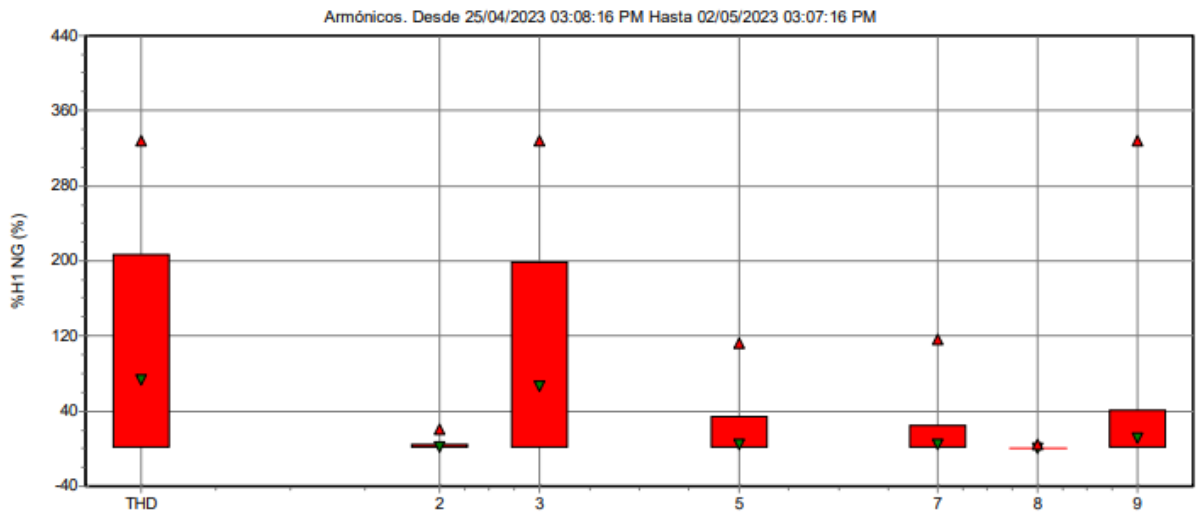
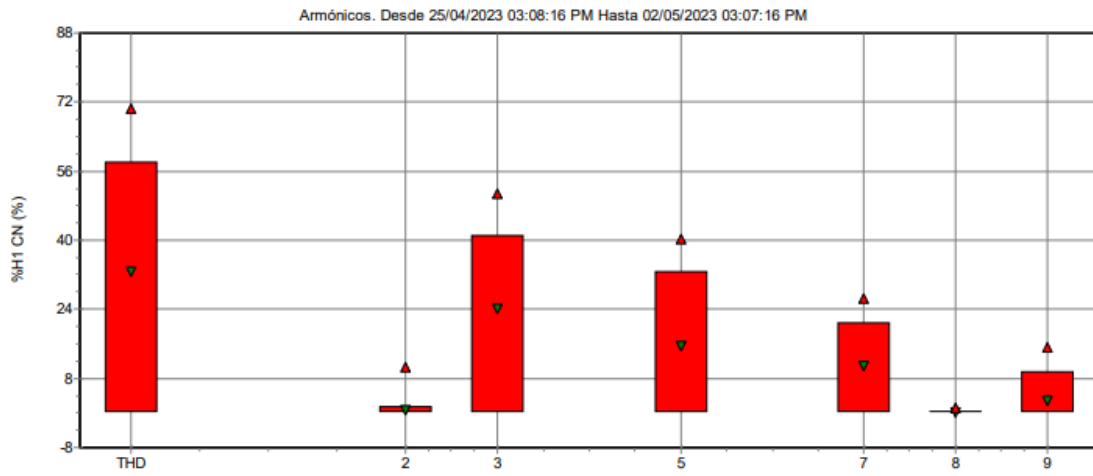


Fuente: Ingeniería y Mantenimiento HCG

Al igual que en el caso del transformador TXD4, los armónicos presentes en el voltaje se encuentran dentro del rango permitido, con predominancia del 5 y 7 armónico.

Figura52: Mediciones de armónicos en corrientes





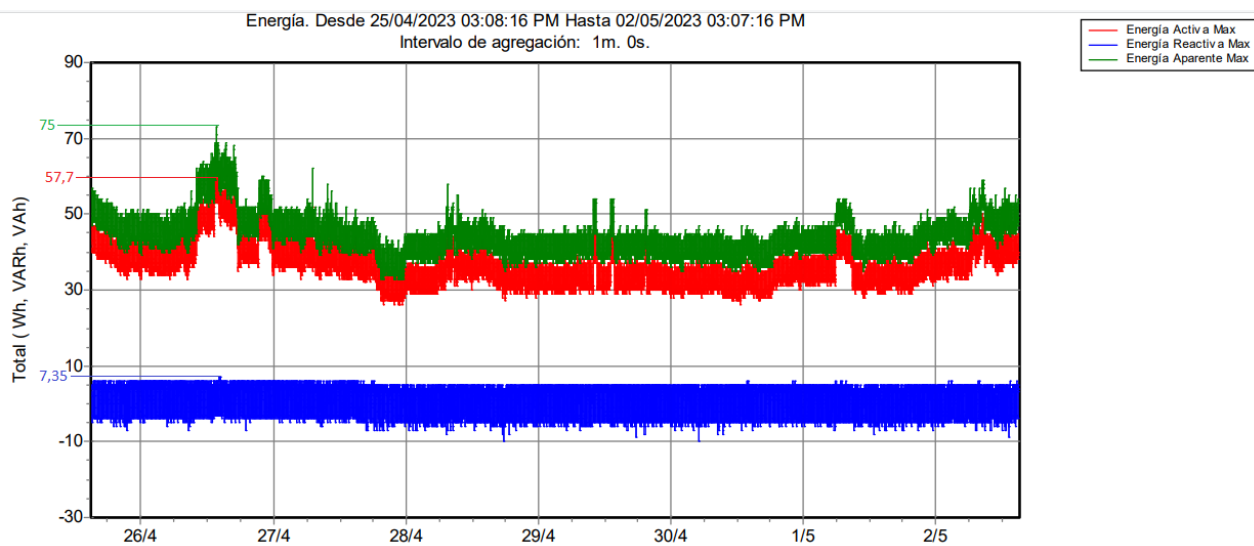
Fuente: Ingeniería y Mantenimiento HCG

**Figura 53: Resumen de datos obtenidos**

Fases	THDI	3ro	5to	7mo	9no
AN	61%	45%	35%	24%	8%
BN	50%	40%	22%	18%	10%
CN	59%	41%	35%	24%	10%
NG	210%	200%	38%	21%	41%

