

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:  
ESTUDIO DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA DE CORRIENTE DEL HOTEL  
OLD TOWN QUITO SUITES PRODUCIDA POR LA INCLUSIÓN DE  
CALENTADORES DE AGUA DEL TIPO INDUCTIVO Y DETERMINACIÓN DE  
ACCIONES CORRECTIVAS.**

**AUTOR:  
DIEGO HOMERO JÁTIVA RIVADENEIRA**

**TUTOR:  
SILVANA FABIOLA VARELA CHAMORRO**

**Quito D.M., julio del 2021**

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo Diego Homero Játiva Rivadeneira, con documento de identificación N° 172547240-9, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación: ESTUDIO DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA DE CORRIENTE DEL HOTEL OLD TOWN QUITO SUITES PRODUCIDA POR LA INCLUSIÓN DE CALENTADORES DE AGUA DEL TIPO INDUCTIVO Y DETERMINACIÓN DE ACCIONES CORRECTIVAS., mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



-----  
Diego Homero Játiva Rivadeneira.

CI. 172547240-9

12 de julio de 2021

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR**

Yo, Silvana Fabiola Varela Chamorro declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Proyecto Técnico, ESTUDIO DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA DE CORRIENTE DEL HOTEL OLD TOWN QUITO SUITES PRODUCIDA POR LA INCLUSIÓN DE CALENTADORES DE AGUA DEL TIPO INDUCTIVO Y DETERMINACIÓN DE ACCIONES CORRECTIVAS, realizado por Diego Homero Játiva Rivadeneira, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito D.M., julio de 2021



---

Silvana Fabiola Varela Chamorro

C.I. 1718518895

## DEDICATORIA

*Este proyecto técnico va dedicado a mis padres ya que ellos son mi fortaleza e inspiración en cada paso que doy en mi vida, a mis hermanos que me han brindado su apoyo y confianza en todo momento, a mis abuelitos que siempre me han brindado su amor y cariño incondicional y a mis tíos que me han sabido aconsejar en cada etapa de mi vida y han sido una guía por el camino de la excelencia. Cada uno de ellos ha sido participe en mi formación como ser humano y mi formación académica por esta razón este proyecto va dedicado a los miembros de mi familia.*

## AGRADECIMIENTO

*Primero tengo que agradecer a Dios por todas las bendiciones que me ha dado a lo largo de toda mi vida, agradezco a mis padres ya que ellos confiaron en mi capacidad e invirtieron en mi educación haciendo un gran esfuerzo, el cual solo el amor de un padre es capaz de realizar, agradezco a todos los miembros de mi familia porque siempre he podido contar con cada uno de ellos sin importar las circunstancias.*

*También quiero agradecer a mis maestros, ellos han sido mi guía en el camino del aprendizaje, siempre enfocados en alcanzar un nivel de conocimiento superior que nos distinga como profesionales al servicio de nuestro país.*

# ÍNDICE

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR .....	i
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR.....	ii
DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTO .....	iv
ÍNDICE.....	v
RESUMEN .....	xvi
ABSTRACT .....	xviii
CAPITULO I.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos .....	2
121.    Objetivo general.....	2
122.    Objetivos específicos .....	2
1.3. Alcance .....	2
1.4. Justificación .....	2
1.5. Contenido.....	3
CAPÍTULO II.....	5
MARCO TEÓRICO .....	5
2.1. Definición de calidad de energía eléctrica .....	5
2.2. Calidad de servicio .....	6
221.    Calidad del producto .....	6
222.    Calidad del servicio comercial.....	6
223.    Calidad del servicio técnico .....	6
2.3. Guías y estándares utilizados para estudios de calidad de energía eléctrica .....	6
231.    Estándar IEEE 519-214.....	6
232.    Estándar IEEE 1159 .....	7
2.4. Monitoreo de la calidad de energía eléctrica .....	7
241.    Métodos de medición de la calidad de energía eléctrica.....	8
242.    Requerimientos para el control de armónicos en sistemas eléctricos .....	9
2.5. Estado del arte.....	10

2.6. Armónicos.....	11
261. Representación matemática de armónicos mediante las series de Fourier ..	14
262. Armónicos de simetría par e impar .....	15
263. Armónicos impares .....	15
264. Armónicos pares .....	15
2.7. Principales fuentes de armónicos.....	16
271. Cargas no lineales .....	16
272. Efectos de la presencia de armónicos en la red eléctrica .....	17
2.8. Armónicos en la corriente.....	18
2.9. Factor de potencia, desbalance de fases y pérdidas .....	18
291. Factor de potencia .....	18
292. Factor de potencia asociado a la calidad de energía .....	19
293. Desbalance de fases .....	20
294. Desbalance de fases asociado a la calidad de energía.....	22
2.10. Índices de calidad de energía bajo la distorsión armónica .....	23
210.1. Distorsión armónica total (THD) .....	23
210.2. Distorsión de demanda total (TDD).....	23
210.3. Factor de influencia de teléfono (TIF) .....	23
210.4. Productos $I^*T$ y $V^*T$ .....	24
210.5. Desplazamiento, distorsión y factor total de potencia .....	24
210.6. Parámetros relacionados al voltaje.....	24
2.11. Filtros y metodologías para la mitigación de armónicos .....	24
211.1. Atenuación de armónicos.....	24
211.2. Atenuación de armónicos en medio y bajo voltaje .....	25
211.3. Atenuación de armónicos utilizando filtros pasivos. ....	25
211.4. Atenuación de armónicos utilizando filtros activos.....	26
211.5. Combinación de filtros activos y pasivos .....	27
2.12. Introducción a calentadores de agua del tipo inductivo .....	28
212.1. Principios de funcionamiento .....	30
212.2. Equipo utilizado .....	31
2.13. Configuración e Instalación del equipo Fluke 435 en el inmueble .....	33
211. Fluke 435.....	34
213.1. Configuración del equipo.....	34
213.2. Conexión realizada en el PCC .....	36
CAPÍTULO III.....	39

METODOLOGIA.....	39
MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS.....	39
3.1. Regulación NO. ARCONEL 005/18 .....	39
311. Calidad del producto .....	39
312. Aspecto calidad del consumidor .....	41
313. Límites de distorsión armónica .....	41
314. Medición .....	41
315. Cumplimiento de los índices de armónicos en el punto de medición.....	42
316. Seguimiento de los aspectos de calidad responsabilidad del consumidor ...	42
317. Recopilación de las mediciones de las variables eléctricas .....	42
3.2. Aspecto calidad del consumidor.....	42
321. Niveles de corriente en las líneas.....	42
322. Distorsión armónica individual de corriente Línea 1 .....	50
323. Distorsión armónica individual de corriente Línea 2.....	54
324. Distorsión armónica individual de corriente Línea 3.....	55
325. Distorsión armónica individual de corriente en el Neutro .....	57
326. Cálculo del factor de distorsión de demanda total TDD .....	58
3.3. Aspecto calidad del producto.....	58
331. Nivel de voltaje .....	59
332. Perturbaciones rápidas de voltaje (Flicker).....	62
333. Distorsión armónica de voltaje .....	64
334. Desequilibrio de voltaje .....	67
335. Factor de potencia .....	69
3.4. Análisis de los índices de distorsión armónica del calentador inductivo. ....	72
341. Niveles de corriente del calentador de agua de tipo inductivo. ....	72
342. Distorsión armónica individual de corriente en las Líneas .....	77
343. Distorsión armónica individual de corriente en la Línea 1. ....	78
344. Distorsión armónica individual de corriente en la Línea 2. ....	79
345. Distorsión armónica individual de corriente en el neutro .....	80
346. Cálculo del factor de distorsión de demanda total TDD .....	82
347. Factor de potencia .....	82
CAPITULO IV .....	84
ANÁLISIS DE RESULTADOS Y ACCIONES CORRECTIVAS .....	84
4.1. Resultados aspecto calidad del consumidor .....	84

4.2. Acciones correctivas aspecto calidad del consumidor.....	85
421. Corriente en el neutro.....	85
422. Armónicos en la corriente.....	87
423. Cálculo de filtro pasivo sintonizado L1.....	87
424. Cálculo de filtro pasivo sintonizado L2.....	92
425. Cálculo de filtro pasivo sintonizado L3.....	96
4.3. Resultados aspecto calidad del producto.....	100
4.4. Resultados circuito perteneciente al calentador de agua del tipo inductivo. .	100
441. Acciones correctivas.....	101
442. Cálculo de filtro pasivo sintonizado calentador de inducción L1.....	102
443. Cálculo de filtro pasivo sintonizado calentador de inducción L2.....	105
4.5. Análisis económico.....	108
451. Costo de los materiales.....	108
CAPÍTULO V.....	110
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	110
5.1. Conclusiones.....	110
5.2. Recomendaciones.....	110
REFERENCIAS.....	112
ANEXOS.....	116
6.1. Instalación del analizador de red FLUKE 435 en el PCC del inmueble.....	117
6.2. Analizador de red FLUKE 435.....	119
6.3. Software PowerLogClassic.....	120
6.4. Especificaciones calentador de agua tipo inductivo.....	122
6.5. Proforma solicitada bobinas necesarias en el presente proyecto.....	123
6.6. Proforma solicitada condensadores necesarios en el presente proyecto.....	124

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1.</b> Calidad de energía eléctrica. ....	5
<b>Figura 2.6.</b> Señal de corriente ideal sin la presencia de armónicos. ....	12
<b>Figura 2.6.1.</b> Distorsión en la señal de corriente debido al tercer armónico. ....	13
<b>Figura 2.6.2.</b> Distorsión en la señal de corriente debido al quinto armónico. ....	13
<b>Figura 2.6.3.</b> Distorsión en la señal de corriente debido al tercer y quinto armónico. ...	14
<b>Figura 2.7.</b> Modelo de carga con puente rectificador. ....	16
<b>Figura 2.7.1.</b> Curva de comportamiento de una carga no lineal. ....	17
<b>Figura 2.9.1.</b> Triángulo de potencia. ....	19
<b>Figura 2.9.3.</b> Señal de voltaje de un sistema trifásico de amplitud 120 [V] balanceado. ....	21
<b>Figura 2.9.3.1.</b> Señal de voltaje de un sistema trifásico desbalanceado. ....	22
<b>Figura 2.11.3.</b> Filtro pasivo paralelo para fuente de corriente cargas no lineales. ....	26
<b>Figura 2.11.3.1</b> Filtro pasivo serie para fuente de voltaje cargas no lineales. ....	26
<b>Figura 2.11.4.</b> Filtro activo paralelo para fuente de corriente cargas no lineales. ....	27
<b>Figura 2.11.4.1.</b> Filtro activo serie para fuente de voltaje cargas no lineales. ....	27
<b>Figura 2.11.5.</b> Combinación filtros activo y pasivo para fuente de corriente cargas no lineales. ....	28
<b>Figura 2.11.5.1.</b> Combinación filtros activo y pasivo para fuente de voltaje cargas no lineales. ....	28
<b>Figura 2.12.</b> Campo magnético generado por un inductor ....	29
<b>Figura 2.12.1.</b> Campo magnético generado por un inductor. ....	30
<b>Figura 2.12.2.</b> Calentador de agua de inducción EcoSmart ECO 11. ....	31
<b>Figura 2.12.2.1.</b> Funcionamiento interno del EcoSmart ECO 11. ....	32
<b>Figura 2.12.2.2.</b> Calentador de agua de inducción instalado en el inmueble. ....	33
<b>Figura 2.13.</b> ....	33
<b>Figura 2.13.1.</b> Analizador de calidad de energía Fluke 435. ....	34
<b>Figura 2.13.2.</b> Pantalla inicial analizador de calidad de energía Fluke 435. ....	34

<b>Figura 2.13.2.1.</b> Función registrador del analizador de calidad de energía Fluke 435. ...	35
<b>Figura 2.13.2.2.</b> Configuración de intervalos del analizador de calidad de energía Fluke 435. ....	35
<b>Figura 2.13.2.3.</b> Selección de variables del analizador de calidad de energía Fluke 435. ....	36
<b>Figura 2.13.2.</b> .....	36
<b>Figura 2.13.2.1.</b> PCC para el Hotel Old Town Quito Suites. ....	37
<b>Figura 2.13.2.2.</b> Conexión realizada en el PCC del Hotel Old Town Quito Suites. ....	37
<b>Figura 2.13.2.3.</b> Analizador en el PCC del Hotel Old Town Quito Suites. ....	38
<b>Figura 3.2.1.1.</b> Nivel máximo de corriente en la Línea 1. ....	43
<b>Figura 3.2.1.2.</b> Nivel medio de corriente en la Línea 1. ....	43
<b>Figura 3.2.1.3.</b> Nivel mínimo de corriente en la Línea 1. ....	44
<b>Figura 3.2.1.4.</b> Nivel máximo de corriente en la Línea 2. ....	45
<b>Figura 3.2.1.5.</b> Nivel medio de corriente en la Línea 2. ....	45
<b>Figura 3.2.1.6.</b> Nivel mínimo de corriente en la Línea 2. ....	46
<b>Figura 3.2.1.7.</b> Nivel máximo de corriente en la Línea 3. ....	47
<b>Figura 3.2.1.8.</b> Nivel medio de corriente en la Línea 3. ....	47
<b>Figura 3.2.1.9.</b> Nivel mínimo de corriente en la Línea 3. ....	48
<b>Figura 3.2.1.10.</b> Nivel máximo de corriente en el Neutro. ....	49
<b>Figura 3.2.1.11.</b> Nivel medio de corriente en el Neutro. ....	49
<b>Figura 3.2.1.12.</b> Nivel mínimo de corriente en el Neutro. ....	50
<b>Figura 3.2.2.</b> Armónicos de corriente en la Línea 1. ....	52
<b>Figura 3.2.3.</b> Armónicos de corriente en la Línea 2. ....	54
<b>Figura 3.2.4.</b> Armónicos de corriente en la Línea 3. ....	55
<b>Figura 3.2.5.</b> Armónicos de corriente en el Neutro. ....	57
<b>Figura 3.3.1.1.</b> Niveles máximos de voltaje. ....	60
<b>Figura 3.3.1.2.</b> Niveles promedio de voltaje. ....	61
<b>Figura 3.3.1.3.</b> Niveles mínimos de voltaje. ....	62

<b>Figura 3.3.2.1.</b> Flicker de corto plazo (Pst).....	63
<b>Figura 3.3.2.2.</b> Flicker de largo plazo (Plt).....	64
<b>Figura 3.3.3.1.</b> THD máximos de voltaje.....	65
<b>Figura 3.3.3.2.</b> THD Promedios de voltaje.....	66
<b>Figura 3.3.3.3.</b> THD mínimos de voltaje.....	67
<b>Figura 3.3.4.1.</b> Desequilibrio de voltajes máximos, promedios y mínimos.....	68
<b>Figura 3.3.5.1.</b> Factor de potencia máximo.....	69
<b>Figura 3.3.5.2.</b> Factor de potencia mínimo.....	70
<b>Figura 3.3.5.3.</b> Factor de potencia promedio.....	71
<b>Figura 3.3.5.4.</b> Factor de potencia de todo el sistema.....	71
<b>Figura 3.4.</b> Instalación de analizador fluke en el circuito de alimentación del calentador de inducción.....	72
<b>Figura 3.4.1.1.</b> Corriente máxima en la Línea 1.....	73
<b>Figura 3.4.1.2.</b> Corriente promedio en la Línea 1.....	73
<b>Figura 3.4.1.3.</b> Corriente mínima en la Línea 1.....	74
<b>Figura 3.4.1.4.</b> Corriente máxima la Línea 2.....	75
<b>Figura 3.4.1.5.</b> Corriente promedio la Línea 2.....	75
<b>Figura 3.4.1.6.</b> Corriente mínima la Línea 2.....	76
<b>Figura 3.4.3.</b> Armónicos de corriente en la Línea 1.....	78
<b>Figura 3.4.4.</b> Armónicos de corriente en la Línea 2.....	79
<b>Figura 3.4.5.</b> Armónicos de corriente en el Neutro.....	81
<b>Figura 3.4.7.</b> Factor de potencia del sistema.....	83
<b>Figura 4.2.1.</b> Simulación de señal de corriente en el Neutro con todos sus componentes armónicos.....	86
<b>Figura 4.2.1.1.</b> Simulación corriente en el Neutro sin armónicos de secuencia cero en líneas.....	86
<b>Figura 4.2.3.1.</b> Simulación señal de corriente L1 con todas sus componentes armónicas.....	91

<b>Figura 4.2.3.2.</b> Simulación de corriente con filtro pasivo sintonizado para el 3er armónico en la L1. ....	92
<b>Figura 4.2.4.1.</b> Simulación señal de corriente L2. ....	95
<b>Figura 4.2.4.2.</b> Simulación de corriente con filtro pasivo sintonizado para el 3er armónico en la L2. ....	95
<b>Figura 4.2.5.1.</b> Simulación señal de corriente L3. ....	98
<b>Figura 4.2.5.2.</b> Simulación de corriente con filtro pasivo sintonizado para el 3er armónico en la L3. ....	99
<b>Figura 4.4.2.1.</b> Señal de corriente reconstruida con todas sus componentes armónicas L1. ....	104
<b>Figura 4.4.2.2.</b> Simulación de corriente con filtro pasivo sintonizado para el 2do armónico en la L1. ....	105
<b>Figura 4.4.3.1.</b> Señal de corriente reconstruida con todas sus componentes armónicas L2. ....	107
<b>Figura 4.4.3.2.</b> Simulación de corriente con filtro pasivo sintonizado para el 2do armónico en la L2. ....	107

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.12.2.</b> Especificaciones técnicas del equipo EcoSmart ECO 11. ....	32
<b>Tabla 3.1.1.1.</b> Límites de variación de voltaje[2]. ....	39
<b>Tabla 3.1.1.3.</b> Límites máximos armónicos de voltaje (% del voltaje nominal)[2].....	40
<b>Tabla 3.2.1.1.</b> Datos de niveles máximos, medio y mínimo de corriente en la Línea 1 .	44
<b>Tabla 3.2.1.2.</b> Datos de niveles máximos, medio y mínimo de corriente en la Línea 2 .	46
<b>Tabla 3.2.1.3.</b> Datos de niveles máximos, medio y mínimo de corriente en la Línea 3 .	48
<b>Tabla 3.2.1.4.</b> Datos de niveles máximos, medio y mínimo de corriente en el Neutro ..	50
<b>Tabla 3.2.2.</b> Datos del transformador. ....	51
<b>Tabla 3.2.2.1.</b> Datos de armónicos individuales de corriente en la Línea 1. ....	52
<b>Tabla 3.2.3.</b> Datos de armónicos individuales de corriente en la Línea 2. ....	54
<b>Tabla 3.2.4.</b> Datos de armónicos individuales de corriente en la Línea 3. ....	56
<b>Tabla 3.2.5.</b> Datos de armónicos individuales de corriente en el Neutro. ....	57
<b>Tabla 3.2.6.</b> Datos de distorsión de demanda total del sistema. ....	58
<b>Tabla 3.3.1.1.</b> Datos de niveles máximos de voltaje fases-neutro. ....	60
<b>Tabla 3.3.1.2.</b> Datos de niveles promedio de voltaje fases-neutro. ....	61
<b>Tabla 3.3.1.3.</b> Datos de niveles promedio de voltaje fases-neutro. ....	62
<b>Tabla 3.3.1.4.</b> Resumen del cumplimiento de los niveles de voltaje. ....	62
<b>Tabla 3.3.2.1.</b> Datos de niveles Flicker de corto plazo (Pst). ....	63
<b>Tabla 3.3.2.2.</b> Datos de niveles Flicker de corto plazo (Pst). ....	64
<b>Tabla 3.3.2.3.</b> Resumen de perturbaciones de voltaje. ....	64
<b>Tabla 3.3.3.1.</b> Datos del THD máximo de voltaje. ....	65
<b>Tabla 3.3.3.2.</b> Datos del THD promedio de voltaje. ....	66
<b>Tabla 3.3.3.3.</b> Datos del THD mínimo de voltaje. ....	67
<b>Tabla 3.3.3.4.</b> Resumen cumplimiento THD de voltaje. ....	67
<b>Tabla 3.3.4.1.</b> Datos del Desequilibrio de voltajes máximos, promedios y mínimos.....	68
<b>Tabla 3.3.4.2.</b> Resumen Desequilibrio de voltajes máximos, promedios y mínimos. ....	68

<b>Tabla 3.3.5.1.</b> Datos del factor de potencia máximo. ....	69
<b>Tabla 3.3.5.2.</b> Datos del factor de potencia mínimo. ....	70
<b>Tabla 3.3.5.3.</b> Datos del factor de potencia promedio. ....	71
<b>Tabla 3.3.5.4.</b> Datos del factor de potencia del sistema. ....	71
<b>Tabla 3.4.1.1.</b> Niveles máximo, mínimo y promedio de corriente en la Línea 1. ....	74
<b>Tabla 3.4.1.2.</b> Niveles máximo, mínimo y promedio de corriente en la Línea 2. ....	76
<b>Tabla 3.4.1.2.</b> Niveles máximo, mínimo y promedio de corriente en el Neutro. ....	76
<b>Tabla 3.4.3.</b> Datos de armónicos individuales de corriente en la Línea 1. ....	78
<b>Tabla 3.4.4.</b> Datos de armónicos individuales de corriente en la Línea 2. ....	79
<b>Tabla 3.4.5.</b> Datos de armónicos individuales de corriente en el Neutro. ....	81
<b>Tabla 3.4.6.</b> Datos de distorsión de demanda total del sistema. ....	82
<b>Tabla 3.4.7.</b> Datos del factor de potencia del sistema. ....	83
<b>Tabla 4.2.3.</b> Datos de potencia y factor de potencia en la línea 1. ....	87
<b>Tabla 4.2.3.1.</b> Datos de potencia del circuito L1. ....	88
<b>Tabla 4.2.3.2.</b> Límites de operación para capacitores en L1 según IEEE 18 [37]. ....	90
<b>Tabla 4.2.3.3.</b> Características filtro 3er Armónico L1. ....	90
<b>Tabla 4.2.4.1.</b> Datos del circuito L2. ....	92
<b>Tabla 4.2.4.2.</b> Cálculo de filtro pasivo sintonizado L2. ....	93
<b>Tabla 4.2.4.3.</b> Límites de operación para capacitores en L2 según IEEE 18. ....	93
<b>Tabla 4.2.4.4.</b> Límites de operación con capacitores de mayor VAR L2. ....	94
<b>Tabla 4.2.4.5.</b> Características filtro 3er Armónico L2. ....	94
<b>Tabla 4.2.5.1.</b> Datos del circuito L3. ....	96
<b>Tabla 4.2.5.2</b> Cálculo de filtro pasivo sintonizado L3. ....	96
<b>Tabla 4.2.5.3.</b> Límites de operación para capacitores en L3 según IEEE 18. ....	97
<b>Tabla 4.2.5.4.</b> Límites de operación con capacitores de mayor valor en L3. ....	97
<b>Tabla 4.2.5.5</b> Características filtro 3er Armónico L3. ....	98
<b>Tabla 4.2.5.6</b> TDD después de aplicar el filtro. ....	99

<b>Tabla 4.4.2.1.</b> Datos del circuito individual L1. ....	102
<b>Tabla 4.4.2.2.</b> Cálculo de filtro pasivo sintonizado L1. ....	102
<b>Tabla 4.4.2.3.</b> Límites de operación para capacitores L1 según IEEE 18. ....	103
<b>Tabla 4.4.2.4.</b> Límites de operación con dos capacitores L1 según IEEE 18. ....	103
<b>Tabla 4.4.2.5.</b> Características filtro 2do Armónico L1. ....	103
<b>Tabla 4.4.3.1.</b> Datos del circuito individual L2. ....	105
<b>Tabla 4.4.3.2.</b> Cálculo de filtro pasivo sintonizado L2. ....	105
<b>Tabla 4.4.3.3.</b> Límites de operación para capacitores L2 según IEEE 18. ....	106
<b>Tabla 4.4.3.4.</b> Límites de operación con dos capacitores L2. ....	106
<b>Tabla 4.4.3.4.</b> Características filtro 2do Armónico L2. ....	106
<b>Tabla 4.4.3.5.</b> TDD después de aplicar filtros circuito calentador de inducción. ....	108
<b>Tabla 4.5.1.</b> Costo de los materiales de los filtros. ....	108
<b>Tabla 4.5.1.1.</b> Costo de implementación de filtros en forma individual. ....	109

## RESUMEN

Hoy en día se dispone de algunas alternativas para el calentamiento de agua en las instalaciones de usuarios residenciales, comerciales e industriales, siendo una opción los calentadores eléctricos de inducción por su tamaño compacto y fácil instalación. En el presente proyecto se realiza un análisis de los armónicos generados en la red eléctrica, debido a la utilización de calentadores de agua de inducción. El caso de estudio que se presenta es el del hotel Old Town Quito Suites, ubicado en el centro de la ciudad de Quito, cuyo giro de negocio es la renta temporal de departamentos en los cuales se dispone de calentadores de inducción en cada departamento.

Para el desarrollo del estudio se ha realizado mediciones con el equipo FLUKE 435 de propiedad de la Universidad Politécnica Salesiana, conforme a lo establecido en la Regulación No. ARCONEL 005/18. Las mediciones fueron realizadas en dos puntos del hotel siete días continuos con un registro cada diez minutos; el primer punto de medición fue en el tablero de medidores al cual llega una acometida expresa desde el transformador No.49474 ubicado en una cámara de transformación aledaña. El segundo punto de medición fue en un circuito expreso secundario que conecta directamente a un calentador de agua. De forma adicional se realizó un estudio de la calidad del producto al que accede el usuario por parte de la empresa distribuidora.

Los resultados obtenidos en cuanto a calidad de energía eléctrica desde la responsabilidad del consumidor reflejan un problema con la distorsión armónica de corriente, se pudo evidenciar la presencia de armónicos de orden par e impar fuera de los límites deseados. Para dar una solución a este problema se realiza el diseño de un filtro pasivo sintonizado en la frecuencia del armónico predominante, de esta forma dicho armónico es eliminado además de que todo el sistema entra en los límites para la distorsión total de demanda.

De igual forma se realiza el análisis de forma individual del circuito perteneciente al calentador de inducción en donde se evidencia problemas con armónicos de diferente orden, para este caso la aplicación de un filtro pasivo sintonizado no presentó una solución viable. Sin embargo, la incidencia de este circuito no afecta de forma representativa al desempeño de todo el sistema debido a los tiempos reducidos de uso de este circuito.

En el caso de la calidad del producto se observa que todos los índices bajo análisis se encuentran dentro de los límites establecidos por la regulación No. ARCONEL 005/18 y no es necesario tomar acciones correctivas.

Finalmente se realiza un análisis económico para la inclusión de filtros pasivos

sintonizados, con los cuales se lograría mejorar la calidad de onda de corriente en la red de bajo voltaje del Hotel Old Town Quito Suites, que conduce a una notable mejora en la distorsión armónica total.

## ABSTRACT

Nowadays, there are some alternatives available for water heating in residential, commercial and industrial installations; one option is electric induction water heaters due to their compact size and easy installation. The present project is carried out an analysis of the harmonics generated in the electrical network due to the use of induction water heaters. The case study presented is from the Old Town Quito Suites Hotel, located in downtown Quito, whose business line is the temporary rental of apartments in which induction heaters are available in each apartment.

For the development of the study, measurements were made with FLUKE 435 equipment owned by the Salesian Polytechnic University, under the provisions of Regulation No. ARCONEL 005/18. Measurements were taken at two points of the hotel seven continuous days with a record every ten minutes; the first measurement point was at the meter board to which there is an express connection from transformer No. 49474 located in a nearby transformation chamber. The second measurement point was at a secondary express circuit that connects directly to a water heater. In addition, a study was made of the quality of the product accessed by the user from the distribution company.

The results obtained in terms of electric power quality from the consumer's responsibility reflect a problem with the harmonic distortion of current, the presence of harmonics of even and odd order out of the desired limits was evidenced. To provide a solution to this problem, a passive filter tuned to the frequency of the predominant harmonic is designed so that the harmonic is eliminated and the whole system is within the limits for the total demand distortion.

Similarly, the individual analysis of the circuit belonging to the induction heater is performed, where problems with harmonics of different order are evidenced, for this case the application of a tuned passive filter did not present a viable solution. However, the incidence of this circuit does not representatively affect the performance of the entire system due to the reduced usage times of it.

In the case of product quality, it is observed that all the indexes under analysis are within the limits established by regulation No. ARCONEL 005/18 and it is not necessary to take corrective actions.

Finally, an economic analysis is carried out for the inclusion of tuned passive filters, with which it would be possible to improve the quality of the current wave in the low-voltage network of the Hotel Old Town Quito Suites, which leads to a notable improvement in

the total harmonic distortion.

# CAPITULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Introducción

El constante crecimiento en la utilización de equipos de cocción, calentamiento y calefacción eléctricos en el área residencial responde a las necesidades de confort, consumo y estética que buscan los usuarios, el uso de equipos basados en la inducción eléctrica que van desde cocinas, hornos y calentadores de agua se pueden encontrar con frecuencia en el sector residencial.

Frecuentemente los consumidores desconocen los efectos que pueden llegar a tener al utilizar equipos no lineales en la red eléctrica, en este caso la presencia de calentadores de agua del tipo inductivo ha planteado la necesidad de conocer las características de la carga instalada y su incidencia en la red eléctrica asociada.

Estos equipos representan una alternativa muy deseable desde el punto de vista ecológico en comparación con tecnologías del pasado que no solamente contribuían a la contaminación ambiental sino que también podían llegar a ser un peligro para la salud de los usuarios, el ARCONEL mediante la regulación No. ARCONEL 005/18 *Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica* ha establecido indicadores, índices y límites en la comercialización de energía eléctrica que deben ser cumplidos por las empresas distribuidoras y por los consumidores, para mantener la calidad en el servicio [3].

En cuanto al índice de calidad que corresponde al consumidor el ARCONEL mediante la promulgación de la Regulación No. ARCONEL 005/18 establece que se determinará mediante el índice de distorsión armónica en la corriente[3]; Ya que es el consumidor responsable de los efectos negativos que pueda presentar su carga instalada, no solamente a su red sino también a la de terceros.

Por esta razón en este proyecto se realiza un estudio técnico siguiendo todos los procedimientos y parámetros de calidad del consumidor según la regulación No. ARCONEL 005/18, de tal forma que se pueda establecer los niveles de distorsión armónica en la corriente del edificio Old Town Quito Suites producida por la utilización de calentadores de agua del tipo inductivo y plantear una solución rentable desde el punto de vista económico y de igual forma técnico, también se plantea la necesidad de realizar un análisis desde el punto de vista de calidad del producto al que accede el usuario, de esta forma se establecerá si este se encuentra dentro de los parámetros deseados, finalmente se busca una visión individual de la carga instalada, en este caso el calentador

de agua del tipo inductivo, de esta forma se puede observar la contribución que tiene esta carga en cuanto a la contaminación armónica.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

- Realizar un análisis armónico de corriente, del impacto que tienen los calentadores del tipo inductivo en la red eléctrica de bajo voltaje en el hotel Old Town Quito Suites, con el fin de establecer una solución económicamente rentable que mejore la calidad del consumidor.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Configuración e instalación de un analizador de carga para el registro de variables eléctricas en el hotel Old Town Quito Suites.
- Realizar la descarga de la información registrada y validar los datos obtenidos.
- Determinar si la distorsión armónica de corriente obtenida cumple con la REGULACIÓN No. ARCONEL 005/18.
- Proponer alternativas para la mitigación de armónicos y mejora de la distorsión armónica.

## **1.3. Alcance**

El presente proyecto está vinculado a cuantificar la distorsión armónica de corriente que puede causar el uso de calentadores eléctricos de inducción, utilizados para el calentamiento de agua en el hotel Old Town Quito Suites. Para obtener la información de la red eléctrica se instalará el analizador FLUKE de la Carrera de Electricidad de la Universidad Politécnica Salesiana, en el hotel Old Town Quito Suites; realizando registros conforme lo indica la Regulación No. ARCONEL 005/18, que permita conocer el impacto de los calentadores eléctricos de inducción en la distorsión armónica de corriente. Con los registros se podrá verificar el aporte de cada uno de los armónicos e identificar acciones de mejora, para cumplir con la calidad de producto.

## **1.4. Justificación**

Debido a la implementación de calentadores de agua del tipo inductivo en el edificio Old Town Quito Suites, es bastante útil desde el punto de vista técnico realizar un análisis de calidad de energía eléctrica enfocándose en la distorsión armónica de la corriente en la red de bajo voltaje del mismo, generalmente los usuarios desconocen que el servicio de energía eléctrica que reciben debe cumplir con estándares de calidad, no únicamente de parte de la distribuidora sino también por parte del consumidor.

La distorsión armónica de la corriente presente en la red de bajo voltaje es responsabilidad del consumidor, ya que es el tipo y número de cargas que este posee las que pueden causar a mayor o menor medida este fenómeno, existen un sinnúmero de efectos negativos producto de la presencia de distorsión armónica en la corriente que no se limitan a la red propia del usuario, sino que también se lo puede apreciar desde la empresa distribuidora y terceros.

Este estudio permitirá establecer el aporte que tienen los calentadores de agua de inducción en la distorsión armónica de la corriente en la red de bajo voltaje del edificio Old Town Quito Suites.

Una vez realizado el estudio los beneficios que se pueden establecer a partir de la toma acciones correctivas, son la mejora de calidad del producto que recibe el usuario y evitar posibles sanciones por parte de la empresa distribuidora.

### **1.5. Contenido**

El presente trabajo desarrolla lo establecido en el objetivo general y específicos en 4 capítulos, los cuales se describen a continuación.

El capítulo 2 plantea una introducción a la calidad de energía eléctrica, se nombran algunas normas internacionales que han establecido parámetros y procedimientos para la realización de estudios de calidad de energía eléctrica, más adelante se presenta en forma detallada el componente teórico en el que se ha fundamentado el estudio de armónicos en sistemas eléctricos, debido a que el trabajo busca establecer los efectos que tienen cargas del tipo inductivo (calentadores de agua de inducción) en la red de bajo voltaje del usuario se ha visto la necesidad de establecer conceptos del factor de potencia y desbalance de fases.

También se presentan los principales índices de calidad de energía bajo distorsión armónica que se utilizan generalmente en bajo voltaje, posteriormente se hace una recopilación de las diferentes configuraciones de filtros existentes para la mitigación o cancelación de armónicos en sistemas eléctricos. Para finalizar se hace una breve introducción a los calentadores de agua del tipo inductivo y a la metodología utilizada para este trabajo haciendo referencia a la regulación No ARCONEL 005/18

El capítulo 3 presenta de forma detallada el procedimiento seguido para la adquisición de datos y tratamiento de la información. Más adelante se presentado los datos que corresponden a tres análisis necesarios para tener una visión completa de la calidad de energía en el inmueble, calidad del producto, aspecto calidad del consumidor y un análisis individual del circuito perteneciente al calentador de agua del tipo inductivo, los datos se

presentan en forma de tablas y gráficas que permiten una mejor comprensión de las variables eléctricas bajo análisis, también se establecen los límites y parámetros que deben cumplir cada una de las variables bajo estudio en base a la Regulación No ARCONEL 005/18.

El capítulo 4 establece los resultados obtenidos para cada caso de análisis y plantea acciones correctivas para los problemas encontrados en el sistema eléctrico perteneciente al edificio Old Town Quito Suites.

# CAPÍTULO II

## MARCO TEÓRICO

### 2.1. Definición de calidad de energía eléctrica

Cuando hablamos de calidad de energía eléctrica se debe señalar que este término se utilizó a partir de 1980 ya que se empieza a tomar en consideración por primera vez la influencia de perturbaciones electromagnéticas que pueden ocurrir en una red de eléctrica especialmente en medio y bajo voltaje[4]. El término calidad de energía eléctrica aún no se encuentra propiamente definido, pero existen estándares que dan una idea o camino para su definición, en [2] se define como la gran variedad de fenómenos electromagnéticos que van a caracterizar a la corriente y al voltaje en un periodo de tiempo y punto determinado en la red eléctrica, de igual forma en [5] se define como las características que posee la energía eléctrica que se entrega a los usuarios en cuanto a las condiciones de magnitud, frecuencia y simetría del voltaje.

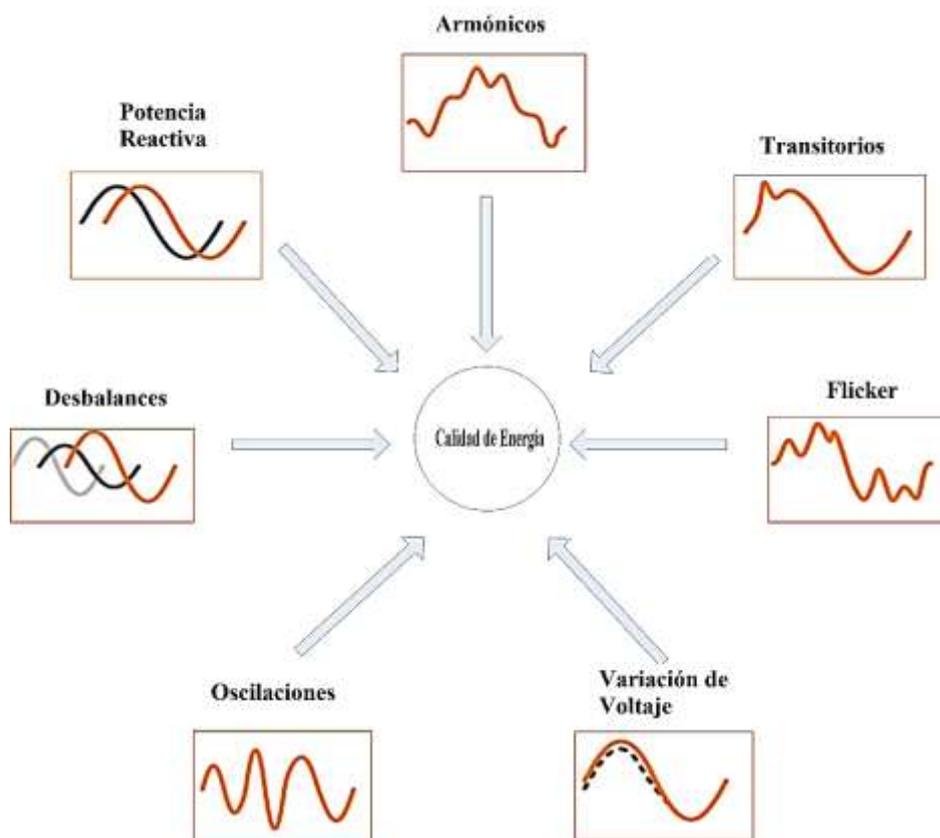


Figura 2.1. Calidad de energía eléctrica.  
Elaborado por: Diego Játiva

La calidad de energía eléctrica debe ser tomada en consideración por todos los participantes del sector eléctrico y es por esta razón que se ha dividido su estudio de la siguiente forma.

## **2.2. Calidad de servicio**

Son los atributos técnicos y comerciales bajo los cuales se debe prestar el servicio de energía eléctrica a los consumidores, la calidad del servicio se puede dividir en calidad del producto, del servicio técnico y del servicio comercial[3].

### **2.2.1. Calidad del producto**

Hace referencia a la calidad en la que se encuentran las formas de onda de voltaje que comercializa la distribuidora, para lo cual existen indicadores como armónicos, niveles de voltaje y perturbaciones rápidas de voltaje[3].

### **2.2.2. Calidad del servicio comercial**

Hace una relación a las prestaciones que ofrece la empresa distribuidora a sus consumidores, estas pueden ir desde tiempos de atención hasta la adecuada facturación del consumo, todo con el fin de que los consumidores se encuentren satisfechos con los servicios que adquieren[3].

### **2.2.3. Calidad del servicio técnico**

Hace una referencia al servicio ininterrumpido que pueda prestar la empresa distribuidora a sus consumidores, se puede cuantificar por la frecuencia y duración de las interrupciones en el suministro de energía eléctrica en la red que abastece al usuario[3].

## **2.3. Guías y estándares utilizados para estudios de calidad de energía eléctrica**

Una vez que se ha establecido como se divide el estudio de la calidad de energía eléctrica es necesario señalar cuales son las principales variables que se deben analizar desde el punto de vista de todos los participantes del sector eléctrico, haciendo énfasis en aquellos que intervienen en medio y bajo voltaje, para este análisis existen algunos estándares que nos plantean como se realizara el monitoreo, análisis y tratamiento de la información recopilada de las distintas variables eléctricas en una red sujeta a un estudio de calidad de energía eléctrica.

Estos estándares son utilizados a nivel mundial y son la base para la elaboración de algunas resoluciones o normativas en cuanto a calidad de energía eléctrica de diferentes países, por esta razón es necesario que se mencionen los principales.

### **2.3.1. Estándar IEEE 519-214**

La IEEE mediante el estándar denominado *Prácticas recomendadas y requisitos para el control de armónicos en sistemas de energía eléctrica* proporciona los límites de distorsión armónica en el voltaje, de manera que se puedan evitar efectos negativos en los equipos asociados a la red eléctrica, también proporciona parámetros de calidad de

potencia que debe tenerse en el PCC , la regulación ARCONEL 005/18 hace referencia a este estándar para el cálculo de índices de calidad energética de parte de la distribuidora y del usuario ya que estos son los responsables de la generación de armónicos de corriente que provocan armónicos en el voltaje y se pueden ver afectados los demás usuarios de la red eléctrica asociada[6].

### **2.3.2. Estándar IEEE 1159**

La IEEE con el estándar 1159 *Práctica recomendada para el monitoreo de la calidad de energía eléctrica* proporciona una definición los fenómenos electromagnéticos en las redes eléctricas. Este estándar plantea algunos indicadores de calidad de energía eléctrica y los clasifica en base a la duración y efecto de estos en la red eléctrica[7], se puede encontrar estos índices en la Tabla 2, sección 4.4 denominada descripción detallada del fenómeno perteneciente a la misma[2].

### **2.4. Monitoreo de la calidad de energía eléctrica**

Si se desea establecer los procedimientos a seguir en cuanto al monitoreo de calidad la energía eléctrica de una red es necesario conocer las variables que deben ser analizadas y los procedimientos que deben realizarse, en [2] se proporciona a los usuarios un conjunto de términos y definiciones para describir los fenómenos de calidad de energía eléctrica. Además, explica cómo los fenómenos electromagnéticos afectan a un sistema eléctrico y su uso final, de igual forma plantea la necesidad de la implementación de equipos de monitoreo que sean capaces de adquirir las variables eléctricas ya sea en puntos de carga o en la red eléctrica.

Para realizar el monitoreo de las variables eléctricas en una red sujeta a un análisis de calidad de energía, se requieren algunos aspectos básicos que nos permitan obtener la información necesaria para posteriormente ser tratada, estos se señalan a continuación;

- Se requiere equipo para que el monitoreo sea útil.
- Se requieren técnicas de medición adecuadas para obtener datos útiles y precisos.
- Ubicación adecuada de monitores, estudios sistemáticos e interpretación de resultados.

Este estándar plantea al voltaje y la corriente como los parámetros base sobre los cuales se debe realizar el monitoreo y análisis de información, con el fin de obtener un estudio integral de la calidad de energía eléctrica en un sistema, de estos dos se desprenderán un sin número de variables eléctricas que se deben ir seleccionando en conformidad con las

necesidades del sistema bajo análisis.

El propósito de este estándar es ayudar a los usuarios describiendo técnicas para definir, medir, cuantificar e interpretar fenómenos electromagnéticos que inciden en las condiciones de calidad de energía eléctrica de un sistema bajo análisis.

Para el caso de sistemas eléctricos de medio y bajo voltaje generalmente las variables seleccionadas para un estudio de calidad de energía eléctrica son las siguientes, cabe recalcar que estas pueden variar según las necesidades de cada sistema y de los usuarios[8].

Parámetros de calidad de energía:

- Magnitud
- Frecuencia
- Sags (Caídas de voltaje)
- Swells (Incrementos de voltaje)
- Fluctuaciones de voltaje causadas por parpadeo (Flicker)
- Transitorios
- Sobre voltajes
- Armónicos
- Interrupciones

La resolución de problemas de calidad de energía eléctrica implica una serie de factores que pueden presentarse según el caso de estudio, estos deben ser interpretados de forma correcta. Muchos problemas relacionados con la calidad de energía se pueden resolver de una forma relativamente simple, por esta razón se señala algunos de las acciones más comunes que se toman normalmente:

- Evaluación cuidadosa de las cargas presentes.
- Verificación del correcto cableado y puesta a tierra del sistema eléctrico.
- Instalando equipos de monitoreo de energía para obtener datos del sistema y sus características.

Sin embargo, se debe tener presente que ningún método maneja todos los problemas y que no es correcto diagnosticar un problema simplemente mirando una sola pieza de información[2].

#### **2.41. Métodos de medición de la calidad de energía eléctrica**

La información adquirida de una red eléctrica debe ser tratada con la metodología adecuada, esto nos permite obtener una visión clara y acertada de los fenómenos que se

están presentando en la red eléctrica bajo estudio, para esto normalmente se debe evaluar la información obtenida con relación a parámetros técnicos ya establecidos para el caso de estudio. En [9] se proporciona una guía para establecer la metodología necesaria según las variables bajo análisis, para lo cual plantea parámetros que deberán ser utilizados según el caso de estudio y las necesidades del sistema eléctrico. Si bien la metodología sigue el mismo patrón de monitoreo, adquisición de datos y tratamiento de la información, este estándar plantea algunas variables específicas para realizar un análisis de calidad de energía eléctrica.

Parámetros de calidad de energía:

- Frecuencia
- Magnitud de voltaje de alimentación
- Fluctuaciones de voltaje causadas por parpadeo (Flicker)
- Incrementos y caídas del voltaje de alimentación (dips and swells)
- Interrupciones
- Transitorios de voltaje
- Desequilibrio en el voltaje de alimentación.
- Armónicos en el voltaje
- Interarmónicos en el voltaje
- Señales principales de voltaje en la red de alimentación
- Cambios rápidos de voltaje

#### **2.42. Requerimientos para el control de armónicos en sistemas eléctricos**

En [1] se enfoca principalmente en el control de la presencia de armónicos en sistemas eléctricos, para la realización de este análisis se debe tomaren cuenta en los puntos de interfaz entre el operador del sistema eléctrico y los consumidores. Los límites recomendados están propuestos para su aplicación en un punto de acoplamiento común (PCC) entre operador del sistema eléctrico y el consumidor, donde el PCC usualmente se toma en el punto en el sistema eléctrico más cercano al consumidor donde el operador del sistema eléctrico podría ofrecer servicio a otros consumidores. Para usuarios comerciales el PCC se encuentra comúnmente en el lado de bajo voltaje del transformador[1].

Este estándar plantea límites en la distorsión armónica para diferentes niveles de voltaje y de igual forma diferentes niveles de corriente, de igual forma establece los parámetros de cómo deben realizarse las mediciones en cada caso y además recomienda algunas acciones para la reducción de dichos niveles de armónicos.

Los beneficios económicos que se pueden presentar al realizar un análisis de calidad de energía eléctrica abarcan a todos los participantes del sector eléctrico, ya que el tomar acciones correctivas sobre posibles anomalías en elementos del sistema eléctrico representa un incremento en la vida útil de los elementos bajo análisis, y en el caso de los usuarios puede significar menos consumo y evitar posibles sanciones impuestas por la empresa que brinda el servicio de energía eléctrica, esto debido a que la carga que el usuario posee puede presentar efectos negativos o no deseables sobre otros usuarios o al sistema que lo abastece.

## **2.5. Estado del arte**

Una vez que se han presentado las guías y estándares comúnmente utilizados para la realización de un estudio de calidad de energía eléctrica a continuación se presentan algunos trabajos en el área de investigación. Cabe recalcar que se hace un énfasis en los casos donde existen problemas por la existencia de armónicos, ya que un análisis de calidad de energía abarca más variables e índices que deben ser estudiados como se mencionó anteriormente.

En [6] se realiza un análisis de calidad de energía conforme a los parámetros indicados en la regulación ARCONEL 005/18. Para este caso particular se presentan problemas con los armónicos de orden tres y cinco, esto debido a la conexión de un sistema fotovoltaico. Si bien existe un problema de armónicos en la red en que se realiza este análisis, el origen de este problema es diferente al caso propuesto en el presente trabajo, no obstante se puede observar el manejo de las variables y aplicación de la regulación para un análisis de los parámetros requeridos en la distorsión armónica de corriente.

En [7] de igual forma al realizar un análisis de calidad de energía en un inmueble y se evidencia la presencia de armónicos de orden impar, para el tratamiento de la información de utiliza la norma IEEE 519, la cual es la base de la regulación vigente en el país, en este trabajo se recomienda la implementación de filtros que eliminen la presencia de armónicos predominantes del sistema en base a las características de consumo. Este trabajo se realiza bajo los parámetros necesarios para la adquisición de datos y posterior tratamiento de la información según lo estipulado en la regulación.

En [10] evidencia la presencia de armónicos de orden par e impar, de igual forma maneja los procedimientos y metodologías que expresa la regulación vigente para un análisis de distorsión armónica de corriente, no se recomiendan acciones correctivas específicas para tratar el problema existente con los armónicos pero señala en que

porcentaje cada uno de estos incumple con la regulación.

En [11] se maneja al igual que los trabajos mencionados anteriormente la regulación actual, el caso corresponde a la implementación de cocinas de inducción y se evidencia de igual forma un problema debido a la presencia de armónicos de orden impar siendo el armónico de orden cinco el predominante, de igual forma plantea la necesidad de la aplicación de filtros para mitigar o cancelar este problema.

Los trabajos enunciados muestran el manejo de la regulación vigente en el país para realizar un análisis de calidad de energía y proponen algunas acciones correctivas, sin embargo la naturaleza de los armónicos que se presenta en cada caso es diferente al del presente trabajo ya que no se ha realizado ningún análisis del efecto que tienen calentadores de agua de inducción en redes de bajo voltaje.

## 2.6. Armónicos

El término armónico definido desde el punto de vista de la ingeniería eléctrica se ha establecido como componente sinusoidal de una forma de onda periódica que tiene una frecuencia igual a un múltiplo entero de la frecuencia fundamental del sistema[12].

En el caso ideal los sectores encargados de la comercialización de energía eléctrica a los usuarios deberían entregar señales sinusoidales perfectas de voltaje y corriente, pero este nunca es el caso, existen un sin número de razones por las que es difícil mantener estas condiciones en el servicio, las desviaciones en las formas de onda de voltaje y corriente de su señal original o ideal puramente sinusoidal son conocidas como distorsiones armónicas.

Los armónicos en voltaje y corriente pueden ser concebidos como componentes sinusoidales componentes de la frecuencia fundamental del sistema y representados de la siguiente forma (1).

$$f_h = (h) * (\text{frecuencia fundamental}) \quad (1)$$

Dónde:

$h$ : Número entero.

$f_h$ : Componente armónico.

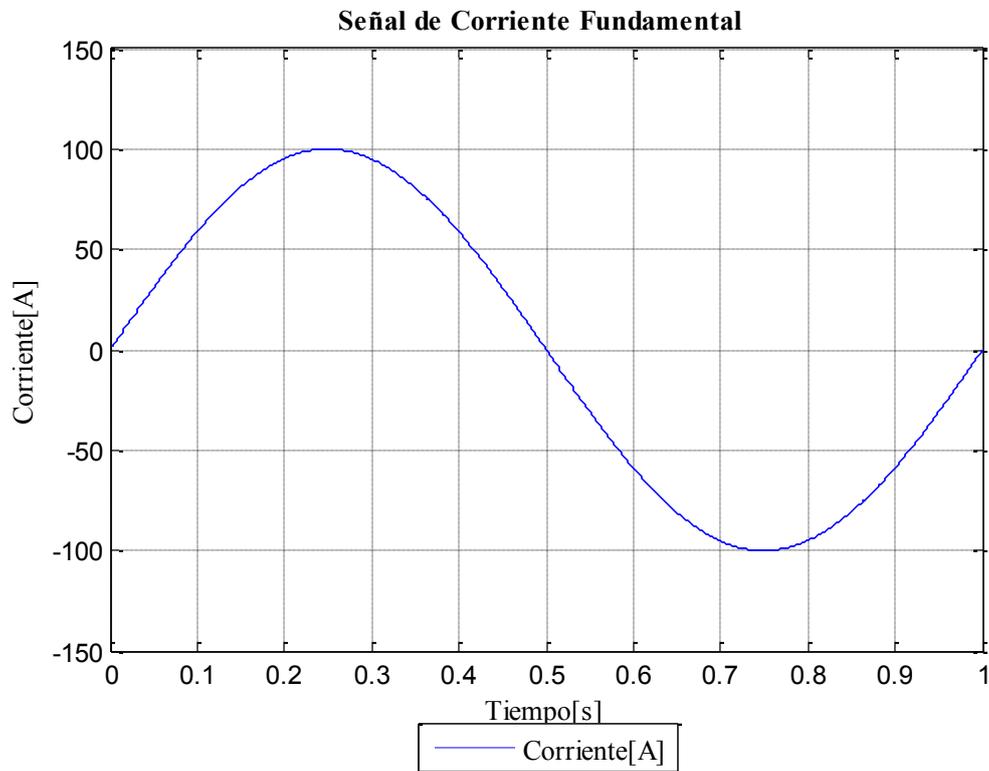
Se puede representar en sistemas eléctricos con su forma fundamental sinusoidal la presencia de armónicos de forma gráfica para que se comprenda los efectos que estos tienen sobre la señal.

$$i_1 = Im_1 * \sin(wt) \quad (2)$$

$$i_3 = Im_3 * \sin(3wt) \quad (3)$$

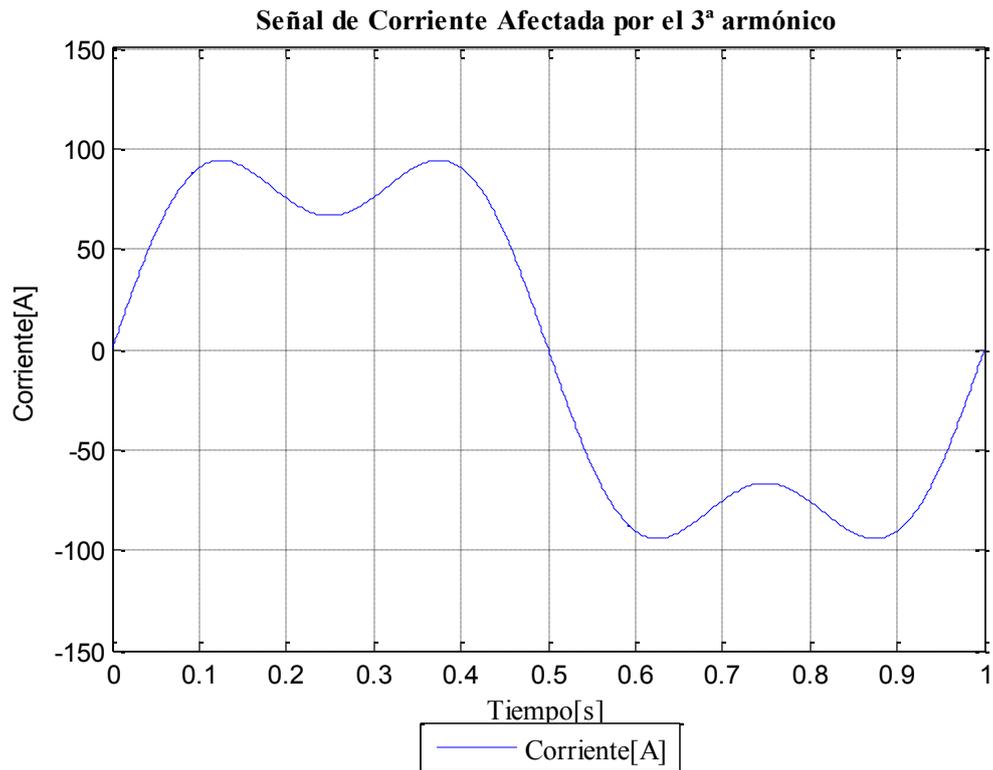
$$i_5 = Im_5 * \sin(5wt) \quad (4)$$

La siguiente gráfica muestra el caso ideal de una señal de corriente de amplitud 100[A].

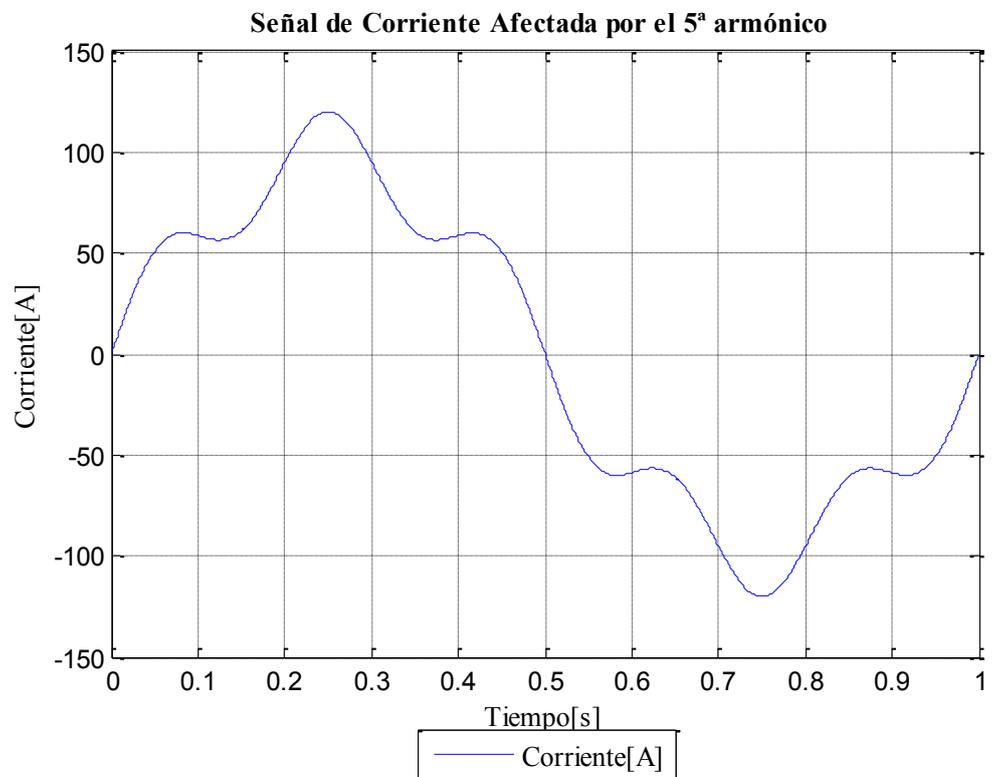


**Figura 2.6.** Señal de corriente ideal sin la presencia de armónicos.  
Elaborado por: Diego Játiva

La presencia de armónicos de diferente orden puede tener diversos efectos en esta señal sinusoidal como se muestra en la Figura 2.6.1 y Figura 2.6.2, en las cuales se aprecia el tercer y quinto armónico respectivamente.

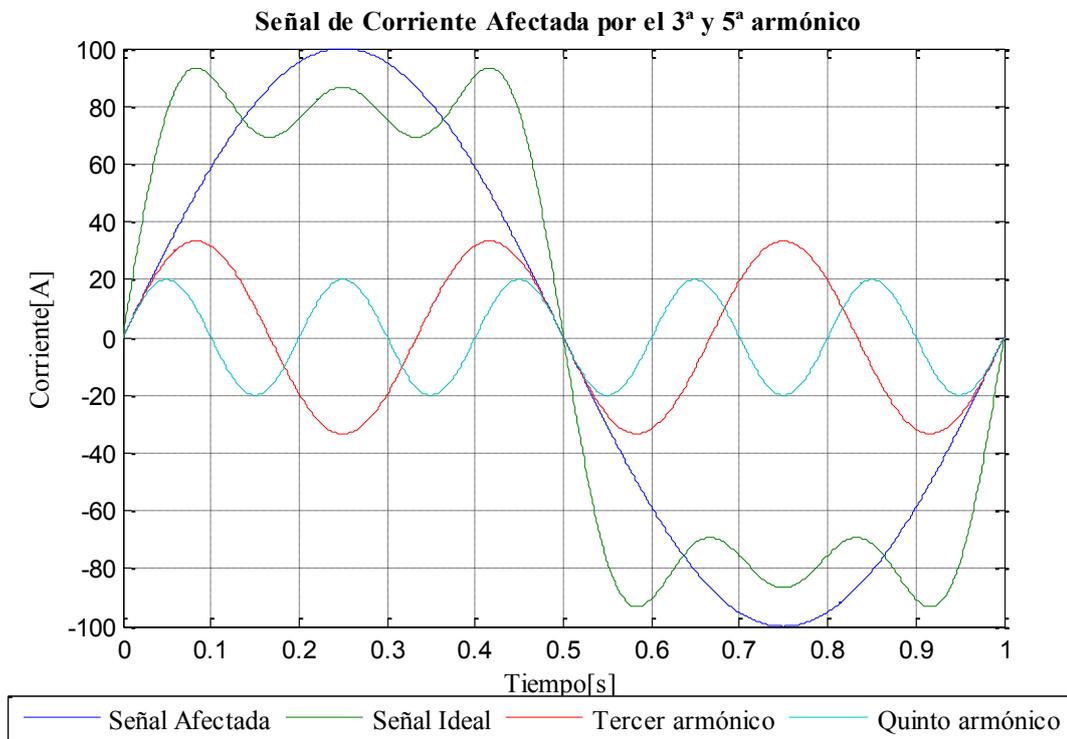


**Figura 2.6.1.** Distorsión en la señal de corriente debido al tercer armónico.  
Elaborado por: Diego Játiva



**Figura 2.6.2.** Distorsión en la señal de corriente debido al quinto armónico.  
Elaborado por: Diego Játiva

De igual forma se muestra en la Figura 2.6.3 cómo estos armónicos se presentan de forma individual y el efecto combinado que estos tienen sobre la señal fundamental.



**Figura 2.6.3.** Distorsión en la señal de corriente debido al tercer y quinto armónico.  
Elaborado por: Diego Játiva

La distorsión armónica es un parámetro que nos muestra que tan distorsionada o alterada se encuentra la señal fundamental, este parámetro se lo conoce como distorsión armónica total (THD)[13].

### 2.6.1. Representación matemática de armónicos mediante las series de Fourier

Para realizar un estudio detallado y posterior análisis de la distorsión armónica, una de las herramientas más efectivas son las series de Fourier, estas nos permite ver el comportamiento de los componentes armónicos de un señal distorsionada ya sea de corriente o de voltaje, esto se logra al descomponer la misma , el análisis mediante las series de Fourier establece que cualquier señal periódica puede representarse mediante las siguientes funciones[14]:

$$f(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(hw_o t) + B_h \sin(hw_o t)] \quad (6)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [C_h \sin(hw_o t + \varphi_h)] \quad (7)$$

Dónde:

$f(t)$  Es una función periódica de frecuencia  $f_0$ , una frecuencia angular de  $w_0 = 2\pi f_0$  y el periodo está dado por  $T = 1/f_0$ .

$C_1 \sin(hw_0t + \varphi_1)$  Representa la señal fundamental.

$C_h \sin(hw_0t + \varphi_h)$ : Representa el armónico  $h^{th}$  de amplitud  $C_h$ , frecuencia  $hf_0$  y fase  $\varphi_h$ .

Los coeficientes para las series de Fourier están dados por:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) dx, \text{ donde } x = w_0 t \quad (8)$$

$$A_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(hw_0t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(hx) dx \quad (9)$$

$$B_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(hw_0t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(hx) dx \quad (10)$$

$$C_h = \sqrt{A_h^2 + B_h^2} \quad (11)$$

$$\varphi_h = \tan^{-1}\left(\frac{A_h}{B_h}\right) \quad (12)$$

### 2.6.2. Armónicos de simetría par e impar

La simetría que poseen los armónicos es una de las características por las cuales se puede realizar un análisis más detallado de los efectos que pueden tener en sistemas eléctricos [14].

### 2.6.3. Armónicos impares

Los armónicos de simetría impar se caracterizan por  $f(-t) = -f(t)$  y no produce términos de coseno en la expansión de la forma de onda por las series de Fourier(6)[14].

### 2.6.4. Armónicos pares

Los armónicos de simetría par se caracterizan por  $f(-t) = f(t)$  y no produce términos sinusoidales en la expansión de la forma de onda por las series de Fourier (7). Las señales con simetría en la mitad de la misma  $f(t \pm T/2) = -f(t)$  tienen cero componente DC y esto resulta en la cancelación de los armónicos de orden (2,4,6,...), por esta razón se ignoran los armónicos de este orden en el análisis de sistemas eléctricos ya que estos poseen componentes bilaterales en el voltaje y la corriente que son simétricos a media onda[14].

## 2.7. Principales fuentes de armónicos

El constante crecimiento de la demanda implica que el suministro de energía eléctrica a estos nuevos usuarios sea abastecido bajo parámetros de calidad de energía, sin embargo el aumento de la demanda ha incrementado la presencia de armónicos debido a la presencia de cargas no lineales como computadoras, lámparas fluorescentes, dispositivos de comunicaciones[15] y todo tipo de dispositivo que tenga que trabajar con rectificadores.

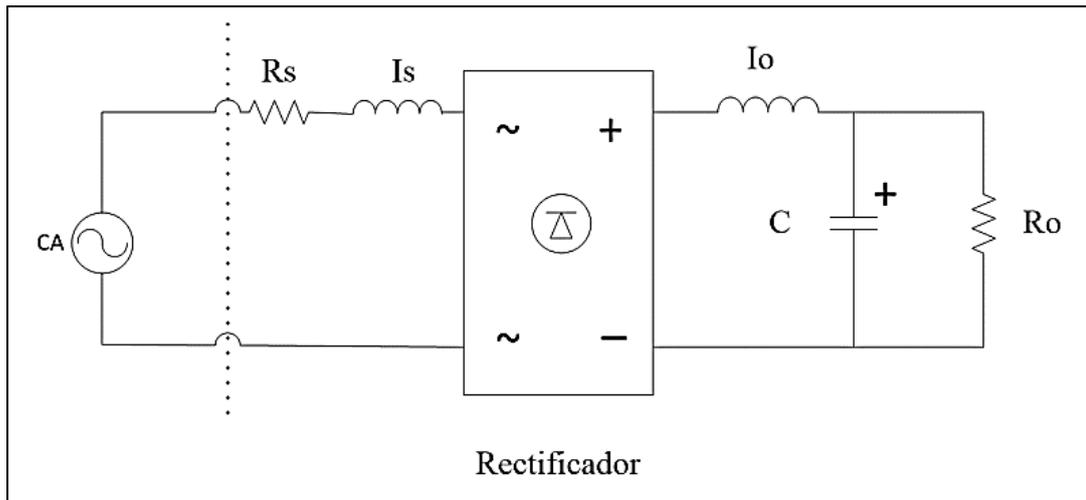
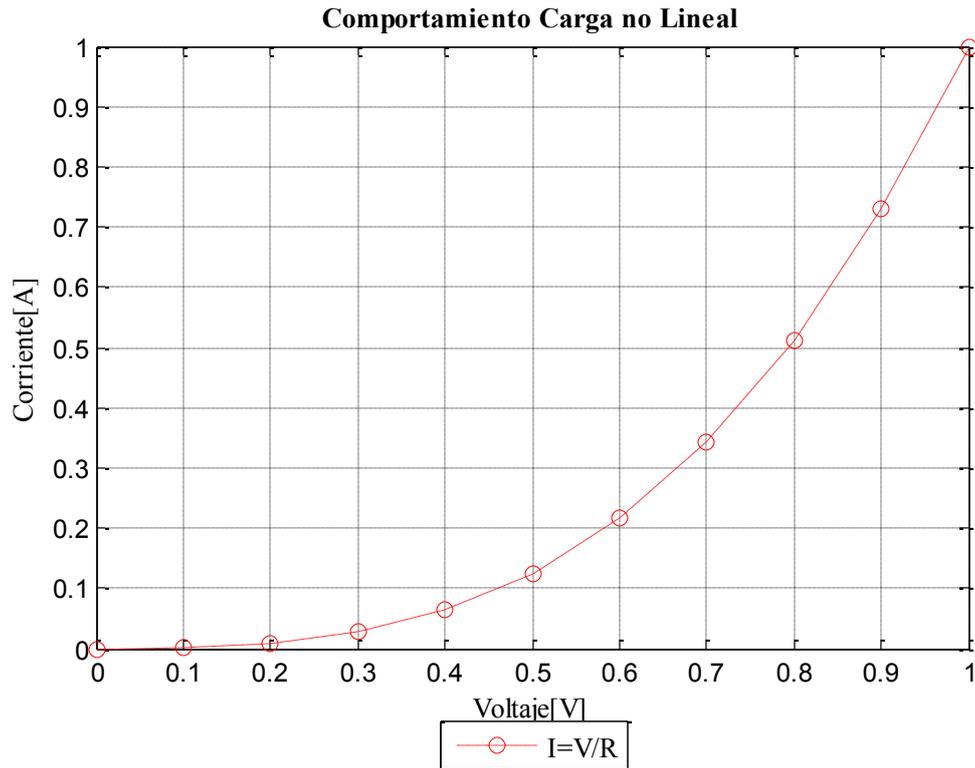


Figura 2.7. Modelo de carga con puente rectificador.  
Elaborado por: Diego Játiva

### 2.7.1. Cargas no lineales

En este tipo de cargas la señal de corriente no se parece a la del voltaje aplicado debido a una serie de razones, una de las principales es que su impedancia no es constante, por ejemplo, el uso de interruptores electrónicos que conducen corriente a la carga solo durante una fracción del periodo de la frecuencia. Por esta razón se puede concebir a las cargas no lineales como aquellas en que la Ley de Ohm no describe la relación entre voltaje y corriente a diferencia de cargas lineales, en algunos casos cargas lineales como los transformadores pueden actuar como cargas no lineales bajo condiciones de saturación [12].



**Figura 2.7.1.** Curva de comportamiento de una carga no lineal.  
Elaborado por: Diego Játiva

En la Figura 2.7.1 se puede apreciar de forma gráfica que la relación de voltaje y corriente no sigue un patrón lineal.

### 2.7.2. Efectos de la presencia de armónicos en la red eléctrica

Para el caso de sistemas eléctricos se han realizado una gran variedad de estudios que muestran los efectos de la presencia de armónicos en la red, los cuales se describen a continuación[13]:

- Reducción del factor de potencia: Esto limita la máxima transferencia de potencia de la red eléctrica que se abastece.
- Efectos sobre motores y generadores: Se presenta en el calentamiento de los componentes de motores y generadores, en el caso del generador debido a un incremento en la corriente que este debe proveer, y en el caso del motor el incremento en la resistencia del rotor debido a altas frecuencias
- Efectos en transformadores: Se presenta con un incremento en las pérdidas de cobre debido al aumento en la corriente y al efecto skin.
- Efectos en capacitores: Se producen corrientes armónicas debido a que la reactancia de los capacitores cambia con la frecuencia, lo que se traduce en calentamiento y pérdidas.

- Efecto en el conductor neutro: Los armónicos de secuencia cero se adhieren al conductor neutro.
- Efecto en mediciones y protección de equipos: Pueden presentarse distorsiones en las mediciones realizadas lo que causaría un aumento en los errores, en el caso de protecciones puede afectar su funcionamiento debido a que estos están diseñados para trabajar bajo condiciones de señales sinusoidales.
- Efecto en cargas sensibles: Algunos dispositivos suelen ser bastante sensibles a distorsiones en las señales, equipos como los usados para el control de calidad de procesos, lo que causa errores en sus mediciones o en su funcionamiento en general.

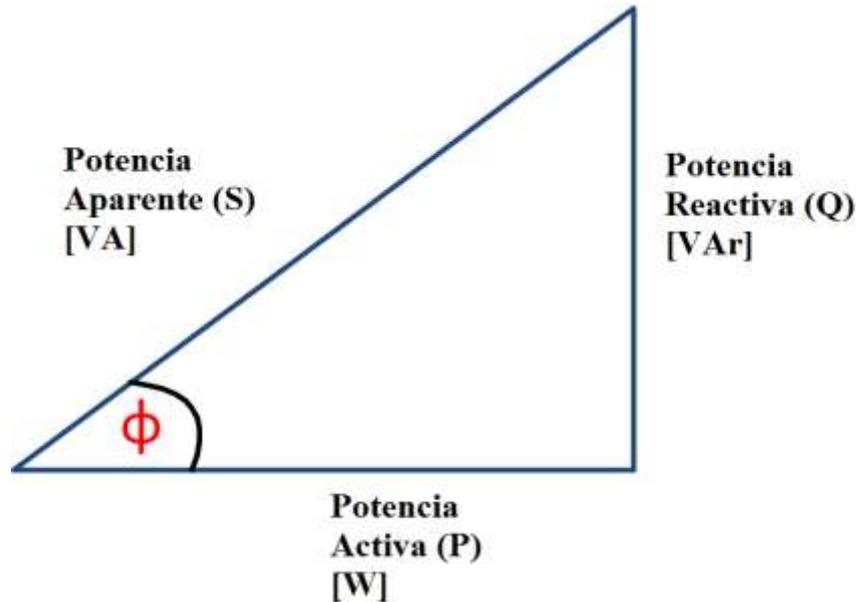
## **2.8. Armónicos en la corriente**

La importancia del estudio de los armónicos en la corriente es primordial para comprender porque se presenta una distorsión en la señal de voltaje, a mayor presencia de armónicos en la corriente mayor será la presencia de armónicos en el voltaje. Las fuentes corrientes armónicas más comunes en sistemas de potencia son: convertidores electrónicos de potencia, hornos de arco, inversores para generación distribuida, controladores de fase AC y rectificadores. Cada uno de estos dispositivos productores de armónicos puede tener una corriente armónica bastante consistente[1].

## **2.9. Factor de potencia, desbalance de fases y pérdidas**

### **2.9.1. Factor de potencia**

El factor de potencia se ha establecido eléctricamente como el coseno del ángulo que existe entre el voltaje y la corriente en un sistema o circuito AC[16]. De igual forma el factor de potencia se puede expresar como la relación trigonométrica de la potencia aparente, activa y reactiva mediante un triángulo de potencia.



**Figura 2.9.1.** Triángulo de potencia.  
Elaborado por: Diego Játiva

El triángulo de potencia se construye tomando en cuenta las siguientes consideraciones: la potencia activa es la que se consume y es medida en watts (13), la potencia aparente es la multiplicación del voltaje y la corriente y es medida en Volt-Amp (15) y por último la potencia reactiva es medida en Volt-Amp-reactivos (14)[17]. Mediante un análisis gráfico se puede expresar de forma muy sencilla al factor de potencia como la siguiente expresión (13):

$$P = V * I * \cos(\phi) \quad (13)$$

$$Q = V * I * \sin(\phi) \quad (14)$$

$$S = V * I = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (15)$$

$$PF = (\cos \phi) = \frac{\text{Potencia activa [W]}}{\text{Potencia aparente [VA]}} = \frac{P}{S} \quad (16)$$

## 2.9.2. Factor de potencia asociado a la calidad de energía

Es uno de los índices o variables primordiales que se deben tomar en cuenta para realizar un análisis de calidad de energía en un sistema, debido a los inconvenientes técnicos que pueden presentarse en los equipos sujetos a la red al no tener un factor de potencia en los niveles adecuados y a la vez el impacto económico que representaría el deterioro de los mismos o la presencia de fallas [18].

El incremento de cargas no lineales en los sistemas eléctricos ha planteado la necesidad de que se tome en cuenta la propagación de armónicos y el efecto que estos tienen en el voltaje y la corriente para así establecer una variante en la definición del factor de potencia. De esta forma se puede obtener un valor más cercano a la realidad de

la red eléctrica, el factor de potencia ahora se encuentra definido de la siguiente manera:

$$PF_{tot} = F_d * F_{dist} \quad (17)$$

$$PF_{tot} = \text{Factor de potencia total} \quad (18)$$

$$F_d = \text{Factor de desplazamiento} \quad (19)$$

$$F_{dist} = \text{Factor de distorsión} = \frac{\text{Corriente fundamental}}{\text{Corriente rms}} \quad (20)$$

La presencia de cargas capacitivas o inductivas en un sistema eléctrico tiene como efecto la reducción del factor de potencia total del sistema, debido a que estas cargas afectan directamente al factor de desplazamiento mientras que las cargas no lineales lo harán en el factor de distorsión por la propagación de armónicos[19].

La presencia de problemas con los niveles del factor de potencia en un sistema eléctrico es muy común y existen muchos estudios al respecto. El obtener un factor de potencia óptimo para el correcto funcionamiento de todos los equipos asociados al sistema eléctrico resulta relativamente fácil y económicamente viable, ya que existen algunas técnicas ya establecidas que nos permitirán tener los niveles deseados para el caso en particular que se busca mejorar[20].

Al mejorar el factor de potencia también se consigue mejorar la calidad de energía y con esto se presentan los siguientes beneficios para el sistema eléctrico[20]:

- Aumenta la vida útil de los equipos asociados al sistema eléctrico.
- Mejora el funcionamiento y rendimiento del sistema eléctrico.
- Reduce los costos de mantenimiento del sistema eléctrico.
- Mejora la seguridad del sistema eléctrico.

Los métodos tradicionales para la corrección del factor de potencia van desde la aplicación de dispositivos pasivos como capacitores, los cuales se encargan del factor de desplazamiento para tener un efecto en el factor de potencia total, este método es el más sencillo y generalmente que más se aplica. De igual forma existen dispositivos electrónicos más sofisticados que no únicamente mejoran el factor de potencia, sino que también reducen la distorsión armónica total[20].

### 2.9.3. Desbalance de fases

El concepto de sistemas balanceados o desbalanceados se aplica a sistemas trifásicos, debido a sus características constructivas un sistema balanceado se caracteriza por un desfase igual o muy similar entre los voltajes del sistema, en teoría debería ser de 120 grados [21]. En cuanto a la magnitud del voltaje, si las cargas que alimentan son idénticas las magnitudes también deben ser iguales o idénticas en las tres fases. Pero este caso ideal

o idóneo en la práctica nunca se encuentra.

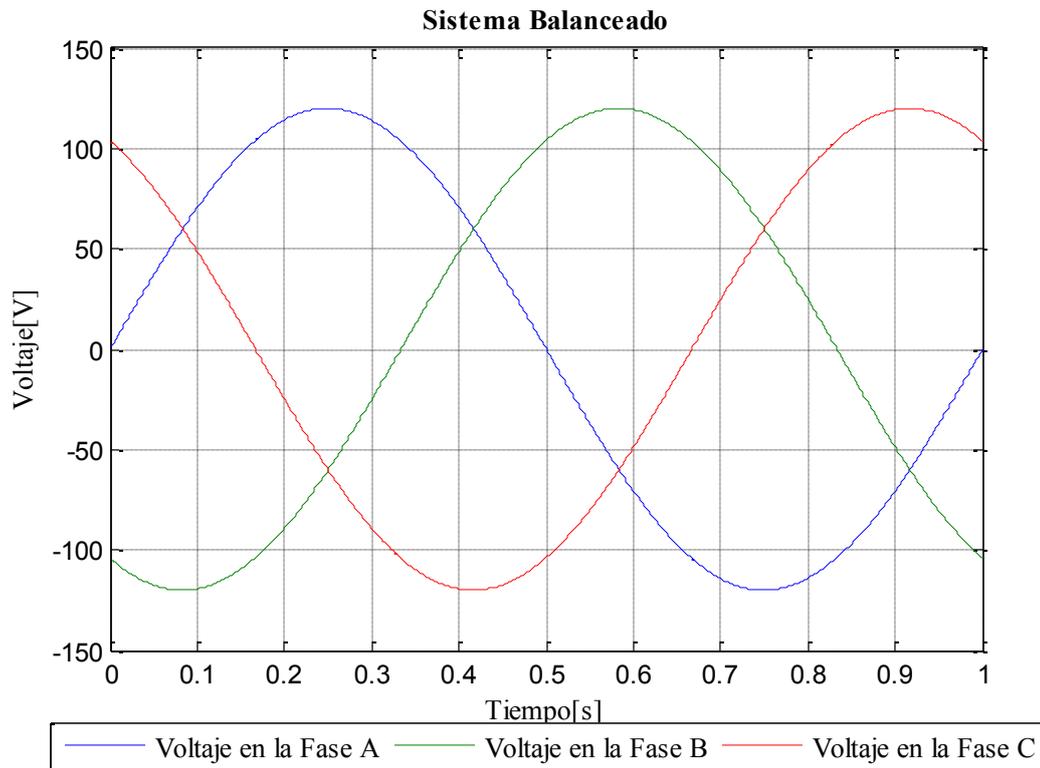
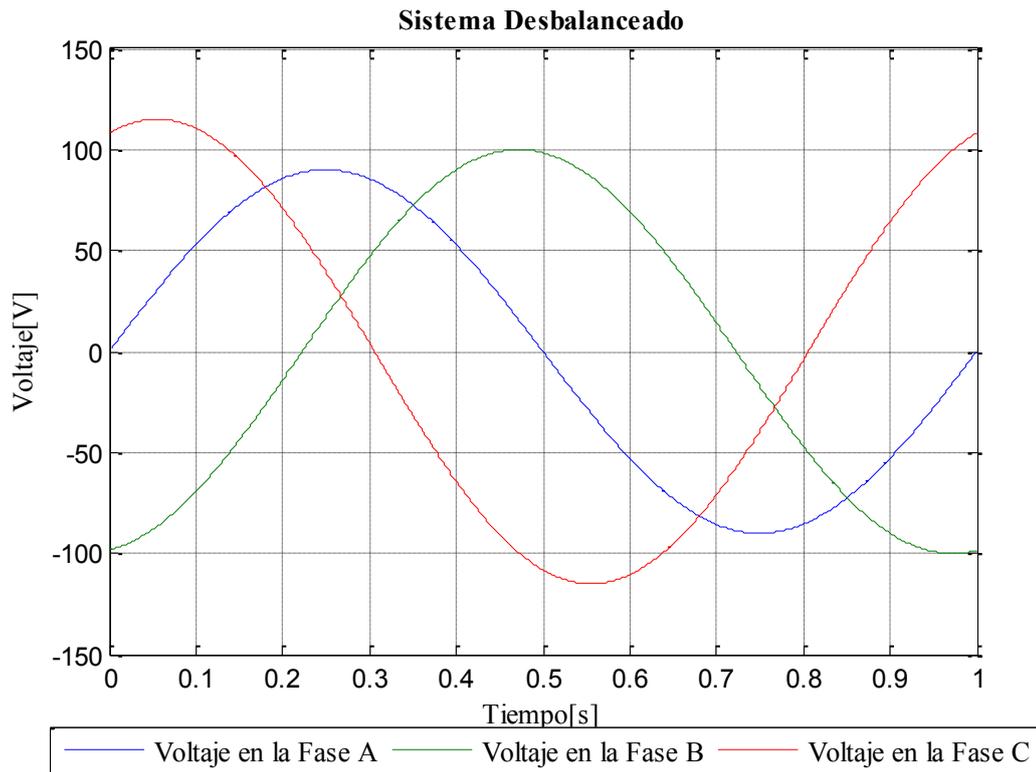


Figura 2.9.3. Señal de voltaje de un sistema trifásico de amplitud 120 [V] balanceado.  
Elaborado por: Diego Játiva

En la Figura 2.9.3 se muestra el comportamiento del voltaje en un sistema trifásico completamente balanceado. Los beneficios que presenta un sistema balanceado en teoría son los siguientes:

- La señal de voltaje es perfectamente senoidal.
- No existe corriente por el neutro, en el caso ideal el neutro no sería necesario.
- La corriente en las tres fases es la misma.
- No existen pérdidas o son casi nulas.

Que un sistema sea balanceado o desbalanceado no depende de la generación sino de las cargas, por esta razón frecuentemente los sistemas trabajan en régimen de desbalance y a la larga se pueden presentar un sinnúmero de efectos negativos para los usuarios. Estos pueden ser sujetos a sanciones por parte de la empresa que les brinda el servicio y de igual forma se puede ver afectada la empresa distribuidora por el desgaste de equipos como transformadores o líneas de distribución[22].



**Figura 2.9.3.1.** Señal de voltaje de un sistema trifásico desbalanceado.  
Elaborado por: Diego Játiva

En la Figura 2.9.3.1 se muestra como los voltajes en cada una de las fases tienen diferente amplitud y se encuentran desfasados en ángulos distintos a 120 grados. Un sistema desbalanceado presenta las siguientes características:

- Las señales de voltaje se encuentran distorsionadas
- La corriente entre las fases no es la misma
- Existen corrientes en el neutro
- Existen pérdidas considerables

#### **2.9.4. Desbalance de fases asociado a la calidad de energía**

El desbalance en los voltajes de un sistema es un problema que concierne principalmente a los sistemas de distribución debido a la presencia de cargas de una sola fase[23]. Desde el punto de vista de calidad de energía la existencia de un desbalance en los voltajes tiene efectos no deseados en los diferentes elementos conectados a un sistema. En el caso de motores se presenta como un incremento en las pérdidas, calentamiento excesivo y en consecuencia se reduce la vida útil del motor, para el caso de sistemas de distribución se presenta como un aumento en las pérdidas de potencia[24].

Los usuarios de una red de distribución pueden tener cargas de una, dos o tres fases lo que obliga al sistema de distribución a trabajar en régimen de desbalance. La distribución

desigual de las cargas entre las fases hace que se presente un desbalance en las corrientes y en consecuencia en el voltaje. Al tener que abastecer a todas las cargas de los usuarios ya sea que estas produzcan este fenómeno en mayor o menor medida, aparecen corrientes suplementarias de secuencia cero o secuencia negativa las que causan pérdidas adicionales y el calentamiento excesivo de máquinas asíncronas que pertenezcan a diferentes usuarios[24].

En [25] nos presenta la medida de desbalance de voltaje para cuantificar el grado de desbalance que existe en este.

$$PVUR(\%) = \frac{\text{máxima desviación de voltaje}}{\text{voltaje de fase promedio}} \quad (21)$$

$$PVUR(\%) = \frac{[|V_r - V_{av}|, |V_y - V_{av}|, |V_b - V_{av}|]}{V_{av}} * 100\% \quad (22)$$

## 2.10. Índices de calidad de energía bajo la distorsión armónica

### 2.10.1. Distorsión armónica total (THD)

El THD es un índice importante ampliamente utilizado para describir problemas de calidad de energía en los sistemas de transmisión y distribución. Considera la contribución de cada componente armónico individual en la señal. El THD está definido para voltaje y corriente de la siguiente forma[12].

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (23)$$

Estas ecuaciones nos indican que el ratio entre los valores rms de las señales, incluidos los armónicos y señales considerando solo la frecuencia fundamental definen la distorsión armónica total.

### 2.10.2. Distorsión de demanda total (TDD)

Considera los componentes de distorsión armónica hasta el orden 50, excluyendo a los Interarmónicos, este índice se expresa como un % de la corriente máxima de demanda[3][2].

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad (24)$$

### 2.10.3. Factor de influencia de teléfono (TIF)

Este índice es una medida de la interferencia en circuitos de audio debido a la presencia de armónicos en el sistema, utiliza el concepto de THD influenciado por el factor  $W_h$  que indica la sensibilidad del oído humano a ruidos en diferentes frecuencias[12].

$$TIF = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} W_h^2 I_h^2}}{I_{rms}} \quad (25)$$

#### 2.10.4 Productos I\*T y V\*T

Estos índices son utilizados para medir la interferencia causada por armónicos en circuitos de audio, debido a su relación con la distorsión de onda total I\*T y V\*T , son también indicadores de voltaje de distorsión y estrés en condensadores de derivación [12].

$$I * T = TIF * I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} W_h^2 I_h^2} \quad (26)$$

$$V * T = TIF * V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} W_h^2 V_h^2} \quad (27)$$

#### 2.10.5 Desplazamiento, distorsión y factor total de potencia

Debido a la presencia de armónicos en el sistema el factor de potencia debe considerar los valores rms de voltaje y corriente, de esta forma el factor de desplazamiento DPF caracteriza el factor de potencia mientras que el factor de distorsión TPF incluye las variaciones en las señales rms, y así se puede definir al factor total de potencia PFtotal como el producto de estos dos factores[12].

$$PF_{total} = DPF * TPF = \cos(\theta_1 - \delta_1) * \frac{P_{total}}{S_{total}} \quad (28)$$

#### 2.10.6 Parámetros relacionados al voltaje

Son factores que han sido pensados para mantener una regulación adecuada de voltaje[12].

$$factor\ cresta = \frac{V_{total}}{V_{rms}} \quad (29)$$

$$factor\ de\ desbalance = \frac{|V_-|}{|V_+|} \quad (30)$$

$$factor\ flicker = \frac{\Delta V}{|V|} \quad (31)$$

### 2.11. Filtros y metodologías para la mitigación de armónicos

#### 2.11.1. Atenuación de armónicos

El estudio de las características y consecuencias de la presencia de armónicos en los sistemas eléctricos de potencia, principalmente en medio y bajo voltaje ha sido el punto de partida para que se planteen diferentes métodos para la mitigación o cancelación de estos armónicos, se han diseñados diferentes dispositivos tomando como base la teoría de

filtros, estos han cumplido de forma satisfactoria según el caso de estudio con la reducción y cancelación de la distorsión armónica, a continuación se muestra cuales fueron estos dispositivos y como se ve reducida la distorsión armónica para los diferentes casos de estudio.

### **2.11.2 Atenuación de armónicos en medio y bajo voltaje**

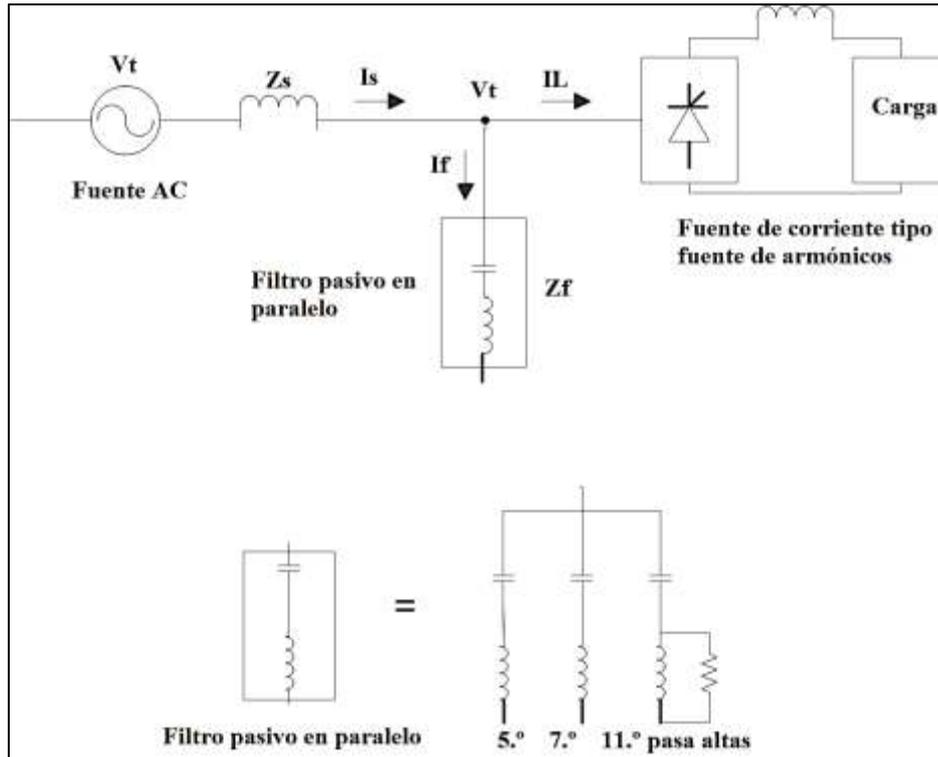
El incremento de cargas no lineales de uso doméstico y comercial ha causado que se generen una cantidad significativa de corrientes armónicas que fluyen a través de la red de medio y bajo voltaje, estos armónicos incluso pueden ser amplificados por el fenómeno conocido como propagación de armónicos que es el resultado de la resonancia entre capacitores para la corrección del factor de potencia, transformadores y la impedancia de las líneas[26]. En el caso de bajo voltaje o a nivel residencial el constante aumento en la utilización de diferentes tipos de equipos electrónicos usados ya sea de forma activa como es el caso de los rectificadores o pasiva como los inversores, estas son las causas del aumento en la demanda y el incremento de la distorsión armónica en el sistema[27].