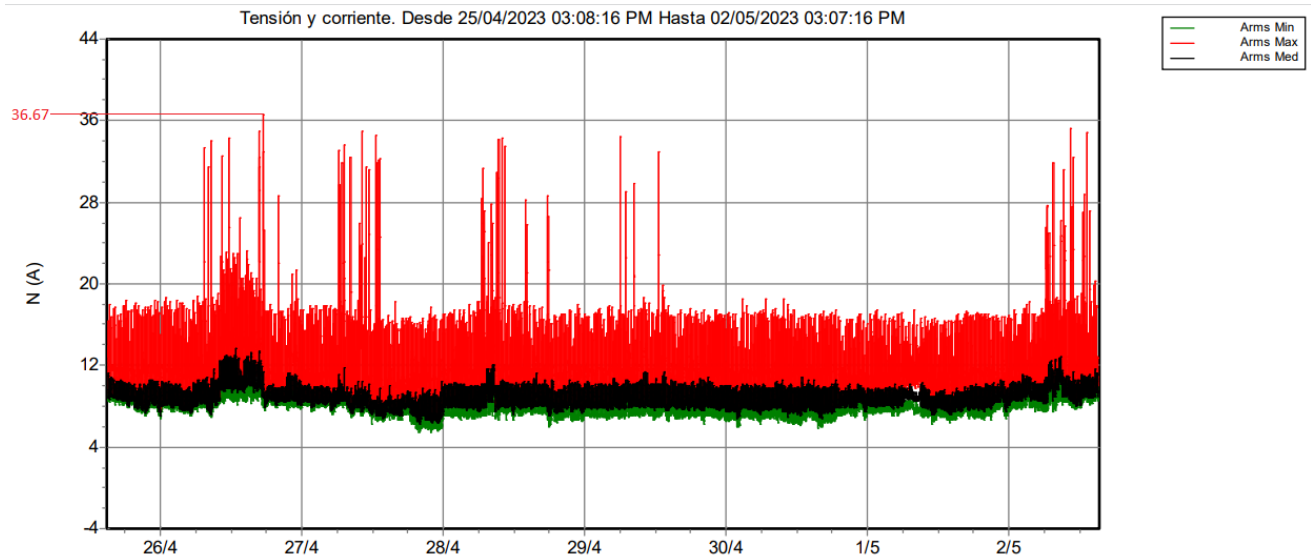
Después se observar los datos obtenidos, en las mediciones de corriente, se evidencia un gran problema de armónicos con predominancia del 3ro y 5to; no obstante, también se puede observar presencia del 7 y 9, los cuales están muy por encima de los límites permitidos, ya que alcanzan valores por encima del 40% en el 3ro y 35% en el 5to.

Figura 54: Potencias transformador TDX4B



Fuente: Propia

Figura55: Corrientes rms transformador TXD4B



Fuente: Propia

### Cálculo de un filtro activo

Monge (2021), en su tesis: *Soluciones para mitigar los armónicos causados por los variadores de frecuencia en la red eléctrica industrial*, hace mención de Porras (2014) en página 90, en su tesis: *Diagnóstico de la calidad de la energía y evaluación de las instalaciones eléctricas en la Represa Hidroeléctrica Pirrís*:

Para el dimensionamiento del filtro activo es necesario conocer las magnitudes de corriente que deberá aportar. Este tipo de filtros aportan tanto la corriente para la corrección de armónicos (hasta armónico 50) como la corriente reactiva necesaria para corregir el factor de potencia. (p.151)

Por lo tanto, primero se calcula la corriente armónica necesaria para el filtro. Para realizar este cálculo se utilizarán los resultados de las mediciones mediante la normativa de ARESEP, mostrados en la sección 5.2 de este documento, con un THDI máximo de 200 %,  $I_L=36,67A$ :

Fórmula de la corriente armónica

$$I_H = \frac{I_L}{\sqrt{\frac{1}{THDI^2}+1}} = \frac{36,67}{\sqrt{\frac{1}{200^2}+1}} = 36.7A$$

Donde:

$I_H$ : Corriente armónica (A).

$I_L$ : Corriente fundamental (A).

THDI: Distorsión armónica total de corriente.

Ahora se estima la corriente necesaria para compensar los 7.35 VAr que absorbe la carga, asumiendo un factor de potencia objetivo de 0,93.

Fórmula de la corriente Reactiva

$$I_R = \frac{QC}{\sqrt{3} \cdot V_{L-L}} = \frac{7.35}{\sqrt{3} \cdot (208)} = 0.02A$$

Donde:

$I_R$ : Corriente reactiva (A).

$Q_c$ : Potencia reactiva capacitiva (VAR).

VL-L: Voltaje de línea a línea (V).

Finalmente, se calcula la capacidad del filtro requerido:

Fórmula de la corriente de diseño del filtro.

$$I_{\text{filtro}} = \sqrt{IH^2 + IR^2} = \sqrt{36.7^2 + 0.02^2} = 36.7A$$

Según información recolectada, de proveedores de soluciones para armónicos los que ofrecen equipos para este rango de amperios son Schindler, Eaton y Siemens en este punto se descarta la opción de CC Instrumentación Industrial S.A. ya que sus productos están más dirigidos a solucionar problemas en cargas específicas, como por ejemplo los causados por variadores de frecuencia en motores, en el caso de Eaton aunque sí cuenta con los rangos necesarios, se descarta ya que para la corriente necesaria solo manejan voltajes de 200 a 415 v +-15%, lo cual está por debajo de los 480 v, requeridos. Se analizarán las dos propuestas restantes.

### **Primera propuesta filtro activo**

Filtro Schneider HCU2

Mitigación activa de armónicos, reduciendo el THDI a menos del 3%, según hoja de datos. La reducción sería de:

$$57\% \text{THD actual promedio} - 3\% \text{THD Implementando} = 54\%$$

### Segunda propuesta filtro activo

Filtros armónicos activos y optimizadores de potencia Serie PQSine S tasa de reducción del 97%. Según datos de fabricante reducción sería:

$$57\% \text{THD actual promedio} - 3\% \text{THD Implementando} = 54\%$$

Se comprueba que ambas opciones ofrecen la misma disminución de THDI, por lo cual se definirán otros factores para brindar la propuesta final.

### Propuesta filtro sintonizado

El señor Luis Alejandro Brenes Hernández, en su estudio de calidad de energía, realizado en laboratorios Stein, recomienda un filtro sintonizado para resolver problemas de armónicos, efectuando los siguientes cálculos.

Diseño del filtro

1. Primeramente se debe obtener el valor de potencia real de máxima demanda. Para este caso, fue de 30 kW y la tensión de trabajo 480 V.
2. Seguidamente, se obtiene el valor del factor de potencia de desplazamiento inicial, que fue de 0,96.
3. Luego se especifica a qué valor de factor de potencia de desplazamiento se quiere llegar. En este caso, el valor deseado es de 0,98.
4. Después, se obtienen los ángulos de cada uno de estos factores.

$$\phi_{inicial} = \cos^{-1}(0,96) = 16,26^\circ$$

$$\phi_{final} = \cos^{-1}(0,98) = 11,48^\circ$$

5. A continuación, se calcula el valor de kVAR:

$$kVAR = kW(\tan(\phi_{inicial}) - \tan(\phi_{final}))$$

$$kVAR = 30[\tan(16,26) - \tan(11,48)]$$

$$kVAR = 2,65$$

6. A partir de este valor, se calcula la capacitancia de los condensadores al despejar la siguiente fórmula:

$$kVAR = 2\pi f CV^2$$

$$C = \frac{2,65}{2\pi(60)(480)^2}$$

$$C = 30,5 \text{ nf}$$

7. Seguidamente, se busca la frecuencia de sintonización, la cual será un poco menor que la frecuencia de la armónica, la cual se desea empezar a filtrar.

$$f_{sintonizado} = 3(60) (0,94)$$

$$f_{sintonizado} = 169,2 \text{ Hz}$$

8. Finalmente, se obtiene el valor de la inductancia despejando la fórmula:

$$2\pi f_{sintonizado} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$L = \frac{\left(\frac{1}{(2\pi f_{sintonizado})}\right)^2}{C}$$

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_{sintonizado}^2 C}$$

$$L = \frac{1}{4\pi^2 (169,2)^2 (30,5 \times 10^{-9})}$$

$$L = 31,56 \text{ mH}$$

## **CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Después de haber realizado las mediciones, analizar los datos y obtener información de diferentes fuentes con respecto del control de armónicas, se puede definir la mejor solución, para el problema de armónicas encontrado.

### **Conclusiones**

Objetivo general.

Al inicio de este estudio no se sabía lo que se podía encontrar, ya que no se logró determinar un antecedente de análisis eléctrico, específicamente en una red hospitalaria, en la cual, es de conocimiento general la gran cantidad y variedad de equipos que existen; sin embargo, por este hecho era de sospechar que efectivamente se encontraría este problema, lo cual resultó ser así. También se comprobó, la existencia de equipos para solucionar este problema, los cuales tenían diferentes alcances.