Las posibles soluciones que se presentan para resolver este problema incluyen un enfoque desde el punto de vista pasivo o activo en el diseño e implementación de filtros, las soluciones basadas en filtros pasivos nos entregan la posibilidad de cancelar los armónicos, mitigar armónicos o cambiarlos a otras frecuencias[26]. mientras que las soluciones basadas en filtros activos son una forma efectiva de compensar las corrientes armónicas en el caso de usuarios y en el caso de las distribuidoras para compensar armónicos presentes en el voltaje [28].

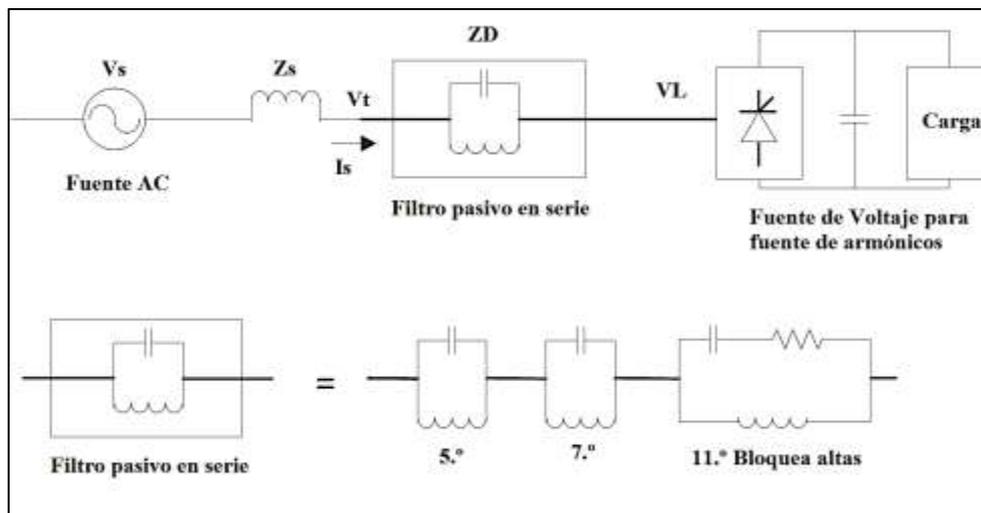
### **2.11.3 Atenuación de armónicos utilizando filtros pasivos.**

La utilización de filtros pasivos es muy deseable desde el punto de vista económico y técnico debido a su simplicidad, estos filtros están diseñados con elementos reactivos como bobinas y condensadores, que pueden ir en paralelo o en serie con la carga, los filtros pasivos son diseñados para presentar una impedancia baja a una frecuencia establecida para el armónico de orden  $n$  que se desea mitigar o cancelar, también pueden ser diseñados como un filtro pasa banda el cual filtra armónicos sobre una frecuencia establecida[12].

A continuación se muestran las configuraciones existentes para filtros pasivos[29].



**Figura 2.11.3.** Filtro pasivo paralelo para fuente de corriente cargas no lineales.  
Elaborado por: Diego Játiva

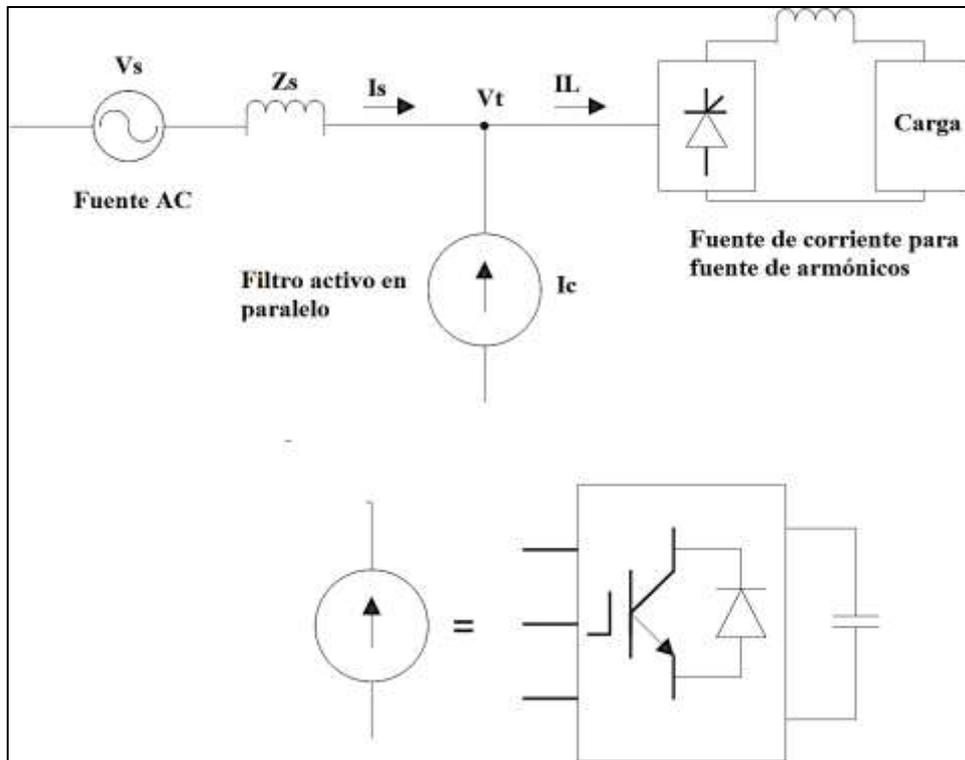


**Figura 2.11.3.1** Filtro pasivo serie para fuente de voltaje cargas no lineales.  
Elaborado por: Diego Játiva

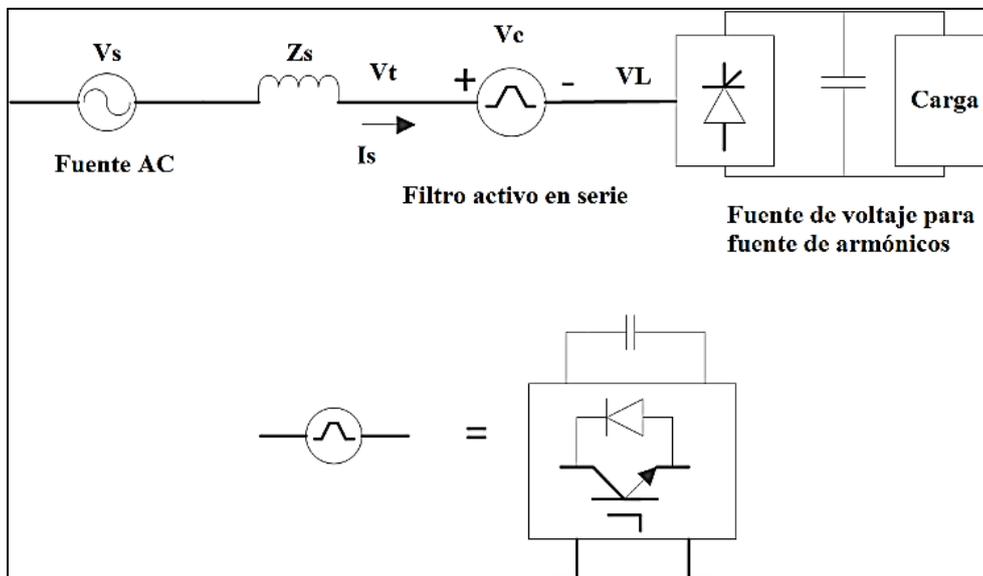
#### 2.11.4 Atenuación de armónicos utilizando filtros activos.

Los filtros activos son dispositivos electrónicos que analizan el espectro de corrientes armónicas presentes e inyectan al sistema eléctrico un espectro de corrientes 180 grados desfasadas con las corrientes armónicas de la carga. El resultado de esta acción es la cancelación de las corrientes armónicas, de igual forma es posible conectar estos filtros en serie o en paralelo con la carga, actuando como fuentes de corriente y voltaje respectivamente, de esta forma se proporciona una impedancia reducida para la

frecuencia fundamental y una alta impedancia para los armónicos que se desea cancelar[29][30].



**Figura 2.11.4.** Filtro activo paralelo para fuente de corriente cargas no lineales.  
Elaborado por: Diego Játiva

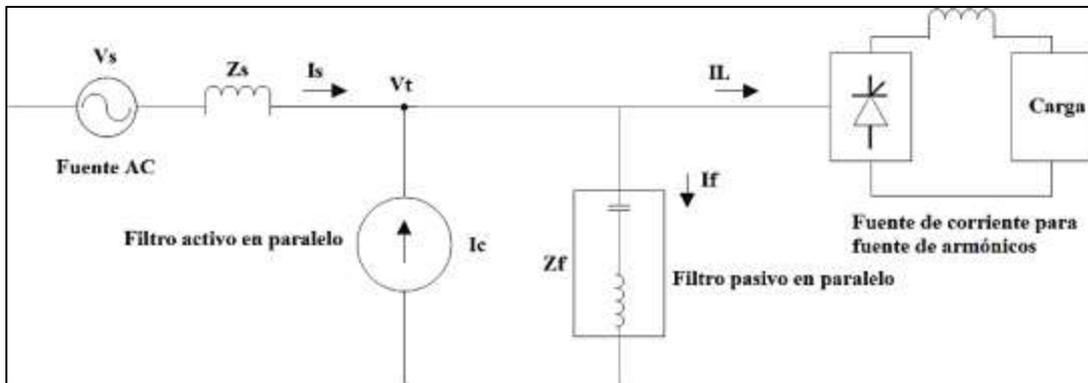


**Figura 2.11.4.1.** Filtro activo serie para fuente de voltaje cargas no lineales.  
Elaborado por: Diego Játiva

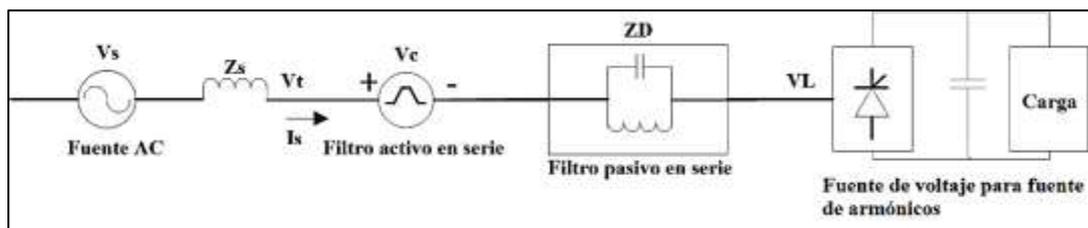
### 2.11.5 Combinación de filtros activos y pasivos

Este tipo de configuración se conoce como filtros híbridos, debido a sus características estos filtros cubren un espectro más amplio en cuanto a la mitigación y cancelación de

armónicos, los filtros activos se utilizan en esta configuración para compensar armónicos de una frecuencia baja, de igual forma los filtros pasivos son capaces de mitigar los armónicos de orden alto, el filtro activo puede eliminar la resonancia entre la fuente y el filtro pasivo[29].



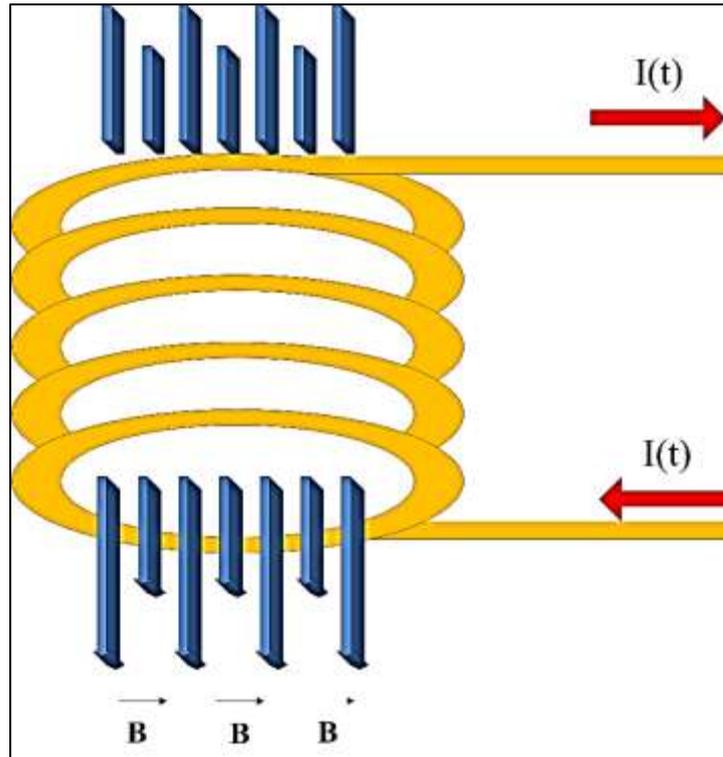
**Figura 2.11.5.** Combinación filtros activo y pasivo para fuente de corriente cargas no lineales.  
Elaborado por: Diego Játiva



**Figura 2.11.5.1.** Combinación filtros activo y pasivo para fuente de voltaje cargas no lineales.  
Elaborado por: Diego Játiva

## 2.12. Introducción a calentadores de agua del tipo inductivo

Para conocer el funcionamiento de estos dispositivos es necesario conocer los principios teóricos eléctricos y electromagnéticos bajo los cuales estos han sido diseñados. En [31] se plantea los principios bajo los cuales se produce el calentamiento por inducción, para esto se establece el resultado de combinar leyes como Ley de Faraday, el Efecto Joule Ley de Ampere con el fin de describir este fenómeno. El Efecto Joule se encarga de estudiar el calentamiento que generan las corrientes de inducción en un campo magnético variable.

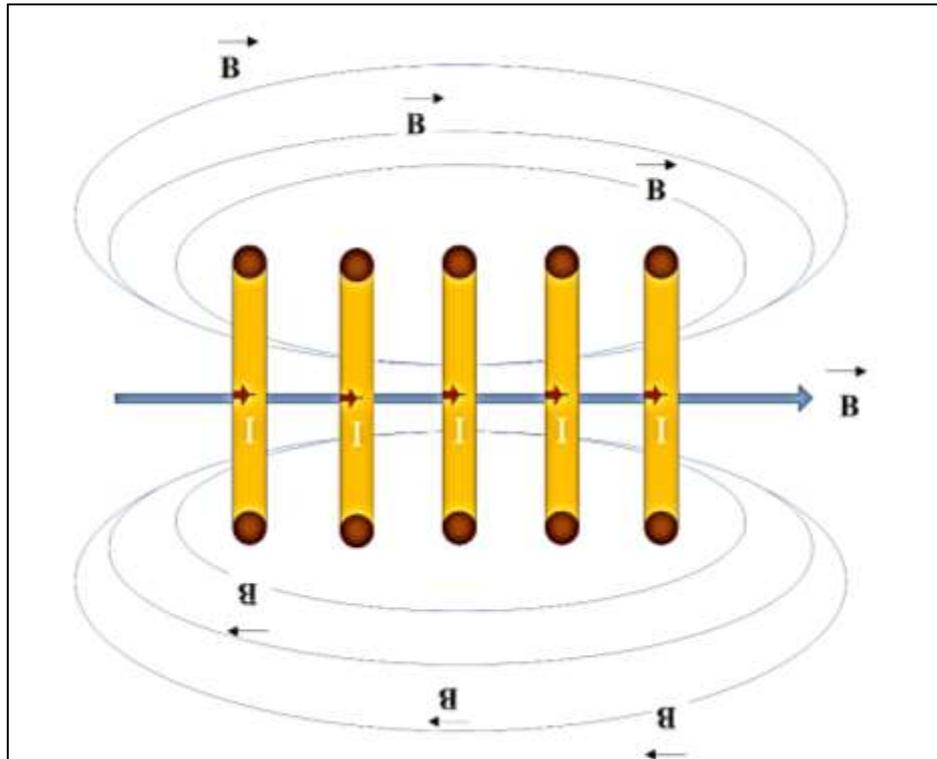


**Figura 2.12.** Campo magnético generado por un inductor.

Elaborado por: Diego Játiva

Para lograr aumentar la temperatura de un material conductor se debe tener un campo magnético estable con una amplitud y que este sea en el variante tiempo, es necesario recalcar que en este proceso se pueden presentar picos de voltaje y de corriente muy elevados.

Mediante la Ley de Faraday es posible realizar el análisis de como al hacer circular una corriente a través de un inductor o bobina se genera un campo magnético a sus alrededores, la intensidad del campo magnético inducido en la bobina dependerá de la corriente aplicada y la cantidad de espiras que esta posea.



**Figura 2.12.1.** Campo magnético generado por un inductor.  
Elaborado por: Diego Játiva

### 2.12.1. Principios de funcionamiento

Para la alimentación de estos dispositivos generalmente se utiliza una fuente de corriente alterna a una determinada frecuencia, (en el caso ecuatoriano es de 60 Hz), el paso de corriente en la bobina de inducción produce un campo magnético muy intenso y variante en el espacio dentro de la bobina[32].

El campo magnético que genera la bobina producirá corrientes de Foucault o también conocidas como corrientes parásitas en el elemento de trabajo, estas corrientes al recorrer el elemento y por la resistencia que esté presente se produce un calentamiento por efecto Joule, esta potencia es disipada en forma de calor y se puede expresar mediante la relación de (33). Es de esta forma que al transcurrir este proceso el agua se calienta inmediatamente al tener contacto con el tubo o elemento de trabajo [33]. La expresión que indica la relación entre la corriente y la potencia se plasma en (32).

$$i = \frac{V}{2\pi * F * L_b} \quad (32)$$

$$P(t) = i(t)^2 * R \quad (33)$$

Donde:

$F$  Frecuencia en Hz.

$L_b$  Inductancia de la Bobina en H

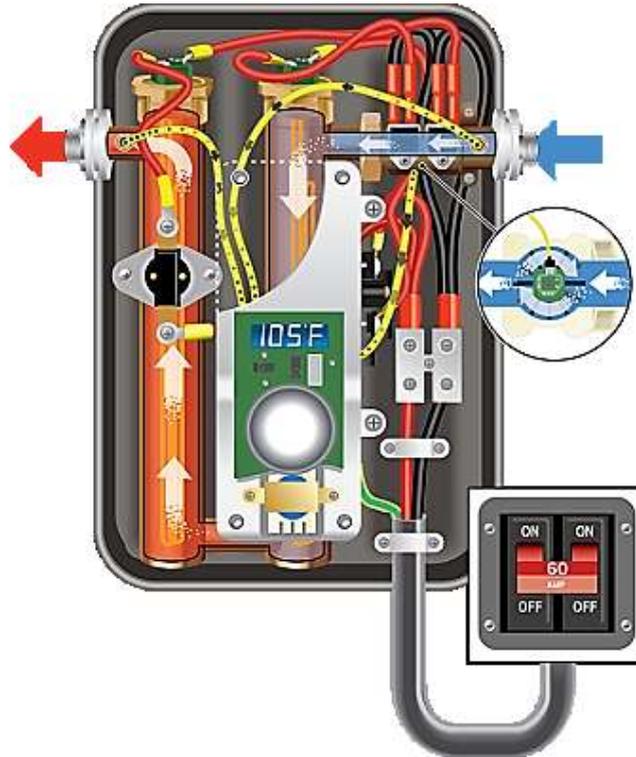
Es importante señalar que en el material de trabajo se producirán magnetizaciones y también des magnetizaciones, esto va a generar pérdidas que de igual forma se convertirán en calor.

### 2.12.2 Equipo utilizado

El equipo utilizado en el Hotel Old Town Quito Suites es el EcoSmart ECO 11 de trece kilovatios sin tanque, este equipo tiene la capacidad de proporcionar 3.2 galones de agua caliente por minuto, posee un indicador digital de la temperatura de salida del agua.



**Figura 2.12.2.** Calentador de agua de inducción EcoSmart ECO 11.  
Fuente: ECOSMARTUS



**Figura 2.12.2.1.** Funcionamiento interno del EcoSmart ECO 11.  
Fuente: ECOSMARTUS

**Tabla 2.12.2.** Especificaciones técnicas del equipo EcoSmart ECO 11.

<b>Especificaciones</b>	<b>ECO 11</b>
Voltaje	220/240V
Número de fases	Monofásico
Potencia	11.8kW
Corriente	54A
Protección	60A
Cable Requerido	6 AWG

Elaborado por: Diego Játiva.



Figura 2.12.2.2. Calentador de agua de inducción instalado en el inmueble.  
Fuente: Diego Játiva

### 2.13. Configuración e Instalación del equipo Fluke 435 en el inmueble

El lugar donde se realizó el presente trabajo de trata del Hotel Old Town Quito Suites, ubicado en José Antepara E3 61 y, Vicente León, Quito 170403.

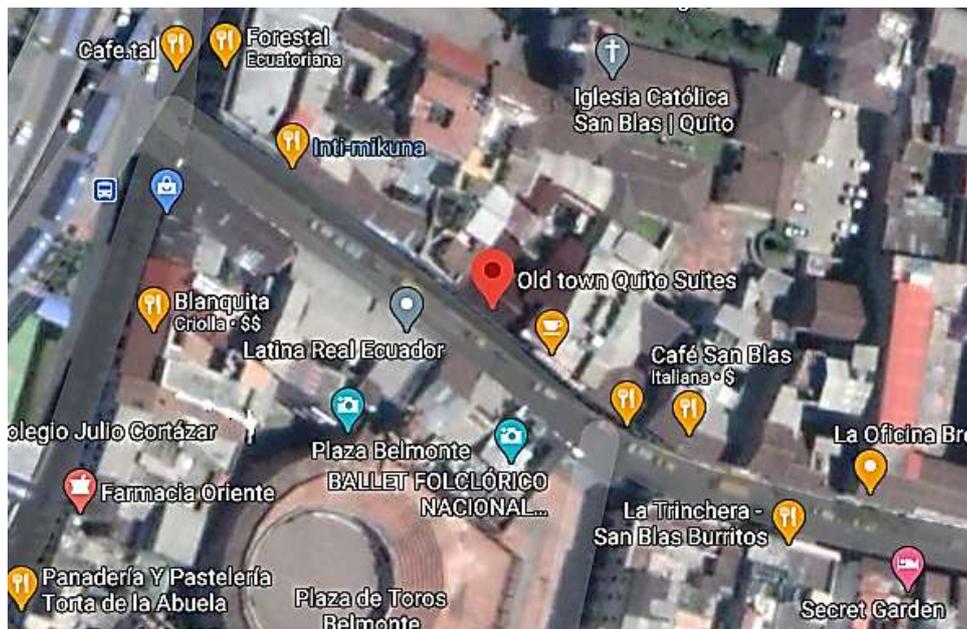


Figura 2.13. Ubicación Hotel Old Town Quito Suites.

Fuente: Google Maps

### 2.1.1. Fluke 435

El equipo utilizado se trata del analizador de calidad de energía eléctrica Fluke 435 categoría 1, este equipo es capaz de adquirir datos tales como: voltajes, corrientes, potencia, energía, armónicos y demás información necesaria para realizar un análisis de calidad de energía, además nos presenta la información en forma de histogramas y formas de onda lo que resulta muy útil para interpretar la información recopilada.



Figura 2.13.1. Analizador de calidad de energía Fluke 435.  
Fuente: Fluke

### 2.13.1. Configuración del equipo.

Antes de instalar el equipo en el inmueble es necesario configurar al analizador en los parámetros necesarios para obtener una visión integral del estado en que se encuentra la red eléctrica sujeta al análisis.

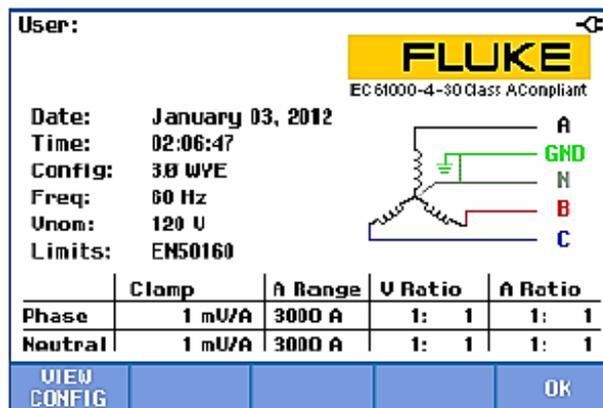
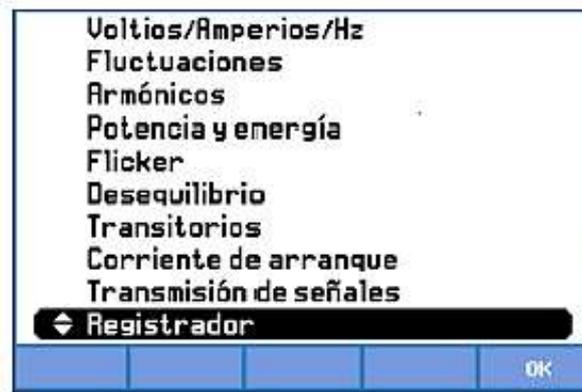


Figura 2.13.2. Pantalla inicial analizador de calidad de energía Fluke 435.  
Fuente: Fluke

Para establecer los parámetros de cómo se almacena la información se debe ingresar a la función de registrador, esta función nos permitirá recopilar varias lecturas de los parámetros que nosotros deseemos, es muy importante que se establezcan los intervalos de tiempo correctos ya que la memoria se podría ver limitada, para nuestro caso se trata de intervalos de 10 min por un periodo de 7 días.



**Figura 2.13.2.1.** Función registrador del analizador de calidad de energía Fluke 435.  
Fuente: Fluke



**Figura 2.13.2.2.** Configuración de intervalos del analizador de calidad de energía Fluke 435.  
Fuente: Fluke

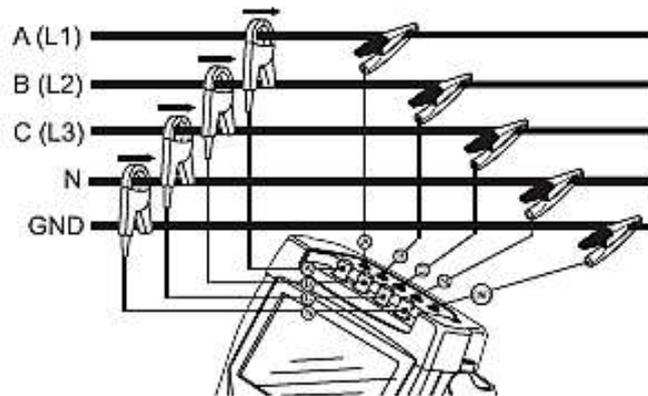
Una vez que se han establecido los intervalos se deben seleccionar las variables eléctricas a ser medidas, el analizador nos proporciona un sinnúmero de variables que son fundamentales para conocer el estado de la red eléctrica, en nuestro caso se hace un énfasis en la distorsión armónica de corriente ya que es con esta información que se determinara la distorsión individual y la total.



**Figura 2.13.2.3.** Selección de variables del analizador de calidad de energía Fluke 435.  
Fuente: Fluke

### 2.13.2 Conexión realizada en el PCC

Una vez que se han seleccionado las variables deseadas para el análisis se procederá a la instalación del mismo en el circuito a ser analizado para esto es necesario seguir los diagramas que nos proporciona el manual de usuario, tal como se muestra a continuación.



**Figura 2.13.2.** Diagrama de Conexión realizada en el PCC del Hotel Old Town Quito Suites.  
Fuente: Fluke.

Conforme con lo que dispone la norma el analizador de calidad de energía Fluke 435 fue instalado en el PCC punto común de acoplamiento presente en el tablero principal del inmueble, debido a que existe una acometida exprés para el mismo.



**Figura 2.13.2.1.** PCC para el Hotel Old Town Quito Suites.  
**Fuente:** Diego Játiva.



**Figura 2.13.2.2.** Conexión realizada en el PCC del Hotel Old Town Quito Suites.  
**Fuente:** Diego Játiva.



**Figura 2.13.2.3.** Analizador en el PCC del Hotel Old Town Quito Suites.  
**Fuente:** Diego Játiva.

Cuando se ha realizado la conexión del analizador a la red se debe presionar el botón de START y el equipo empezara a recopilar toda la información que fue establecida anteriormente.

# CAPÍTULO III

## METODOLOGIA

### MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

#### 3.1. Regulación NO. ARCONEL 005/18

La regulación emitida por parte del ARCONEL plantea parámetros que deben ser cumplidos para cumplir con los límites de calidad de energía partiendo desde la comercialización y distribución de energía eléctrica; de igual forma nos proporciona los procedimientos de registro, medición y evaluación de información para la distribuidora y los consumidores, según les corresponda a cada uno de ellos[3]. La regulación nos presenta atributos de calidad que deben ser cumplidos por la distribuidora y por el usuario, estos se encuentran divididos de la siguiente forma:

#### 3.1.1. Calidad del producto

##### 3.1.1.1. Nivel de voltaje

Este índice nos permite verificar la calidad del nivel de voltaje que se suministra al usuario, la regulación establece límites para la variación de voltaje los cuales se presentan en la Tabla 3, de igual forma nos proporciona la ecuación (34) para calcular este índice.

$$\Delta V_k = \frac{V_k - V_N}{V_N} * 100 \quad [\%] \quad (34)$$

Donde:

$\Delta V_k$  Variación de voltaje en relación al voltaje del sistema.

$V_k$  Voltaje en el punto k en un intervalo de tiempo igual a 10 minutos.

$V_N$  Voltaje en el punto k.

**Tabla 3.1.1.1.** Límites de variación de voltaje[2].

Nivel de Voltaje	Rango Admisible
Alto Voltaje (Grupo 1 y Grupo 2)	± 5.0 %
Medio Voltaje	± 6.0 %
Bajo Voltaje	± 8.0 %

Elaborado por: Diego Játiva.

##### 3.1.1.2. Perturbaciones rápidas de voltaje (Flicker)

Las perturbaciones de corto plazo (Pst), es el indicador que evalúa la severidad de las variaciones en la amplitud del voltaje, la regulación indica que se evalúa conforme a la normativa IEC 61000-4-15 de la siguiente forma:

$$P_{st} = \sqrt{0.0314P_{0.1} + 0.0525P_1 + 0.0657P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50}} \quad (35)$$

Donde:

- $P_{st}$  Índice Flicker de corta duración.  
 $P_{0.1}, P_1, P_3, P_{10}, P_{50}$ : Niveles Flicker que están fuera del límite durante el tiempo de medición  
 $V_N$  Voltaje en el punto k.

El límite establecido por la regulación es de la unidad para el Pst y el Plt.

### 3.1.1.3. Distorsión armónica de voltaje

La distorsión total de voltaje se debe evaluar mediante la ecuación 36, los límites establecidos por la regulación se encuentran en la Tabla 3.1.1.3.

$$THD_k = \left[ \frac{1}{V_n} \sqrt{\sum_{h=2}^{50} (V_{h,k})^2} \right] * 100 [\%] \quad (36)$$

Donde:

- $V_{h,k}$  Armónica de voltaje h en el intervalo k.  
 $V_n$  Voltaje nominal en el punto de medición.  
 $THD_k$  Factor de distorsión armónica total de voltaje.

**Tabla 3.1.1.3.** Límites máximos armónicos de voltaje (% del voltaje nominal)[2].

Nivel de Voltaje	THD [%]
Bajo Voltaje	8.0
Medio Voltaje	5.0
Alto Voltaje (Grupo 1)	2.5
Alto Voltaje (Grupo 2)	1.5

Elaborado por: Diego Játiva.

### 3.1.1.4. Desequilibrio de voltaje

Este índice se evalúa con la ecuación 37, los límites permitidos por la regulación corresponde al 2% para cada uno de los niveles de voltaje en el punto donde se realizó las mediciones.

$$Desequilibrio de voltaje = \frac{|V_-|}{|V_+|} * 100 [\%] \quad (37)$$

Donde:

- $V_-$  Componente de secuencia - del voltaje.  
 $V_+$  Componente de secuencia + de voltaje.

### 3.1.2. Aspecto calidad del consumidor

#### 3.1.2.1. Distorsión armónica de corriente

Esta resolución indica la responsabilidad que tienen los consumidores en mantener niveles de distorsión armónica bajo límites establecidos que serán evaluados mediante la distorsión armónica individual de corriente y la distorsión de demanda total, conforme a los siguiente índices[3].

$$I_{h,k} = \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} (I_{h,i})^2} * 100 \quad [\%] \quad (38)$$

$$DI_{h,k} = \frac{I_{h,k}}{I_L} * 100 \quad [\%] \quad (39)$$

$$TDD_k = \left[ \frac{1}{I_L} \sqrt{\sum_{h=2}^{50} (I_{h,k})^2} \right] * 100 \quad [\%] \quad (40)$$

Donde:

- $I_{h,k}$  Armónica h en un intervalo igual a k por 10 minutos.
- $I_{h,i}$  Componente de secuencia + de voltaje.
- $DI_{h,k}$  Valor eficaz de la armónica h (para h= 2,3,...,50), en un intervalo de tiempo igual a 3 segundos (para i = 1,2,3,...,200).
- $TDD_k$  Factor de distorsión individual de corriente de la armónica h (para h= 2,3,.., 50) en intervalo de k de 10 min.
- $I_L$  Corriente máxima de carga a frecuencia fundamental (60 Hz).

#### 3.1.3. Límites de distorsión armónica

Los límites establecidos tanto para la distorsión armónica individual de corriente como para la distorsión de la demanda total se encuentran en la Regulación ARCONEL 005/18, capítulo 7, sección 29.2 límites; en base a esta tabla se plantean los límites de nivel máximo de armónicos pares e impares como un porcentaje de la corriente máxima de demanda.

#### 3.1.4. Medición

Los equipos que se utilicen para mediciones en el sistema tienen que cumplir con los estándares IEC 61000-4-7 e IEC 61000-4-30. Los intervalos de tiempo en que se realizará la medición o adquisición de datos se establecen de la siguiente forma:

El registro realizado de las variables eléctricas y el almacenamiento de las mismas en cada punto donde se realizó las mediciones debe cumplir un periodo de tiempo no menor a 7 días continuos, en intervalos de 10 minutos[3].

### **3.1.5. Cumplimiento de los índices de armónicos en el punto de medición**

Se considera que el consumidor o usuario cumple con los requerimientos establecidos por la norma cuando el factor de distorsión de demanda total en el punto donde se recopiló la información y el factor de distorsión armónica individual de corriente se encuentran con el 95% o más de los valores registrados dentro de los límites definidos[3].

### **3.1.6. Seguimiento de los aspectos de calidad responsabilidad del consumidor**

En el caso de los usuarios que incumplan con los parámetros de calidad responsabilidad del consumidor, estos tienen como obligación realizar las acciones correctivas necesarias para solventar los problemas que se hayan identificado en su red [3].

### **3.1.7. Recopilación de las mediciones de las variables eléctricas**

Para esta parte del trabajo se realizó la adquisición de datos durante la semana correspondiente al 4 de febrero hasta el 11 de febrero del 2021, para este intervalo de tiempo se recopilaron 1.016 registros con un total de 9.144 datos.

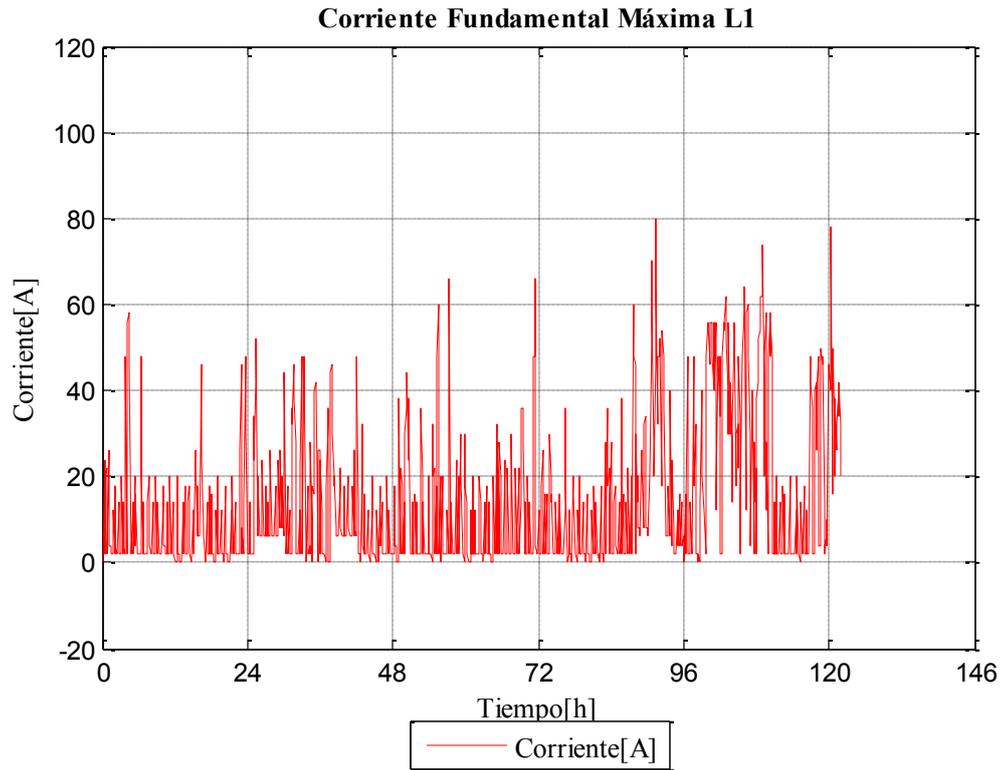
El análisis se realizará conforme a lo que manifiesta la regulación No. ARCONEL 005/18 correspondiente a calidad de energía por parte del consumidor y calidad del producto en donde se establece que si el 95 % o más de los registros se encuentran dentro de los parámetros se está cumpliendo con la norma y el usuario no recibiría sanción alguna.

## **3.2. Aspecto calidad del consumidor**

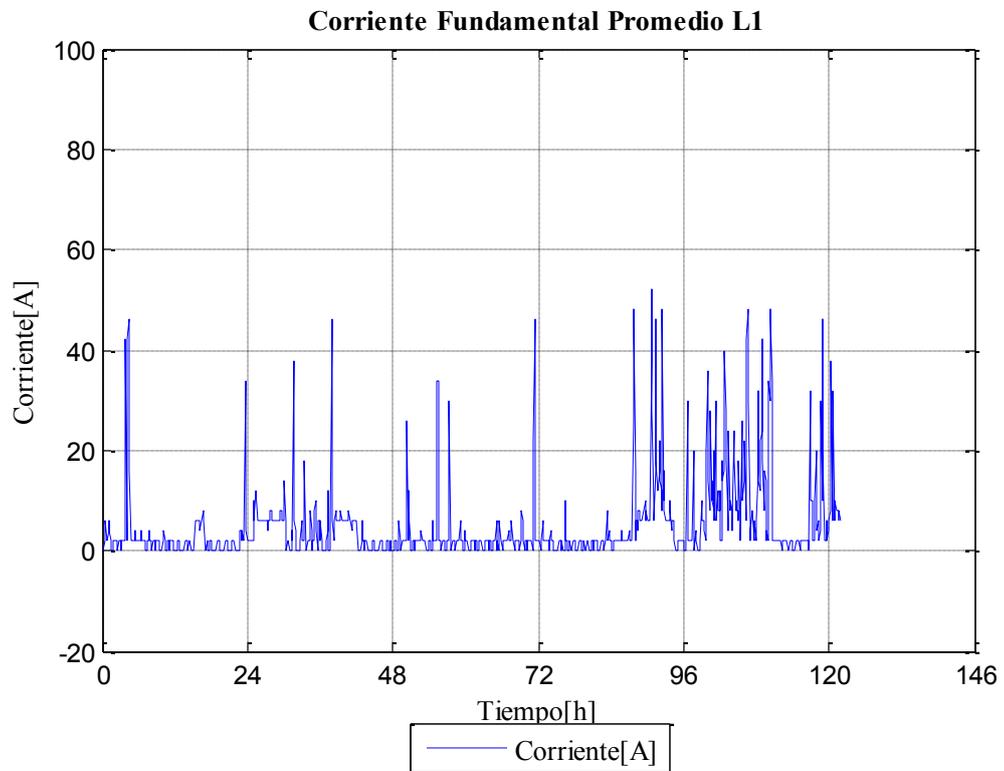
### **3.2.1. Niveles de corriente en las líneas**

Para tener una mejor visión de cómo se presenta la distorsión armónica en la corriente es necesario hacer un análisis de los puntos máximos, promedio y mínimos de la corriente fundamental, si bien este no es un parámetro que nos plantea la norma nos servirá más adelante para el cálculo de la distorsión armónica de corriente en el sistema.

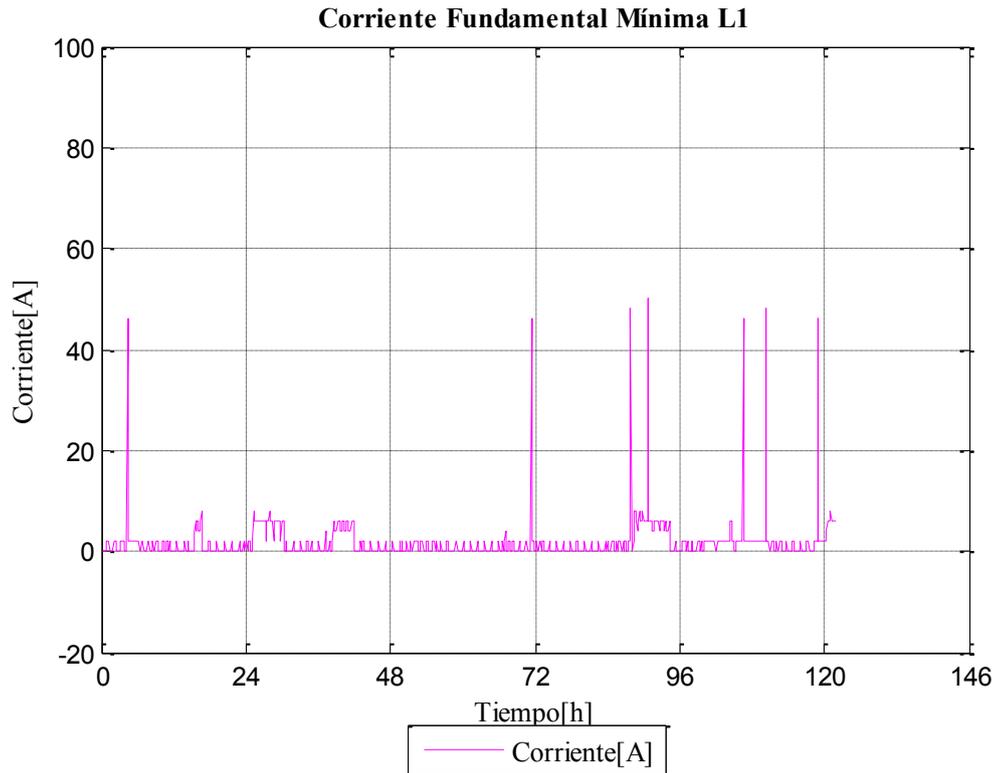
A continuación desde la Figura 3.2.1.1 hasta la Figura 3.2.1.3 se presenta el comportamiento de la corriente en cada una de las líneas y en el neutro, para el intervalo de tiempo en que se hizo la adquisición de datos, en la Tabla 3.2.1.1 hasta la Tabla 3.2.1.4 se muestran los valores promedios máximos, medios y mínimos registrados de la corriente fundamental en el tiempo en que se realizaron las mediciones, estos valores nos proporcionan una visión de cómo y en qué grado los componentes armónicos presentes en el sistema contribuyen a la distorsión de la señal de corriente.



**Figura 3.2.1.1.** Nivel máximo de corriente en la Línea 1.  
Elaborado por: Diego Játiva



**Figura 3.2.1.2.** Nivel medio de corriente en la Línea 1.  
Elaborado por: Diego Játiva



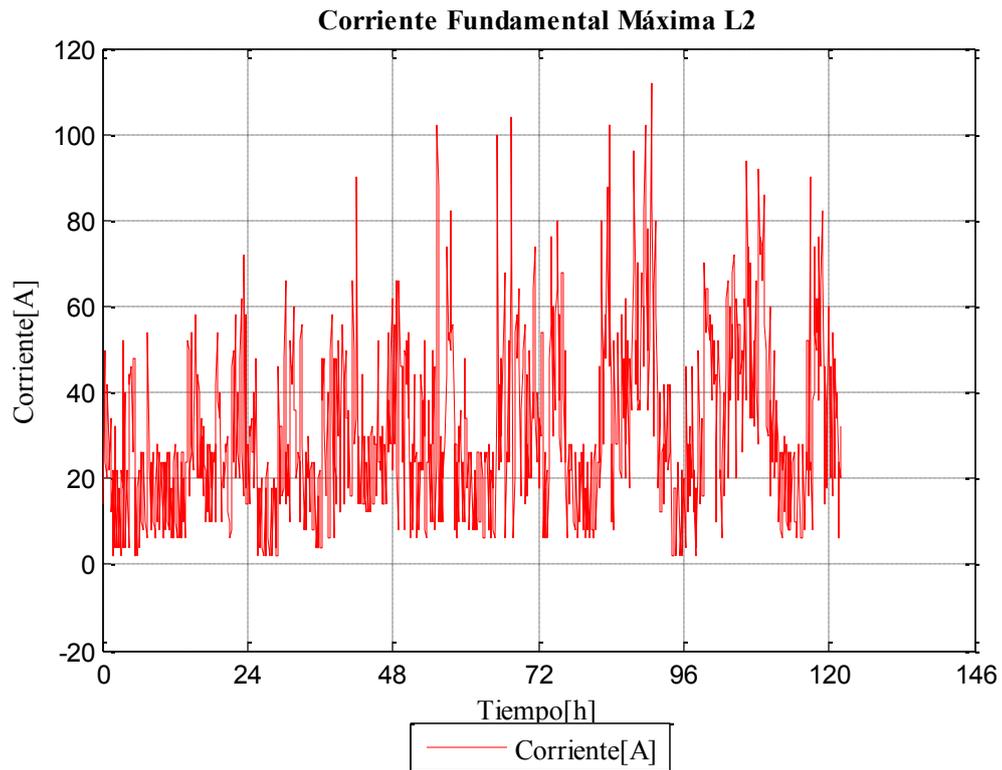
**Figura 3.2.1.3.** Nivel mínimo de corriente en la Línea 1.  
Elaborado por: Diego Játiva

**Tabla 3.2.1.1.** Datos de niveles máximos, medio y mínimo de corriente en la Línea 1

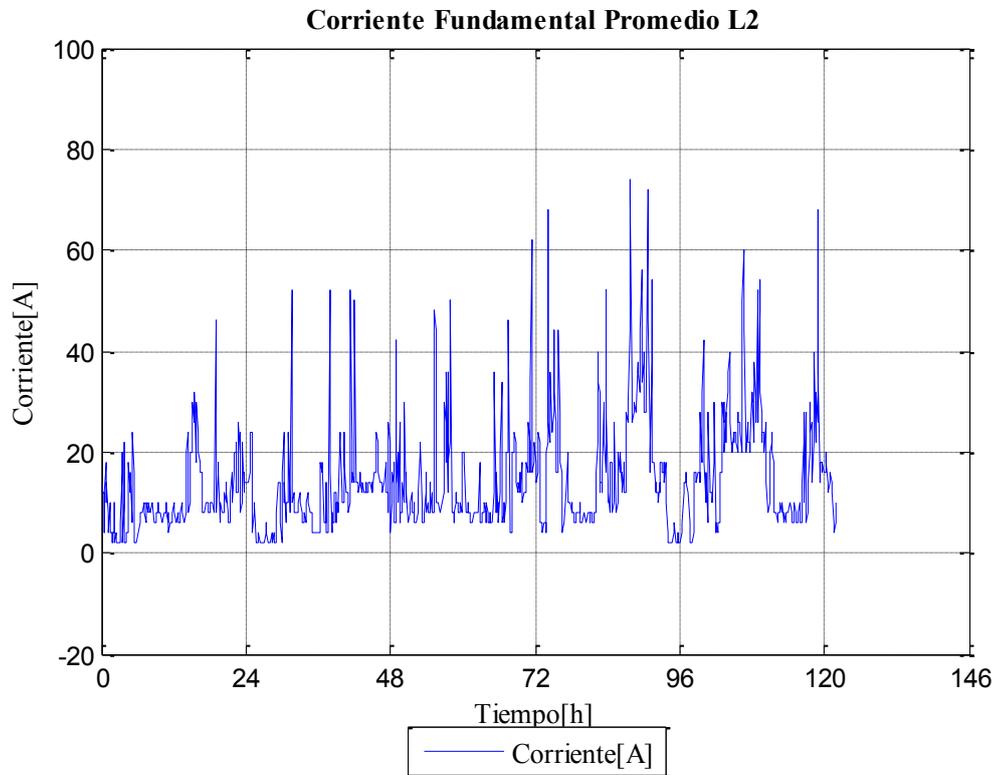
	Corriente Máxima L1	Corriente Mínima L1	Corriente Media L1
Valor máximo [A]	80	50	52
Valor mínimo [A]	0	0	0
Valor medio [A]	14.34	1.90	4.99

Elaborado por: Diego Játiva.

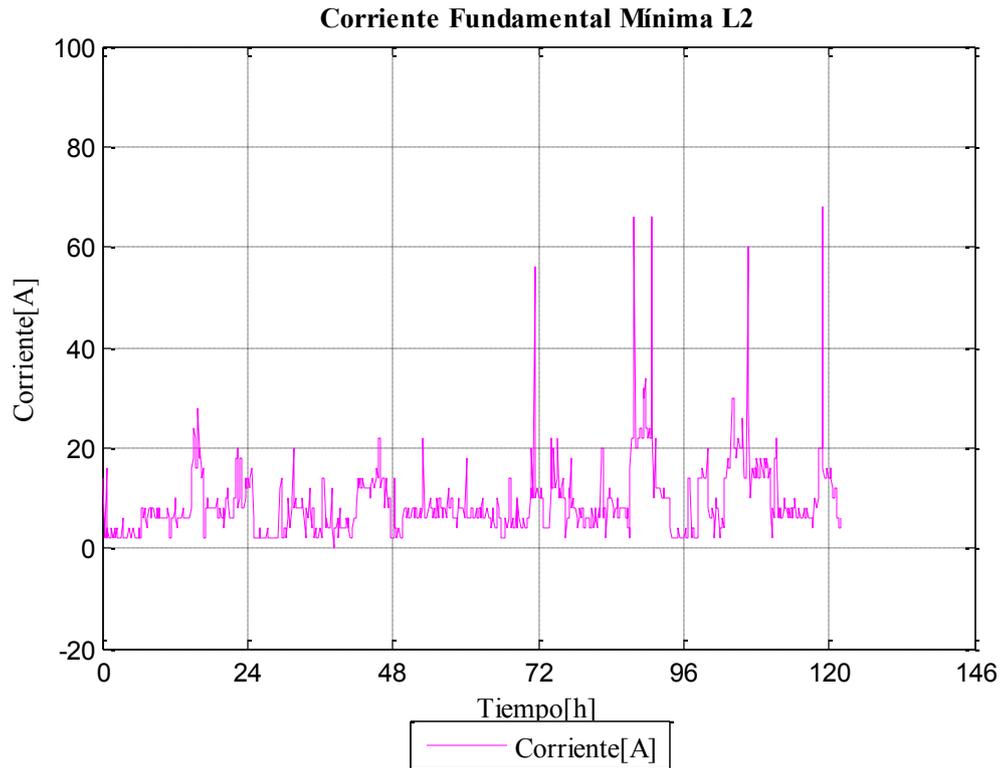
La corriente en la Línea 1 alcanza valores máximos de 80 [A], el valor medio de la corriente máxima es de 14.34 [A] lo que indica que esos picos de corriente son escasos, en promedio la corriente se encuentra en 4.99 [A].



**Figura 3.2.1.4.** Nivel máximo de corriente en la Línea 2.  
Elaborado por: Diego Játiva



**Figura 3.2.1.5.** Nivel medio de corriente en la Línea 2.  
Elaborado por: Diego Játiva



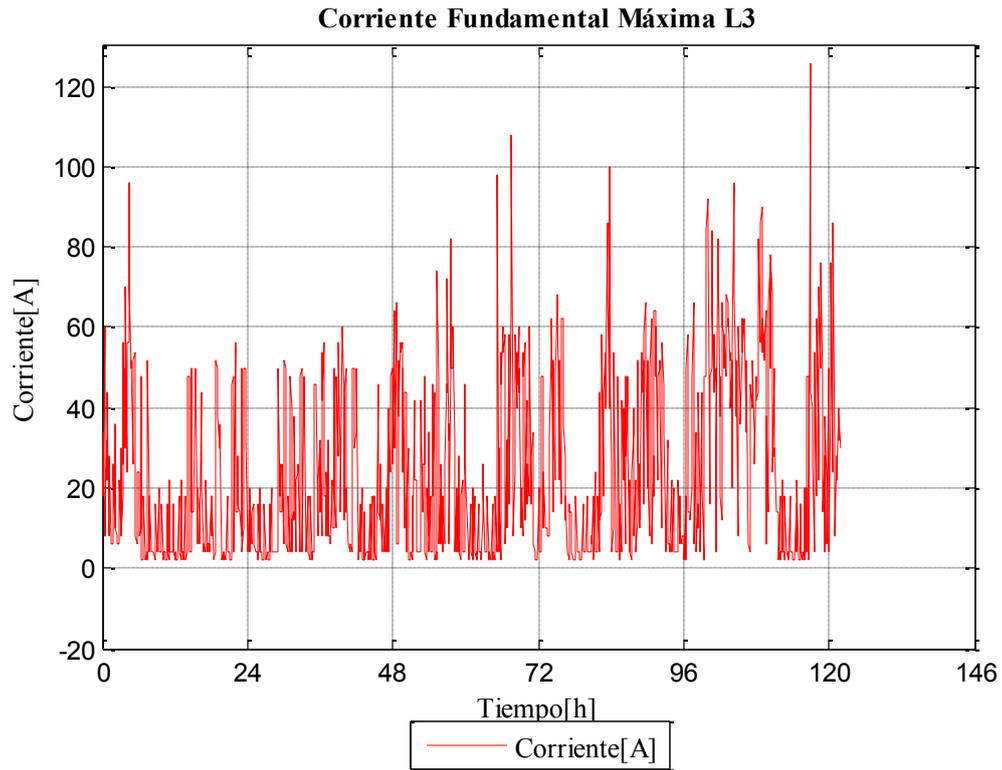
**Figura 3.2.1.6.** Nivel mínimo de corriente en la Línea 2.  
Elaborado por: Diego Játiva

**Tabla 3.2.1.2.** Datos de niveles máximos, medio y mínimo de corriente en la Línea 2

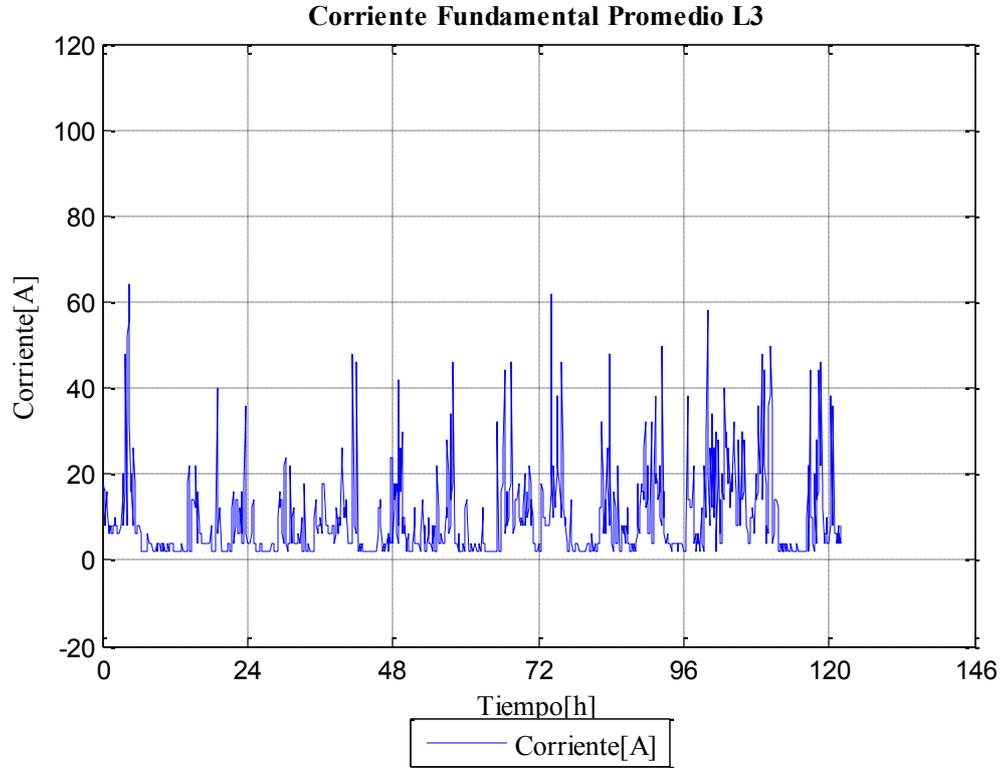
	Corriente Máxima L2	Corriente Mínima L2	Corriente Media L2
Valor máximo [A]	112	68	74
Valor mínimo [A]	2	0	2
Valor medio [A]	31.12	9.01	10.97

Elaborado por: Diego Játiva.

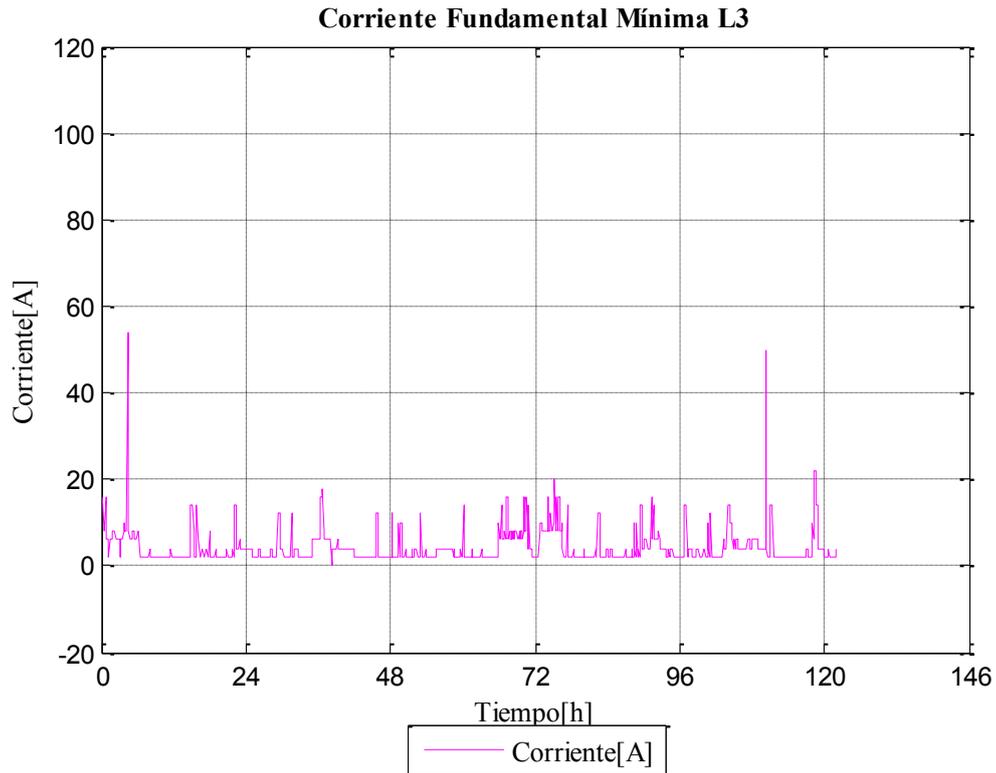
La corriente en la Línea 2 alcanza valores máximos de 112 [A], el valor medio de la corriente máxima es de 31.12 [A] lo que indica nuevamente que esos picos de corriente son escasos, en promedio la corriente se encuentra en 10.97 [A].



**Figura 3.2.1.7.** Nivel máximo de corriente en la Línea 3.  
Elaborado por: Diego Játiva



**Figura 3.2.1.8.** Nivel medio de corriente en la Línea 3.  
Elaborado por: Diego Játiva



**Figura 3.2.1.9.** Nivel mínimo de corriente en la Línea 3.  
Elaborado por: Diego Játiva

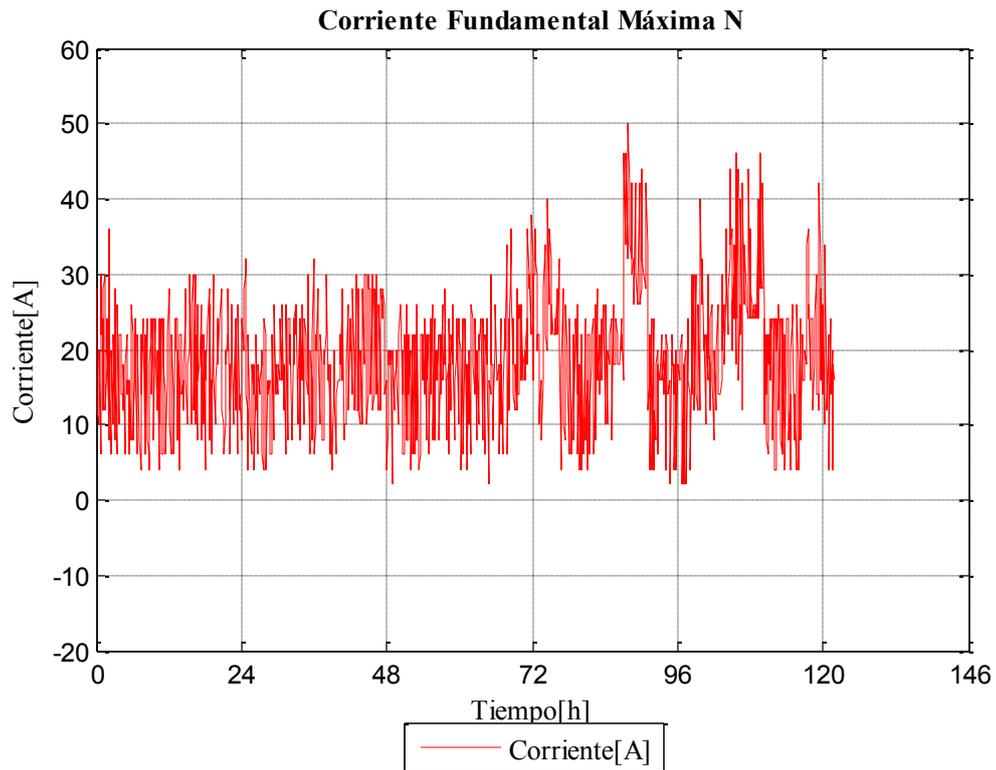
**Tabla 3.2.1.3.** Datos de niveles máximos, medio y mínimo de corriente en la Línea 3

	Corriente Máxima L3	Corriente Mínima L3	Corriente Media L3
Valor máximo [A]	126	54	64
Valor mínimo [A]	2	0	2
Valor medio [A]	23.80	4.33	9.34

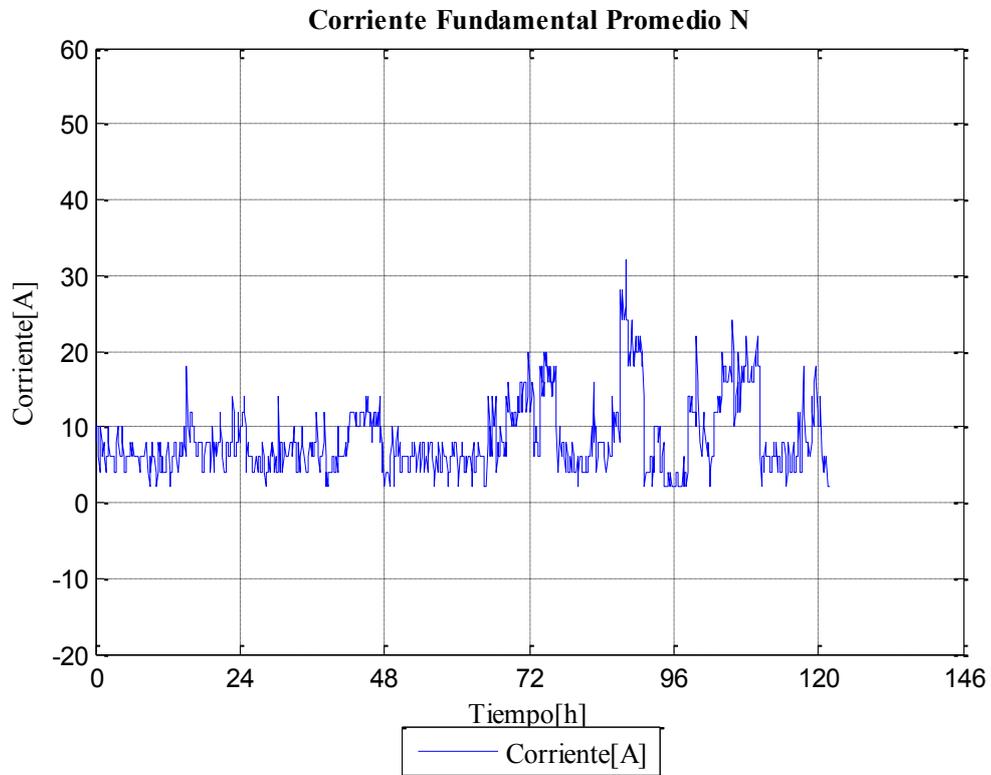
Elaborado por: Diego Játiva.

La corriente en la Línea 3 alcanza valores máximos de 126 [A], el valor medio de la corriente máxima es de 23.80 [A] los picos de corriente son escasos y por esta razón se encuentra este valor, en promedio la corriente se encuentra en 9.34 [A].

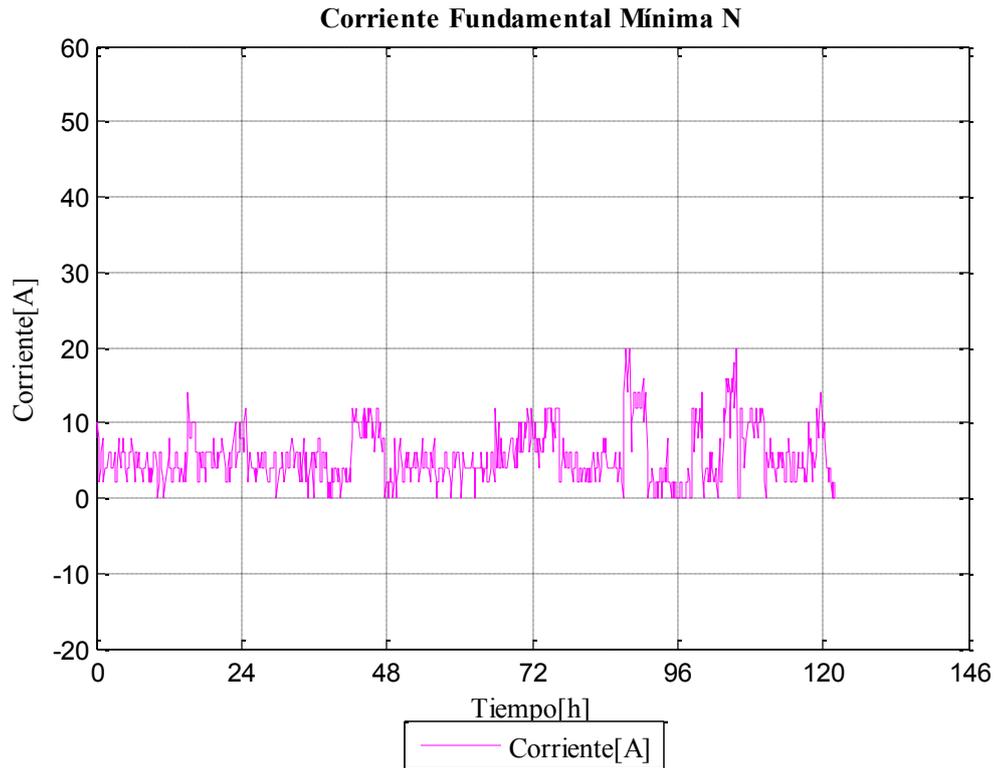
En los registros realizados se puede observar que existe una corriente en el neutro lo que nos indica que el sistema se encuentra desbalanceado.



**Figura 3.2.1.10.** Nivel máximo de corriente en el Neutro.  
Elaborado por: Diego Játiva



**Figura 3.2.1.11.** Nivel medio de corriente en el Neutro.  
Elaborado por: Diego Játiva



**Figura 3.2.1.12.** Nivel mínimo de corriente en el Neutro.  
Elaborado por: Diego Játiva

**Tabla 3.2.1.4.** Datos de niveles máximos, medio y mínimo de corriente en el Neutro

	Corriente Máxima L3	Corriente Mínima L3	Corriente Media L3
Valor máximo [A]	50	20	32
Valor mínimo [A]	2	0	2
Valor medio [A]	18.75	5.46	8.31

Elaborado por: Diego Játiva.

La corriente en el neutro alcanza valores máximos de 50 [A], el valor medio de la corriente máxima es de 18.75 [A] los picos de corriente son escasos y por esta razón se encuentra este valor, en promedio la corriente se encuentra en 8.31 [A].

### 3.2.2. Distorsión armónica individual de corriente Línea 1

Para calcular este índice se toman valores desde el armónico número 2 hasta el número 20 debido a que los armónicos de orden mayor a 20 son nulos, la metodología aplicada corresponde a la regulación No. ARCONEL 005/18 en donde se indica los límites para cada armónico, la selección de estos se da según la relación de  $I_{cc}/I_L$ .

Para el cálculo de la  $I_{cc}$  es necesario contar con la información del transformador que abastece al inmueble, estos datos son proporcionados por la EEQ en un membrete

presente en la acometida expresa

**Tabla 3.2.2.** Datos del transformador.

<b>Transformador</b>	<b>Datos</b>
<b>Número empresa</b>	49474
<b>Potencia (kVA)</b>	300
<b>Número de fases</b>	3
<b>Bajo voltaje</b>	220/127

Elaborado por: Diego Játiva.

En el caso de la impedancia del transformador se toma el valor mínimo recomendado o el peor de los casos para transformadores de estas características según [34], correspondiente a un valor de 2%.

Con esta información se procede a calcular la  $I_{cc}$  en el PCC según lo indica la regulación No. ARCONEL 005/18, en este caso el PCC se trata del tablero principal del hotel Old Town Quito Suites debido a que el inmueble posee una acometida expresa, para este cálculo utilizamos la siguiente expresión matemática[6][35]:

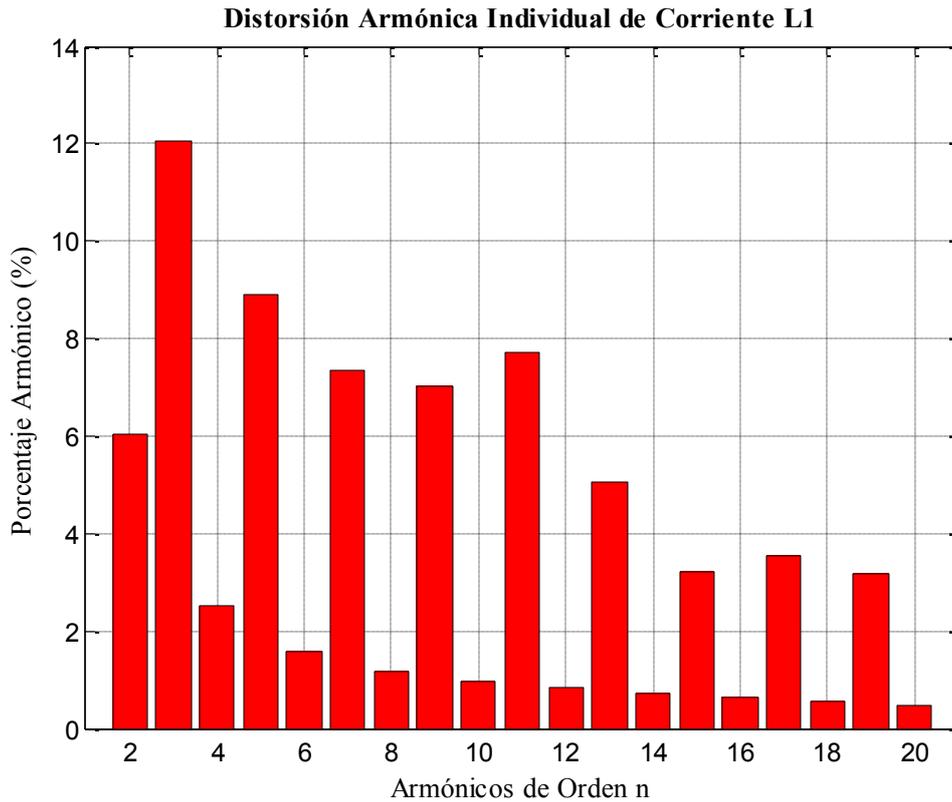
$$I_{cc} = \frac{S * 100}{\sqrt{3} * V_{sec} * (\% Z \text{ transformador})} \quad (40)$$

$$I_{cc} = \frac{300 \text{ [kVA]} * 100}{\sqrt{3} * 0.22 \text{ [kV]} * (2)} \quad (41)$$

Donde:

- $I_{cc}$  Corriente de corto circuito en el secundario.
- $V_{sec}$  Voltaje en el secundario [kV].
- $S$  Potencia del transformador en [kVA].
- $z$  Impedancia porcentual (%) del transformador y del conductor.

El valor encontrado es de 39.3647 kA. Para encontrar la  $I_L$  se debe calcular un promedio de las corrientes máximas registradas en cada una de las líneas, a estos valores se los dividió para la  $I_{cc}$  y se obtuvo un resultado máximo de 1213.0981 amperios. Esto nos ubica en la quinta fila de la Tabla de donde se seleccionan los límites.



**Figura 3.2.2.** Armónicos de corriente en la Línea 1.  
Elaborado por: Diego Játiva

La Figura 3.2.2 nos muestra el porcentaje en que contribuyen individualmente cada uno de los armónicos presentes en la Línea 1, se puede apreciar que el armónico de orden impar que se ve predominante es el de orden H3 que alcanza un valor promedio 12,0496 de la corriente fundamental, también se puede ver una importante presencia de los armónicos de orden H5, H7, H9 y H11 con valores que casi llegan al 10%. En el orden de armónicos pares el predominante en el de orden H2 el cual alcanza un valor de 6,0256, el resto de armónicos pares no toman valores demasiado elevados ya que no sobrepasan el 3%.

**Tabla 3.2.2.1.** Datos de armónicos individuales de corriente en la Línea 1.

Componente armónico	Línea 1	% de Cumplimiento datos recopilados en 7 días	Limites regulación No. ARCONEL 005/18	¿Cumple con la regulación?
H2	6.0256	15.4528	3.75	NO
H3	12.0496	76.8701	15	NO
H4	2.5207	85.8268	3.75	NO
H5	8.9121	86.3189	15	NO
H6	1.5665	99.7047	3.75	SI

<b>H7</b>	7.3515	90.5512	15	NO
<b>H8</b>	1.1686	100.000	3.75	SI
<b>H9</b>	7.0394	89.5669	15	NO
<b>H10</b>	0.9649	99.7047	2.75	SI
<b>H11</b>	7.7321	76.2795	11	NO
<b>H12</b>	0.8294	100.000	2.75	SI
<b>H13</b>	5.0560	91.8307	11	NO
<b>H14</b>	0.7019	100.0000	2.75	SI
<b>H15</b>	3.2168	95.9646	11	SI
<b>H16</b>	0.6232	99.7047	1.5	SI
<b>H17</b>	3.5391	87.6969	6	NO
<b>H18</b>	0.5521	99.7047	1.5	SI
<b>H19</b>	3.1928	89.5669	6	NO
<b>H20</b>	0.4861	99.9016	1.5	SI

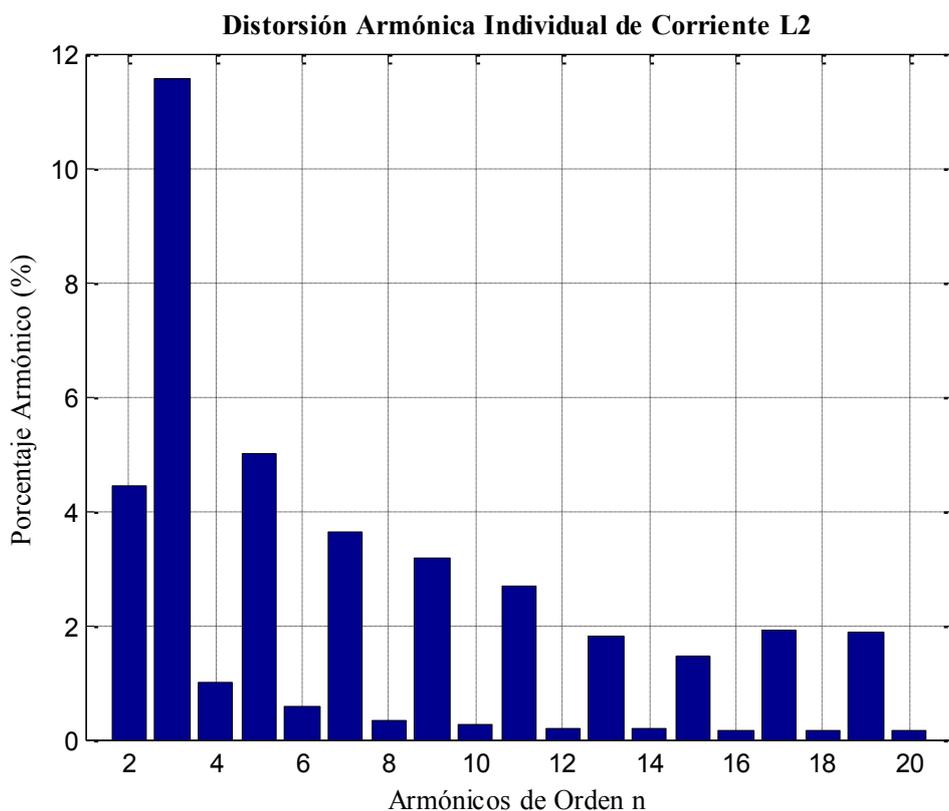
Elaborado por: Diego Játiva.

En la Tabla 3.2.2.1 se muestra que, si bien algunos de los valores promedio de los armónicos se encuentran bajo los límites establecidos, la regulación establece que el 95% de los datos recopilados en el tiempo que se realizó la medición deben tener un valor igual o menor a los límites para cada armónico. Para el armónico de orden H2 y H3 es evidente que inclusive su promedio se encuentra fuera de los límites y esto se ve reflejado en el porcentaje de cumplimiento que estos presentan 15.4528 y 76.8701 respectivamente, si hacemos una evaluación del número de registros que se encontraron dentro de esos límites en el caso del armónico H2 únicamente 157 de los 1016 valores registrados se encontraban dentro del límite establecido por la regulación.

Para el caso del armónico H5 que tiene un valor promedio de 8.9121%, el límite que le corresponde tiene un valor de 15%, el armónico de orden H5 aparentemente se encuentra bajo el límite que establece la norma, pero únicamente 86.3189% de los valores registrados en el periodo de tiempo que se realizó la medición para este armónico tienen un valor igual o menor al límite establecido. El promedio toma ese valor debido a que este armónico pudo tomar valores mucho más elevados a los que plantea el límite y de igual forma en instantes pudo tomar valores cercanos a cero.

Este mismo comportamiento se ve reflejado en las Líneas 2 ,3 y el neutro, en donde no necesariamente el valor promedio que toma cada armónico de orden par o impar presente quiere decir que están cumpliendo con la norma.

### 3.2.3. Distorsión armónica individual de corriente Línea 2



**Figura 3.2.3.** Armónicos de corriente en la Línea 2.  
Elaborado por: Diego Játiva

En la Figura 3.2.3 se puede visualizar que los armónicos predominantes en el orden par e impar son los armónicos de orden H2 y H3 respectivamente, a diferencia que esta vez la contribución de las demás componentes armónicas no toman valores considerables. En el caso de las armónicas impares a excepción de la armónica H3 no sobrepasan el 6 % y en las armónicas de orden par no llegan al 2 % de la corriente fundamental.

**Tabla 3.2.3.** Datos de armónicos individuales de corriente en la Línea 2.

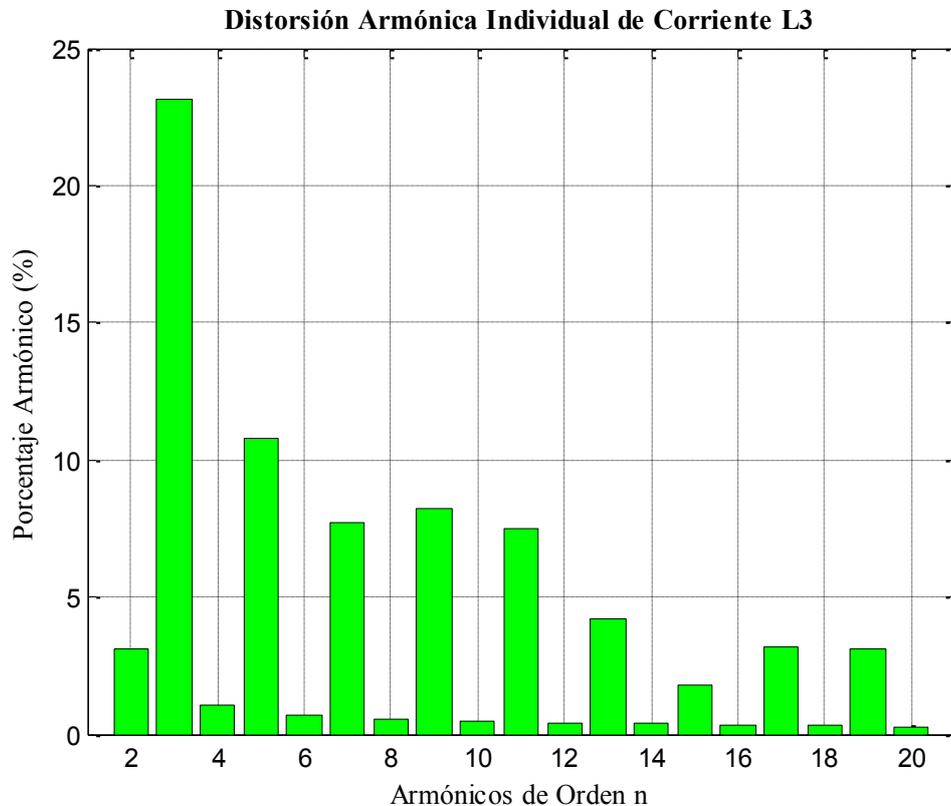
Componente armónico	Línea 2	% de Cumplimiento datos recopilados en 7 días	Limites regulación No. ARCONEL 005/18	¿Cumple con la regulación?
H2	4.4359	46.7520	3.75	NO
H3	11.5714	78.9370	15	NO
H4	0.9932	99.8031	3.75	SI
H5	4.9932	95.4724	15	SI
H6	0.5686	99.9016	3.75	SI
H7	3.6200	99.6063	15	SI
H8	0.3351	100.000	3.75	SI
H9	3.1787	100.000	15	SI

H10	0.2483	100.000	2.75	SI
H11	2.6694	99.6063	11	SI
H12	0.2079	100.000	2.75	SI
H13	1.8186	100.000	11	SI
H14	0.1835	100.000	2.75	SI
H15	1.4618	100.000	11	SI
H16	0.1654	99.9016	1.5	SI
H17	1.9139	96.8504	6	SI
H18	0.1493	99.9016	1.5	SI
H19	1.8653	97.1457	6	SI
H20	0.1404	100.000	1.5	SI

Elaborado por: Diego Játiva.

En la Tabla 3.2.3 se puede verificar lo que se presenta en forma de histograma en la Figura 3.2.3, para este caso los únicos armónicos que no cumplen con los límites establecidos por la norma son los armónicos de orden H2 y H3, el armónico H2 únicamente el 46.7520% de los registros se encuentran bajo el límite de 3.75 %. El armónico H3 el 78.9370% de los valores registrados se encuentran dentro de los límites, el resto de armónicos presentes en esta línea están bajo los límites deseados.

### 3.24. Distorsión armónica individual de corriente Línea 3



**Figura 3.2.4.** Armónicos de corriente en la Línea 3.  
Elaborado por: Diego Játiva

En la Figura 3.2.4 se puede apreciar que los armónicos de orden impar se presentan de

forma importante, el armónico predominante sigue siendo el de orden H3, que alcanza valores mayores al 20 % de la corriente fundamental y los armónicos de orden H5, H7, H9, H11 se encuentran sobre el 5 %. En el caso de armónicos pares estos no presentan un mayor aporte, el armónico H2 que es el predominante no llega a valores del 5 % y los armónicos pares que le siguen se ven casi nulos.

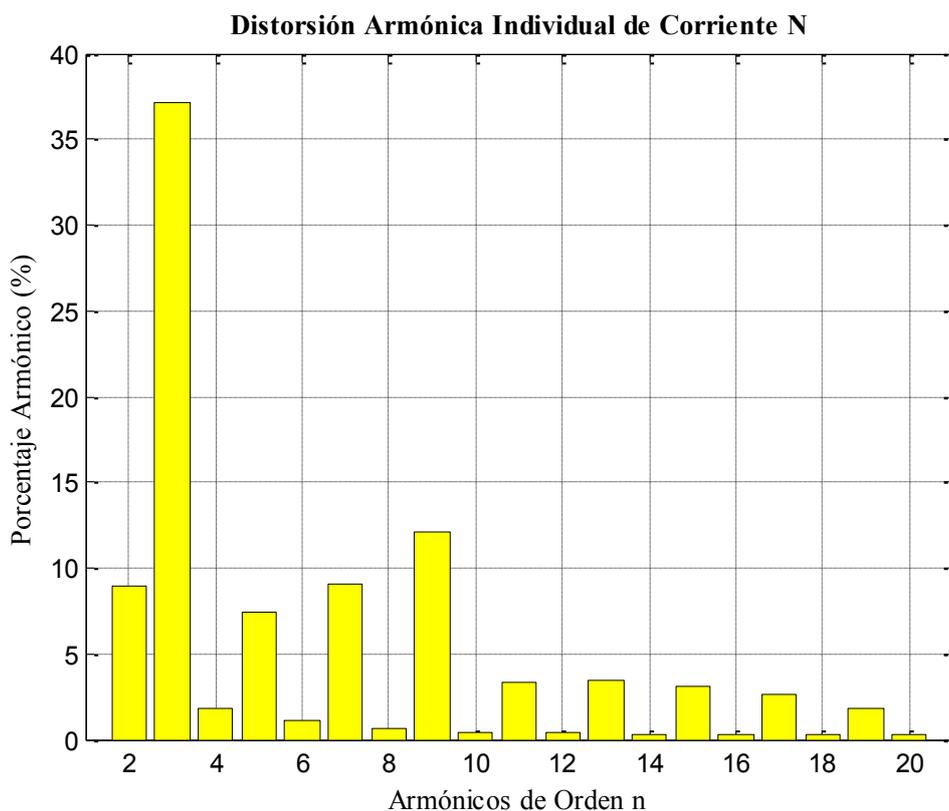
**Tabla 3.2.4.** Datos de armónicos individuales de corriente en la Línea 3.

Componente armónico	Línea 3	% de Cumplimiento datos recopilados en 7 días	Limites regulación No. ARCONEL 005/18	¿Cumple con la regulación?
H2	3.1239	70.5709	3.75	NO
H3	2.31539	27.1654	15	NO
H4	1.0623	99.8031	3.75	SI
H5	10.7871	74.1142	15	NO
H6	0.7164	99.9016	3.75	SI
H7	7.7074	91.3386	15	NO
H8	0.5481	100.000	3.75	SI
H9	8.2154	95.3740	15	SI
H10	0.4853	99.9016	2.75	SI
H11	7.5185	84.4488	11	NO
H12	0.4249	100.000	2.75	SI
H13	4.2019	99.1142	11	SI
H14	0.3695	10.0000	2.75	SI
H15	1.7931	100.000	11	SI
H16	0.3289	99.9016	1.5	SI
H17	3.2073	92.0276	6	NO
H18	0.3017	99.9016	1.5	SI
H19	3.1123	92.3228	6	NO
H20	0.2703	100.000	1.5	SI

Elaborado por: Diego Játiva.

En la Tabla 3.2.4 se puede verificar que los armónicos impares desde el armónico H3 hasta el H11 con excepción del H9 se encuentran fuera de los límites, de igual forma los armónicos H17 y H19 también se encuentran fuera de los límites, pero con menos de 3 puntos porcentuales, los armónicos de orden par se ven dentro de la norma y únicamente el armónico H2 se encuentra fuera de los límites.

### 3.2.5. Distorsión armónica individual de corriente en el Neutro



**Figura 3.2.5.** Armónicos de corriente en el Neutro.  
Elaborado por: Diego Játiva

La Figura 3.2.5 nos muestra la presencia de armónicos de corriente en el neutro debido a la presencia de corriente por el mismo, el armónico H3 tiene un valor demasiado pronunciado alcanzando más del 35 % de la fundamental, de igual forma el armónico H5, H7 se ven con más del 5 % de aporte y el armónico H9 sobrepasa el 10 % esto indica que en el neutro circulan corrientes demasiado elevadas debido a la contaminación armónica.

**Tabla 3.2.5.** Datos de armónicos individuales de corriente en el Neutro.

Componente armónico	Neutro	% de Cumplimiento datos recopilados en 7 días	Limites regulación No. ARCONEL 005/18	¿Cumple con la regulación?
H2	8.9439	13.7795	3.75	NO
H3	37.1416	11.1220	15	NO
H4	1.8059	94.7835	3.75	NO
H5	7.3832	92.2244	15	NO
H6	1.0998	99.0157	3.75	SI
H7	9.1090	90.9449	15	NO
H8	0.5850	99.7047	3.75	SI
H9	12.1041	83.0709	15	NO

H10	0.4650	99.6063	2.75	SI
H11	3.3767	96.1614	11	SI
H12	0.4356	99.5079	2.75	SI
H13	3.4534	96.8504	11	SI
H14	0.3391	99.9016	2.75	SI
H15	3.1309	96.4567	11	SI
H16	0.3074	98.9173	1.5	SI
H17	2.5959	93.7008	6	NO
H18	0.2597	99.5079	1.5	SI
H19	1.7572	96.5551	6	SI
H20	0.2402	99.4094	1.5	SI

Elaborado por: Diego Játiva.