Objetivos específicos.

1. Después de la entrevista con el encargado de la parte eléctrica del Hospital, el Ing. Carlos Núñez Vega y explicarle los puntos que se querían analizar, al inicio del estudio, recomendó un lugar en específico de la Torre Médica, donde se habían observado calentamientos de transformadores y en cuyo piso existía equipo médico vital, por lo que siguiendo su recomendación, se procedió a colocar un analizador eléctrico en dicha

área. En la primera medición del transformador TXD4 como se observa en los datos recopilados, los armónicos que se encontraron no sobrepasaban el 3% en ninguna de las fases, tanto en los armónicos de voltajes como en los de corriente. En los datos recopilados, se puede observar que dicho transformador alimentaba exclusivamente, el tablero de iluminación de todo el 4to piso. Por medio de este análisis se pudo determinar, que el calentamiento que se daba en él no se debía a problemas de armónicos eléctricos, por lo cual al buscar información de proveedor y marca, este indicó que podía trabajar hasta los 150 grados Celsius. Además, las mediciones del cuarto (1.36 mx1.70 m) para un área total de 2,3 m, donde se ubican tres transformadores: uno de 45 kva y dos de 30 kva, además de que la parte superior se encuentra cerrada sin ningún sistema de extracción o A/C.

2. Luego de realizar las mediciones del primer transformador mencionado, se procedió a conectar un analizador en el transformador TXD4B, el cual alimenta el tablero de tomas de todo el 4to piso, en el cual se encuentran conectados los equipos de soporte vital antes mencionados. En este caso, al igual que el transformador anterior, los armónicos de voltaje se encontraron por debajo del permitido; sin embargo, los datos recolectados en la parte de corriente, mostraron un grave problema con armónicos en las tres líneas, los cuales, como se puede observar, superaban en algunos casos el 40% con un promedio TDHI 57%, lo que indica armónicos muy por encima de los límites permitidos. Las mediciones de termografía no indican un sobrecalentamiento pero sí se

evidencia una sobrecarga de la fase neutra, la cual se da debido a la suma de armónicos tipo homopolares.

3. Luego de analizar y obtener estos resultados quedó claro el gran problema que existe, en esta parte de la red, debido a los tipos de cargas que se encuentran conectados en ella, los cuales hasta el momento no se habían contemplado y como se mencionó en este estudio al inicio pueden generar grandes problemas, como un efecto en cadena que afectara tanto a los equipos que no consumen cargas no lineales tales como bombas de agua, sistema contra incendio, compresores de aire, bombas de vacío, equipos de refrigeración, elevadores y banco de capacitores el cual resulto ser el más afectado anteriormente, sin dejar de lado los equipos médicos que como pudimos ver en la información recopilada pueden no trabajar de la manera más óptima (detectores paso por cero), por lo tanto representan un gran costo económico para la institución y son necesarios para la atención oportuna de los pacientes internados. Se pudo comprobar, que los equipos médicos son generadores de gran cantidad de contaminación armónica, por lo que este trabajo de investigación puede servir, como un llamado de atención ante este fenómeno y realizar un estudio más a fondo en los pisos restantes, incluso en otros centros médicos, para así poder obtener una mayor información y realizar correcciones necesarias y poder mejorar la eficiencia de los sistemas, ya que al perfeccionar estos criterios, se podrá ofrecer una mejor atención a la población.
4. En este estudio se logró determinar cuatro productos existentes, para solucionar o minimizar problemas de armónicos, de los cuales tres se adaptaban a los requerimientos

técnicos, se recomendó el que más se adecuaba a las necesidades que se determinaron en este estudio.

5. Según datos de la empresa Smart Siemens el costo del filtro es de 22700 dólares, por otro lado el costo de la intervención del banco de capacitores (09 Abril 2022) fue de aproximadamente 9000 dólares según lo indicado por el ingeniero eléctrico, cabe mencionar que al día de hoy banco de capacitores está evidenciando nuevamente los mismos síntomas que presento anteriormente cuando fue requerida su intervención. Este estudio al centrarse en el cuarto piso de la torre médica y al colocar filtro en lado de baja de transformador se garantiza que armónicos presentes en esta parte de la red serán filtrados por lo cual no llegarán a la red principal, no obstante aún quedan tres pisos que no han sido analizados en los cuales se encuentran cargas no lineales al igual que en el UCI tales como electrocardiógrafos, monitores de signos vitales, desfibriladores entre otros, por lo cual es evidente que este problema requiere nuevos estudios, más detallados sobre fallas que se han presentado constantemente en equipos como elevadores, chillers y motores eléctricos (cargas lineales) los cuales suponen un alto costo para la institución y así determinar si están relacionados a mala calidad de energía de la cual se dispone, debido a las armónicas que se comprobó existen dentro de la red.

## Recomendaciones

Al finalizar este estudio y analizar los datos obtenidos en las mediciones de ambos transformadores, en el primer transformador, aunque se comprobó que la temperatura que presentada, no se debía a armónicos, sí se pudo comprobar que el cuarto eléctrico no cuenta con una adecuada ventilación, por lo cual, la sensación térmica es sumamente alta. Por otro lado, en el segundo caso, el transformador donde la presencia de armónicos sobrepasa los niveles permitidos, sí se recomienda colocar un sistema de filtración en el lado de baja tensión (208 V), esto para proteger en primera instancia el transformador del efecto joule y que así no sufra daños como los descritos en el marco referencial, a su vez evitar que estos armónicos puedan circular por la red (efecto cadena) generando problemas en áreas aledañas tales como el banco de capacitores provocando otra falla como la que ya se presentó. También no podemos dejar de lado el latente riesgo que conlleva no contar con una buena calidad de energía en nuestra red eléctrica y los grandes problemas que pueden generar en áreas específicas (cuarto de máquinas), detallados en este estudio. También cabe mencionar, que este transformador no está trabajando a plena carga, según los datos obtenidos, trabaja a menos del 50%, por lo cual no se recomienda conectar más carga en este.