La Tabla 3.2.5 nos muestra que el armónico H3 es el predominante en el orden impar, únicamente el 11.1220 % de los valores registrados se encuentran dentro de los límites, en el caso de los armónicos de orden par el H2 es el predominante con el 13.7795 % de los valores dentro del límite.

### 3.2.6. Cálculo del factor de distorsión de demanda total TDD

Para realizar este cálculo se toma la metodología de la regulación No. ARCONEL 005/18.

**Tabla 3.2.6.** Datos de distorsión de demanda total del sistema.

#	TDD (%)	% de Cumplimiento	Limites regulación No. ARCONEL 005/18	¿Cumple con la regulación?
<b>Línea 1</b>	23.3908	51.8701	20	NO
<b>Línea 2</b>	15.5593	79.2323	20	NO
<b>Línea 3</b>	30.4849	27.4606	20	NO
<b>Neutro</b>	43.4132	14.2717	20	NO

Elaborado por: Diego Játiva.

La Tabla 3.2.6 nos muestra que ninguna de las líneas cumple con el TDD, si bien la Línea 2 tiene un promedio de 15.5593 % y aparentemente se encuentra dentro del límite únicamente el 79.2323 % de los valores registrados en el periodo de 7 días se encuentran en las condiciones deseables, en el caso de la Línea 1, 3 y el Neutro no únicamente su promedio se encuentra fuera del límite deseado, el porcentaje de valores registrados que cumplen con la regulación es muy bajo, de forma particular se debe señalar al neutro donde únicamente el 14.2717 % cumple con la regulación.

### 3.3. Aspecto calidad del producto

Es importante conocer la calidad del suministro de energía eléctrica a la cual accede el usuario, de esta forma se tiene una visión más completa del comportamiento de las

variables eléctricas establecidas para la calidad según la responsabilidad del consumidor, debido a que no se puede exigir al usuario cumplir con parámetros de calidad que la propia empresa distribuidora no cumple en el producto que le entrega.

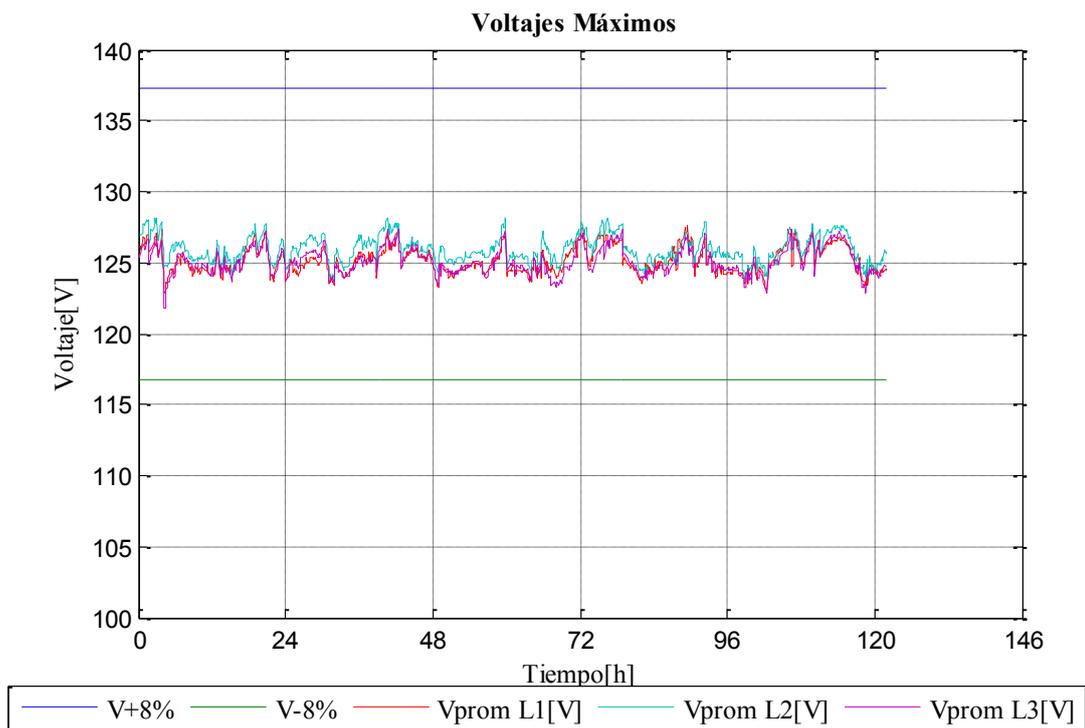
La regulación No. ARCONEL 005/18 plantea realizar un análisis de: Nivel de voltaje, Perturbaciones rápidas de voltaje (Flicker), Distorsión armónica de voltaje y Desequilibrio de voltaje, en este trabajo se realiza además de lo que solicita la norma un análisis adicional del factor de potencia.

### **3.3.1. Nivel de voltaje**

Este análisis se realiza en base a los niveles de voltaje máximos, promedios y mínimos registrados en todo el periodo de medición, los límites admisibles para bajo voltaje no deben exceder el  $\pm 8$  % del voltaje fundamental (127V) según la regulación No. ARCONEL 005/18.

En la Figura 3.3.1.1 hasta Figura 3.3.1.3 se puede observar que los valores máximos, promedio y mínimos de voltaje en cada una de las líneas se mantienen dentro de los parámetros establecidos, cabe recalcar que por un instante de tiempo la Línea 3 dejó de prestar el servicio, este evento pudo haberse presentado por una desconexión de esta línea por parte de la distribuidora, pero posteriormente fue reconectada.

Desde la Tabla 3.3.1.1 hasta la Tabla 3.3.1.3 se puede observar un resumen de los valores registrados en cuanto a voltajes máximos, promedio y mínimos en cada una de las líneas, además se presenta el porcentaje de los valores registrados que se encuentran dentro de los parámetros que establece la regulación No. ARCONEL 005/18, los mismos que cumplen su totalidad con más del 95 % de registros dentro de estos límites.

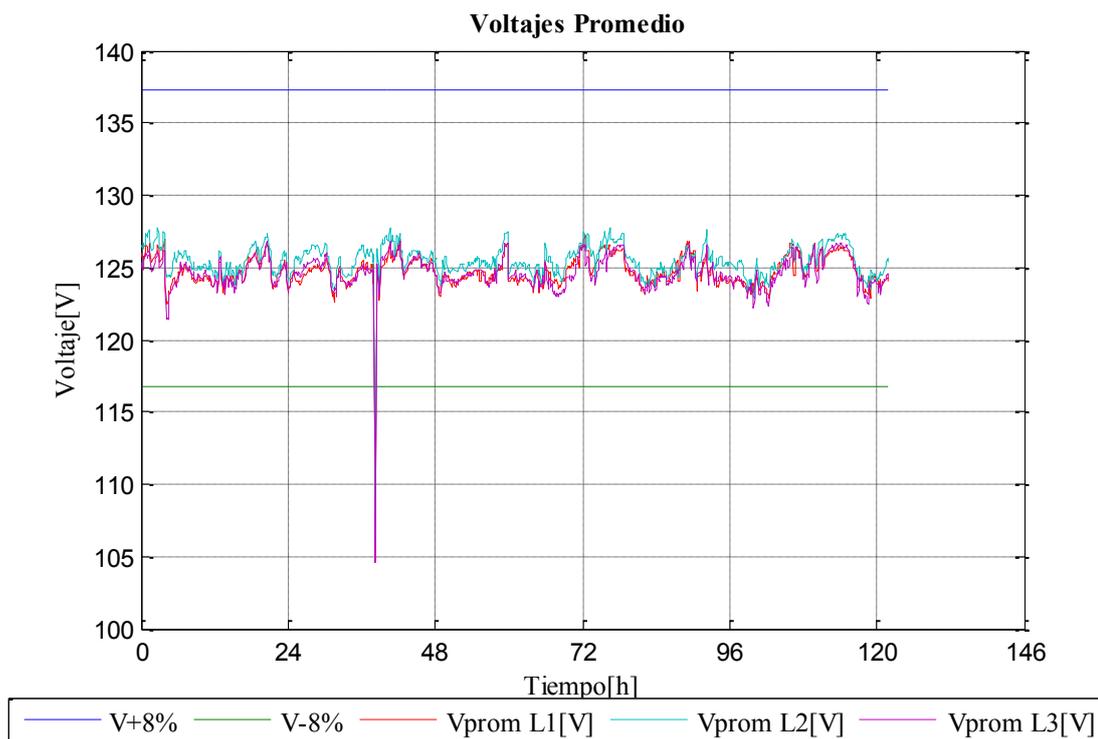


**Figura 3.3.1.1.** Niveles máximos de voltaje.  
Elaborado por: Diego Játiva

**Tabla 3.3.1.1.** Datos de niveles máximos de voltaje fases-neutro.

#	L1N	L2N	L3N
<b>Valor máximo [V]</b>	127.6	128.2	127.3
<b>Valor mínimo [V]</b>	122.8	123.8	121.8
<b>Valor promedio [V]</b>	125.17	125.94	125.10
<b>% que cumple con los límites ± 8%</b>	100	100	100

Elaborado por: Diego Játiva.

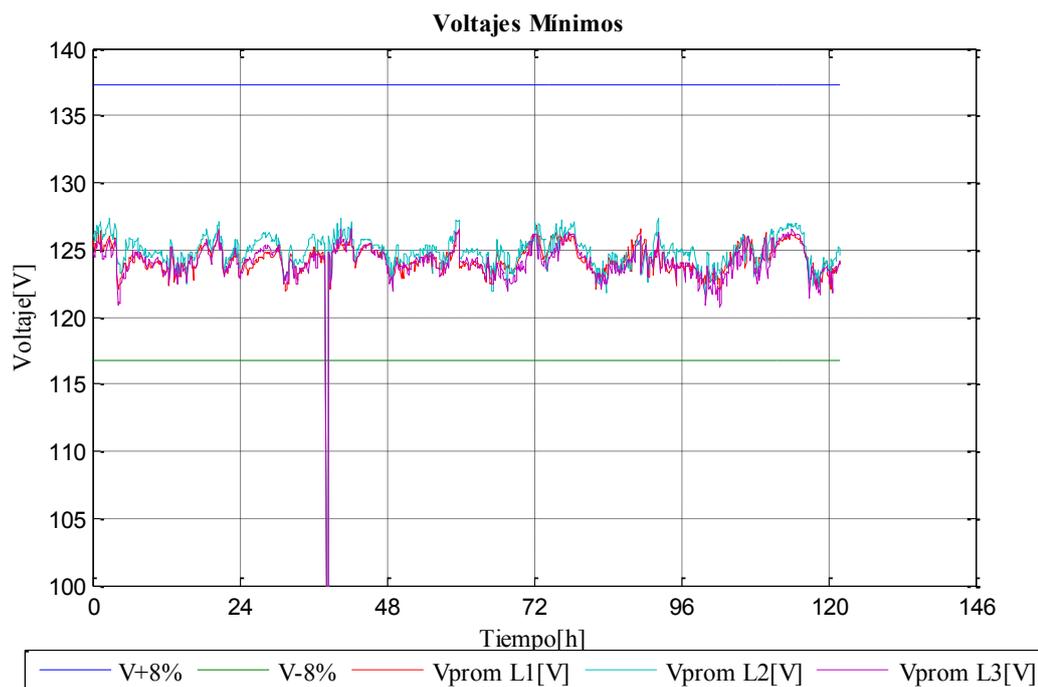


**Figura 3.3.1.2.** Niveles promedio de voltaje.  
Elaborado por: Diego Játiva

**Tabla 3.3.1.2.** Datos de niveles promedio de voltaje fases-neutro.

#	L1N	L2N	L3N
<b>Valor máximo [V]</b>	127.2	127.8	126.8
<b>Valor mínimo [V]</b>	104.7	105.6	104.6
<b>Valor promedio [V]</b>	124.73	125.46	124.66
<b>% que cumple con los límites ± 8%</b>	99.80	99.80	99.80

Elaborado por: Diego Játiva.



**Figura 3.3.1.3.** Niveles mínimos de voltaje.  
Elaborado por: Diego Játiva

**Tabla 3.3.1.3.** Datos de niveles promedio de voltaje fases-neutro.

#	L1N	L2N	L3N
<b>Valor máximo [V]</b>	126.8	127.4	126.5
<b>Valor mínimo [V]</b>	0	0	0
<b>Valor promedio [V]</b>	124.07	124.67	123.91
<b>% que cumple con los límites <math>\pm</math> 8%</b>	99.80	99.80	99.80

Elaborado por: Diego Játiva.

Para finalizar en la Tabla 3.3.1.4 se presenta un resumen del cumplimiento de los niveles de voltaje en sus máximos, mínimos y promedio en todo el sistema.

**Tabla 3.3.1.4.** Resumen del cumplimiento de los niveles de voltaje.

¿Cumple con la norma?	Niveles máximos	Niveles mínimos	Niveles promedio
<b>No. ARCONEL 005/18</b>	SI	SI	SI

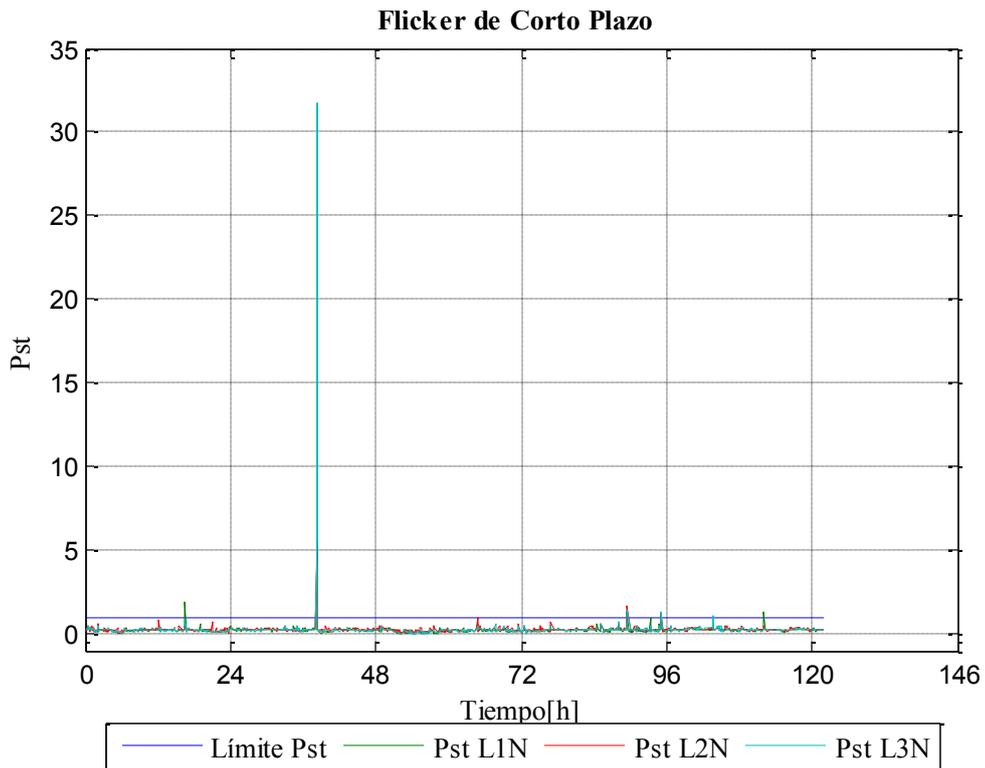
Elaborado por: Diego Játiva.

### 3.3.2. Perturbaciones rápidas de voltaje (Flicker)

Para este análisis se toman los datos registrados en cuanto a Flicker de corto plazo (Pst) y de largo plazo (Plt), siendo el límite máximo permitido según la regulación No. ARCONEL 005/18 la unidad. De igual forma se establece que los valores registrados deben estar al menos el 95 % dentro de los límites que plantea la norma, para que se

cumpla con la misma.

En la Figura 3.3.2.1 correspondiente al (Pst) se puede distinguir el número de veces que cada una de las líneas cruza el límite, las líneas que más veces lo cruzan son la uno y la tres, en el caso de la línea dos solo lo hace en dos ocasiones. En la Tabla 3.3.2.1 se muestran los valores máximos, promedio y mínimos en cada una de las líneas y el porcentaje de registros que cumplen con la normativa.



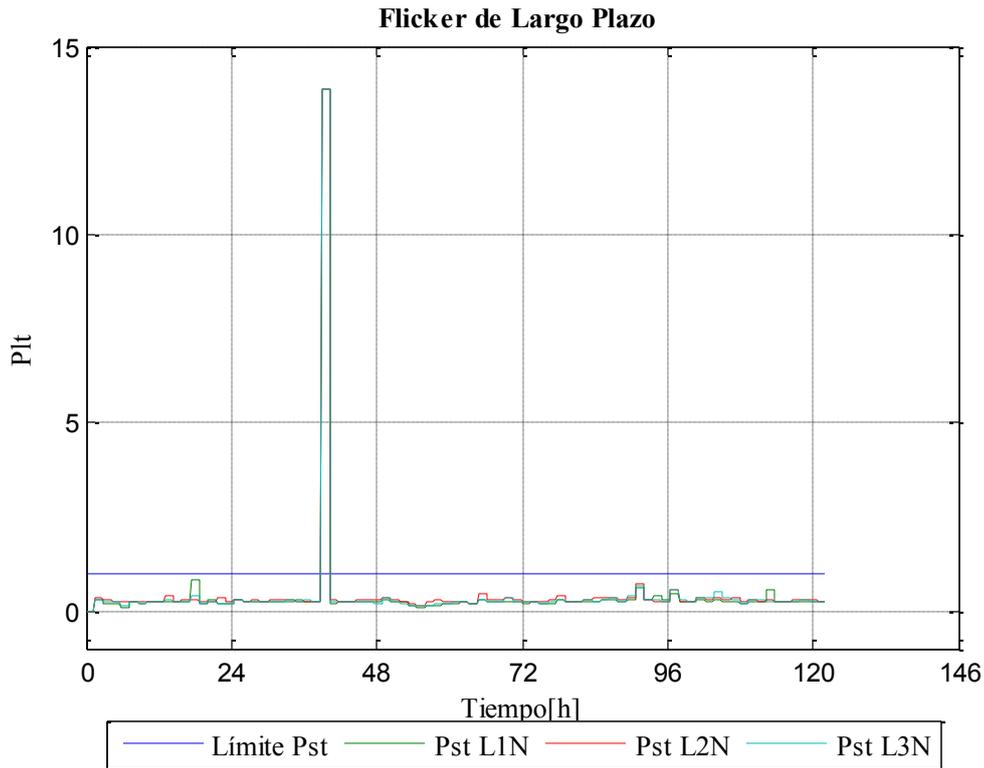
**Figura 3.3.2.1.** Flicker de corto plazo (Pst).  
Elaborado por: Diego Játiva

**Tabla 3.3.2.1.** Datos de niveles Flicker de corto plazo (Pst).

#	L1N	L2N	L3N
Valor máximo	31.655	31.713	31.668
Valor mínimo	0.051	0.05	0.049
Valor promedio	0.2586	0.2931	0.2747
% que cumple con los límites de 1	99.4094	99.6063	99.5079

Elaborado por: Diego Játiva.

En la Figura 3.3.2.2 se muestra el Flicker de larga duración (Plt), podemos ver que las tres líneas sobrepasaron el límite en el mismo instante con amplitudes idénticas, todos estos valores se presentan en la Tabla 3.3.2.2.



**Figura 3.3.2.2.** Flicker de largo plazo (Plt).  
Elaborado por: Diego Játiva

**Tabla 3.3.2.2.** Datos de niveles Flicker de corto plazo (Pst).

#	L1N	L2N	L3N
<b>Valor máximo</b>	13.84	13.87	13.85
<b>Valor mínimo</b>	0	0	0
<b>Valor promedio</b>	0.4287	0.4599	0.4384
<b>% que cumple con los límites de 1</b>	98.7004	98.7204	98.7204

Elaborado por: Diego Játiva.

Para finalizar se presenta un resumen en la Tabla 3.3.2.3 de las perturbaciones de voltaje (Pst) y (Plt) del cumplimiento con la regulación establecida.

**Tabla 3.3.2.3.** Resumen de perturbaciones de voltaje.

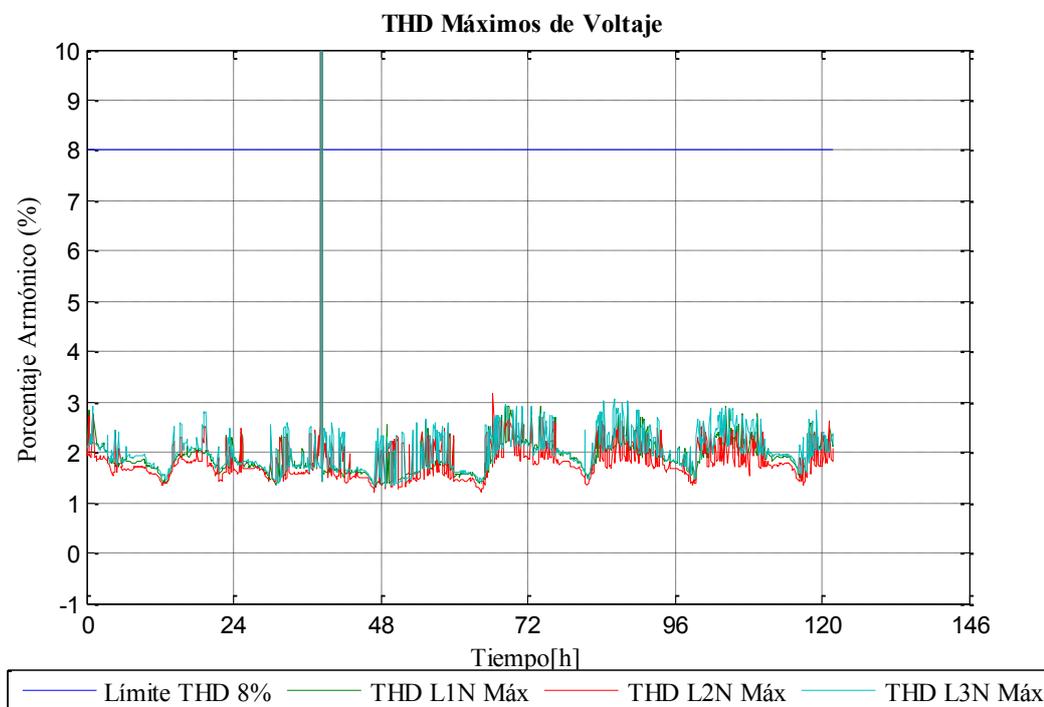
¿Cumple con la norma?	Pst	Plt
<b>No. ARCONEL 005/18</b>	SI	SI

Elaborado por: Diego Játiva.

### 3.3.3. Distorsión armónica de voltaje

En la Figura 3.3.3.1 hasta la figura 3.3.3.3 se muestra el THD máximo, promedio y mínimo respectivamente a través del tiempo, en el intervalo en que se realizaron los registros, es necesario señalar un evento que se presenta en la Figura 3.3.3.2 y 3.3.3.3 cuando THD supera el límite establecido y alcanza valores extremadamente altos, esto se

puede ver reflejado en las Tablas 3.3.3.1 y 3.3.3.2, de igual forma se presenta el % de registros que se encuentran debajo del límite establecido y se considera que se está cumpliendo con la norma si estos registros son del 95 %.

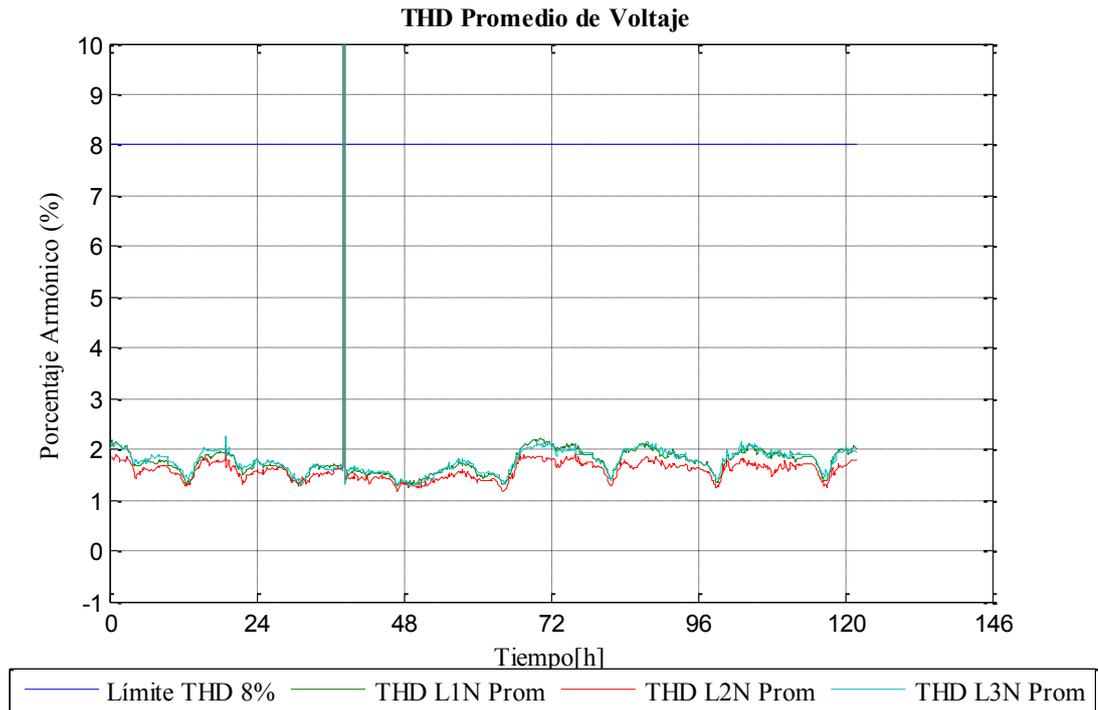


**Figura 3.3.3.1.** THD máximos de voltaje.  
Elaborado por: Diego Játiva

**Tabla 3.3.3.1.** Datos del THD máximo de voltaje.

#	L1N	L2N	L3N
<b>Valor máximo</b>	327.67	327.67	327.67
<b>Valor mínimo</b>	1.32	1.2	1.32
<b>Valor promedio</b>	2.53	2.47	2.65
<b>% que cumple con los límites de 1</b>	99.80	99.80	99.80

Elaborado por: Diego Játiva.

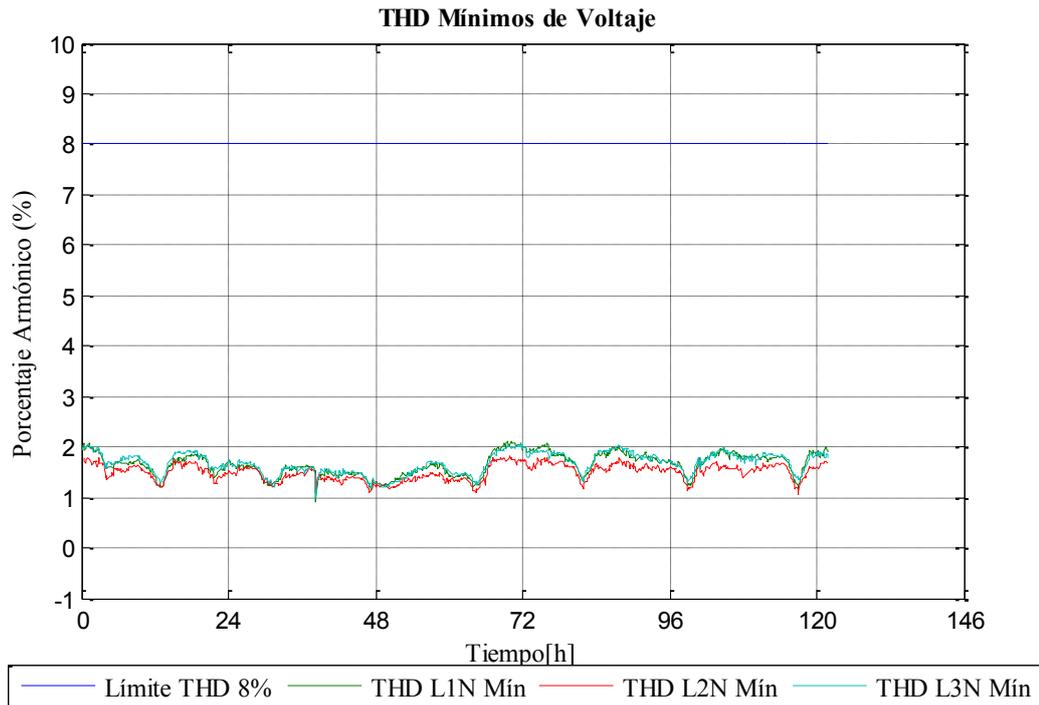


**Figura 3.3.3.2.** THD Promedios de voltaje.  
Elaborado por: Diego Játiva

**Tabla 3.3.3.2.** Datos del THD promedio de voltaje.

#	L1N	L2N	L3N
<b>Valor máximo</b>	327.67	327.67	327.67
<b>Valor mínimo</b>	1.28	1.15	1.28
<b>Valor promedio</b>	2.38	2.22	2.40
<b>% que cumple con los límites de 1</b>	99.80	99.80	99.80

Elaborado por: Diego Játiva.



**Figura 3.3.3.3.** THD mínimos de voltaje.  
Elaborado por: Diego Játiva

**Tabla 3.3.3.3.** Datos del THD mínimo de voltaje.

#	L1N	L2N	L3N
<b>Valor máximo</b>	2.12	1.82	2.06
<b>Valor mínimo</b>	0.93	1.04	0.97
<b>Valor promedio</b>	1.65	1.49	1.67
<b>% que cumple con los límites de 1</b>	100	100	100

Elaborado por: Diego Játiva.

En la Tabla 3.3.3.4 se presenta un resumen del cumplimiento de la distorsión armónica THD de voltaje en sus niveles máximos, promedio y mínimos.

**Tabla 3.3.3.4.** Resumen cumplimiento THD de voltaje.

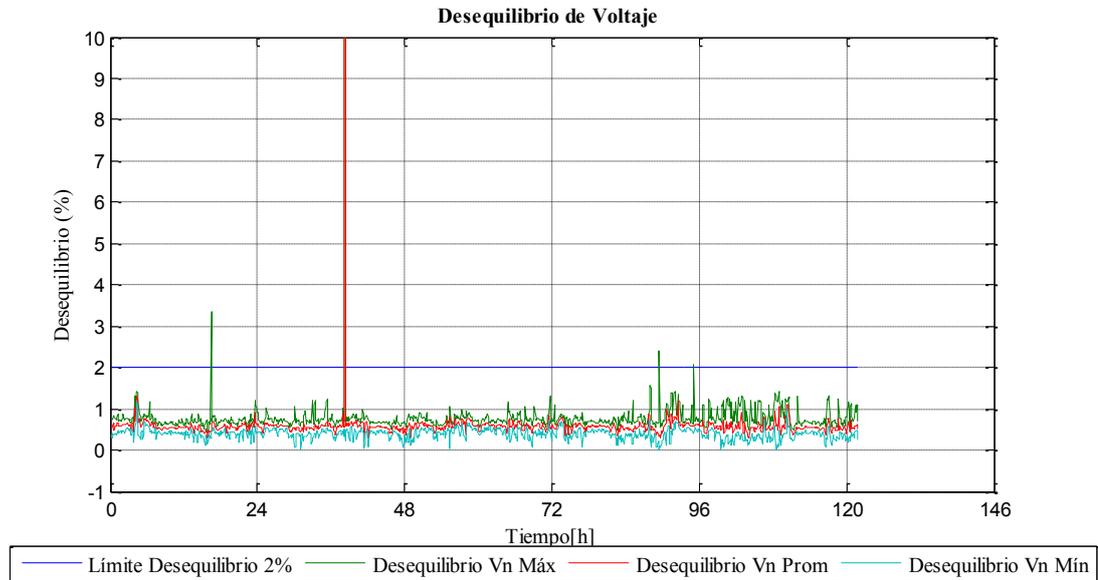
¿Cumple con la norma?	THD máximos	THD promedio	THD mínimos
<b>No. ARCONEL 005/18</b>	SI	SI	SI

Elaborado por: Diego Játiva.

### 3.3.4. Desequilibrio de voltaje

En la Figura 3.3.4.1 se presentan los niveles máximos, promedios y mínimos de desequilibrio de voltaje, se puede apreciar que en algunos instantes el límite de 2 % es superado, pero no alcanza valores importantes, el evento en que el desequilibrio tiene un valor demasiado elevado se ve registrado en la Tabla 3.3.4.1 donde se muestran los niveles máximos, promedios y mínimos registrados. De igual forma se presenta el

porcentaje de registros que cumplen con la norma para establecer si el desequilibrio de voltaje se encuentra dentro de lo requerido, los valores de desequilibrio promedio se ven elevados debido al evento que parece entre la hora 48 y 72 del registro, sin embargo, al ser un evento aislado el porcentaje de registros que cumple con la norma se encuentran sobre el 99 %.



**Figura 3.3.4.1.** Desequilibrio de voltajes máximos, promedios y mínimos.  
Elaborado por: Diego Játiva

**Tabla 3.3.4.1.** Datos del Desequilibrio de voltajes máximos, promedios y mínimos.

	Desequilibrio máximo	Desequilibrio promedio	Desequilibrio mínimo
Valor máximo	327.67	327.67	1.18
Valor mínimo	0.42	0.21	0
Valor promedio	1.41	1.21	0.39
% que cumple con los límites de 1	99.50	99.80	100

Elaborado por: Diego Játiva.

En la Tabla 3.3.4.2 se muestra un resumen del cumplimiento del desequilibrio de voltaje para los valores registrados.

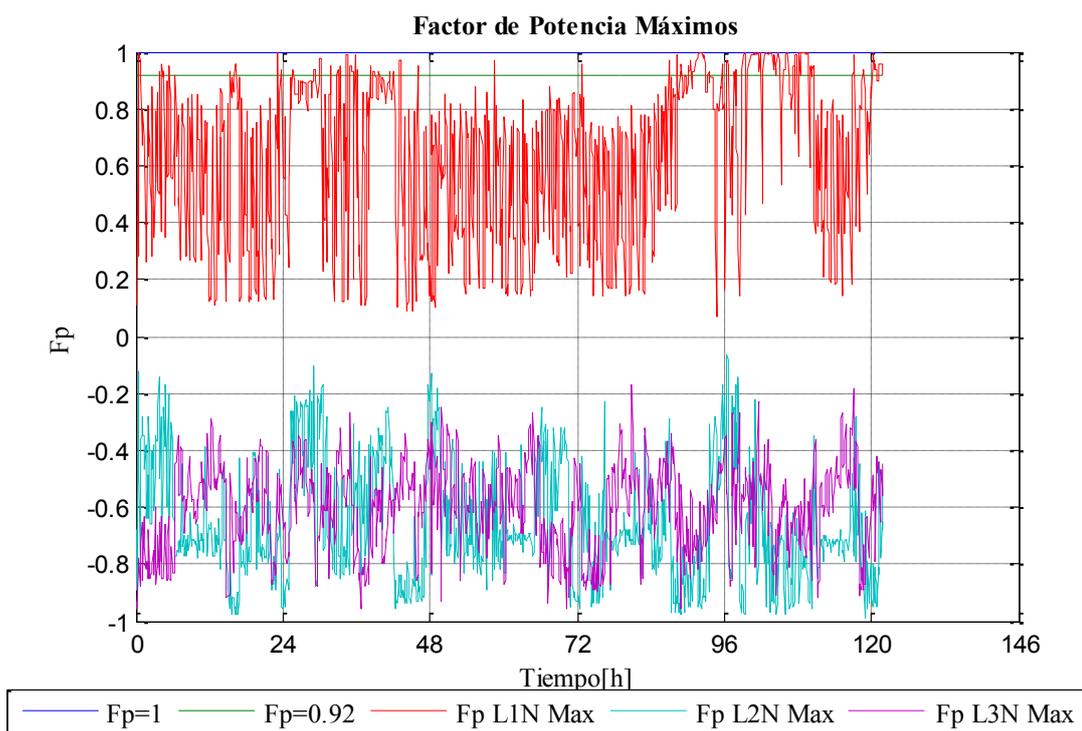
**Tabla 3.3.4.2.** Resumen Desequilibrio de voltajes máximos, promedios y mínimos.

¿Cumple con la norma?	Desequilibrio máximo	Desequilibrio promedio	Desequilibrio mínimo
No. ARCONEL 005/18	SI	SI	SI

Elaborado por: Diego Játiva.

### 3.3.5. Factor de potencia

En este análisis del factor de potencia se recopila toda la información registrada en los 7 días que se realizaron las mediciones, el valor deseado de factor de potencia es 1 y el valor mínimo es de 0.92, con este parámetro se plantean a continuación un análisis gráfico del comportamiento del factor de potencia en las Figuras 3.3.5.1 hasta Figura 3.3.5.4, de igual forma se plasman los valores máximos, promedio y mínimo en la Tabla 3.3.5.1 hasta Tabla 3.3.5.4.

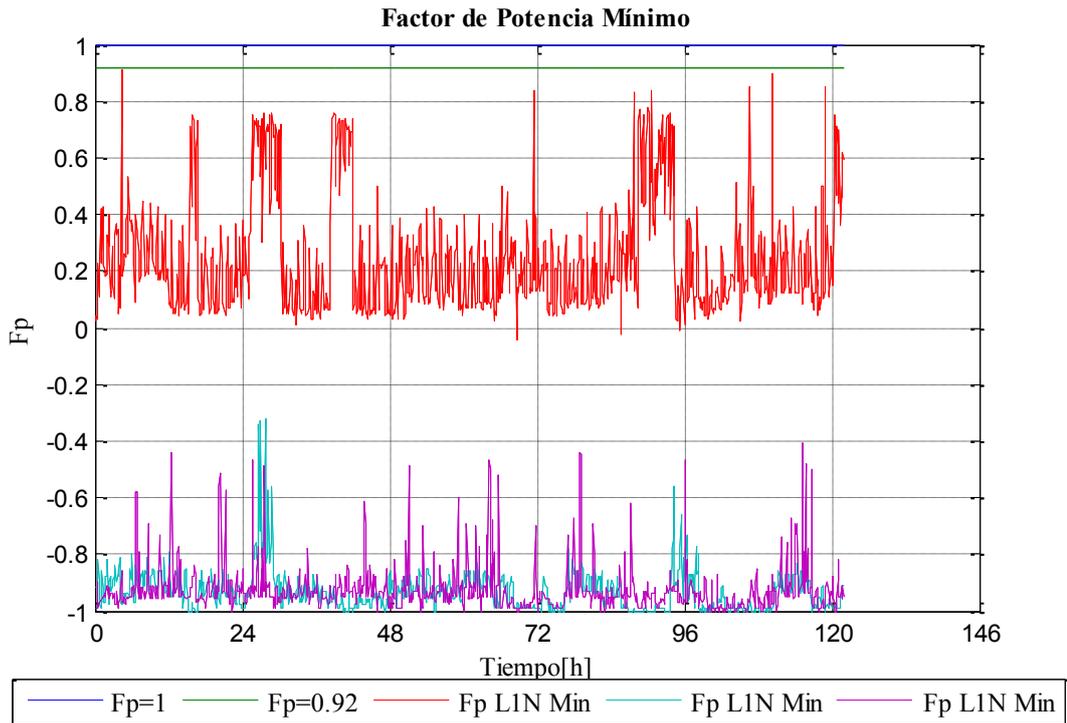


**Figura 3.3.5.1.** Factor de potencia máximo.  
Elaborado por: Diego Játiva

**Tabla 3.3.5.1.** Datos del factor de potencia máximo.

	L1N	L2N	L3N
<b>Valor máximo</b>	1	- 0.06	- 0.17
<b>Valor mínimo</b>	0.07	- 0.99	- 0.96
<b>Valor promedio</b>	0.63	-0.65	-0.60

Elaborado por: Diego Játiva.

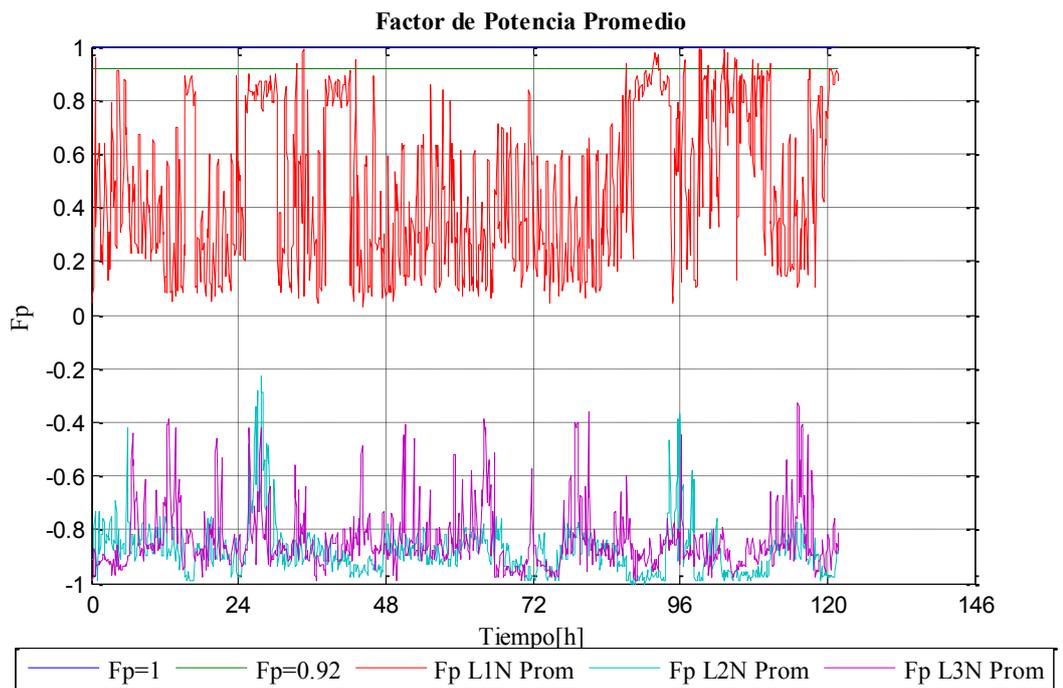


**Figura 3.3.5.2.** Factor de potencia mínimo.  
Elaborado por: Diego Játiva

**Tabla 3.3.5.2.** Datos del factor de potencia mínimo.

	L1N	L2N	L3N
<b>Valor máximo</b>	0.91	- 0.32	- 0.41
<b>Valor mínimo</b>	-0.04	-1	-1
<b>Valor promedio</b>	0.25	-0.93	-0.92

Elaborado por: Diego Játiva.

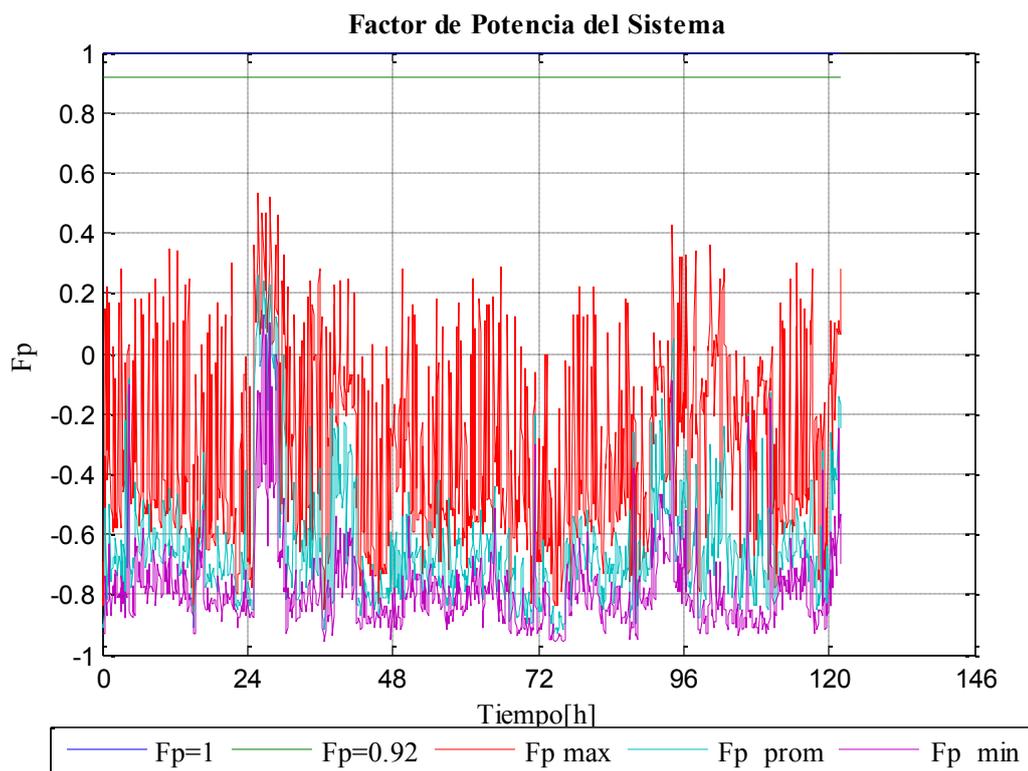


**Figura 3.3.5.3.** Factor de potencia promedio.  
Elaborado por: Diego Játiva

**Tabla 3.3.5.3.** Datos del factor de potencia promedio.

	L1N	L2N	L3N
<b>Valor máximo</b>	0.99	-0.23	-0.33
<b>Valor mínimo</b>	0.03	-1	-0.99
<b>Valor promedio</b>	0.47	-0.87	-0.84

Elaborado por: Diego Játiva.



**Figura 3.3.5.4.** Factor de potencia de todo el sistema.  
Elaborado por: Diego Játiva

**Tabla 3.3.5.4.** Datos del factor de potencia del sistema.

	L1N	L2N	L3N
<b>Valor máximo</b>	0.53	0.13	0.26
<b>Valor mínimo</b>	-0.87	-0.96	-0.96
<b>Valor promedio</b>	-0.31	-0.78	-0.63

Elaborado por: Diego Játiva.

El factor de potencia en su punto máximo no alcanza a llegar a los límites deseados, se evidencia especialmente en las Líneas 2 y 3 que el factor de potencia se encuentra muy bajo alcanzando niveles máximos de -0.06 y -0.17 respectivamente, únicamente la Línea 1 llega a alcanzar los límites deseados, pero en intervalos muy pequeños de tiempo.

El mismo patrón continúa con el factor de potencia promedio en cada una de las líneas, en cuanto al valor promedio únicamente la Línea 1 alcanza un valor de 0.99 en intervalos

muy cortos de tiempo, en la Línea 2 tiene un valor de -0.23 y en la Línea 3 un valor de -0.33.

Con el análisis que se ha realizado para cada línea se puede evidenciar el porqué de los valores obtenidos respecto al factor de potencia, en donde se ve que en el mejor de los casos alcanza un valor máximo 0.53 y tiene un promedio en sus valores máximos de -0.31, no obstante es necesario recalcar que en promedio general de todo el sistema el factor de potencia se encuentra con un valor de -0,63.

#### **3.4. Análisis de los índices de distorsión armónica del calentador inductivo.**

En este caso de estudio se ha hecho un seguimiento al circuito de alimentación del calentador del tipo inductivo, lo que se busca es ver el comportamiento que tiene esta carga en la red de bajo voltaje del sistema en cuanto a la distorsión armónica de corriente.

Se utilizó el analizador Fluke 435 para recopilar la información durante un periodo de 7 días, desde la semana del 12 de febrero hasta el 19 de febrero del 2021.

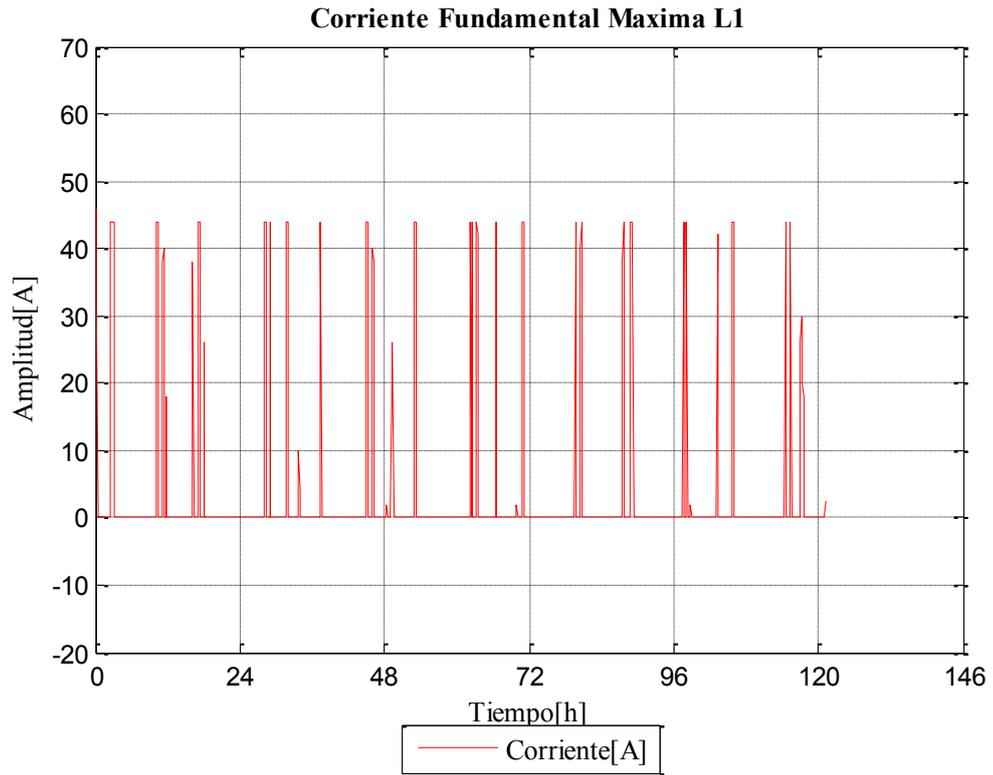
En este análisis se utilizan los límites establecidos de distorsión armónica de corriente según el estándar IEEE 519-2014 que es al que hace referencia la regulación No. ARCONEL 005/18.



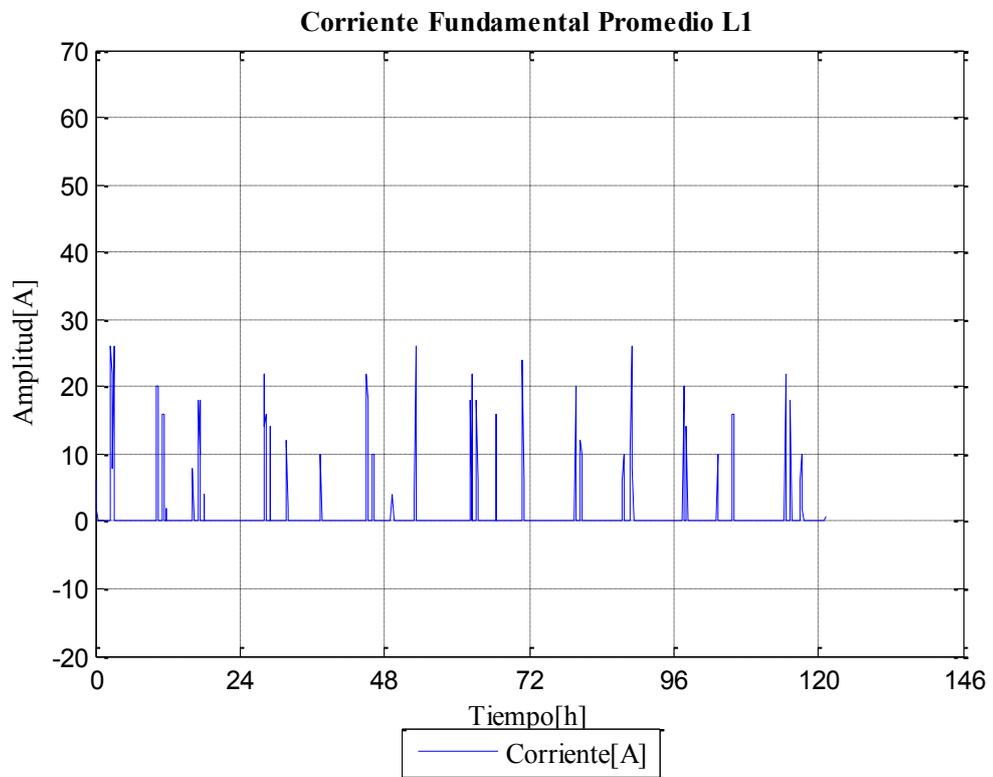
**Figura 3.4.** Instalación de analizador fluke en el circuito de alimentación del calentador de inducción.  
Fuente: Power Log Classic

#### **3.4.1. Niveles de corriente del calentador de agua de tipo inductivo.**

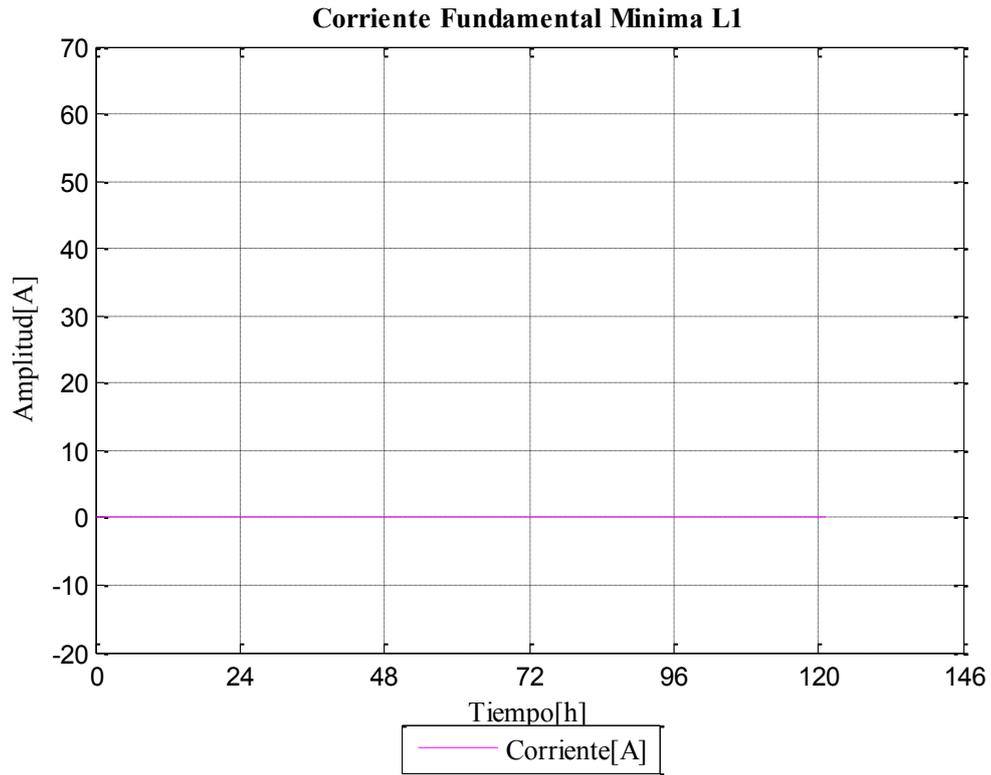
El circuito de alimentación del calentador de agua inductivo se trata de un circuito de 220 voltios, por esta razón las mediciones se realizaron en las dos fases de alimentación y en el neutro. Tomando en cuenta estas consideraciones a continuación se presenta el comportamiento de la corriente en sus puntos máximos, promedio y mínimos en el intervalo de tiempo que se hizo la adquisición de datos para cada una de las Líneas.



**Figura 3.4.1.1.** Corriente máxima en la Línea 1.  
Elaborado por: Diego Játiva



**Figura 3.4.1.2.** Corriente promedio en la Línea 1.  
Elaborado por: Diego Játiva

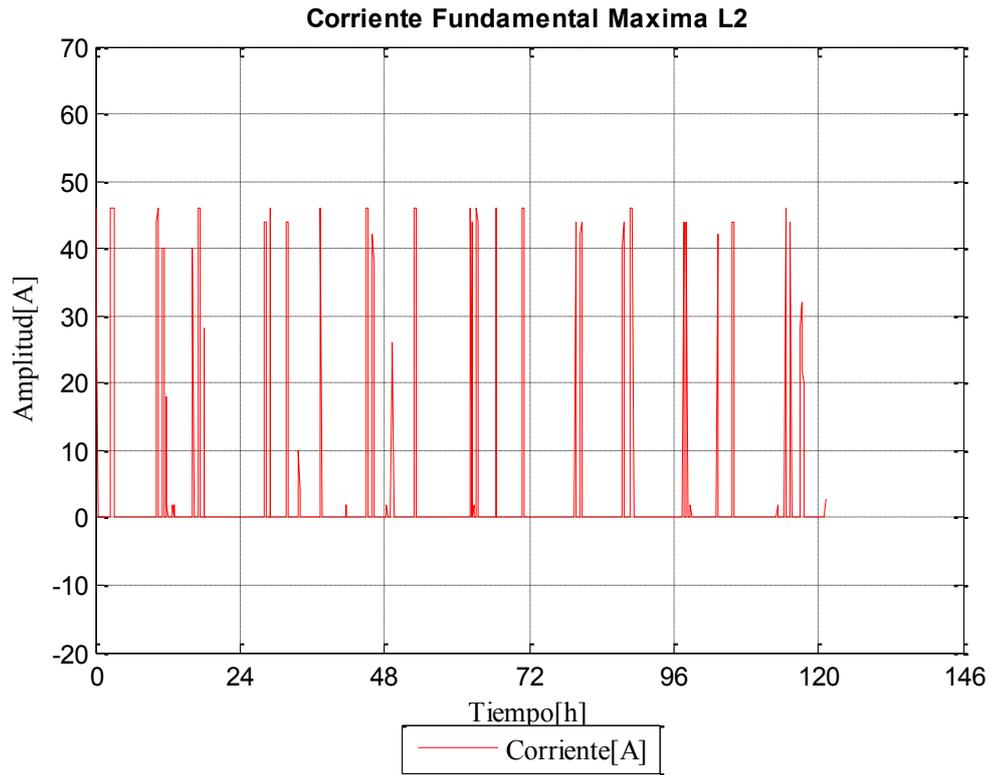


**Figura 3.4.1.3.** Corriente mínima en la Línea 1.  
Elaborado por: Diego Játiva

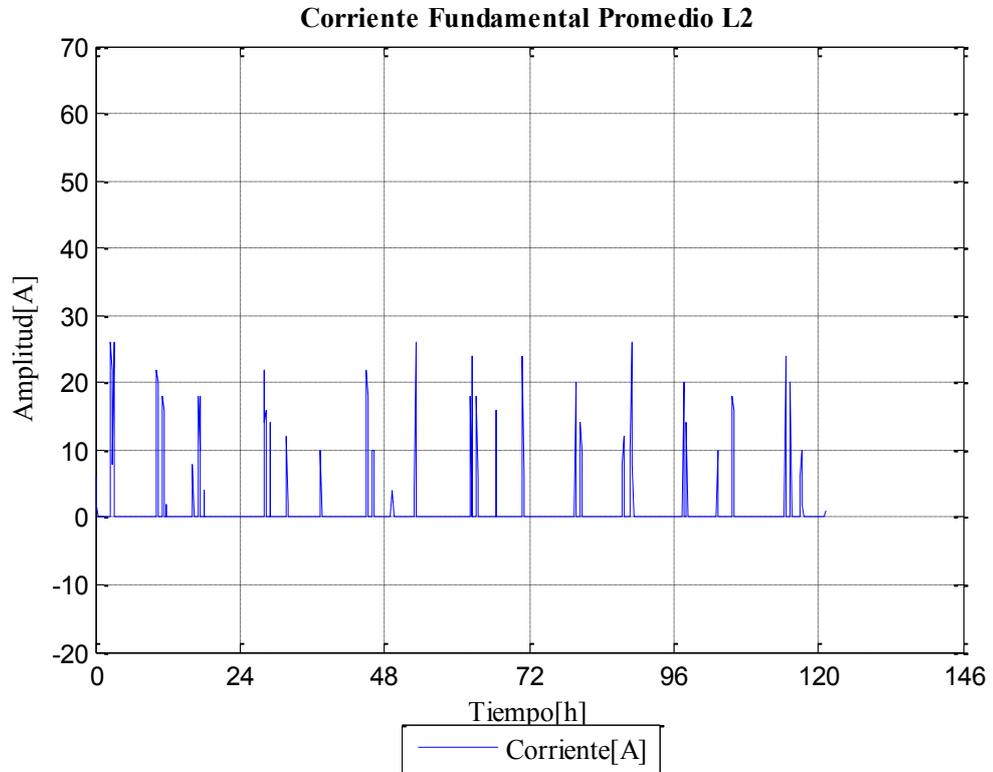
**Tabla 3.4.1.1.** Niveles máximo, mínimo y promedio de corriente en la Línea 1.

Corriente en la Línea 1	
Valor máximo	46
Valor mínimo	0
Valor promedio	46

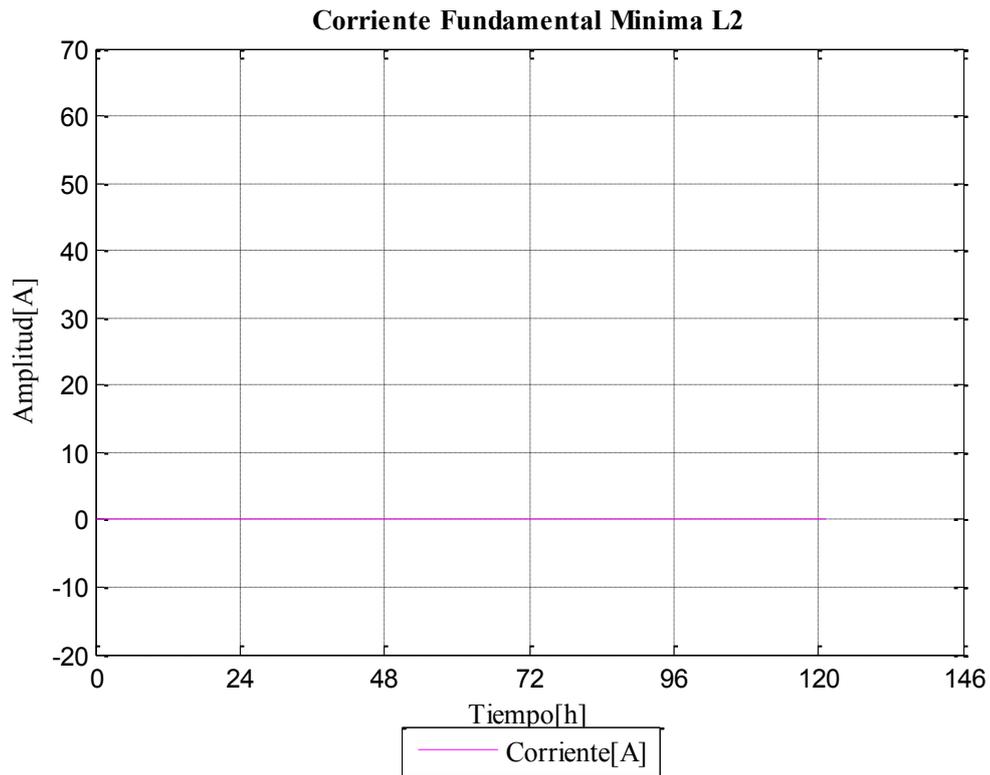
Elaborado por: Diego Játiva.



**Figura 3.4.1.4.** Corriente máxima la Línea 2.  
Elaborado por: Diego Játiva



**Figura 3.4.1.5.** Corriente promedio la Línea 2.  
Elaborado por: Diego Játiva



**Figura 3.4.1.6.** Corriente mínima la Línea 2.  
Elaborado por: Diego Játiva

**Tabla 3.4.1.2.** Niveles máximo, mínimo y promedio de corriente en la Línea 2.

Corriente en la Línea 2	
Valor máximo	46
Valor mínimo	0
Valor promedio	26

Elaborado por: Diego Játiva.

Una vez que se analizó la información recopilada se pudo ver que en el neutro existen corrientes que llagan a un máximo de 5 [A], siempre y cuando se realice un análisis en el orden de 200 ms, es por esta razón que en las lecturas de la corriente fundamental el analizador nos muestra como si no existiera corriente alguna. Esto debido a que únicamente se puede ver una corriente en el neutro cuando se utiliza el calentador de agua del tipo inductivo.

**Tabla 3.4.1.2.** Niveles máximo, mínimo y promedio de corriente en el Neutro.

Corriente en el Neutro	
Valor máximo	46

Valor mínimo	0
Valor promedio	26

---

Elaborado por: Diego Játiva.

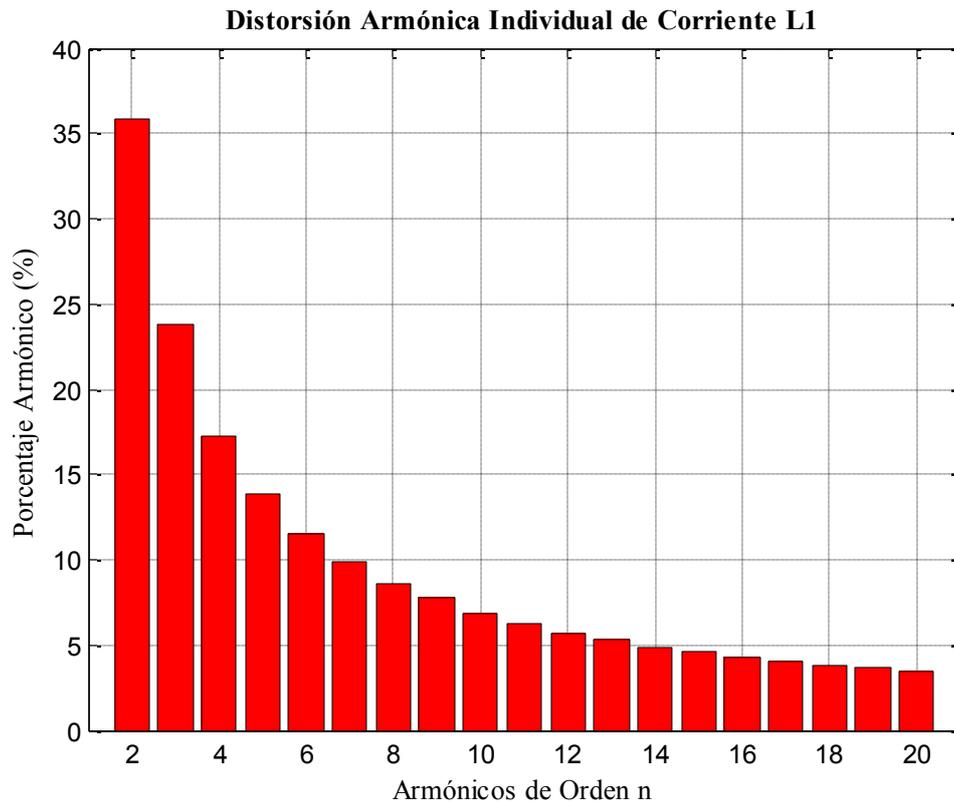
### 3.4.2. Distorsión armónica individual de corriente en las Líneas

Para el análisis de la distorsión armónica individual de este circuito se debe determinar nuevamente el PCC, se analizará un solo departamento como un usuario independiente, al tratarse de departamentos separados cada uno con su respectivo medidor se toma el concepto que expresa la norma y el PCC es el punto donde todos los departamentos se conectan a la red, en este caso es el tablero secundario perteneciente a un solo departamento, se mantendrán los límites debido a que en este caso se posee una  $I_L$  menor a la de todo el inmueble, al realizar la relación de  $I_{CC}/I_L$  el único valor esperado puede ser mayor al obtenido anteriormente.

En las Figuras 3.4.3, Figura 3.4.4 y Figura 3.4.5 se muestra el aporte promedio que tienen cada uno de los armónicos a la corriente fundamental, de igual forma en las Tablas 3.4.3, Tabla 3.4.4 y Tabla 3.4.5 se plantea los límites para cada armónico según la regulación No. ARCONEL 005/1. Para el presente análisis se toma en cuenta desde el armónico de orden 2 hasta el armónico de orden 20 ya que los armónicos que siguen son nulos.

Se considera que se está cumpliendo con la norma si el 95% de los datos registrados se encuentran dentro del límite.

**3.4.3. Distorsión armónica individual de corriente en la Línea 1.**



**Figura 3.4.3.** Armónicos de corriente en la Línea 1.  
Elaborado por: Diego Játiva

**Tabla 3.4.3.** Datos de armónicos individuales de corriente en la Línea 1.

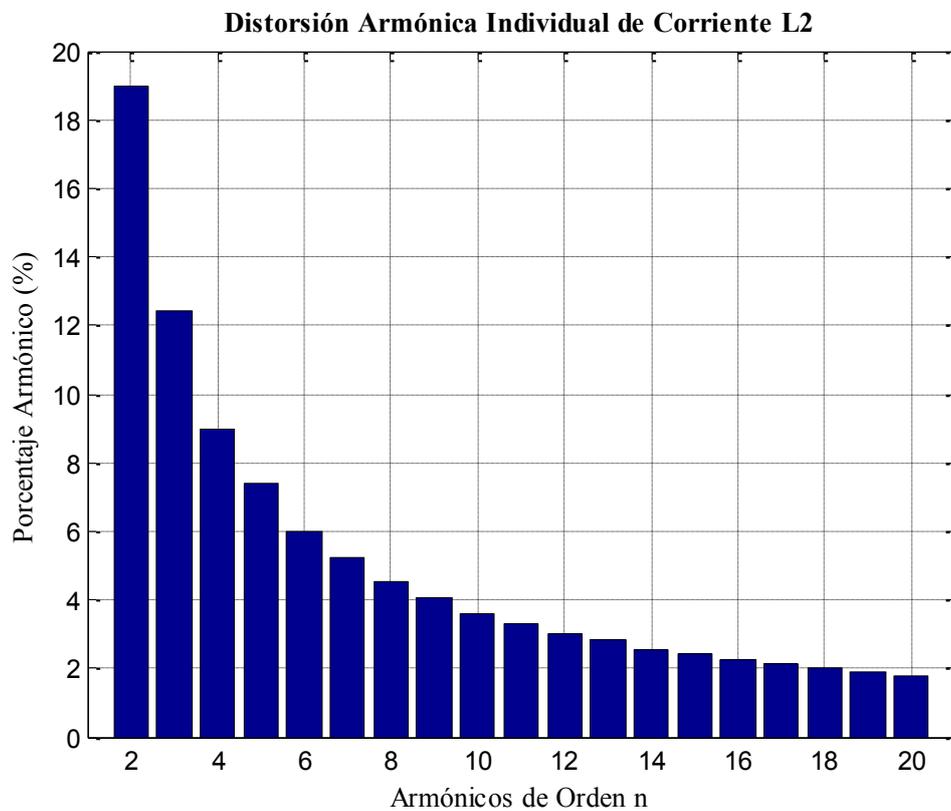
Componente armónico	Línea 1	% de Cumplimiento datos recopilados en 7 días	Limites regulación No. ARCONEL 005/18	¿Cumple con la regulación?
H2	35.8099	0.0000	3.75	NO
H3	23.7998	8.6224	15	NO
H4	17.2037	0.0000	3.75	NO
H5	13.8048	70.8622	15	NO
H6	11.4813	0.0000	3.75	NO
H7	9.9367	100.0000	15	SI
H8	8.5991	0.4955	3.75	NO
H9	7.7266	100.0000	15	SI
H10	6.8990	0.1982	2.75	NO
H11	6.3072	100.0000	11	SI
H12	5.7116	0.8920	2.75	NO
H13	5.3487	100.0000	11	SI
H14	4.8862	6.4420	2.75	NO
H15	4.5904	100.0000	11	SI

H16	4.2760	0.0991	1.5	NO
H17	4.0486	100.0000	6	SI
H18	3.7968	0.1982	1.5	NO
H19	3.6383	100.0000	6	SI
H20	3.4256	0.5946	1.5	NO

Elaborado por: Diego Játiva.

En la Línea 1 se puede ver como ninguno de los armónicos de orden par cumple con los límites establecidos por la regulación, el armónico de este orden predominante es el H2 que supera el 35 % de la corriente fundamental, en el caso de los armónicos de orden impar únicamente los que se encuentran fuera de los límites son H3 y H5 con 8.6224 % y 70.8622 % respectivamente.

### 3.4.4. Distorsión armónica individual de corriente en la Línea 2.



**Figura 3.4.4.** Armónicos de corriente en la Línea 2.

Elaborado por: Diego Játiva

**Tabla 3.4.4.** Datos de armónicos individuales de corriente en la Línea 2.

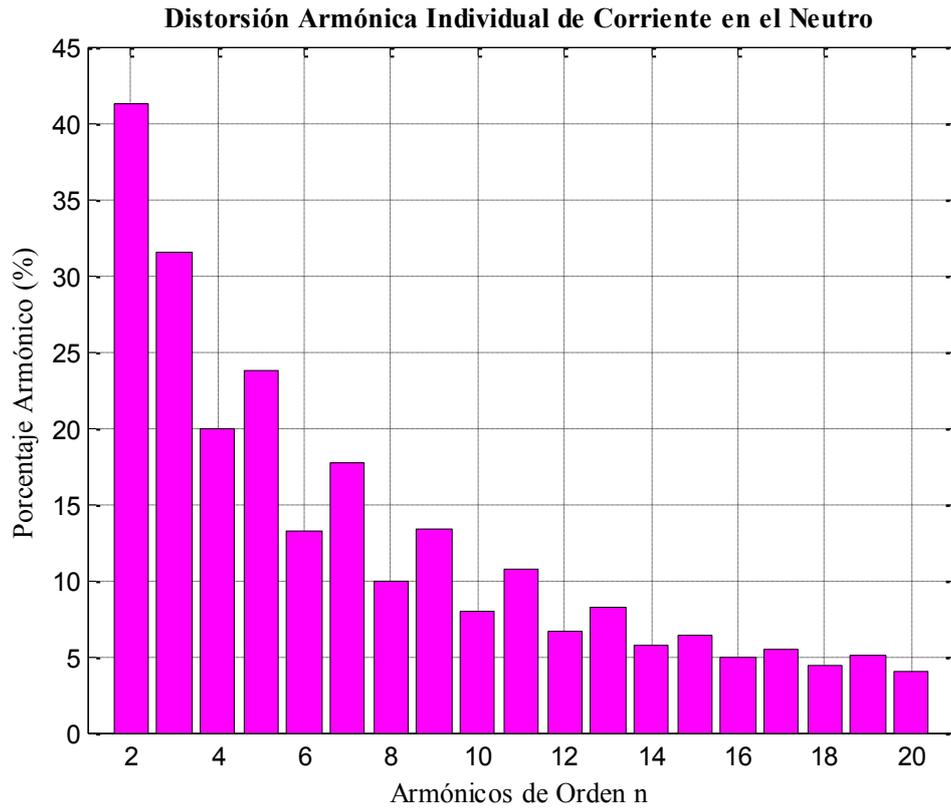
Componente armónico	Línea 2	% de Cumplimiento datos recopilados en 7 días	Límites regulación No. ARCONEL 005/18	¿Cumple con la regulación?
H2	18.9553	0	3.75	NO

<b>H3</b>	12.4063	98.5133796	15	<b>SI</b>
<b>H4</b>	8.9910	0	3.75	<b>NO</b>
<b>H5</b>	7.3789	100	15	<b>SI</b>
<b>H6</b>	6.0003	0.99108028	3.75	<b>NO</b>
<b>H7</b>	5.2171	100	15	<b>SI</b>
<b>H8</b>	4.5143	14.0733399	3.75	<b>NO</b>
<b>H9</b>	4.0388	100	15	<b>SI</b>
<b>H10</b>	3.6033	12.4876115	2.75	<b>NO</b>
<b>H11</b>	3.3056	100	11	<b>SI</b>
<b>H12</b>	2.9863	20.5153617	2.75	<b>NO</b>
<b>H13</b>	2.8124	100	11	<b>SI</b>
<b>H14</b>	2.5604	58.3746283	2.75	<b>NO</b>
<b>H15</b>	2.4250	100	11	<b>SI</b>
<b>H16</b>	2.2415	3.07234886	1.5	<b>NO</b>
<b>H17</b>	2.1366	100	6	<b>SI</b>
<b>H18</b>	1.9903	12.0911794	1.5	<b>NO</b>
<b>H19</b>	1.9114	100	6	<b>SI</b>
<b>H20</b>	1.7957	14.0733399	1.5	<b>NO</b>

Elaborado por: Diego Játiva.

En la Línea 2 se repite el mismo patrón que se pudo observar en la Línea 1, todos los armónicos de orden par se encuentran fuera de los límites que establece la regulación, el armónico predominante de este orden es el H2 con un valor de 18.9553 %, en el caso de los armónicos de orden impar todos se encuentran dentro de los valores que nos recomienda la regulación.

### **3.45. Distorsión armónica individual de corriente en el neutro**



**Figura 3.4.5.** Armónicos de corriente en el Neutro.  
Elaborado por: Diego Játiva

**Tabla 3.4.5.** Datos de armónicos individuales de corriente en el Neutro.

Componente armónico	Línea 2	% de Cumplimiento datos recopilados en 7 días	Limites regulación No. ARCONEL 005/18	¿Cumple con la regulación?
H2	41.2427	0	3.75	NO
H3	31.5747	0	15	NO
H4	19.9700	0	3.75	NO
H5	23.7573	0	15	NO
H6	13.2787	0	3.75	NO
H7	17.7373	0.09910803	15	NO
H8	9.9460	0	3.75	NO
H9	13.3166	99.5044599	15	SI
H10	7.9671	0	2.75	NO
H11	10.7069	67.789891	11	NO
H12	6.6272	0	2.75	NO
H13	8.1729	100	11	SI
H14	5.6876	0	2.75	NO
H15	6.3956	100	11	SI
H16	4.9656	0	1.5	NO

<b>H17</b>	5.4795	97.1258672	6	SI
<b>H18</b>	4.4310	0	1.5	NO
<b>H19</b>	5.1198	99,900892	6	SI
<b>H20</b>	4.0331	0	1.5	NO

Elaborado por: Diego Játiva.

En el caso del neutro se puede observar que nuevamente todos los armónicos de orden par se encuentran fuera de lo que establece la regulación, con valores bastante considerables, el armónico predominante se trata del H2 que alcanza un valor superior al 40 % de la corriente fundamental, en el caso de los armónicos de orden impar podemos observar que existen casos donde se encuentran fuera de los límites de la regulación, el armónico H3 sobrepasa el 30 % de la corriente fundamental y es el predominante en este orden.

### 3.4.6. Cálculo del factor de distorsión de demanda total TDD

En la Tabla 3.4.6 se muestra un resumen de en qué porcentaje se encuentra el TDD en cada una de las líneas.

**Tabla 3.4.6.** Datos de distorsión de demanda total del sistema.

#	TDD (%)	% de Cumplimiento	Límites regulación No. ARCONEL 005/18	¿Cumple con la regulación?
<b>Línea 1</b>	54.4853	0.0000	20	NO
<b>Línea 2</b>	28.6886	6.9376	20	NO
<b>Neutro</b>	70.0777	0.0000	20	NO

Elaborado por: Diego Játiva.

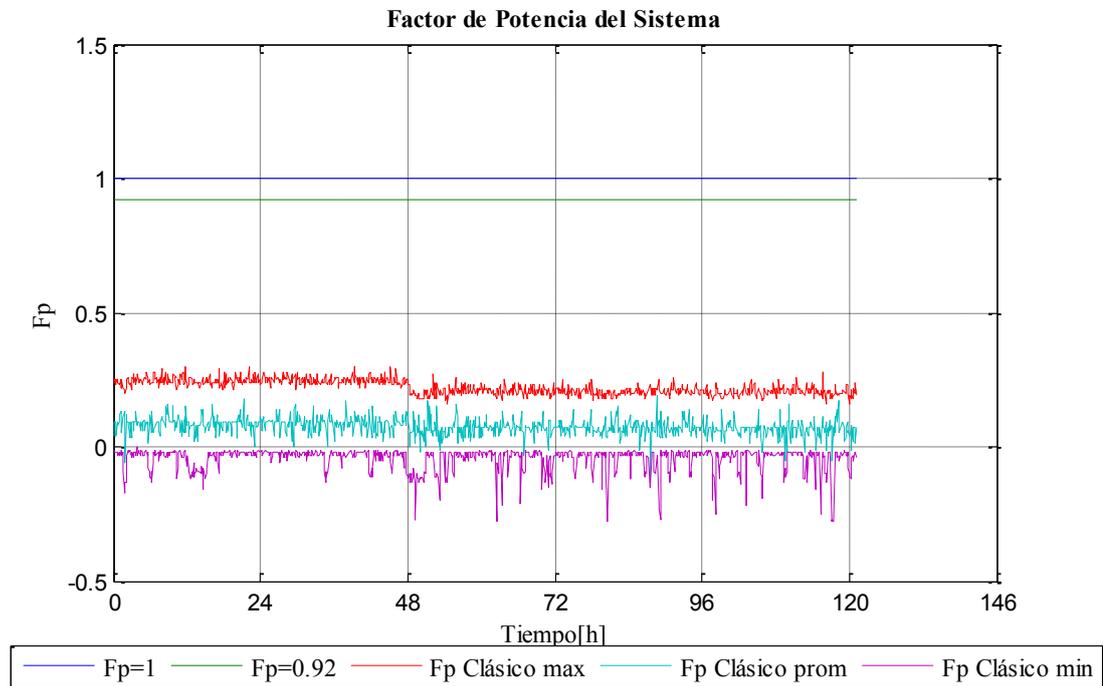
En la Tabla 3.4.6 se puede observar que ninguna línea cumple con los límites establecidos por la regulación en cuanto al TDD, los valores promedio se encuentran considerablemente fuera de los límites y el porcentaje de valores recopilados en el tiempo de 7 días se encuentra por debajo del 10 % llegando al caso de que en ningún momento se encontró un dentro del límite.

### 3.4.7. Factor de potencia

Si bien la regulación No. ARCONEL 005/18 no plantea como uno de los parámetros de responsabilidad del consumidor al factor de potencia es necesario conocer cuál es el efecto de la carga inductiva en el factor de potencia del circuito. Una vez que se conoce estado del factor de potencia se tiene punto de partida para establecer acciones correctivas en cuanto a la distorsión armónica de corriente ya que estos dos parámetros van de la mano.

En la Figura 3.4.7 se muestra el comportamiento del factor de potencia en el periodo

de tiempo en que se realizó la adquisición de datos del circuito perteneciente al calentador de inducción, en la Tabla 3.4.7 se presentan valores máximo, promedio y mínimo.



**Figura 3.4.7.** Factor de potencia del sistema.  
Elaborado por: Diego Játiva

**Tabla 3.4.7.** Datos del factor de potencia del sistema.

	Fp máx.	Fp mín.	Fp prom.
<b>Valor máximo</b>	0.3	0	0.19
<b>Valor mínimo</b>	0.16	-0.28	-0.13
<b>Valor promedio</b>	0.22	-0.04	0.07

Elaborado por: Diego Játiva.

En la Tabla 3.4.7 se puede ver que el valor máximo que alcanza el factor de potencia es de 0.3, el valor mínimo alcanza valores negativos de hasta -0.28 y el valor promedio es de 0.07.

# CAPITULO IV

## ANÁLISIS DE RESULTADOS Y ACCIONES CORRECTIVAS

### 4.1. Resultados aspecto calidad del consumidor

La información recopilada en el Hotel Old Town Quito Suites ha sido evaluada según los parámetros que plantea la regulación No. ARCONEL 005/18 en cuanto a calidad del consumidor.

El análisis realizado presenta los siguientes resultados:

La distorsión armónica individual en la Línea 1 presenta problemas en cuanto a la presencia de armónicos de orden impar H3, H5, H7 H9, H11, H13, H17 Y H19, el armónico predominante se trata del H3 ya que 76.8701 % de los valores registrados en el periodo de 7 días se encuentran dentro de los límites establecidos y este alcanza un promedio de 12.0496 % de la corriente fundamental, de igual forma se presentan pero a menor medida armónicos de orden par H2 y H4, el armónico predominante es el H2 con un promedio 6.0256 % de y el 15.4528 % de los valores registrados dentro de los límites establecidos por la regulación.

La distorsión armónica individual de la Línea 2 únicamente tiene inconvenientes por la presencia de armónicos de orden H2 y H3 con valores promedio de 4.4359 % y 11.5714 % de la corriente fundamental respectivamente, en cuanto a los valores registrados dentro del periodo de 7 días el armónico de orden H2 tiene un porcentaje de 46.7520 % dentro de los límites y el armónico de orden H3 78.9370 %.

La distorsión armónica individual en la Línea 3 presenta problemas en los armónicos de orden impar, en los armónicos H3, H5, H7, H11, H17 y H19 el armónico predominante es el H3 con un valor promedio de 23.1539 % y un porcentaje de valores registrados dentro del límite establecido por la regulación de 27.1654 %. En el caso de los armónicos de orden par el único que se encuentra fuera de los límites establecidos por la regulación es el H2 con un valor promedio de 3.1239 % y un porcentaje de valores registrados dentro del límite establecido por la regulación de 70.5709 %.

En el caso del neutro los armónicos de orden impar que se encuentran fuera de los límites de la regulación son H3, H5, H7, H9 y H17, el armónico predominante es el H3 con un valor promedio de 37.1416 % y un porcentaje de valores registrados dentro del límite establecido por la regulación de 11,1220 %. Los armónicos de orden par que se encuentran fuera de los límites son H2 y H4, el armónico predominante es H2 con un valor promedio de 8.9439 % y un porcentaje de valores registrados dentro del límite

establecido por la regulación de 13.7795 %.

En el caso del TDD de cada una de las líneas en ningún caso se encontró dentro de los límites que establece la regulación, se debe recalcar que si bien el valor promedio de la Línea 2 es de 15.5593 y este aparentemente se encuentra dentro del límite únicamente el 79.2323 % de los valores registrados se encontraron dentro de este, el valor promedio que se obtiene se debe a que en ocasiones se podrán encontrar valores que están por mucho fuera del límite pero en otros casos se podrán encontrar valores cercanos a cero.

## **4.2. Acciones correctivas aspecto calidad del consumidor**

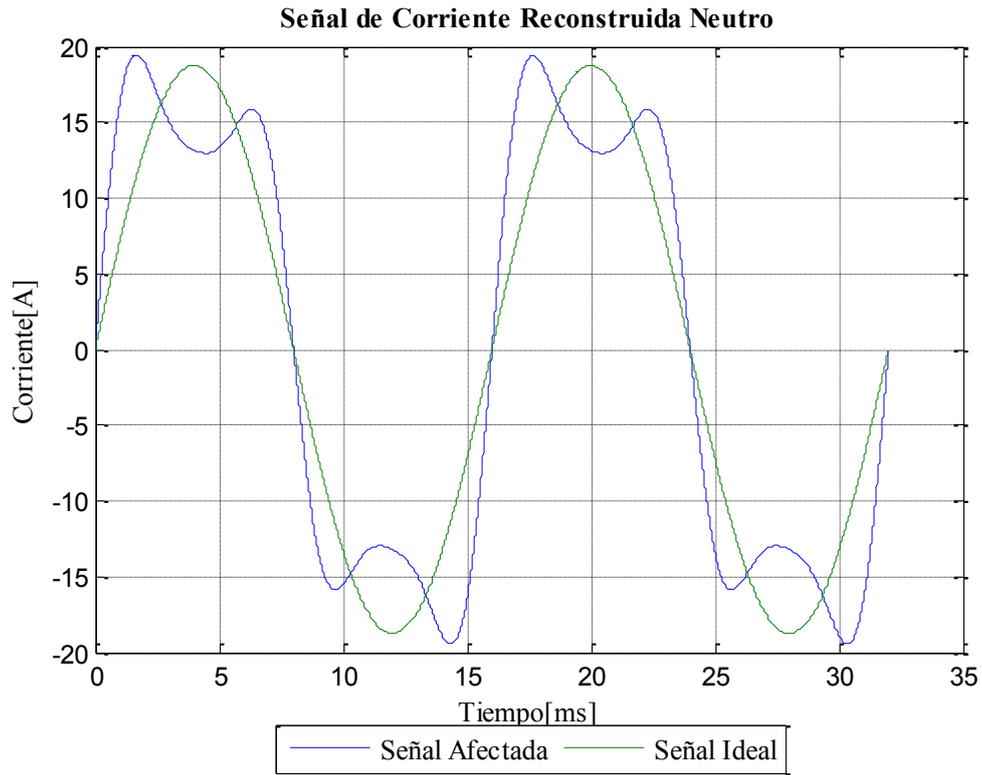
### **4.2.1. Corriente en el neutro.**

La presencia de corriente en el neutro nos indica que existe un desbalance de cargas, es necesario recalcar las características de uso y ocupación del inmueble en el que se ha realizado el presente trabajo, ya que al tratarse de un hotel el uso de las instalaciones tiene un comportamiento aleatorio. Los departamentos están distribuidos de forma adecuada en cada una de las líneas que alimentan al sistema, pero el grado de ocupación de cada uno de ellos puede producir este fenómeno, es por esta razón que proponer un balance de cargas desde el punto de vista técnico no es viable.

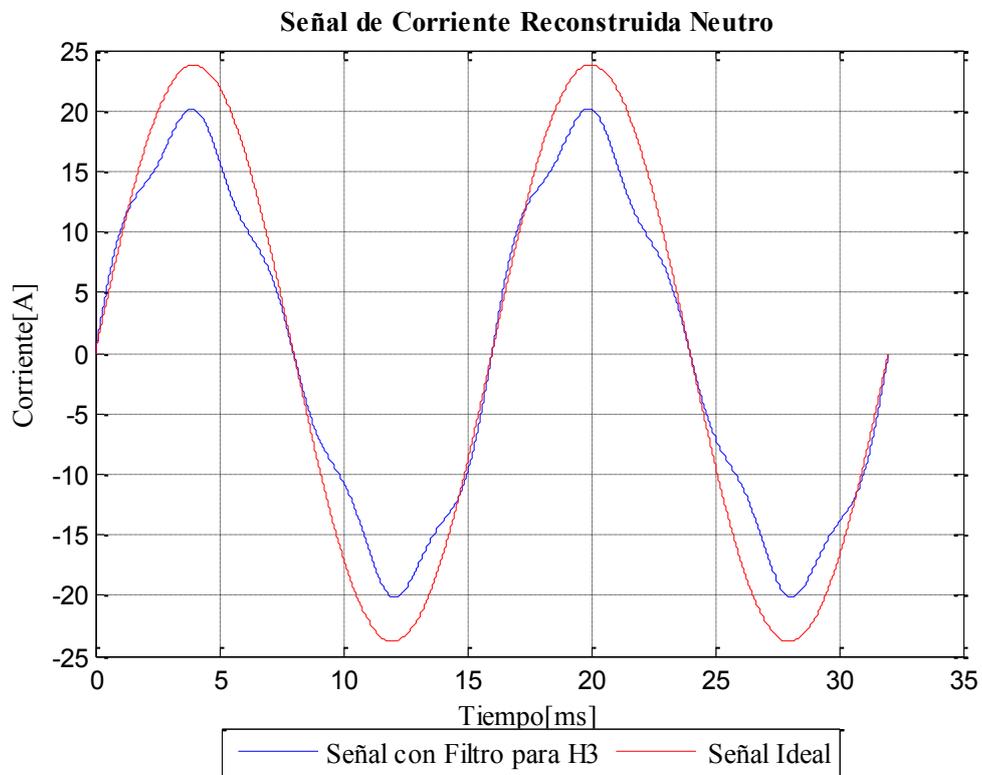
El desbalance de cargas sumado a la elevada presencia de armónicos en cada una de las líneas ha producido la presencia de corriente en el neutro, al proponerse filtros para cada una de las líneas la inyección de reactivos a la red se ve elevada, proponer un filtro para el neutro cuando se han considerado las condiciones en las que se produce este fenómeno no es deseable desde el punto de vista técnico, debido a que una inyección de reactivos a través de un filtro contribuiría aún más a la congestión de las líneas.