## Comparación datos técnicos filtros

### Eaton

#### Technical specifications

Table 1. Technical specifications

Description	Specification
<b>Electrical characteristics</b>	
Standard rms output current ratings	Chassis: 20 A, 30 A, 50 A, 60 A Wall: 20 A, 30 A, 50 A, 60 A
Nominal voltage	208–415 Vac, –15%/+10%
Nominal frequency	50/60 Hz, ±3 Hz auto sensing
Connection type	Three-phase/three-wire or three-phase/four-wire
Compensation type	Three-phase only or three-phase + neutral
Earthing systems	TT, TN-C, TN-S, TN-C-S, IT, corner ground, centre-tapped delta, and HRG
Network voltage distortion	Maximum 20% phase-to-phase (up to 30th order)
Voltage notch limits	Notch depth: 10%, notch area (AN): 13.667 V µs at 400 V as per IEEE® 519-2014, Annex C
<b>Technical product characteristics</b>	
Power electronics	3-level IGBT
Control topology	Digital harmonic FFT Digital instantaneous reactive power
Efficiency and losses	208 Vac ≥ 95%      Three-phase compensation: ≤ 17.7 W/A 380–415 Vac ≥ 97%      Three-phase + N compensation: ≤ 19.7 W/A Three-phase compensation: ≤ 20.4 W/A Three-phase + N compensation: ≤ 22.6 W/A
Current transformer	Any ratio with 1 A or 5 A secondary; Class 1.0 accuracy; 50/60 or 400 Hz rated (instrument rated or better); Grounded; can be shared with other devices
CT VA loading	1 A: 0.04 VA 5 A: 1 VA
Quantity of CT	Two or three CTs for three-phase loads; three CTs are required for four-wire with neutral connected loads
CT position	Grid or load sense
Control basis	Closed or open loop
Spectrum cancellation and selection	2nd to 51st harmonic order; discrete, fully selectable adjustable per harmonic order (amplitude % and ON/OFF)
Modes of operation	Multi-modes simultaneously or discrete <ul style="list-style-type: none"> <li>• Phase harmonic correction</li> <li>• Neutral harmonic correction with user-adjustable current limit up to three times unit rating</li> <li>• Power factor correction (cos)</li> <li>• Mains current load balancing</li> </ul>
Operational features	% THDI setpoint, % THDv setpoint, Target PF setpoint
Harmonic attenuation and filtering performance	THDI < 3% in closed loop control; maximum 20:1 THDI (typical reduction with load harmonic above 50% unit rating) requires 3% or higher inductive impedance per nonlinear load
Power factor correction	Optimize PF and target PF (cos φ) programmable leading (capacitive) or lagging (inductive)
Mains current load balancing	Negative and zero sequence; selectable individually or simultaneously
Resonance avoidance	Output at specific harmonic order turned off if resonance or lack of impedance detected or manually turned off
<b>Paralleling characteristics</b>	
Scalability and expandability	Up to 12 units in parallel per set of CT, any size unit combination possible (maximum nth order subject to network characteristics)
Parallel operation options	Primary/Secondary, Multi-primary, Multi-primary/Multi-secondary (primaries receive CT connection) Main units (primary capable): 20 A, 30 A, 50 A, 60 A Expansion units (secondary only—no CT connection): 60 A
Paralleling architecture	Distributed redundancy with no independent controller required
Parallel sequence options	Load share: all operating units function at the same output percentage. Cascade: load/lag with unit rotation; one unit operates to full capacity before next unit turns on; timed rotation
Unit ID assignment	Automatic parallel ID assignment capability or can be set manually
<b>HMI and service provisions</b>	
Display	Magalis STU HMI, high definition color touchscreen TFT QVGA 64 k
Operator interface	Chassis mount: 5.70 inches (144 mm) supplied for mounting remotely Wall mount: 5.70 inches (144 mm) Expansion units: no HMI required
User interface options	Plain language, no cryptic code. Multiple languages: English, French, Spanish, Portuguese, Chinese, Korean, German, Russian, and Polish
Service port	2 x USB ports for firmware update, diagnostics file, and event log download, connection to PC. Diagnostics can be downloaded via PC even if the unit is de-energized
Commissioning features	On-board step-by-step commissioning wizard via HMI On-board commissioning report for download—no additional software required Automatic CT calibration, polarity detection, and correction Phase sequence unsusceptible Automatic unit neutral connection check

## Filtro TDK

Datos técnicos y especificaciones			
Tensión nominal	380 V (228 ... 456 V)	480 V (384 ... 552 V)	690 V (483 ... 793 V)
Frecuencia de red	50/60 Hz (rango: 45 ... 62 Hz)		
Filtrar corriente	25, 35, 50, 60, 100, 150A	75, 90A	75, 90A
Capacidad de filtrado neutral	3 veces la corriente nominal del filtro (en el caso de un dispositivo de 4 hilos)		
Rango de compensación de corriente armónica 2º a 50º orden armónico, o armónicos especificados 0 a 110%			
Tasa de reducción armónica	> 97% <sup>1)</sup>		
Pérdidas de potencia típicas	< 3% (dependiendo de la carga)		
Factor de potencia objetivo	Ajustable de -1 a 1		
Frecuencia de conmutación/control	20kHz/20kHz		
Tiempo de reacción	Aprox. 20 µs		
Tiempo total de respuesta	< 5ms		
Compensación armónica	Disponible		
Compensación de potencia reactiva	Disponible		
Compensación de desequilibrio	Disponible		
Mostrar	Todos los sistemas incluyen una unidad de visualización/control de color TFT de 7" (pantalla táctil)		
Puertos de comunicación	RS485 y puerto de red (RJ45)		
Protocolos de comunicación	Modbus (RTU), TCP/IP (Ethernet)		
Alarma de fallo	Disponible, máx. 500 registros de alarma		
Nivel de ruido	< 56 dB hasta 100 A, < 65 dB para 150 A	< 65 dB (según modelo)	
Funciones de protección	Sobretensión, subtenión, cortocircuito, puente inversor inverso, sobrecompensación		
Temperatura de funcionamiento	-10 a +40 °C sin reducción de potencia		
Humedad relativa	5 a 95%, sin condensación		
Enfriamiento	75, 151, 300, 405 L/s (25-35, 50-60, 75-100, 150 A)	359 L/s	
clase de protección	IP 20 según IEC 529 (personalizable)		
Color de paneles	RAL7035 gris claro		
Altitud	1500. Entre 1500 y 4000 m la potencia disminuye un 1% por cada 100 m adicionales, según GB/T3859.2		
Calificaciones	CE, IEEE 61000	CE, ETL (UL 508 y CSA C22.2 # 2014), IEEE 61000	
Cumplimiento de las normas	IEEE 519, ER G5/4		

1) Para distorsiones de orden armónico típicas

## Filtro Schneider

A partir de diciembre de 2022

Unidad de corrección de armónicos (HCU2)

EATON [www.eaton.com](http://www.eaton.com)

Descripción del Producto

Los filtros de armónicos activos HCU2 de Eaton están diseñados para proporcionar corrección dinámica de armónicos mediante la inyección activa de las corrientes en un sistema de distribución eléctrica para cancelar todo el espectro de corrientes armónicas en el punto de conexión.

Ventajas

- Se puede dimensionar para cumplir con niveles específicos de corrección de armónicos, Cumplimiento de los niveles recomendados por IEEE 519
- Diseñado para evitar la sobrecarga
- El diseño escalable se puede expandir sin afectar el rendimiento
- Amplio espectro de cancelación para una protección robusta (2º a 51º armónico)

- Ayuda a mejorar el factor de potencia para maximizar la eficiencia
- Instalación más fácil y económica que los filtros pasivos, ya que el diseño de filtro activo reduce la necesidad de ingeniería detallada
- HMI proporciona un control completo a través de una interfaz basada en iconos

Características, ventajas y funciones

- Acción rápida
- ULT 508/ CSAT C22.2 No. 14 listado
- 208–240 V, 380–480 V  $\pm 10$  %, 600 V y 690 V

con autotransformador

- Frecuencia de 50/60 Hz  $\pm 3$  Hz
- Rango de temperatura de funcionamiento 0 °C a +40 °C
- NEMAT 1, NEMA 2, NEMA 12, IP31, IP54 y montaje en chasis

versiones disponibles:

- Montaje en pared (diseños NEMA 1)
- De pie (NEMA 2, NEMA 12, IP31 e IP54)
- Capacidad de salida: auto limitada al 100 % de la corriente nominal
- Capacidad correctiva: <5 % TDD y desplazamiento casi unitario

Factor de potencia

Nota: Requiere al menos un reactor de línea de entrada en serie del 3 % delante de cada carga no lineal.