Se puede abordar este problema de forma indirecta, al eliminar los componentes armónicos predominantes de secuencia cero en cada una de las líneas estos ya no se adhieren al neutro lo que reduciría la corriente y la distorsión en la misma.

En la Figura 4.2.1 se muestra la corriente en el neutro con todas sus componentes armónicas



**Figura 4.2.1.** Simulación de señal de corriente en el Neutro con todos sus componentes armónicos.  
Elaborado por: Diego Játiva



**Figura 4.2.1.1.** Simulación corriente en el Neutro sin armónicos de secuencia cero en líneas.  
Elaborado por: Diego Játiva

Se puede ver en la Figura 4.2.1.1 que al eliminarse los armónicos predominantes de

secuencia cero en cada una de las líneas que comparten el neutro no solamente se reduce la amplitud de la misma sino que también se reduce la distorsión presente en la señal.

#### 4.22. Armónicos en la corriente.

En el caso de la presencia de armónicos se procede a calcular un filtro pasivo para mitigar los armónicos predominantes que se encuentran fuera de los límites que plantea la regulación No ARCONEL 005/18, para esto se reconstruyó la señal de corriente con todas sus componentes armónicas encontradas, los valores utilizados corresponden al promedio de corriente máxima en cada línea ya que se busca observar el comportamiento de la corriente y sus componentes armónicos cuando se encuentra en funcionamiento la mayor cantidad de carga.

Al eliminar los componentes armónicos predominantes en cada una de las líneas se está reduciendo la cantidad de corriente de demanda en cada una de ellas debido a que estas componentes poseen el porcentaje más elevado de la corriente fundamental, esto se verá reflejado en la forma de la señal de corriente y principalmente en el TDD.

La distorsión total de la demanda es un parámetro que toma particular importancia en el PCC, debido a que es el punto donde la distribuidora puede tomar las mediciones de demanda de cada uno de los usuarios, se busca estar por debajo de los límites establecidos por la regulación para de esta forma evitar posibles sanciones por parte de la distribuidora.

#### 4.23. Cálculo de filtro pasivo sintonizado L1.

Tal como se muestra en el análisis anterior el armónico que se encuentra con el porcentaje más alto de la corriente fundamental es el H3, por esta razón se propone un filtro pasivo sintonizado para eliminar esta componente armónica.

Generalmente el punto de partida para el diseño del filtro se basa en la corrección del factor de potencia. En este caso se tomará el valor de factor de potencia en el instante en que se encontró la potencia activa máxima promedio en la L1, de esta forma se asegura que no existirá una sobre compensación.

- Para la sintonización del filtro se utiliza el factor  $\delta$  que se indica en[36].
- Los límites de operación del filtro fueron evaluados según se indica en[37].

Tomando en cuenta todos estos parámetros se procede al cálculo:

**Tabla 4.2.3.** Datos de potencia y factor de potencia en la línea 1.

Potencia Aparente [kVA]	6.5
Factor de potencia	0.85

Elaborado por: Diego Játiva.

Potencia Activa

$$P = fp * S = 6.5 * 0.85 = 5.525 [kVA]$$

Potencia reactiva.

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{6.5^2 - 5.525^2} = 3.424 [kVAR]$$

**Tabla 4.2.3.1.** Datos de potencia del circuito L1.

Datos del circuito	
Potencia Aparente [kVA]	6.5
Potencia Activa [kW]	5.525
Potencia Reactiva [kVAR]	3.424
Factor de potencia	0.85

Elaborado por: Diego Játiva.

Cálculo de VAR para un factor de potencia igual a 0.95.

$$kVAR = 5.525(\tan(31.7883) - \tan(18.1948))$$

$$kVARs = 1.6081$$

Valor comercial

$$VARs = 2.2 [kVAR]$$

Potencia reactiva consumida del transformador

$$Q = 3.424 - 1.820 = 1.224 [kVAR]$$

Potencia aparente entregada por el transformador

$$S = \sqrt{5.525^2 + 1.224^2} = 5.6589 [kVA]$$

Nuevo factor de potencia

$$fp = \frac{P}{S} = \frac{5.525}{5.6589} = 0.9763$$

Cálculo de filtro para armónico de orden 3

Frecuencia de resonancia

$$Z = \frac{Z\%}{100} * \frac{kV^2}{MVA_f}$$

$$MVA_{cc} = \frac{100 * MVA}{Z\%}$$

$$MVA_{cc} = \frac{100 * 0.3}{2} = 15$$

$$h = \sqrt{\frac{MVA_{cc}}{MVAR_{cap}}} = \sqrt{\frac{15}{0.0022}} = 82.5722$$

El valor encontrado nos indica que el sistema entra en resonancia en la frecuencia

4954.332 valor muy alejado a la frecuencia de sintonía del filtro propuesto, eso nos asegura que el sistema no entrara en resonancia paralelo cerca del filtro.

Sintonización del filtro para el tercer armónico

$$h = h_n + (\delta * h_n) = 3 + (-0.0375 * 3) = 2.8875$$

Reactancia del capacitor

$$X_{C1} = \frac{kV^2}{MVAR} = \frac{0.22^2}{0.0022} = 22 [Ohms]$$

Cálculo del inductor

$$X_{L1} = \frac{X_{C1}}{h^2} = \frac{22}{2.8875^2} = 2.6386 [Ohms]$$

Factor de calidad

Los valores típicos de Q se encuentran entre 20 y 30, mientras más alto sea el valor mejor respuesta tendrá el filtro. El valor seleccionado corresponde a 30.

$$R = \frac{X_{L1}}{Q}$$

$$R = \frac{2.6386}{30} = 87.9543 [m\Omega]$$

El valor de R viene dado por las características constructivas del inductor, este es un valor recomendado.

VARs que entrega el filtro al sistema

$$MVARs = \frac{kV^2}{X_C - X_L} = \frac{0.220^2}{(22 - 2.6386)} = 2.4998 [kVAR]$$

Corriente inicial en el banco de capacitores

$$I_C = \frac{kVAR}{\sqrt{3} * kV} = \frac{2.2}{\sqrt{3} * (0.220)} = 5.7803 [A]$$

Corriente en el filtro

$$I_F = \frac{kVAR}{\sqrt{3} * kV} = \frac{2.4998}{\sqrt{3} * (0.220)} = 6.5681 [A]$$

Corriente en el armónico de orden 3

$$I_1 = \frac{kW}{\sqrt{3} * kV} = \frac{5.525}{\sqrt{3} * 0.220} = 14.5165 [A]$$

$$I_3 = \frac{12.0496}{100} * 14.5165 = 1.7491 [A]$$

Corriente en el filtro rms

$$I_{rms} = \sqrt{(6.5681)^2 + (1.7491)^2} = 6.7970 [A]$$

Corriente pico

$$I_{peak} = 6.5681 + 1.7491 = 8.3172[A]$$

Voltaje en el capacitor

$$V_C = \sqrt{3} * I_F * X_C = \sqrt{3} * 6.5681 * 22 = 249.9823[V]$$

Voltaje del armónico

$$V_C = \sqrt{3} * I_3 * \frac{X_C}{3} = \sqrt{3} * 1.7491 * \frac{22}{3} = 22.1913 [V]$$

Voltaje rms en el capacitor

$$V_{Crms} = \sqrt{(249.9823)^2 + (22.1913)^2} = 250.9653[V]$$

Voltaje pico en el capacitor

$$V_{Cpico} = 249.9823 + 22.1913 = 273.1567 [V]$$

Potencia reactiva que entrega el banco de capacitores

$$kVAR = \sqrt{3} * (250.9653) * (6.7970) = 2.9510[kVAR]$$

Determinación de los parámetros de operación del capacitor según IEEE 18

Debido a los valores elevados de voltaje y corriente que se encontraron se utilizara un capacitor de mayor voltaje. Esto se debe al incremento que se dio al introducir el filtro al sistema por sus características constructivas, un inductor en serie con un capacitor. El capacitor utilizado deberá tener un voltaje nominal de 380 [V]

**Tabla 4.2.3.2.** Límites de operación para capacitores en L1 según IEEE 18 [37].

Valores incluyendo armónicas	Limite en % del valor nominal	Valor calculado %	Fuera del límite
$I_{RMS}$	135	114.0751	NO
$V_{RMS}$	110	66.0435	NO
$V_{PICO}$	120	71.8833	NO
KVAR	135	134.1396	NO

Elaborado por: Diego Játiva.

El filtro queda especificado de la siguiente forma:

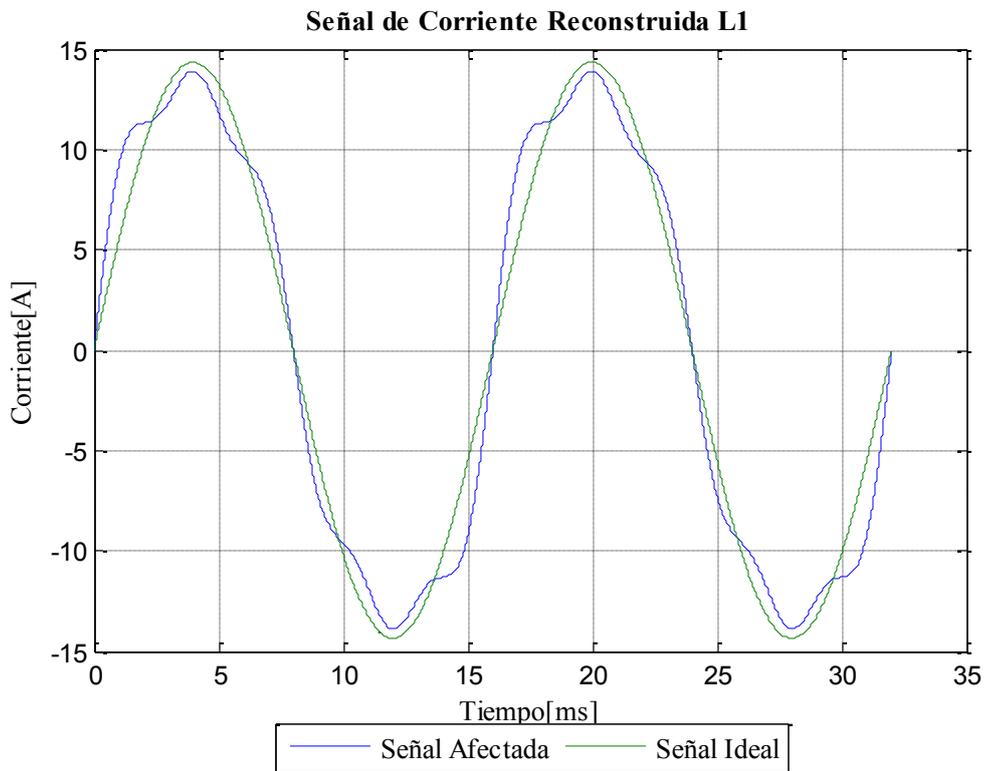
**Tabla 4.2.3.3.** Características filtro 3<sup>er</sup> Armónico L1.

Datos del filtro	
Potencia [kVAR]	2.2
Voltaje [ $V_{L-L}$ ]	380

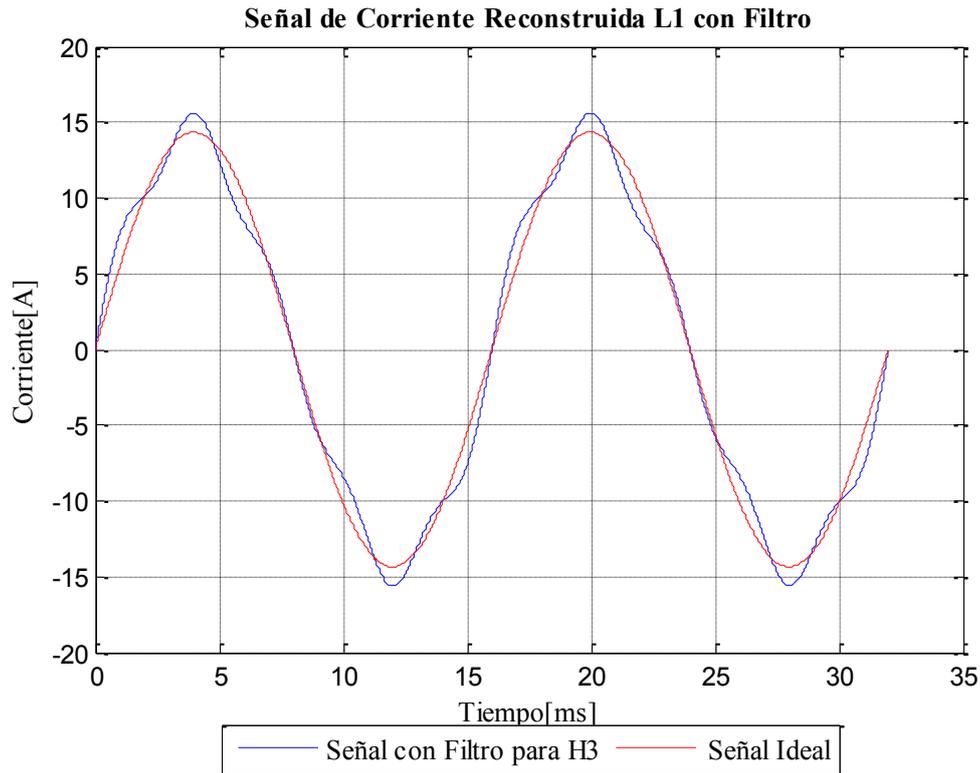
L [mH]	0.9947
C [uF]	120.5690
Factor de sintonía	2.8875
R [ $m\Omega$ ]	87.9543

Elaborado por: Diego Játiva.

La señal reconstruida de corriente sin la aplicación del filtro se muestra en la Figura 4.2.3.1 y la señal de corriente posterior a la aplicación del filtro se muestra en la Figura 4.2.3.2.



**Figura 4.2.3.1.** Simulación señal de corriente L1 con todas sus componentes armónicas.  
Elaborado por: Diego Játiva



**Figura 4.2.3.2.** Simulación de corriente con filtro pasivo sintonizado para el 3<sup>er</sup> armónico en la L1.  
Elaborado por: Diego Játiva

#### 4.2.4. Cálculo de filtro pasivo sintonizado L2

Para el diseño del filtro en la L2 el armónico predominante es el H3, por esta razón se propone un filtro pasivo sintonizado.

En el presente diseño se mantuvieron los mismos parámetros y metodología mencionada anteriormente. Para este caso en particular de la L2 el factor de potencia se encuentra en atraso y ya no es factible proponer una mejora al factor de potencia para el diseño del filtro, se plantea establecer el valor nominal de operación del filtro en base al 70% u 80% de la potencia reactiva del total de la carga, tampoco se puede optar por una capacidad muy baja del condensador a modo de no afectar al factor de potencia ya que esto disminuiría el rendimiento del filtro [38].

**Tabla 4.2.4.1.** Datos del circuito L2.

Potencia entregada por el transformador	
Potencia Aparente [kVA]	9.1
Potencia Reactiva [kVAR]	2.6

Elaborado por: Diego Játiva.

La potencia a la que diseña el filtro es de 1.82 [kVAR] que corresponde al 70% del total de la carga, el valor comercial más cercano es 2 y con este valor se procede a realizar los

cálculos.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

**Tabla 4.2.4.2.** Cálculo de filtro pasivo sintonizado L2.

Filtro pasivo sintonizado L2 para 3 <sup>er</sup> armónico	
Resonancia en paralelo del sistema	
$h = 86.60$	No cae en resonancia cerca de la frecuencia del filtro
	Reactancia del capacitor
$X_C$	24.2000 [Ohm]
	Reactancia del inductor
$X_L$	2.9024 [Ohm]
	Factor de calidad $Q = 30$
R	96.7498[mΩ]
Condiciones de operación	
VAR que entrega el filtro al sistema	2.2725 [kVAR]
Corriente inicial en el banco de capacitores	5.2548 [A]
Corriente en el filtro	5.9710 [A]
Corriente en el 3 <sup>er</sup> armónico	2.6511 [A]
Corriente rms en el filtro	6.5331 [A]
Corriente pico	8.6221[A]
Voltaje en el capacitor	249.9823 [V]
Voltaje del 3 <sup>er</sup> armónico	36.9976 [V]
Voltaje rms en el capacitor	252.7053 [V]
Voltaje pico en el capacitor	289.7029 [V]
Potencia reactiva que entrega el banco de capacitores	
kVAR	2.8561

Elaborado por: Diego Játiva.

**Tabla 4.2.4.3.** Límites de operación para capacitores en L2 según IEEE 18.

Valores incluyendo armónicas	Limite en % del valor nominal	Valor calculado %	Fuera del límite
$I_{RMS}$	135	114.8660	NO
$V_{RMS}$	110	66.5014	NO
$V_{PICO}$	120	76,2376	NO
KVAR	135	142.8073	SI

Elaborado por: Diego Játiva.

Se puede observar en la Tabla 4.2.4.3 que la potencia reactiva excede el límite por un 7.8073% por esta razón se plantea aumentar la capacidad del banco de capacitores a 3 y se realizar un recalcu de los parámetros ya encontrados, a continuación se obtienen los siguientes resultados:

**Tabla 4.2.4.4.** Límites de operación con capacitores de mayor VAR L2.

Valores incluyendo armónicas	Límite en % del valor nominal	Valor calculado %	Fuera del límite
$I_{RMS}$	135	114.1775	NO
$V_{RMS}$	110	66.1028	NO
$V_{PICO}$	120	72.5780	NO
KVAR	135	135.277	NO

Elaborado por: Diego Játiva.

El límite de potencia reactiva se ve sobrepasado por apenas un 0.2% por esta razón se puede considerar que el capacitor trabajara de forma normal. La nueva resonancia en paralelo es  $h = 70.71$  y se encuentra bastante lejos del filtro propuesto por esta razón no existiría ningún inconveniente.

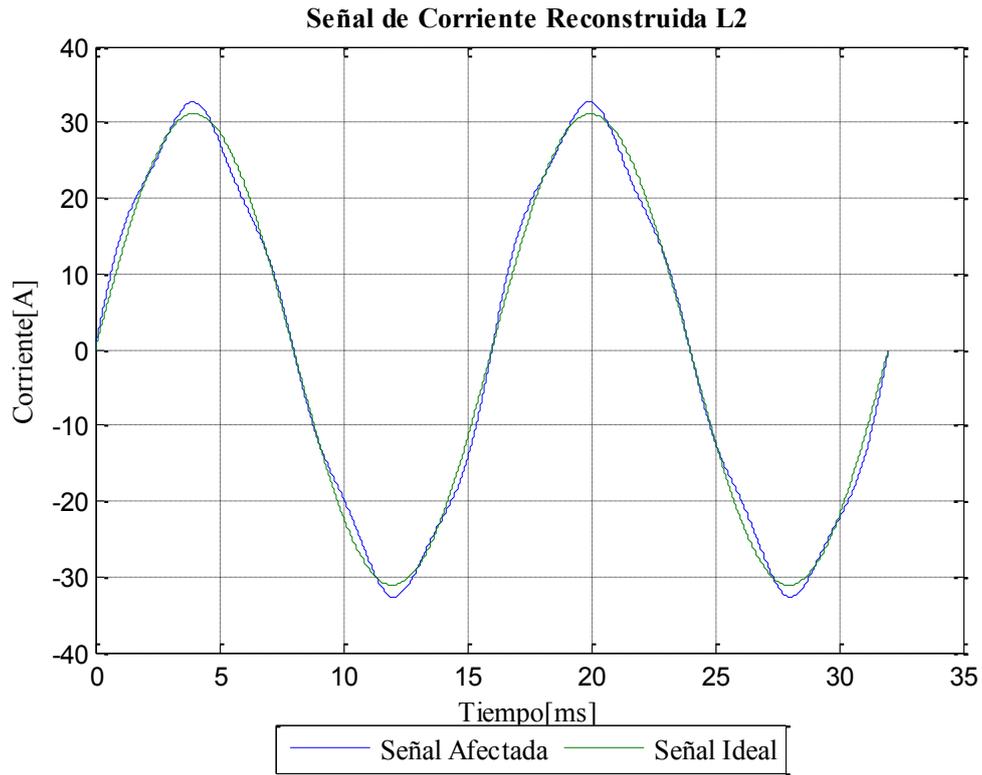
El filtro queda especificado de la siguiente forma:

**Tabla 4.2.4.5.** Características filtro 3<sup>er</sup> Armónico L2.

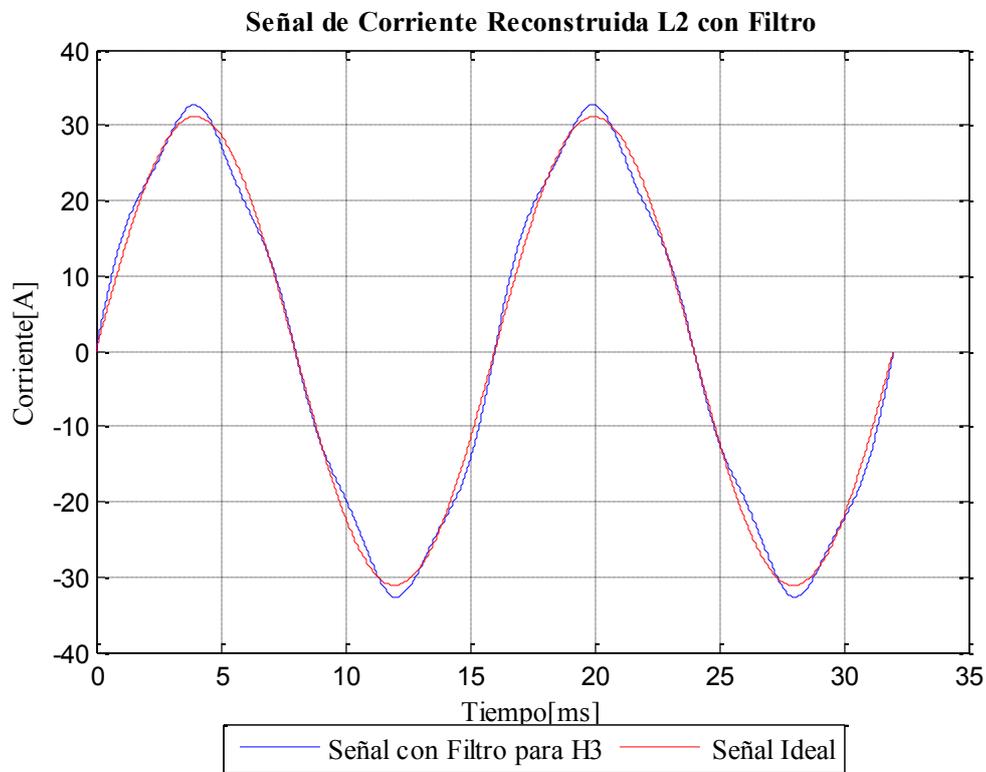
Datos del filtro	
Potencia [kVAR]	3
Voltaje [ $V_{L-L}$ ]	380
L [mH]	0.7294
C [uF]	164.41
Factor de sintonía	2.8875
R [ $m\Omega$ ]	64.4998

Elaborado por: Diego Játiva.

La señal reconstruida de corriente sin la aplicación del filtro se muestra en la Figura 4.2.4.1 y la señal de corriente posterior a la aplicación del filtro se muestra en la Figura 4.2.4.2.



**Figura 4.2.4.1.** Simulación señal de corriente L2.  
Elaborado por: Diego Játiva



**Figura 4.2.4.2.** Simulación de corriente con filtro pasivo sintonizado para el 3<sup>er</sup> armónico en la L2.  
Elaborado por: Diego Játiva

La Línea 2 era la que presentaba menor distorsión armónica en la corriente con 78 9370%

de los valores fuera del límite establecido y un 11.5714 % de la corriente fundamental, por esta razón al aplicar el filtro la mejora en la señal es reducida.

#### 4.25. Cálculo de filtro pasivo sintonizado L3

De igual forma para el diseño del filtro el armónico predominante es el H3, por esta razón se propone un filtro pasivo sintonizado. En el presente diseño se mantuvieron los mismos parámetros y metodología mencionada anteriormente.

Al igual que en el caso de la L2 el factor de potencia en la L3 se encuentra en atraso y no es factible proponer una mejora al factor de potencia para el diseño del filtro, se plantea establecer el valor nominal de operación del filtro en base al 70% u 80% tal como se realizó en la L2.

Potencia entregada por el transformador:

**Tabla 4.2.5.1.** Datos del circuito L3.

Potencia entregada por el transformador	
Potencia Aparente [kVA]	7.7
Potencia Reactiva [kVAR]	-2.7

Elaborado por: Diego Játiva.

La potencia a la que diseña el filtro es de 1.89 [kVAR] que corresponde al 70% de la potencia total de la carga, el valor comercial más cercano nuevamente corresponde a 2 y con este se realizaran los cálculos.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

**Tabla 4.2.5.2** Cálculo de filtro pasivo sintonizado L3.

Filtro pasivo sintonizado L3 para 3 <sup>er</sup> armónico	
Resonancia en paralelo del sistema	
$h = 86.60$	No cae en resonancia cerca de la frecuencia del filtro
	Reactancia del capacitor
$X_C$	24.2000 [Ohm]
	Reactancia del inductor
$X_L$	2.9024 [Ohm]
	Factor de calidad $Q = 30$
R	96.7498[mΩ]
Condiciones de operación	
VAR que entrega el filtro al sistema	2.2725 [kVAR]
Corriente inicial en el banco de capacitores	5.2548 [A]
Corriente en el filtro	5.9710 [A]
Corriente en el 3 <sup>er</sup> armónico	4.3868 [A]
Corriente rms en el filtro	7.4092 [A]
Corriente pico	10.3578 [A]
Voltaje en el capacitor	249.9823 [V]
Voltaje del 3 <sup>er</sup> armónico	61.2196 [V]
Voltaje rms en el capacitor	257.3694 [V]
Voltaje pico en el capacitor	318.5890 [V]
Potencia reactiva que entrega el banco de capacitores	
kVAR	3.2989

Elaborado por: Diego Játiva.

**Tabla 4.2.5.3.** Límites de operación para capacitores en L3 según IEEE 18.

Valores incluyendo armónicas	Limite en % del valor nominal	Valor calculado %	Fuera del límite
$I_{RMS}$	135	116.9860	NO
$V_{RMS}$	110	67.7287	NO
$V_{PICO}$	120	83.8392	NO
KVAR	135	164.9484	SI

Elaborado por: Diego Játiva.

La potencia reactiva excede el límite establecido por un 29.8497 % de lo permitido, en este caso se plantea utilizar 2 capacitores de 2 kVAR, de esta forma la corriente y potencia que anteriormente tenía que soportar uno solo queda dividida.

Las reactancias capacitivas son las mismas, por esta razón la corriente a través de cada uno de ellos es igual, los capacitores se colocan en paralelo.

$$MVARs = \frac{kV^2}{(X_{C1} + X_{C2}) - X_L} = \frac{0.220^2}{(48.4 - 5.8049)} = 1.1362[kVAR]$$

La nueva corriente en el filtro está dada por

$$I_F = \frac{kVAR}{\sqrt{3} * kV} = \frac{1.1362}{\sqrt{3} * (0.220)} = 2.9855[A]$$

Corriente en el filtro rms

$$I_{rms} = \sqrt{(4.3868)^2 + (2.9855)^2} = 4.3868[A]$$

Potencia reactiva que entrega cada uno de los capacitores

$$kVAR = \sqrt{3} * (124.99) * (4.3868) = 1.2776[kVAR]$$

**Tabla 4.2.5.4.** Límites de operación con capacitores de mayor valor en L3.

Valores incluyendo armónicas	Limite en % del valor nominal	Valor calculado %	Fuera del límite
$I_{RMS}$	135	63.2629	NO
$V_{RMS}$	110	63.2629	NO
$V_{PICO}$	120	91.0900	NO
KVAR	135	63.8830	NO

Elaborado por: Diego Játiva.

Los límites establecidos se encuentran dentro de los parámetros deseados. En este caso

no fue necesario tomar un capacitor de voltaje superior al del sistema debido al modelo implementado.

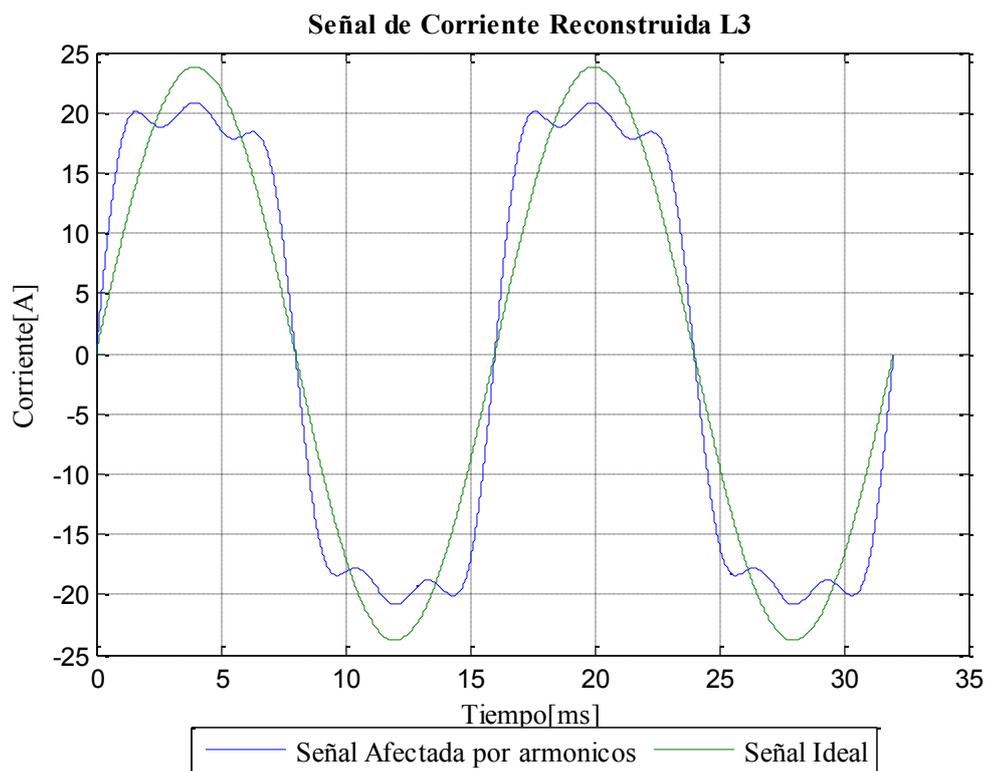
El filtro queda especificado de la siguiente forma:

**Tabla 4.2.5.5** Características filtro 3<sup>er</sup> Armónico L3.

Datos del filtro	
Potencia [kVAR]	2
Voltaje [ $V_{L-L}$ ]	220
L [mH]	2.1884
C [ $\mu$ F]	109.6082
Factor de sintonía	2.8875
R [ $m\Omega$ ]	193.4996

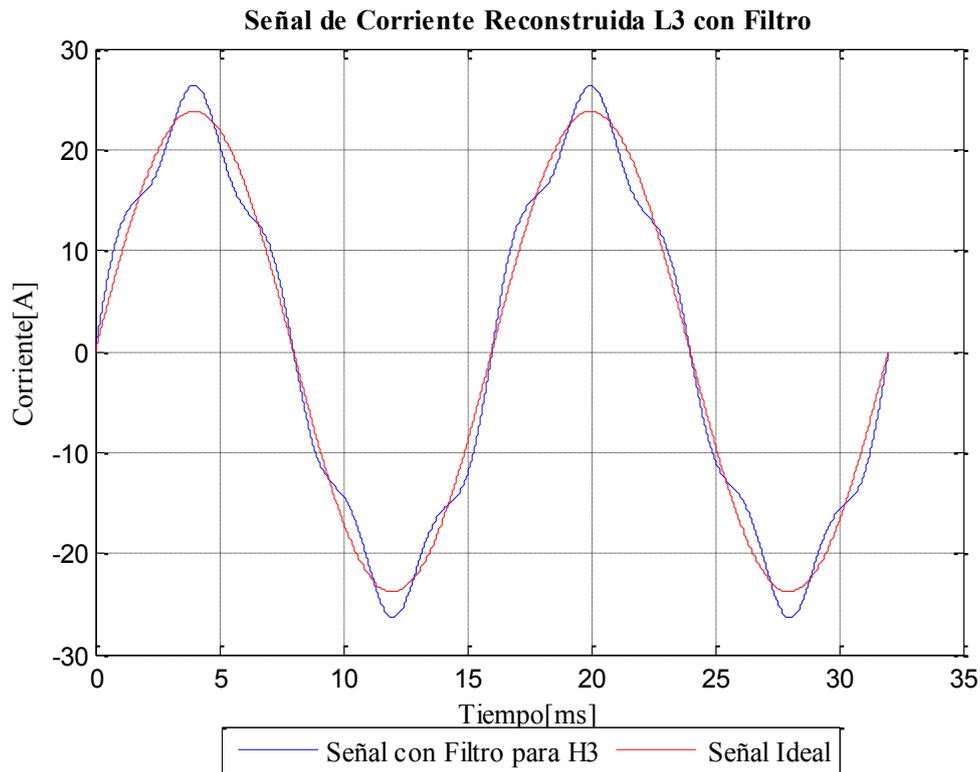
Elaborado por: Diego Játiva.

La señal reconstruida de corriente sin la aplicación del filtro se muestra en la Figura 4.2.5.1 y la señal de corriente posterior a la aplicación del filtro se muestra en la Figura 4.2.5.2.



**Figura 4.2.5.1.** Simulación señal de corriente L3.

Elaborado por: Diego Játiva



**Figura 4.2.5.2.** Simulación de corriente con filtro pasivo sintonizado para el 3<sup>er</sup> armónico en la L3.  
Elaborado por: Diego Játiva

Tal como se puede ver en la Figura 4.2.5.2 existe una notable mejoría en la forma de la señal de corriente tras la eliminación del armónico H3 en comparación con la Figura 4.2.5.2 donde este aún estaba presente.

Al eliminar el armónico predominante de cada una de las líneas se procede a verificar nuevamente el TDD y los valores encontrados se presentan en la Tabla 4.2.5.6.

**Tabla 4.2.5.6** TDD después de aplicar el filtro.

#	TDD (%)	Límites regulación No. ARCONEL 005/18	¿Cumple con la regulación?
Línea 1	19.7230	20	SI
Línea 2	10.2005	20	SI
Línea 3	19.4865	20	SI

Elaborado por: Diego Játiva.

Al eliminar el armónico predominante en cada línea se puede ver que el TDD en cada uno de los casos se encuentra bajo los límites establecidos por la regulación, esto se debe a que estos armónicos contribuían en mayor porcentaje a la distorsión armónica de corriente en comparación con otros componentes armónicos. Una vez implementado el filtro se podría mediante una medición comprobar si el 95 % de los valores registrados se

encuentran bajo los límites.

#### **4.3. Resultados aspecto calidad del producto**

La información recopilada en el Hotel Old Town Quito Suites ha sido evaluada según los parámetros que plantea la regulación No. ARCONEL 005/18 en cuanto a calidad del producto, este es un análisis complementario que busca tener una visión completa de la calidad de energía eléctrica desde la perspectiva de la distribuidora para complementar el análisis principal correspondiente al consumidor.

El análisis realizado presenta los siguientes resultados:

Los niveles de voltaje se encuentran dentro de los límites establecidos por la regulación No. ARCONEL 005/18 con más del 95 % de los valores registrados dentro del límite de  $\pm 8\%$  en todo el tiempo en que se realizaron las mediciones en el inmueble.

El indicador Flicker en cuanto al Pst y el Plt ambos se encuentran con más del 95 % de los valores registrados dentro de los límites establecidos por la regulación, lo que indica que no existe ningún tipo de inconveniente respecto a este indicador.

La distorsión armónica de voltaje THD se encuentra dentro de los parámetros establecidos con más del 95 % de los valores registrados dentro de los límites que plantea la regulación.

El desequilibrio de voltaje cumple con los límites establecidos en la regulación, el porcentaje de valores registrados que se encuentran dentro de los límites es mayor al 95 % que la regulación establece como recomendado.

El factor de potencia es el indicador que presenta problemas, el valor máximo promedio que este alcanza es de 0.26 y llega a tener valores tan bajos como -0.96, en promedio el factor de potencia se encuentra en un valor de -0.63 el análisis gráfico realizado reveló que existen fluctuaciones del factor de potencia en todo el periodo de tiempo en que se realizaron las mediciones encontrándose en valores negativos casi siempre, además este nunca alcanza el valor mínimo deseado de 0.92.

#### **4.4. Resultados circuito perteneciente al calentador de agua del tipo inductivo.**

La información recopilada en el Hotel Old Town Quito Suites ha sido evaluada según los parámetros que plantea la regulación No. ARCONEL 005/18, este análisis individual corresponde a la distorsión armónica del circuito perteneciente a uno de los calentadores de agua del tipo inductivo utilizado en el inmueble.

El análisis realizado presenta los siguientes resultados:

En la Línea 1 los armónicos de orden impar que se encuentran fuera de los límites

permitidos son: H3 y H5, el armónico predominante es el H3 con únicamente 8.6224% de los valores registrados dentro del límite. En el caso de los armónicos de orden par ninguno cumple con los límites deseados, los armónicos H2, H4 y H6 en ningún instante del periodo de tiempo que se registró la información cumplieron con los valores deseados, de igual forma el porcentaje de cumplimiento de los armónicos de orden par restantes no llega ni al 1%.

En la Línea 2 todos los armónicos de orden impar cumplen con los límites tomando valores del 100% de datos registrados dentro de los límites deseados a excepción del armónico H3 que tiene un 98.5133% que de igual forma es bastante bueno. En el caso de los armónicos de orden par se repite la misma tendencia que en la Línea 1, ninguno de los armónicos cumple con los límites deseados, el armónico H2 y H4 son predominantes ya que ninguno cumplió con los límites en todo el tiempo en que se registró la información, el porcentaje de cumplimiento del resto de armónicos de orden par es bastante bajo alcanzando un máximo de 58.3746% en el H14.

En el Neutro los armónicos de orden par que no cumplen con los límites deseados son H3, H5, H7, H11. Los predominantes son el H3 y H5 ya que el porcentaje de cumplimiento de los mismo es del 0%, en el caso de H7 no alcanza el 1% y el h11 alcanza un valor del 67.7898%. En el caso de los armónicos de orden par ninguno cumple con los límites deseados, todos los armónicos de este orden tienen un porcentaje de cumplimiento del 0%.

En el caso del TDD ninguna de las líneas cumplió con los límites establecidos, el porcentaje llega a 6.9376 en la Línea 2 que es bastante bajo ya que no se alcanza ni el 10%, en el caso de la Línea 1 y el Neutro se encuentra en el 0%, lo que indica que en ningún momento se encontró un valor dentro del límite.

En el caso del factor de potencia alcanza un valor máximo de 0.3 que es demasiado bajo en comparación a los valores deseados de 1 o 0.92, incluso alcanzo valores negativos de -0.28, el valor promedio de todo el sistema es de 0.07.

#### **4.41. Acciones correctivas.**

Para el diseño del filtro se tomara como base el análisis de distorsión armónica en cada una de las líneas. Lo que se busca es mejorar la calidad de corriente presente en este circuito mediante la eliminación o atenuación de los armónicos.

Los resultados obtenidos muestran un problema en todos los armónicos de orden par y en algunos de orden impar, la propuesta de aplicación de un filtro no solo busca una mejora en la calidad de corriente del circuito bajo análisis si no que de todo el sistema. Si

revisamos los resultados obtenidos en cuanto a distorsión armónica de corriente en todo el sistema podemos ver que en todos los casos los armónicos predominantes de orden par e impar son el H2 y H3 respectivamente, esto nos indica que si bien existen problemas con armónicos de orden superior estos no provocan ninguna afectación en todo el sistema.

Para este caso particular se propondrá un filtro pasivo sintonizado para eliminar la componente armónica H2 que es el predominante en el circuito individual.

La razón principal de plantear esta acción corresponde a la aleatoriedad de utilización del inmueble en que se ha realizado el presente análisis. De esta forma se plantea ubicar el filtro cerca de la carga que se ha demostrado está produciendo la distorsión armónica.

#### 4.42. Cálculo de filtro pasivo sintonizado calentador de inducción L1.

En este caso se puede apreciar que el armónico predominante en el H2 por esta razón se propone un filtro pasivo sintonizado para eliminar este armónico.

En el presente diseño se mantuvieron los mismos parámetros y metodología mencionada anteriormente.

**Tabla 4.4.2.1.** Datos del circuito individual L1.

Potencia entregada por el transformador	
Potencia Aparente [kVA]	1.9
Potencia Reactiva [kVAR]	0.8

Elaborado por: Diego Játiva.

La potencia a la que diseña el filtro es de 0.56 [kVAR] que corresponde al 70% de la potencia total de la carga, el capacitor seleccionado es de 1 kVAR para el cálculo.

A continuación se presentan los resultados obtenidos:

**Tabla 4.4.2.2.** Cálculo de filtro pasivo sintonizado L1.

Filtro pasivo sintonizado L1 para 2 <sup>do</sup> armónico		
	Resonancia en paralelo del sistema	
$h = 122.4744$	No cae en resonancia cerca de la frecuencia del filtro	
	Reactancia del capacitor	48.4000 [Ohm]
$X_C$	Reactancia del inductor	13.0612 [Ohm]
$X_L$	Factor de calidad $Q = 30$	435.3741 [ $m\Omega$ ]
R	Condiciones de operación	
	VAR que entrega el filtro al sistema	1.3696 [kVAR]
	Corriente inicial en el banco de capacitores	3.5985 [A]
	Corriente en el filtro	4.5278 [A]
	Corriente en el 2 <sup>do</sup> armónico	1.6214 [A]
	Corriente rms en el filtro	3.9469[A]
	Corriente pico	5.2199 [A]
	Voltaje en el capacitor	301.3120 [V]
	Voltaje del 3 <sup>er</sup> armónico	67.8823 [V]
	Voltaje rms en el capacitor	308.8640 [V]

Voltaje pico en el capacitor	376.7463 [V]
Potencia reactiva que entrega el banco de capacitores	
kVAR	2.1089

Elaborado por: Diego Játiva.

Debido a los valores elevados de voltaje y corriente que se encontraron se utilizara un capacitor de mayor voltaje. El capacitor utilizado deberá tener un voltaje nominal de 380 [V].

**Tabla 4.4.2.3.** Límites de operación para capacitores L1 según IEEE 18.

Valores incluyendo armónicas	Límite en % del valor nominal	Valor calculado %	Fuera del límite
$I_{RMS}$	135	140.3927	SI
$V_{RMS}$	110	81.2800	NO
$V_{PICO}$	120	99.1437	NO
KVAR	135	210.8992	SI

Elaborado por: Diego Játiva.

La potencia reactiva y la corriente se encuentran fuera de los límites, por esta razón se utilizaran 2 capacitores de 1 kVAR.

Al realizar nuevamente el cálculo se obtienen los siguientes resultados:

**Tabla 4.4.2.4.** Límites de operación con dos capacitores L1 según IEEE 18.

Valores incluyendo armónicas	Límite en % del valor nominal	Valor calculado %	Fuera del límite
$I_{RMS}$	135	75.1104	NO
$V_{RMS}$	110	75.1104	NO
$V_{PICO}$	120	105.9660	NO
KVAR	135	69.2393	NO

Elaborado por: Diego Játiva.

El filtro queda especificado de la siguiente forma:

**Tabla 4.4.2.5.** Características filtro 2<sup>do</sup> Armónico L1.

Datos del filtro	
Potencia [kVAR]	1
Voltaje [ $V_{L-L}$ ]	220
L [mH]	9.8481
C [uF]	54.8041
Factor de sintonía	1.925
R [ $m\Omega$ ]	870.7482

Elaborado por: Diego Játiva.

La señal reconstruida de corriente sin la aplicación del filtro se muestra en la Figura 4.4.2.1 y la señal de corriente posterior a la aplicación del filtro se muestra en la Figura 4.4.2.2.

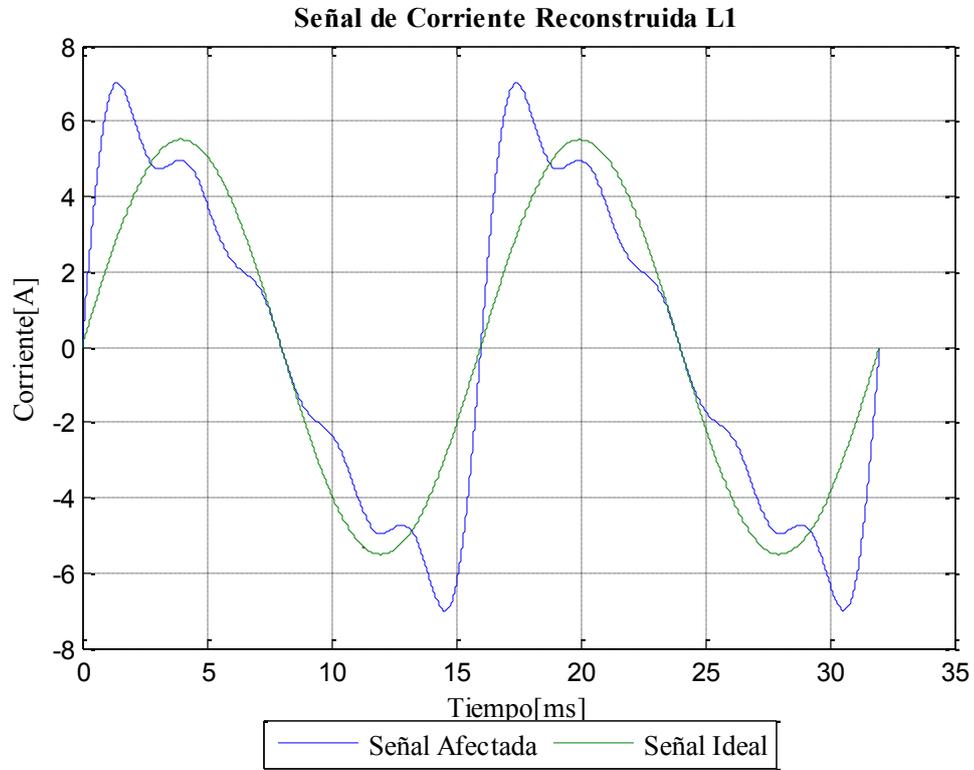
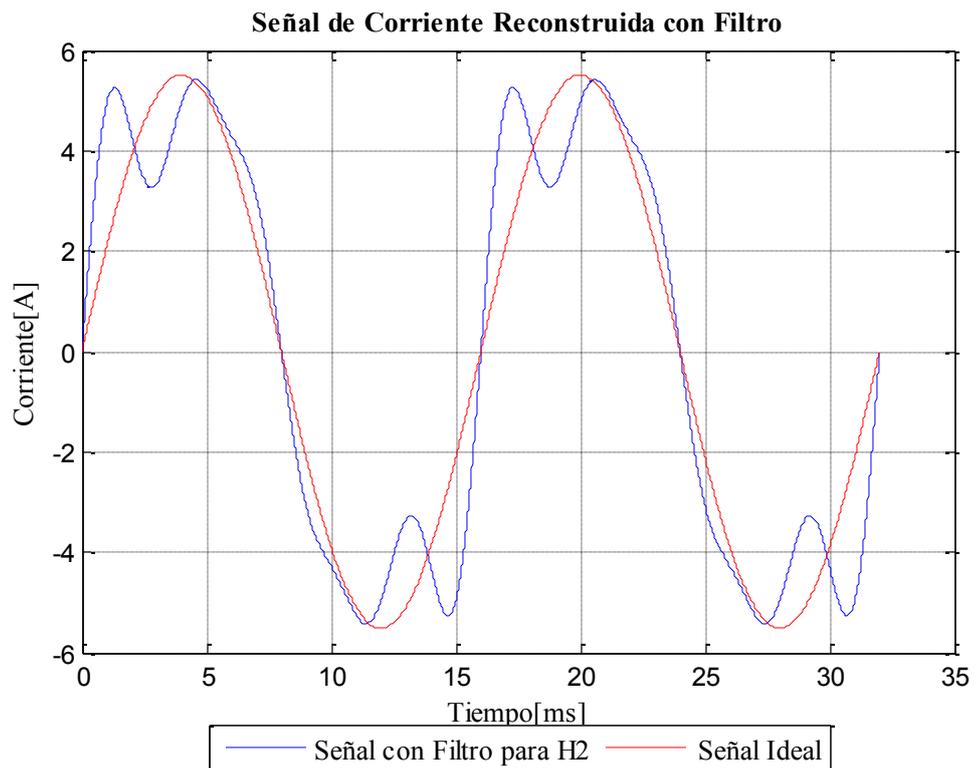


Figura 4.4.2.1. Señal de corriente reconstruida con todas sus componentes armónicas L1.  
Elaborado por: Diego Játiva



**Figura 4.4.2.2.** Simulación de corriente con filtro pasivo sintonizado para el 2<sup>do</sup> armónico en la L1.  
Elaborado por: Diego Játiva

Se puede apreciar en la Figura 4.4.2.1 una mejoría en la forma de la señal de corriente a comparación con la Figura 4.4.2.2 cuando aún estaba presente este armónico predominante, es posible mejorar aún más la señal de corriente al añadir más filtros pero esto implicaría una mayor inyección de reactivos a una sola línea.

#### 4.4.3. Cálculo de filtro pasivo sintonizado calentador de inducción L2.

Para este cálculo una vez más el armónico predominante en el H2 por esta razón se propone un filtro pasivo sintonizado para eliminar este armónico.

En el presente diseño se mantuvieron los mismos parámetros y metodología mencionada anteriormente.

**Tabla 4.4.3.1.** Datos del circuito individual L2

Potencia entregada por el transformador	
Potencia Aparente [kVA]	1.9
Potencia Reactiva [kVAR]	1.1

Elaborado por: Diego Játiva.

La potencia a la que diseña el filtro es de 0.77 [kVAR] que corresponde al 70% de la potencia total de la carga, el capacitor seleccionado es de 1 kVAR para el cálculo.

A continuación se presentan los resultados obtenidos:

**Tabla 4.4.3.2.** Cálculo de filtro pasivo sintonizado L2.

Filtro pasivo sintonizado L2 para 2 <sup>do</sup> armónico	
$h = 122,4744$	Resonancia en paralelo del sistema No cae en resonancia cerca de la frecuencia del filtro
$X_C$	Reactancia del capacitor 48.4000 [Ohm]
$X_L$	Reactancia del inductor 13.0612 [Ohm]
R	Factor de calidad $Q = 30$ 435.3741 [mΩ]
VAR que entrega el filtro al sistema	Condiciones de operación 1.3696 [kVAR]
Corriente inicial en el banco de capacitores	2.6274 [A]
Corriente en el filtro	3.5985 [A]
Corriente en el 2 <sup>do</sup> armónico	0.7715 [A]
Corriente rms en el filtro	3.6803 [A]
Corriente pico	4.3700 [A]
Voltaje en el capacitor	301.3120 [V]
Voltaje del 3 <sup>er</sup> armónico	32.3000 [V]
Voltaje rms en el capacitor	303.0383 [V]
Voltaje pico en el capacitor	335.3384 [V]
Potencia reactiva que entrega el banco de capacitores	
kVAR	1.9294

Elaborado por: Diego Játiva.

Debido a los valores elevados de voltaje y corriente que se encontraron se utilizara un

capacitor de mayor voltaje. El capacitor utilizado deberá tener un voltaje nominal de 380 [V].

**Tabla 4.4.3.3.** Límites de operación para capacitores L2 según IEEE 18.

Valores incluyendo armónicas	Límite en % del valor nominal	Valor calculado %	Fuera del límite
$I_{RMS}$	135	137.7442	SI
$V_{RMS}$	110	79.7469	NO
$V_{PICO}$	120	88.2469	NO
KVAR	135	192.9423	SI

Elaborado por: Diego Játiva.

La corriente rms y potencia reactiva están fuera de los límites, por esta razón se utilizaran dos capacitores de 1 kVAR como la Línea 1 y se procederá a calcular los límites de operación nuevamente. Para este caso no será necesario utilizar un capacitor de mayor voltaje.

**Tabla 4.4.3.4.** Límites de operación con dos capacitores L2.

Valores incluyendo armónicas	Límite en % del valor nominal	Valor calculado %	Fuera del límite
$I_{RMS}$	135	70.0361	NO
$V_{RMS}$	110	70.0361	NO
$V_{PICO}$	120	84.7180	NO
KVAR	135	52.1839	NO

Elaborado por: Diego Játiva.

Los límites establecidos se encuentran dentro de los parámetros deseados. El filtro queda especificado de la siguiente forma:

**Tabla 4.4.3.4.** Características filtro 2<sup>do</sup> Armónico L2.

Datos del filtro	
Potencia [kVAR]	1
Voltaje [ $V_{L-L}$ ]	220
L [mH]	9.8481
C [uF]	54.8041
Factor de sintonía	1.925
R [ $m\Omega$ ]	870.7482

Elaborado por: Diego Játiva.

El filtro tiene las mismas características del propuesto para la Línea 1. La señal

reconstruida de corriente sin la aplicación del filtro se muestra en la Figura 4.4.3.1 y la señal de corriente posterior a la aplicación del filtro se muestra en la Figura 4.4.3.2.

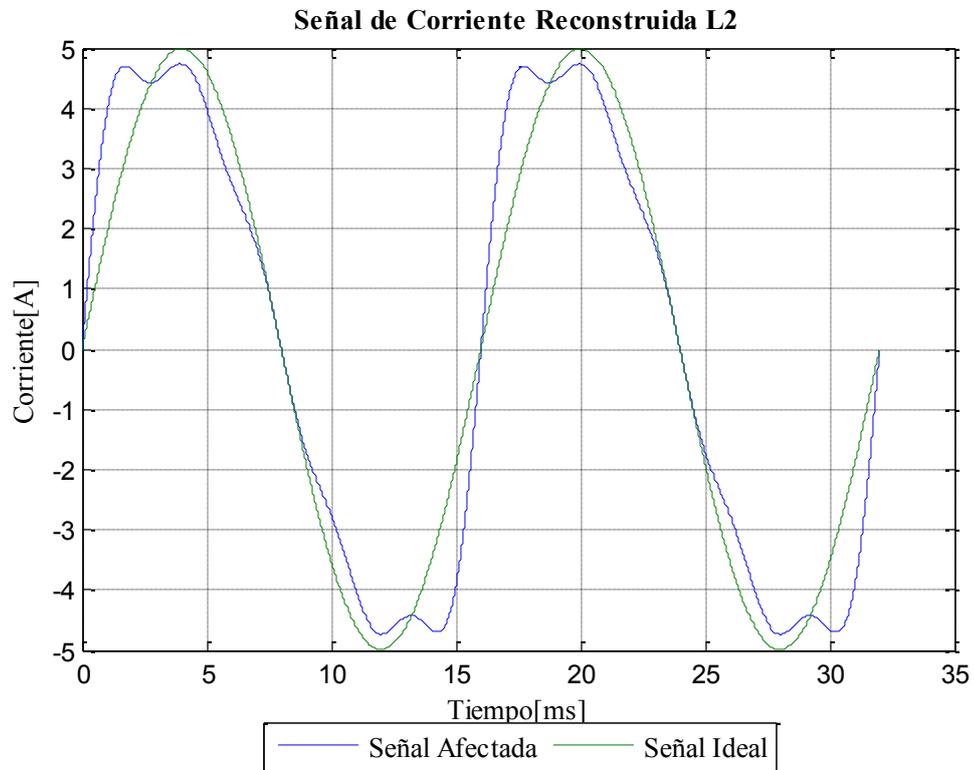


Figura 4.4.3.1. Señal de corriente reconstruida con todas sus componentes armónicas L2.  
Elaborado por: Diego Játiva

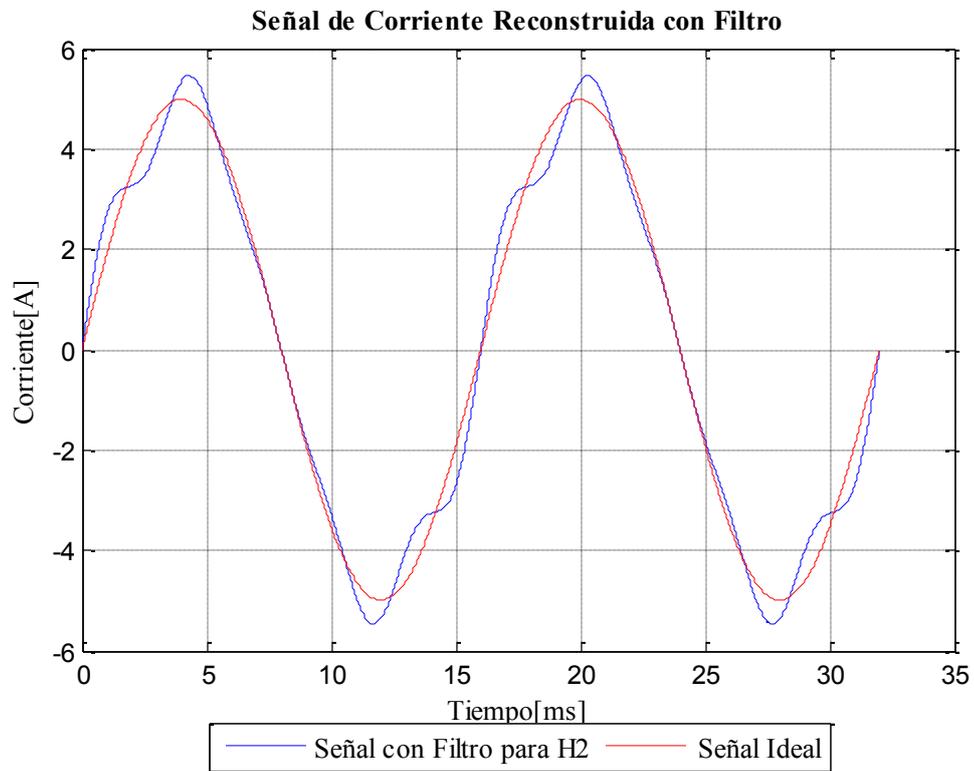


Figura 4.4.3.2. Simulación de corriente con filtro pasivo sintonizado para el 2<sup>do</sup> armónico en la L2.

Elaborado por: Diego Játiva

Se puede apreciar en la Figura 4.4.3.2 una mejoría notable en la forma de la corriente a comparación de la Figura 4.4.3.1 en donde aún no se aplicaba el filtro pasivo sintonizado. Al aplicar los filtros se realiza nuevamente el cálculo del TDD el cual se presenta en la Tabla 4.4.3.5.

**Tabla 4.4.3.5.** TDD después de aplicar filtros circuito calentador de inducción.

#	TDD (%)	Limites regulación No. ARCONEL 005/18	¿Cumple con la regulación?
Línea 1	41.0570	20	NO
Línea 3	21.5233	20	NO

Elaborado por: Diego Játiva.

Si bien se ve una notable mejora en comparación con los valores medidos aún se encuentran fuera de los límites establecidos por la regulación, esto debido a las componentes armónicas de orden superior que mantienen una presencia importante.

Para este caso la reducción del TDD en el circuito individual busca tener una repercusión positiva en el sistema eléctrico de todo el inmueble, esto debido a que el PCC donde la empresa distribuidora realizaría la medición en el caso de ser necesario sería en la acometida y no de forma individual en el circuito donde se realizó el presente análisis, este índice se ve reducido aún más si se toma en cuenta todas las cargas que se alimentan de la línea que también se alimenta este circuito.

El resultado final en cuanto al TDD se vería reflejado al aplicar los filtros propuestos de forma individual en cada uno de los circuitos pertenecientes a los calentadores de inducción y posteriormente medir una vez más este parámetro en el PCC correspondiente a la acometida del inmueble.

#### 4.5. Análisis económico

##### 4.5.1. Costo de los materiales

El valor de los componentes necesarios para los filtros propuestos en cada caso se muestra en la Tabla 4.5.1[39].

En el caso de los inductores es necesario la fabricación de los mismos debido a sus características, el costo de construcción se especifica en la Tabla 4.5.1.1[40].

**Tabla 4.5.1.** Costo de los materiales de los filtros.

Costo de Materiales			
Sistema eléctrico			
Ítem	Concepto	Cantidad	Costo (USD)

1	Condensador de corrección de factor de potencia trifásico 380 [V]-2,5 [kVAR]	1	40.80
2	Condensador de corrección de factor de potencia trifásico 380 [V]-3 [kVAR]	1	42.20
3	Condensador de corrección de factor de potencia trifásico 220 [V]-2 [kVAR]	2	47.80
4	Inductor 9 [A]- 0.9947 [mH]	1	8.92
5	Inductor 9 [A]- 0.7294 [mH]	1	8.92
7	Inductor 11 [A]- 2.1884 [mH]	1	8.92
Total			205.36
Circuito individual calentador de inducción			
8	Condensador de corrección de factor de potencia trifásico 220 [V]-1 [kVAR]	4	38.44
9	Inductor 5 [A]-9.8481 [mH]	1	8.92
Total			162.68

Elaborado por: Diego Játiva.

La implementación de los filtros pasivos sintonizados propuestos resulta económicamente viable si se realiza la instalación en el punto de la acometida exprés de todo el inmueble, de optarse por la instalación en cada circuito independiente el costo económico se vería mucho más elevado ya que existen 8 departamentos, 7 a la disposición del público y 1 perteneciente a los administradores.

**Tabla 4.5.1.1. Costo de implementación de filtros en forma individual.**

Circuito individual calentador de inducción		
Concepto	# de Departamentos	Costo (USD)
Filtros pasivo sintonizado	8	162.68
Total		1302.44

Elaborado por: Diego Játiva.

Los valores referenciales presentados para la construcción de los filtros fueron obtenidos al realizar cotizaciones a distribuidores de materiales eléctricos en el mercado ecuatoriano, en los anexos B1 y B2 se presentan las respectivas proformas.

# **CAPÍTULO V**

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1. Conclusiones**

Se ha logrado el objetivo principal de este trabajo de titulación que correspondía a conocer el impacto que tiene el uso de calentadores de agua del tipo inductivo en la distorsión armónica de corriente en la red de bajo voltaje del hotel Old Town Quito Suites.

El proceso de configuración e instalación del analizador FLUKE equipo utilizado para el presente estudio se realizó con éxito bajo todos los parámetros establecidos por la REGULACIÓN No. ARCONEL 005/18.

El proceso de análisis para la cuantificación del factor de distorsión armónica individual de corriente y del factor de distorsión de demanda total en el punto de medición fue un éxito ya que se pudo verificar que componentes armónicas se encontraban fuera los límites establecidos y como cada uno de estos contribuían a la distorsión de la señal de corriente.

Con respecto a las alternativas para la mitigación de armónicos se consiguió reducir la distorsión armónica de corriente al eliminar el componente armónico predominante mediante la aplicación de un filtro pasivo sintonizado, esto se pudo apreciar mediante una simulación de la señal de corriente con un notable mejoría en la forma de la señal, de igual manera se cumplió con los límites establecidos por la REGULACIÓN No. ARCONEL 005/18 en cuanto al TDD.

El diseño e implementación del filtro representa una propuesta viable desde el punto de vista económico y de funcionamiento.

En cuanto a la calidad del producto se pudo verificar que la empresa distribuidora cumple con todos los parámetros señalados en la REGULACIÓN No. ARCONEL 005/18 en cada uno de los índices que le correspondía.

Si bien el factor de potencia no es un índice que se establece en la regulación se encontró que este se encontraba con valores muy bajos y en atraso, este caso es bastante particular al tratarse de un inmueble del tipo comercial, esto puede tener un efecto negativo en la congestión de las líneas ya que se está inyectando reactivos, sin embargo en la regulación no se ha especificado ningún tipo de sanción para estos casos.

### **5.2. Recomendaciones**

En base a los resultados es recomendable desde el punto de vista económico y de funcionamiento la implementación de los filtros pasivos sintonizados en el la acometida

expres del inmueble ya que esta es la alternativa en donde se evidencio una considerable mejoría en cuanto a la reducción de la distorsión armónica de corriente y a la distorsión total de demanda. En comparación con la implementación individual de cada filtro en los departamentos pertenecientes al inmueble.

Para posibles trabajos de investigación a futuro en cuanto a diseño de filtros activos se recomienda tener en cuenta los armónicos presentes en el circuito individual del calentador de inducción ya que esta también es una alternativa que podría manejar de mejor forma todo el espectro armónico presente pero resulta mucho más compleja y costosa.

## REFERENCIAS

- [1] D. Committee, I. Power, and E. Society, “10.1109@Ieeestd.2014.6826459.Pdf,” vol. 2014, 2014.
- [2] IEEE Std 1159, *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, vol. 2019. 2019.
- [3] Arconel, “Resolución Nro. ARCONEL-053/18,” no. 004, p. 38, 2018.
- [4] C. Andrei and M. O. Popescu, “System used for Power Quality monitoring in a distribution grid,” *Proc. Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP*, pp. 357–359, 2014.
- [5] F. Martzloff and F. D. Martzloff, “A New IEC Standard on the Measurement of Power Quality Parameters A NEW IEC STANDARD ON THE MEASUREMENT,” 2003.
- [6] J. A. Arias and C. S. Pullaguari, “Análisis de la calidad de energía en la red de baja tensión del transformador #19597P, debido a la conexión del sistema de generación fotovoltaico para electromovilidad en la Universidad Politécnica Salesiana,” 2019.
- [7] M. Holguin and D. Gomezcoello, “Análisis de la calidad de energía eléctrica en el ‘Nuevo Campus’ de la Universida politécnica salesiana,” pp. 1–234, 2010.
- [8] N. G. Eassa, G. A. Elessawy, and A. A. Elseoud, “Examining power quality disturbances in electrical power distribution networks,” in *2003 IEEE Bologna PowerTech - Conference Proceedings*, 2003, vol. 3, pp. 451–455.
- [9] Power Standards Lab, “IEC 61000-4-30 Power Quality Measurement Methods Compliance Report,” no. March 2010, pp. 1–58, 2010.
- [10] D. H. Domínguez Guamán and B. G. Salvatierra Cáneppa, “Análisis de calidad de energía eléctrica en sistemas fotovoltaicos conectados a la red,” p. 93, 2016.
- [11] A. Jama, “Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito,” *Tesis*, pp. 1–10, 2017.
- [12] F. C. D. E. L. A. Rosa, *Harminics, Power System, and Smart Grids*. 2015.
- [13] R. L. Lenis Chambi and R. L. Vasquez-Arnez, “A study of the harmonic perturbation within the power quality in the Bolivian distribution system,” *Proc. Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP*, vol. 3, pp. 828–833, 2000.
- [14] G. Wakileh, *Fundamentos armónicos de sistemas de potencia*. 2001.
- [15] A. N. Mudiraj, “Improvement of Power Quality by mitigating harmonics in single phase AC distribution,” *Int. Conf. Autom. Control Dyn. Optim. Tech. ICACDOT 2016*, pp. 83–88, 2017.

- [16] V. M. Lopez-Martin, F. J. Azcondo, and A. Pigazo, "Power quality enhancement in residential smart grids through power factor correction stages," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 11, pp. 8553–8564, 2018.
- [17] S. Mane, R. Sapat, P. Kor, J. Shelar, R. D. Kulkarni, and J. Mundkar, "Microcontroller based automatic power factor correction system for power quality improvement," *2020 Int. Conf. Emerg. Technol. INCET 2020*, vol. 6, pp. 7–12, 2020.
- [18] F. P. Marafão, S. M. Deckmann, and J. A. G. Marafão, "Power factor analysis under non-sinusoidal and unbalanced systems," *Proc. Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP*, vol. 1, pp. 266–271, 2002.
- [19] J. G. Boudrias, "Power factor correction and energy saving with proper transformer, phase shifting techniques and harmonic mitigation," *2004 Large Eng. Syst. Conf. Power Eng. - Conf. Proceedings; Theme Energy Day After Tomorrow*, pp. 98–101, 2004.
- [20] D. Rabosky and P. K. P. K. Sen, "Optimization techniques for improved power factor and energy efficiency for batch industrial processes," *2014 IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meet. IAS 2014*, pp. 1–6, 2014.
- [21] S. Q. Xue and J. D. Cai, "Method of reactive power compensation in three-phase unbalance distribution grid," *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, no. 1, pp. 5–7, 2010.
- [22] F. Munteanu, C. Nemes, and D. Astanej, "Power quality indices proposal for networks operating in sinusoidal and unbalanced conditions," *2014 Int. Symp. Fundam. Electr. Eng. ISFEE 2014*, 2015.
- [23] B. K. Kimaiyo, C. Sirisamphanwong, and S. Somkun, "Effect of voltage unbalance on the power quality of three-phase grid-connected PV inverters," *iEECON 2019 - 7th Int. Electr. Eng. Congr. Proc.*, pp. 1–4, 2019.
- [24] M. Chindriș, A. Cziker, A. Miron, H. Bălan, A. Iacob, and A. Sudria, "Propagation of unbalance in electric power systems," *2007 9th Int. Conf. Electr. Power Qual. Util. EPQU*, 2007.
- [25] P. Q. Assessment and P. System, "Importance of Unbalance Supply Estimation for," no. 2, pp. 1–6, 2010.
- [26] M. Contreras, V. Cárdenas, and H. Calleja, "A review of solutions for harmonic propagation damping in power distribution networks," *Int. Power Electron. Congr. - CIEP*, pp. 195–200, 2006.

- [27] S. Z. Djokic and A. J. Collin, "Cancellation and attenuation of harmonics in low voltage networks," *Proc. Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP*, pp. 137–141, 2014.
- [28] H. Akagi, "New trends in active filters for power conditioning," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 32, no. 6, pp. 1312–1322, 1996.
- [29] F. Z. Peng and D. J. Adams, "Harmonic sources and filtering approaches-series/parallel, active/passive, and their combined power filters," in *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, 1999, vol. 1, pp. 448–455.
- [30] M. Z. Lowenstein, "Eliminating harmonic neutral current problems," in *Transmission and Distribution Exposition Conference: 2008 IEEE PES Powering Toward the Future, PIMS 2008*, 2008, pp. 1–4.
- [31] J. Cáceres and B. Montero, "Diseño Y Construcción De Un Calentador De Agua En Base Al Análisis De Un Sistema Eficiente De Inducción Electromagnética Para Hogares Pertenecientes Al Sector Socio Económico Medio.," 2016.
- [32] F. Reyes, C. Carreño, R. Ordoñez, R. Morales, and H. P. Martínez, "Calentador de Agua por Inducción," vol. 4, no. 3, pp. 2209–2362, 2012.
- [33] B. Potencia, U. Doméstico, R. O. Flores, R. M. Caporal, and A. A. H. Salinas, "Aplicaciones del Calentamiento por Inducción en Baja Potencia : Uso Doméstico , Agrícola y para Laboratorio," no. March 2016, 2018.
- [34] T. Committee, "IEEE Standard for Overhead-Type Distribution Transformers , 500 kVA and Smaller : High Voltage , 34 500 V and Below ; Low Voltage , 7970 / 13 800Y V and Below," *Distribution*, vol. 2005, no. December, 2005.
- [35] "Calculating Short-Circuit Current - IAEI Magazine." [Online]. Available: <https://iaeimagazine.org/features/calculations/calculating-short-circuit-current/>. [Accessed: 22-Mar-2021].
- [36] Y.-S. Cho and H. Cha, "Single-tuned Passive Harmonic Filter Design Considering Variances of Tuning and Quality Factor," *J. Int. Counc. Electr. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 7–13, 2011.
- [37] IEEE, *IEEE Std 18-2012 0.3 IEEE Stabdard for Shunt Power Capacitors*, vol. 2012, no. February. 2013.
- [38] J. S. Molano Aguas and R. E. Tique Rojas, "Diseño y construcción de un kit de filtros pasivos para la mitigación corriente armónicas," 2013.
- [39] L. A. Chacon, *LASER S.A Centro de mantenimiento eléctrico*. 2021, p. 961.

- [40] “Cotización 001-001-000000007 - CORPORACIÓN WOLF S.A. - Dátil.”  
[Online]. Available:  
<https://app.datil.com/ver/6afe388787ce47538e7f448e6bdd8a8b>. [Accessed: 14-  
May-2021].

## **ANEXOS**

### 6.1. Instalación del analizador de red FLUKE 435 en el PCC del inmueble.





## 6.2. Analizador de red FLUKE 435

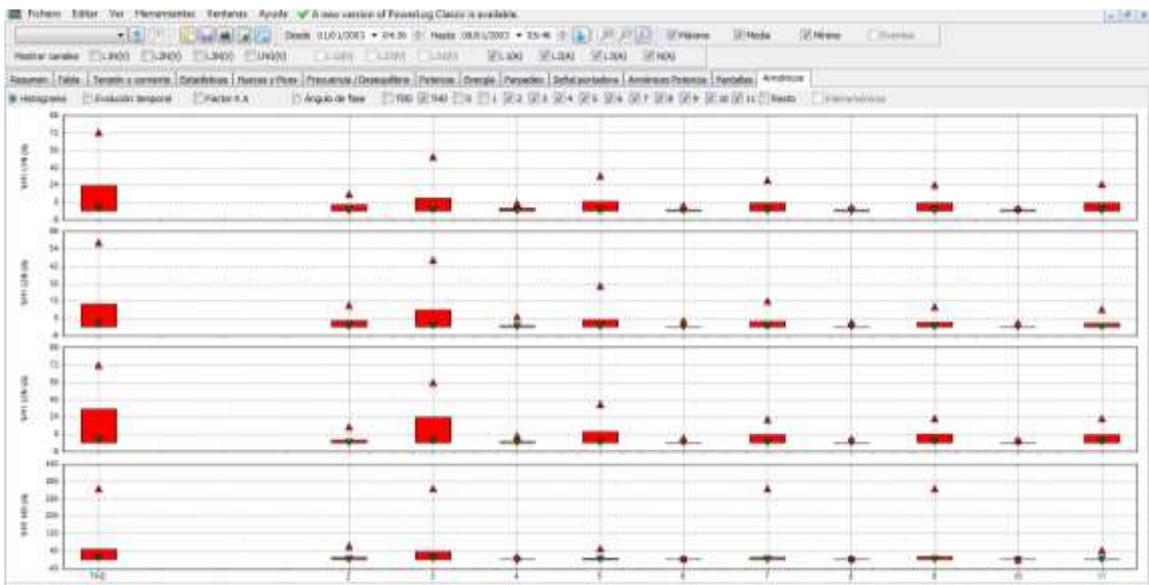
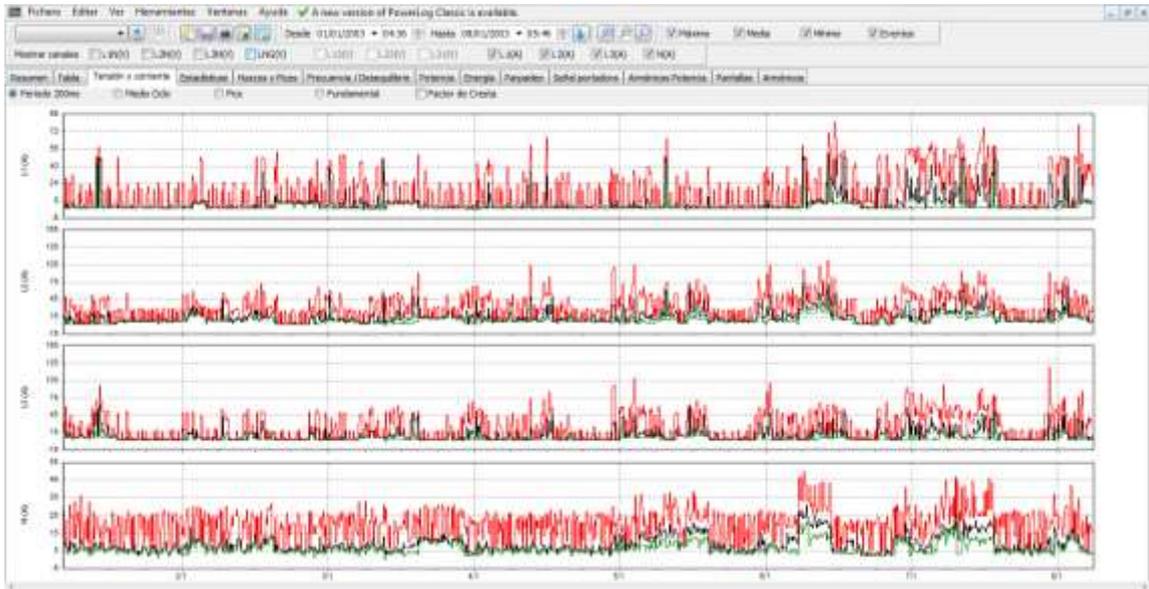
### CARACTERÍSTICAS DE ENTRADA

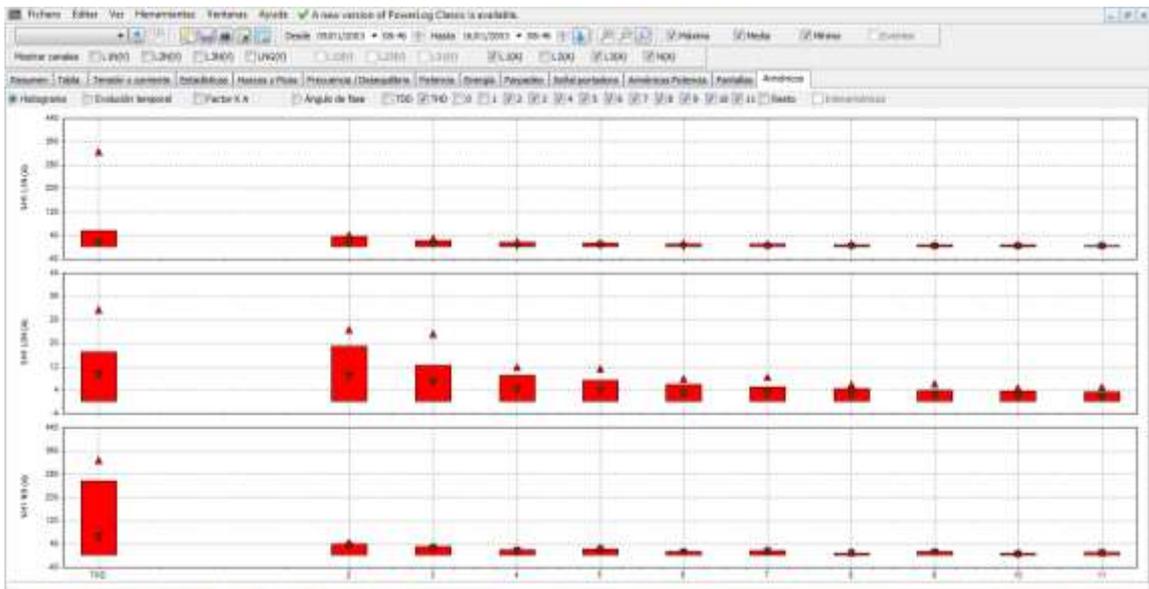
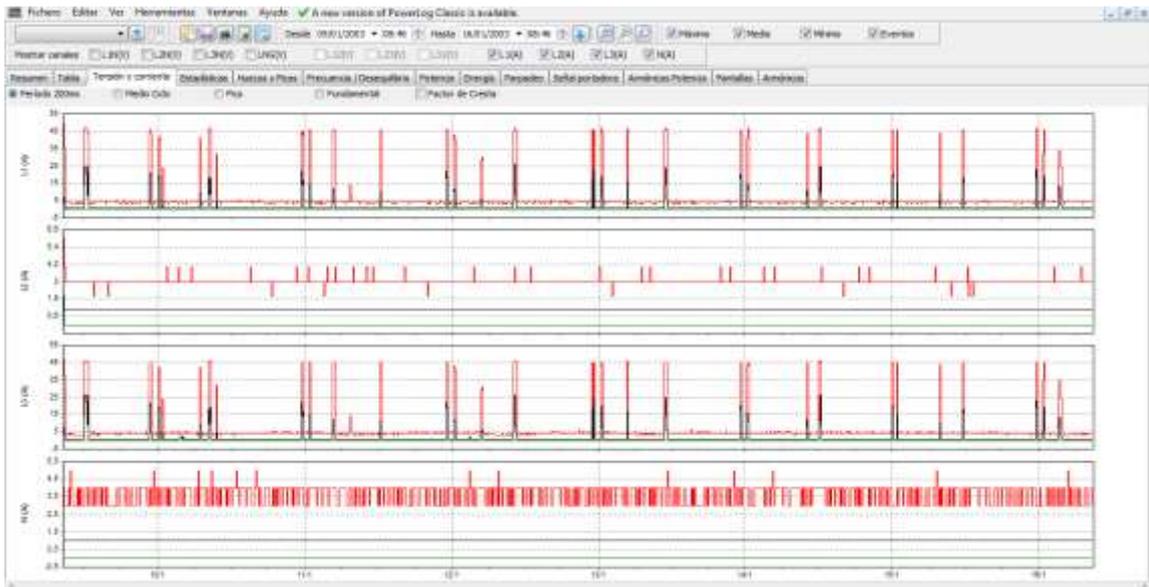
<b>Entradas de tensión</b>	
Número de entradas	4 (3 fases + neutro) acopladas en continua
 Tensión máxima de entrada	1000 Vrms
 Rango de tensión nominal	50...500 V Inrama dividida en tres rangos 500 V, 250 V y 125 V
 Tensión de pico máxima	6 kV
Impedancia de entrada	4 MΩ / 5 pF
Ancho de banda	> 10 kHz, hasta 100 kHz para visualización de transitorios
Factor de escala	1:1, 10:1, 100:1, 1000:1 y variable

<b>Entradas de corriente</b>	
Número de entradas	4 (3 fases + neutro) acopladas en continua
Tipo	Transformador de corriente de pinza con salida mV
 Rango de entrada nominal	0 - ± 5,625 pico de tensión, onda sinusoidal de 0 - 3,97 Vrms
Rango	1 ... 400 Arms con pinzas incluidas (H005) 0,1 ... 3000 Arms con pinzas opcionales
Impedancia de entrada	50 kΩ
Ancho de banda	>10 kHz
Factor de escala	0,1, 1, 10, 100, 1000 mA/A, variable, ES e H30flex

Frecuencia nominal	40 ... 70 Hz
Sistema de muestreo	
Resolución	Convertidor de analógico a digital de 16 bits en 8 canales
Velocidad máxima de muestreo	200 kS/s en cada canal simultáneamente
Muestreo RMS	5000 muestras en $10^{12}$ ciclos conforme a la norma IEC 61000-4-30
Sincronización PLL	4096 muestras en $10^{12}$ ciclos conforme a la norma IEC 61000-4-7

### 6.3. Software PowerLogClassic.





## 6.4. Especificaciones calentador de agua tipo inductivo



Product dimensions shown in inches.

### SPECIFICATIONS

Model #	ECO 8	ECO 11
kW	2	11/13
Voltage	240	220/240
Phase	Single	Single
Element	(1) 6kW @ 208V	(2) 5.5kW @ 220V
Required Breaker	40A DP	60A DP
Max Power	33A	54A
Required Wire	8 AWG	6 AWG
Water Connections	1/2" CF	1/2" CF
Dimensions	11.4" x 7.9" x 3.7"	11.4" x 7.9" x 3.7"
Weight	4.75 lb	6.5 lb
Digital Temp. Adj.	yes	yes
Heat Exchanger	Stainless Steel	Stainless Steel
Protection	Thermal Auto Reset	Thermal Auto Reset
Energy Efficiency	99.8%	99.8%
Certification	ETL Listed to UL-499 and CAN/CSA-C22.2 No. 64	
Warranty	Limited Lifetime	
Operating Pressure	Minimum: 25 PSI   Maximum: 150 PSI (Note: Flow Activated at 0.3 GPM)	

### TEMPERATURE RISE

The ECO 8 and ECO 11 are the perfect fit to provide hot water for point-of-use or low-flow applications. These models are equipped with patented, self-modulating technology so they will only consume the energy necessary for the specified demand. The ECO 8 and ECO 11 also come standard with digital temperature control in increments of 1°F. Below is a chart showing the flow rate capacity of each model, measured in gallons per minute for various inlet water temperatures and calculated for a set output temperature of 105°F.

### FLOW RATE CAPACITY CHART (GPM)

MODEL	37°F	42°F	47°F	52°F	57°F	62°F	67°F	72°F	77°F
ECO 8	0.5	0.9	0.9	1.0	1.1	1.3	1.4	1.7	2.0
ECO 11	1.3	1.4	1.5	1.7	1.9	2.1	2.3	2.7	3.2

Flow rate shown in GPM based on outlet temperature of 105°F. Inlet temperature varies by region and seasonal changes.

"EcoSmart" is a member of the Esmar, Inc. family of brands. © 2019 Esmar, Inc. All rights reserved.

ecosmartus.com

Sharing the Warmth

**ecosmart**  
TANKLESS WATER HEATERS

EcoSmart, 400 Captain Neville Dr, Waterbury, CT 06705 USA  
877-474-6473 | support@ecosmartus.com

**6.5. Proforma solicitada bobinas necesarias en el presente proyecto.**



Cotización 001-001-000000007

Mayo 14, 2021

**CORPORACIÓN WOLF S.A.**

RUC 1792725984001

Av. Morán Valverde y OEH diagonal Politécnica Salesiana Sur  
Quito, Pichincha

0996779364

info@corpwolf.com

[corpwolf.com/itio/](http://corpwolf.com/itio/)

Obligado a llevar contabilidad

**Para:**

Diego Jativa

CEDULA 1725472409

jativad@yahoo.com

Quito

Tel. 0998141866

Cantidad	Código	Descripción	Precio unitario	Descuento	Total
25 Hora	W502216	HORA DE DESARROLLO DE PROYECTO	\$8.928371	\$0.00	\$223.21
Subtotal sin impuestos					\$223.21
Subtotal IVA 12%					\$223.21
Valor IVA 12%					\$26.79
Valor total					\$250.00



6.6. Proforma solicitada condensadores necesarios en el presente proyecto.

**LASERSA**  
 CENTRO DE MANTENIMIENTO ELECTRICO  
 PORTOVIEJO- MANABI -ECUADOR  
 MATRIZ: PORTOVIEJO: CALLE 9 DE OCTUBRE Y ROCAFUERTE  
 Email: contabilidad@cmelaser.net  
 TELF: 0992797830 Portoviejo- 052A20185/Mantiz

RUC: 1391841299001  
 A ciudades de ingeniería eléctrica,  
 mantenimiento eléctrico y electrónico industrial,  
 rebobinado de todo tipo de motores eléctricos  
 industriales, venta de materiales para bobinado.

PROFORMA # **3176**

Fecha: 18 de mayo de 2021  
 Cliente: "SAME" SR Diego Jativa  
 RUC: 136006630001  
 Dirección: \_\_\_\_\_ Teléfono: \_\_\_\_\_

ITEMS	Detalle del producto	Código	Cantidad	Valor unitario	Valor total
1	Condensadores para Corrección del Factor de Potencia WEG   UCWT HD Unidad Condensadora Trifásica Heavy Duty   180 Vac UCWT1 V48 L10 HD	10046007	2	\$ 34,20	\$ 68,40
2	Condensadores para Corrección del Factor de Potencia WEG   UCWT HD Unidad Condensadora Trifásica Heavy Duty   180 Vac UCWT1 5V48 L16 HD	10046008	2	\$ 36,36	\$ 72,72
3	Condensadores para Corrección del Factor de Potencia WEG   UCWT HD Unidad Condensadora Trifásica Heavy Duty   180 Vac UCWT2 V48 L10 HD	10046009	2	\$ 38,74	\$ 77,48
4	Condensadores para Corrección del Factor de Potencia WEG   UCWT HD Unidad Condensadora Trifásica Heavy Duty   180 Vac UCWT2 5V48 L16 HD	10046010	2	\$ 40,90	\$ 81,80
5	Condensadores para Corrección del Factor de Potencia WEG   UCWT HD Unidad Condensadora Trifásica Heavy Duty   180 Vac UCWT5 V48 L10 HD	10046011	2	\$ 42,19	\$ 84,38
6	Condensadores para Corrección del Factor de Potencia WEG   UCWT HD Unidad Condensadora Trifásica Heavy Duty   180 Vac UCWT5 V48 L16 HD	10046012	2	\$ 52,28	\$ 104,56
7	Condensadores para Corrección del Factor de Potencia WEG   UCWT HD Unidad Condensadora Trifásica Heavy Duty   208 Vac UCWT1 V23 L10 HD	10046000	2	\$ 38,44	\$ 76,88
8	Condensadores para Corrección del Factor de Potencia WEG   UCWT HD Unidad Condensadora Trifásica Heavy Duty   208 Vac UCWT1 5V23 L16 HD	10046001	2	\$ 42,80	\$ 85,60
9	Condensadores para Corrección del Factor de Potencia WEG   UCWT HD Unidad Condensadora Trifásica Heavy Duty   208 Vac UCWT2 V23 L10 HD	10046002	2	\$ 47,08	\$ 94,16
10	Condensadores para Corrección del Factor de Potencia WEG   UCWT HD Unidad Condensadora Trifásica Heavy Duty   208 Vac UCWT2 5V23 L16 HD	10046003	2	\$ 51,92	\$ 103,84
11	Condensadores para Corrección del Factor de Potencia WEG   UCWT HD Unidad Condensadora Trifásica Heavy Duty   208 Vac UCWT3 V23 L16 HD	10046004	2	\$ 56,04	\$ 112,08

Validez: 15 Días  
 Garantía: 12 meses  
 Tiempo de entrega: 5-10 Semanas  
 Forma de pago: 30% Anticipo 30% Previa entrega  
 Vendedor: Iamm/Asocia

Ing. Luis Alberto Chacón  
 LASER S.A.  
 GERENTE

SUB TOTAL	961,76
DESCUENTO 30%	288,53
SUBTOTAL 12%	673,23
SUBTOTAL 0%	
IVA 12%	80,79
VALOR TOTAL	754,02

ASISTENTE TECNICO Y TALLER AUTORIZADO WEG  
 TALLER DE MANTENIMIENTO DE VARIADORES DE FRECUENCIA Y ARRANCADORES SUAVES