- Pantalla táctil HMI a color
- Se han minimizado las pérdidas de calor. Esto da como resultado una operación más baja costos y requisitos reducidos para el enfriamiento de la sala de equipos

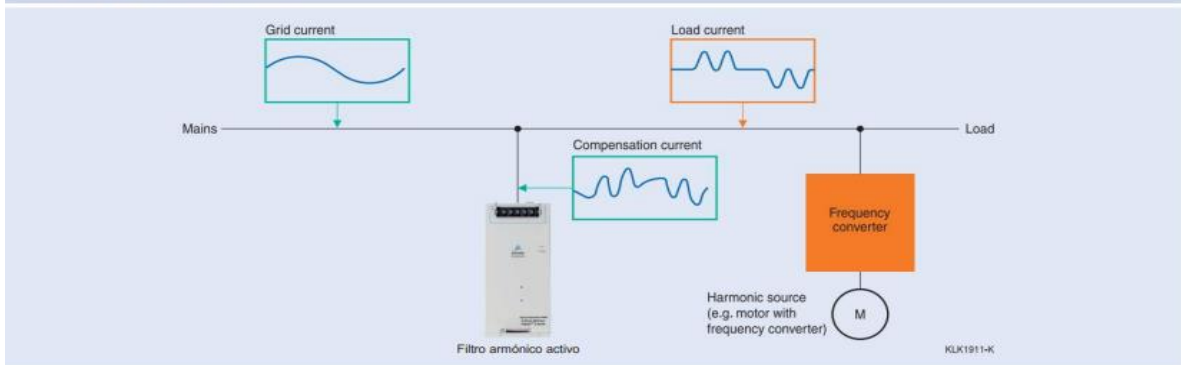
## **CAPÍTULO VI: PROPUESTA**

Después de analizar los datos obtenidos y observar las soluciones disponibles en el mercado, las cuales en su mayoría se asemejan en características brindadas, así como en el rango de armónicos del 2do al 50 y equilibrio de bases, se considera que el equipo de Siemens PQSine S de TDK es el más indicado para la solución del problema encontrados en esta parte de la red. La inclinación principalmente, recae en la variedad de sus productos, al no contar con suficiente espacio en el cuarto eléctrico como se mencionó anteriormente se requiere de un equipo que cumpla con todas las especificaciones técnicas y además pueda colocarse en la pared, siendo este el único en ofrecer este tipo de modelo, también según fabricante se recomienda donde el factor de potencia es de casi 1, según lo indicado por ARESEP en la norma técnica AR-NT-SUMEL hasta 1000Kw de demanda el factor de potencia mínimo debe ser de 0.9, en la Torre Médica se encuentran factores de potencia de 0.94, ya que se cuenta con un banco de capacitores, para compensar los voltajes reactivos. También dispone de un sistema modular que permite su ampliación y es un equipo que se puede programar para contrarrestar los armónicos deseados, que por lo que se pudo observar, serían el 3, el 5, el 7 y el 9, por lo cual, esta opción es la más eficiente, de las cuatro que se lograron encontrar dentro del mercado.

Según datos técnicos el filtro requerido sería el de 50 amperios ya que compensación de armónicas requerido es de 36 amperios y modelo anterior solo filtra hasta 30 amperios.

## Filtro armónico activo

Figura 1 Principio del filtro activo

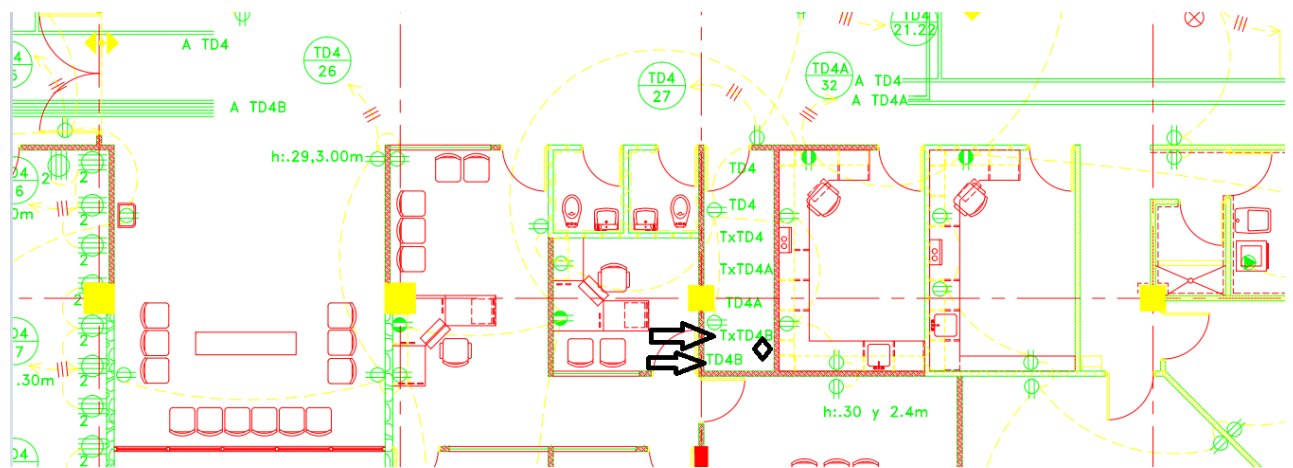


Datos técnicos y especificaciones			
Tensión nominal	380 V (228 ... 456 V)	480 V (384 ... 552 V)	690 V (483 ... 793 V)
Frecuencia de red	50/60 Hz (rango: 45 ... 62 Hz)		
Filtrar corriente	25, 35, 50, 60, 100, 150A	75, 90A	75, 90A
Capacidad de filtrado neutral	3 veces la corriente nominal del filtro (en el caso de un dispositivo de 4 hilos)		
Rango de compensación de corriente armónica 2ª a 50ª orden armónico, o armónicos especificados	0 a 110%		
Tasa de reducción armónica	> 97% <sup>1)</sup>		
Pérdidas de potencia típicas	< 3% (dependiendo de la carga)		
Factor de potencia objetivo	Ajustable de -1 a 1		
Frecuencia de conmutación/control	20kHz/20kHz		
Tiempo de reacción	Aprox. 20 µs		
Tiempo total de respuesta	< 5ms		
Compensación armónica	Disponible		
Compensación de potencia reactiva	Disponible		
Compensación de desequilibrio	Disponible		
Mostrar	Todos los sistemas incluyen una unidad de visualización/control de color TFT de 7" (pantalla táctil)		
Puertos de comunicación	RS485 y puerto de red (RJ45)		
Protocolos de comunicación	Modbus (RTU), TCP/IP (Ethernet)		
Alarma de fallo	Disponible, máx. 500 registros de alarma		
Nivel de ruido	< 56 dB hasta 100 A, < 65 dB para 150 A	< 65 dB (según modelo)	
Funciones de protección	Sobretensión, subtensión, cortocircuito, puente inversor inverso, sobrecompensación		
Temperatura de funcionamiento	-10 a +40 °C sin reducción de potencia		
Humedad relativa	5 a 95%, sin condensación		
Entanamiento	75, 151, 300, 405 L/s (25-35, 50-60, 75-100, 150 A)	359 L/s	
clase de protección	IP 20 según IEC 529 (personalizable)		
Color de paneles	RAL7035 gris claro		
Altitud	1500. Entre 1500 y 4000 m la potencia disminuye un 1% por cada 100 m adicionales, según GB/T3859.2		
Calificaciones	CE, IEEE 61000	CE, ETL (UL 508 y CSA C22.2 # 2014), IEEE 61000	
Cumplimiento de las normas	IEEE 519, ER G54		

1) Para distorsiones de orden armónico típicas

## Ubicación de filtro

El filtro activo se debe colocar en paralelo, entre el transformador TXD4B y el tablero TD4B, donde se encuentra el rombo en la imagen.



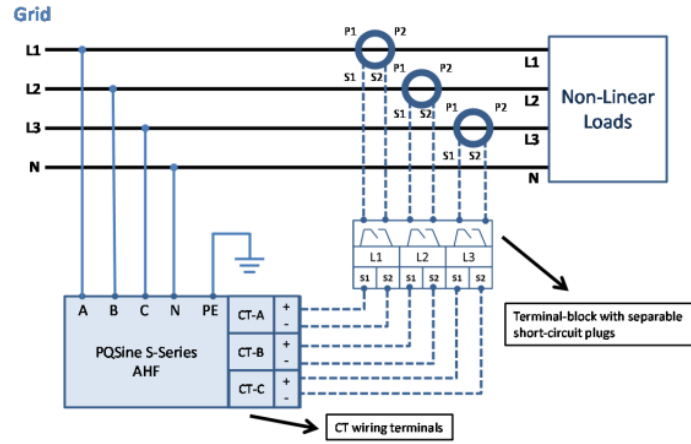
La colocación del filtro podría ser un problema, dado el poco espacio con el que se cuenta, lo cual resultó ser un factor determinante para seleccionar entre las dos opciones que cumplían con los requisitos necesarios, además que según información del fabricante este tipo de filtro se recomienda donde el factor de potencia sea 1 o muy cercano por lo que se considera como mejor opción el tipo pared detallado a continuación.

## Tipo de filtro

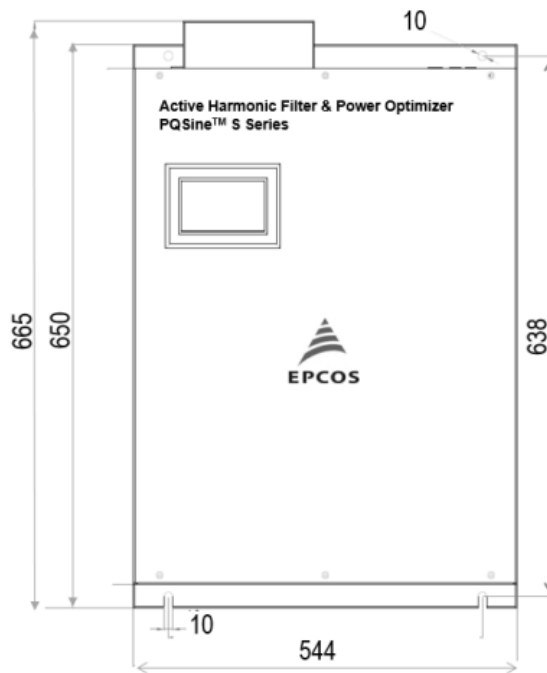
Serie PQSine S de 400 V: sistemas 3P3W							
Tipo	Corriente de filtro nominal A	Tensión del sistema mín./máx. EN		variante de montaje	Aprox. peso kg	Aprox. dimensiones (ancho × profundidad × altura) mímetro	código de pedido
Unidades montadas en la pared1)							
PQSW3025S344 25		228	456	De pared 18		440 × 150 × 490	B44066F3025S344
PQSW3035S344 35		228	456	De pared 18		440 × 150 × 490	B44066F3035S344
PQSW3050S344 50		228	456	De pared 35		440 × 192 × 610	B44066F3050S344
PQSW3060S344 60		228	456	De pared 35		440 × 192 × 610	B44066F3060S344
PQSW3100S344 100		228	456	De pared 48		440 × 232 × 625	B44066F3100S344
PQSW3150S344 150		228	456	De pared 62		505 × 286 × 565	B44066F3150S344
Armarío con módulos rack verticales2)							
PQSF3100S310 100		228	456	De suelo 308		1000 × 600 × 2200	B44066F3100S310
PQSF3150S310 150		228	456	De suelo 322		1000 × 600 × 2200	B44066F3150S310
PQSF3200S310 200		228	456	De suelo 356		1000 × 600 × 2200	B44066F3200S310

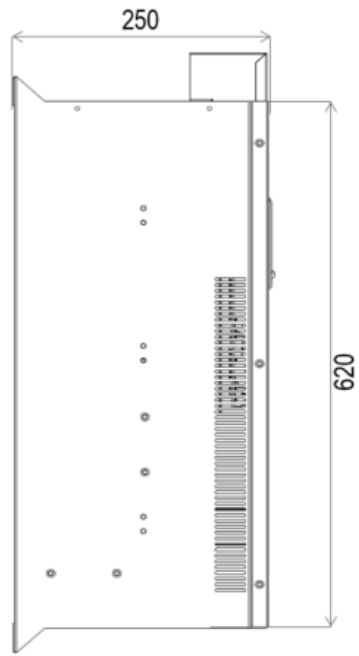


Connection diagram



Outside dimensional drawings





## Referencias

Araya Porras, E. (2017) *Diagnóstico de la calidad de la energía y evaluación de las instalaciones eléctricas en la Represa Hidroeléctrica Pirrís*. Tesis bachillerato Costa Rica Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Automatización | Smart - Siemens Master Dealer | San José (smart-industrial.com)

Brenes Hernández, L. (2018) *Estudio de calidad de energía eléctrica en la instalación de Laboratorios Stein, Costa Rica*. Tesis bachillerato Costa Rica Instituto Tecnológico de Costa Rica Escuela de Ingeniería Electromecánica.

CC instrumentación industrial S.A. [mx/es/product-subcategory/4340-filtros-de-armonicos](https://www.cci.com.mx/es/product-subcategory/4340-filtros-de-armonicos)

Chiluisa Castro, A. (2021) *Propuesta técnica para la atenuación del fenómeno de resonancia de la Subestación de Distribución La Esperanza de la empresa Eléctrica Regional Norte*. Tesis bachillerato. Perú Universidad Técnica del Norte.

Cruz Ponce, V. (2022) *Propuesta de disminución de la distorsión armónica total de voltaje en los alimentadores primarios x1 y x2 de la subestación El Chota*. Tesis bachillerato. Perú Universidad Técnica del Norte.

De la Rosa (2006)

Fornieles, F. *Secuencia de los armónicos eléctricos* –

Harper, G. (2001). *El ABC de la calidad de la energía eléctrica*. México. Limusa, Noriega Editores, México.

Hidalgo Hilario, N. (2021) *Reducción de las perturbaciones armónicas para la corrección del factor de potencia en la red de distribución eléctrica de Chipao – Ayacucho*. Tesis bachillerato. Perú Universidad Nacional.

IEEE 519. (2014). *Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. Nueva Jersey, EU. IEEE.

Karve (2001) *Documento técnico AR-NT-SUCAL*.

Melfosur soluciones energéticas. [eaton.com/mx/es-mx/catalog/power-factor-correction/autovar-filter.html](http://eaton.com/mx/es-mx/catalog/power-factor-correction/autovar-filter.html)

Monje Alvarado, J. (2021) *Soluciones para mitigar los armónicos causados por los variadores de frecuencia en la red eléctrica industrial*. Tesis bachillerato. Costa Rica, Universidad Internacional de las Américas.

Pinto, R. E. *Calidad de la energía eléctrica*. ed. Córdoba, Argentina: Jorge Sarmiento Editor - Universitas, 2020. 209p. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/bibliouia/174425?page=16>. Consultado en: 29 junio 2023.

Square, D. (1994). *Power System Harmonics Bulletin No 8803PD9402*. EU. Rescatado de: [https://download.schneiderelectric.com/files?p\\_enDocType=Data+Bulletin&p\\_File\\_Name=8803PD9402.pdf&p\\_Doc\\_Ref=8803PD9402Power System Harmonics](https://download.schneiderelectric.com/files?p_enDocType=Data+Bulletin&p_File_Name=8803PD9402.pdf&p_Doc_Ref=8803PD9402Power System Harmonics)

## **Anexos**

### **Analizador Fluke mod. Fluke-435-2**

#### Características de funcionamiento

Fluke garantiza las características expresadas en valores numéricos con la tolerancia establecida. Los valores numéricos sin tolerancia son los normales y representan las características de un instrumento de gama media sin incluir los accesorios. El analizador cumple con la precisión especificada de 30 minutos y con dos adquisiciones completas tras el encendido. A menos que se indique lo contrario, todas las especificaciones de funcionamiento son válidas bajo las restricciones detalladas en el apartado "Condiciones ambientales".

Las especificaciones se basan en un ciclo de calibración anual.

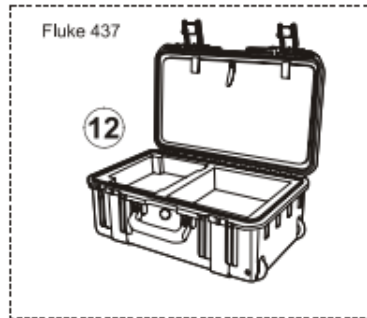
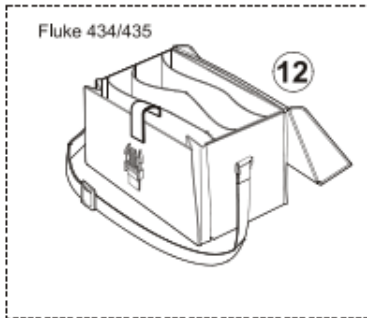
#### Datos ambientales

Los datos ambientales mencionados en este manual están basados en los resultados obtenidos mediante los procedimientos de verificación del fabricante.

#### Características de seguridad

El analizador se ha diseñado y probado conforme a la norma EN61010-1 2 Edición (2001), para instrumentos con requisitos de seguridad para equipos eléctricos de medida, control de las medidas y uso en laboratorio, clase III, grado 2 de contaminación.

Este manual incluye información y advertencias que el usuario debe seguir al pie de la letra para garantizar un funcionamiento seguro y para mantener el analizador y sus accesorios en condiciones de seguridad. La utilización de este analizador y sus accesorios de un modo distinto al especificado por el fabricante puede afectar a la protección proporcionada por el equipo.



Potencia y energía	Rango de medida	Resolución	Precisión
Wattios (VA, VAR) Fluke 435 Fluke 434	1,0 ... 20,00 MW <sup>-1</sup> 1,0 ... 20,00 MW <sup>-1</sup>	0,1 ... 1 kW <sup>-1</sup> 0,1 ... 1 kW <sup>-1</sup>	± 1% ± 10 cuentas <sup>3</sup> ± 1,5% ± 10 cuentas <sup>3</sup>
kWh <sup>6</sup> (kVA <sup>6</sup> , kVAR <sup>6</sup> )	0 kWhr ... 200,0 GWhr <sup>-1</sup> 0 kWhr ... 200,0 GWhr <sup>-1</sup>	0,01 Xhr ... 100 Whr <sup>-1</sup> 0,01 Whr ... 100 Whr <sup>-1</sup>	± 1% ± 10 cuentas <sup>3</sup> ± 1,5% ± 10 cuentas <sup>3</sup>
Factor de potencia	0 ... 1	0,01	± 0,03 <sup>3</sup>
Cos φ / DPF	0 ... 1	0,01	± 0,03 <sup>3</sup>

Flicker (Parpadeo de tensión)	Rango de medida	Resolución	Precisión
Pst (1 minuto), Pst, Plt, PF5 Flicker (Parpadeo) instantáneo	0 ... 20	0,01	Dentro de ± 5% de valores de tabla conforme a la norma IEC61000-4-15
% CC, % Dmax y hora d(t) que excede los límites. Conforme a la norma IEC 61000-3-3	0 ... ± 100,0% para % CC y % Dmax; y 0 ... 9,999 s para Hora	0,1% para % CC y % Dmax; y 10 ms para Hora	± 1% para % CC y % Dmax; y 20 ms para Hora

Desequilibrio	Rango de medida	Resolución	Precisión
Voltios Fluke 435 (secuencia cero y negativa)	0 ... 5%	0,1%	± 0,15%
Voltios Fluke 434 (secuencia cero y negativa)	0 ... 5%	0,1%	± 0,5%
Corriente (secuencia cero y negativa)	0% ... 20%	0,1%	± 1%

Captura de transitorios	Rango de medida	Resolución	Precisión
Voltios lectura del cursor lectura rms	± 6000 Vpk 10 ... 1000 Vrms	1 V 1 V	± 15% de la lectura del cursor ± 2,5% de la tensión nominal
Duración de detección mínima	5 μs		
Velocidad de muestreo	200 kS/s		

Armónicos	Rango de medida	Resolución	Precisión
Orden de armónicos (n)	CC, 1 ... 50 Agrupación: los armónicos se agrupan conforme a la norma IEC 61000-4-7		
Orden de interarmónicos Desactivado, 1 ... 49	Agrupación: los armónicos e interarmónicos se agrupan conforme a la norma IEC 61000-4-7		
Vrms relativo (%f):	0 ... 100,0%	0,1%	$\pm 0,1\% \pm n \times 0,1\%$ ( $\pm 0,4\%$ para %r)
Fluke 435 absoluto:	0 ... 1000 Vrms	0,1 Vrms	$\pm 0,05\%$ de la tensión nominal si < 1% de la tensión nominal $\pm 5\%$ si $\geq 1\%$ de la tensión nominal
Fluke 434 absoluto:	0 ... 1000 Vrms	0,1 Vrms	$\pm 5\% \pm 2$ cuentas
Arms relativo (%f):	0 ... 100,0%	0,1%	$\pm 0,1\% \pm n \times 0,1\%$ ( $\pm 0,4\%$ para %r)
Absoluto:	0 ... 4000 mV x escala de la pinza de corriente	1 mVrms x escala de la pinza de corriente	$\pm 5\% \pm 5$ cuentas
Vatios relativo: (sólo armónicos)	0 ... 100,0%	0,1%	$\pm n \times 2\%$
Vatios absoluto: (sólo armónicos)	según escala de la pinza y la corriente		$\pm 5\% \pm n \times 2\% \pm 10$ cuentas
CC relativo:	0 ... 100,0%	0,1%	$\pm 0,1\% V y A (\pm 2\%$ vatios)
Fluke 435 V absoluto:	0 ... 1000 V	0,1 V	$\pm 0,2\%$ de la tensión nominal
Fluke 434 V absoluto:	0 ... 1000 V	0,1 V	$\pm 5\% \pm 10$ cuentas
A absoluto:	0 ... 4000 mV x escala de la pinza de corriente	1 mVrms x escala de la pinza de corriente 0,1 V	$\pm 5\% \pm 10$ cuentas
Vatios absoluto:	según escala de la pinza y la corriente	según escala	$\pm 5\% \pm 10$ cuentas
THD <sub>(15-40)</sub> (%fo %r relativo)	0 ... 100%	0,1%	$\pm 2,5\% V y A (\pm 5\%$ vatios)
Hz	0 ... 3500 Hz	1 Hz	$\pm 1$ Hz
Ángulo de fase			
Fluke 435	-360° ... +0°	1°	$\pm n \times 1^\circ ( \text{ }^{\text{B}} )$
Fluke 434	-360° ... +0°	1°	$\pm n \times 1,5^\circ ( \text{ }^{\text{B}} )$

## Cámara termográfica


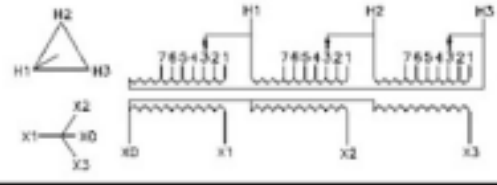

Características principales	
IFOV (resolución espacial) con lentes estándar	1,31 mrad, D:S 753:1
Resolución del detector	320 x 240 (76.800 píxeles)
SuperResolution	Captura y combina el cuádruple de datos para crear una imagen de 640 x 480 (307.200 píxeles)
Enfoque MultiSharp™	Sí, enfoca desde cerca y desde lejos en todo el campo de visión.
Enfoque automático LaserSharp®	Sí, para imágenes enfocadas de manera uniforme.
Medidor láser de distancia	Sí. Calcula la distancia hasta el objetivo y ofrece unas imágenes correctamente enfocadas en pantalla, así como las distancias
Enfoque manual avanzado	Sí
Pantalla táctil de alta resistencia	LCD panorámica de 3,5 pulgadas y 640 x 480
Diseño ergonómico y resistente, apto para su uso con una sola mano	Sí
Zoom digital	2x y 4x
Medida de temperatura	
Rango de medida de temperatura (no calibrada por debajo de -10 °C)	-10 °C a 1500 °C (14 °F a 2732 °F)
Precisión	± 2 °C o 2% (a 25 °C nominal, la mayor de ambas)
Sensibilidad térmica (NETD)*	≤ 0,025 °C a 30 °C temp. objetivo (25 mK)
Corrección de emisividad en pantalla	Sí (valor y tabla)
Compensación de la temperatura reflejada de fondo en pantalla	Sí
Corrección de transmisión en pantalla	Sí
* El mejor posible	

## Tabla de información técnica Transformador SQUARE D mod. 45T3H

### Specifications

Main	
Product	Non-Ventilated Transformer
Enclosure Code	19E
Insulation Temperature	428 °F (220 °C)
Phase	3 phase
Primary Voltage	480 V delta
Power Rating	45 kVA
Secondary Voltage	208Y/120 V
Full Capacity Taps	6 2.5 % 2+ 4-
Temperature Rise	150 °C
Winding Material	Aluminium
Ordering and shipping details	
Category	16273-NON VENT NON RESIN LVGP
Discount Schedule	PE2
GTIN	785901181309
Returnability	No
Country of origin	MX

Figura 13: Ejemplo de la placa de datos

 <b>SQUARE D</b> by Schneider Electric		DRY TYPE DISTRIBUTION TRANSFORMER																																			
CAT. NO. : EX150T3H STYLE NO. : NHA1133203 SERIAL NO. : 006500502491 DATE CODE : 1523		KVA : 150 PHASE : 3 FREQ. : 60 % IZ : 4.1		PRI (H) VOLTS : 480 SEC (X) VOLTS : 208Y/120 PRI (H) AMPS : 180.42 SEC (X) AMPS : 416.36																																	
WEIGHT : 1166 LBS.      TYPE : 50 ENCL : 22K TYPE 2, TYPE 3R WHEN 7460WS22K INSTALLED TO BE IN ACCORDANCE WITH THE NATIONAL ELECTRIC CODE, ARTICLE 450.9, AND UL 1561, MAINTAIN MINIMUM CLEARANCE OF 0.5 INCH TO WALL OR OTHER OBSTRUCTIONS.		INS CLASS : 220 °C    RISE : 150 °C    AMB : 40 °C EFFICIENCY : 98.83% @ 35% LOAD & 75 DEG C MEETS FINAL RULE U.S. 10 CFR 431 APR 2013		BASIC MODEL NO. : 065EX150T480D208Y2A-001																																	
		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">TAP POSITIONS</th> <th>TAP</th> <th>VOLTS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7</td> <td></td> <td>1</td> <td>502</td> </tr> <tr> <td></td> <td>6</td> <td>2</td> <td>491</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td></td> <td>3</td> <td>480</td> </tr> <tr> <td></td> <td>3</td> <td>4</td> <td>469</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>5</td> <td>458</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>6</td> <td>442</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td></td> <td>7</td> <td>431</td> </tr> </tbody> </table>				TAP POSITIONS		TAP	VOLTS	7		1	502		6	2	491	4		3	480		3	4	469			5	458			6	442	1		7	431
TAP POSITIONS		TAP	VOLTS																																		
7		1	502																																		
	6	2	491																																		
4		3	480																																		
	3	4	469																																		
		5	458																																		
		6	442																																		
1		7	431																																		
RWN		 POWER TRANSFORMER 127 H INS SYS. : 65PDG220-1 MADE IN THE U.S.A.																																			

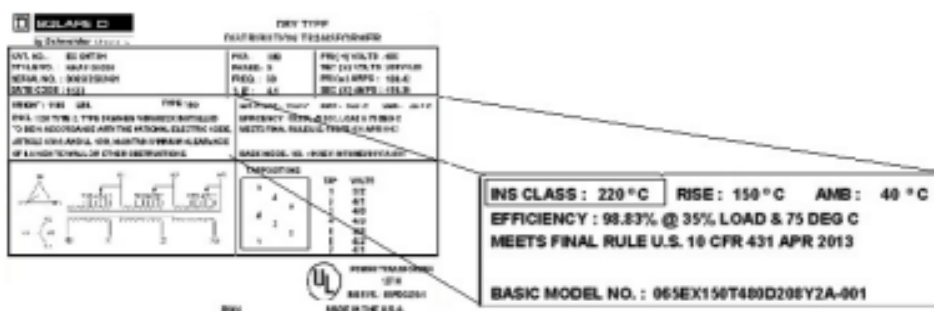
3. Coloque la unidad según los dibujos de diseño del edificio.
4. Verifique que el entorno sea adecuado para el tipo de gabinete.
5. Asegúrese de que la ubicación esté accesible para el personal calificado (de acuerdo con la norma NEC 450.13). Las unidades situadas al aire libre pueden ser montadas en paredes, columnas, o bien, soportadas desde estructuras.
6. Asegúrese de que haya ventilación adecuada ya que es esencial para enfriar correctamente los transformadores con ventilación. Consulte el código eléctrico nacional (NEC®) artículo 450.
  - La distancia mínima está marcada en la placa de datos (NEC 450.9). Vea la figura 14 en la página 20.
  - La distancia mínima varía según el estilo de gabinete. Consulte el dibujo de aprobación de Schneider Electric para conocer la distancia mínima.
  - y se recomienda mantener limpio y seco su lugar de ubicación.
  - El aire filtrado puede reducir el mantenimiento en caso de que la ubicación del transformador presente un problema

Todos los estilos de gabinetes (D, E, F, H, K y J)

- Transformadores instalados en interiores (estilos D, E, F, H, K y J):
  - Completamente cerrados o completamente cerrados con aberturas de ventilación; cumple con la norma NEC 450.21 (A) excepción.
  - Unidades de más de 112,5 kVA
  - Tienen sistemas de aislamiento para 220°C (428°F) o 200°C (392°F); cumple con la norma 450.21 (B) excepción no. 2

Vea la figura 20.

Figura 20: Transformadores instalados en interiores: NEC 450.21, excepciones A o B en el ejemplo de la placa de datos



ESPAÑOL

Tabla 1: Espacio libre en el gabinete

Gabinete estilo	Espacio libre al frente	Espacio libre a los lados (pulg / mm)	Espacio libre atrás (pulg / mm)
D	El espacio libre para realizar trabajos para todos los estilos varía sustancialmente dependiendo de la tensión y la aplicación específica. Consulte la norma NEC 110.28	0,50 / 12,7	Tipo EE – 3 / 76,2
H			Todos los demás estilos – 6 / 152
E			3 / 76,2
K			3 / 76,2
J			0,50 / 12,7
F			0,50 / 12,7

Los transformadores se pueden convertir de montaje en piso a montaje en pared (consulte la tabla 2 y la figura 21 en la página 23) o de montaje en piso a trapecio (consulte la tabla 3 y la figura 22 en la página 24) utilizando kits disponibles de fábrica. Los kits están preperforados para alinearlos con los agujeros de montaje del gabinete; y, cuando el transformador está instalado, conservan el espacio libre mínimo necesario para las unidades. El nuevo soporte de montaje en pared para el estilo K permite un espacio libre de 152 mm (6 pulgadas) y 76 mm (3 pulgadas), todos los demás estilos requieren un espacio libre de 152 mm (6 pulgadas).

Los kits de fábrica no incluyen los herrajes, éstos deben ser suministrados por el cliente. Los herrajes incluyen la varilla roscada para el montaje trapecoidal de los transformadores. El diseñador del proyecto deberá seleccionar los anclajes y herrajes así como su tamaño debido a la gran variedad de técnicas y materiales de construcción. Schneider Electric no puede aconsejarle sobre los anclajes, el montaje en pared, o tamaño de las varillas para el montaje trapecoidal.