

# UNIVERSIDAD DE CUENCA



**Facultad de Ingeniería**  
**Carrera de Ingeniería Eléctrica**

**“Modelo y análisis de armónicos en sistemas de distribución”**

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

**Autores:**

Karla Gabriela Genovez Ramírez

C.I. 0105706493

Bryan Freddy Ureña Torres

C.I. 0104596234

**Director:**

Ing. Santiago Patricio Torres Contreras, PhD.

C.I. 0102448958

**Tutores:**

Ing. Manolo Alejandro Molina Cobos.

C.I. 0104562897

Ing. Silvio Patricio Quituisaca Astudillo, MSc.

C.I. 0103307054

**Cuenca – Ecuador**

**2018**



## RESUMEN

En este trabajo se establece una metodología de modelación para el estudio de armónicos en Sistemas de Distribución que permite analizar la distorsión generada por la introducción de dispositivos no lineales en la red. Inicialmente se presenta la revisión del estado del arte, donde se detallan los modelos más relevantes de la literatura de los elementos que conforman el sistema. Se describe la metodología utilizada para representar las cargas agregadas variantes en el tiempo aplicando un proceso de distribución de carga y un método de caracterización de fuentes de corriente armónica para cada grupo de consumo. Mediante el software Power Factory DIgSILENT se crea el modelo de red con la interfaz de intercambio de archivos DGS partiendo de la información del SIG, para posteriormente analizar la red corriendo flujos de potencia armónica. Además, se desarrolló un script en el lenguaje de programación de DIgSILENT DPL que automatiza el procedimiento de simulación para obtener resultados en un periodo de tiempo de un día. La metodología se implementó en el alimentador 0324 incluyendo varios casos de estudio que incorporan cocinas de inducción, paneles fotovoltaicos, cargadores de vehículos eléctricos y distorsiones externas de voltaje dentro del alimentador. Finalmente, se comparan los resultados de medición y simulación del caso base verificando la aproximación del modelo, y se realiza un análisis de los resultados en los casos de estudio.

**Palabras clave:** ANÁLISIS ARMÓNICO, CARACTERIZACIÓN DE FUENTES ARMÓNICAS, CENTROSUR, DIGSILENT, DISTRIBUCIÓN DE CARGA, DGS, DPL, MODELO DE CARGA NO LINEAL, SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.



## ABSTRACT

This work proposes a modelling methodology for studying the harmonics levels in electric distribution systems and analyzing the distortion generated due to the growing use of nonlinear devices in the network. Initially, a review of state of art is presented, where the most relevant models in literature are detailed. Also, the methodology used to represent the aggregate time-varying loads, by applying a load distribution process and characterization method of harmonic current source for each kind of customers, is described. Using Power Factory DIgSILENT software, the network model is created throughout the DGS file exchange interface based on the GIS information. This software is also used to analyze the network running harmonic power flows. In addition, a script was developed using DIgSILENT Programming Language DPL for automating the simulation procedure to obtain results in a one day period. The methodology was implemented in 0324 feeder, including several case studies that incorporate induction cookers, photovoltaic panels, electric vehicle chargers and external voltage distortions within the feeder. Finally, measurement and simulation results of the base case are compared, verifying the accuracy of model; the results of each scenario are analyzed.

**keywords:** CHARACTERIZATION OF HARMONIC SOURCES, CENTROSUR, DIGSILENT, DISTRIBUTION SYSTEM, DGS, DPL, HARMONIC ANALYSIS, LOAD DISTRIBUTION, NON-LINEAR LOAD MODEL.

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	<b>2</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>3</b>

### **CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN**

1.1 JUSTIFICACIÓN .....	20
1.2 ALCANCE .....	22
1.3 OBJETIVOS .....	22
1.3.1 Objetivo general .....	22
1.3.2 Objetivos específicos .....	22
1.4 CONTENIDO.....	22

### **CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS DE LOS ARMÓNICOS**

2.1 DEFINICIÓN DE ARMÓNICOS.....	24
2.2 ORDEN ARMÓNICO Y SECUENCIA DE FASE .....	25
2.3 DISTORSIÓN ARMÓNICA.....	26
2.3.1 Distorsión Armónica de Corriente y Tensión .....	28
2.4 ÍNDICES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA .....	28
2.4.1 Distorsión Armónica Individual .....	29
2.4.2 Distorsión Armónica Total (THD).....	29
2.4.3 Distorsión Total de Demanda (TDD) .....	30
2.5 FUENTES DE ARMÓNICOS .....	30
2.5.1 Convertidores de Potencia .....	31
2.5.2 Reguladores de Velocidad Ajustables (ASD) .....	31
2.5.3 Transformadores .....	31
2.5.4 Máquinas Rotativas .....	32
2.5.5 Hornos de Arco .....	32
2.5.6 Hornos de Inducción .....	32
2.5.7 Lámparas Fluorescentes Compactas (CFL) y Lámparas Led (LED).....	32
2.5.8 Electrodomésticos .....	33
2.5.9 Cargadores de Vehículos Eléctricos .....	33
2.6 EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS .....	34
2.6.1 Bancos de Condensadores .....	34
2.6.2 Factor de Potencia Verdadero (True Power Factor).....	34
2.6.3 Transformadores .....	35
2.6.4 Máquinas Rotativas .....	35
2.6.5 Sistemas de Protección.....	36
2.6.6 Conductores .....	36



2.6.7	Sistemas de Comunicación .....	37
2.7	ELEMENTOS PARA EL CONTROL DE ARMÓNICOS.....	37
2.7.1	Filtros Activos .....	38
2.7.2	Filtros Pasivos .....	38
2.7.3	Filtros Pasivos Serie.....	38
2.7.4	Filtros Pasivos en derivación.....	39
2.7.5	Transformadores en Zigzag .....	39
2.8	MEDICIÓN DE ARMÓNICOS .....	39
2.8.1	Áreas en donde se realiza el registro .....	40
2.8.2	Equipos de medición .....	40
2.9	MARCO REGULATORIO DE ARMÓNICOS.....	41
2.9.1	Standard IEEE 519.....	41
2.9.2	Norma IEC 61000 para Armónicos.....	45
2.9.3	Regulación CONELEC 004/01 .....	50

**CAPÍTULO 3**

**MODELO DE RED PARA ESTUDIOS DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN**

3.1	INTRODUCCIÓN .....	52
3.2	FILOSOFÍAS DE ANÁLISIS DE ARMÓNICOS .....	52
3.2.1	Análisis en el Dominio del Tiempo .....	52
3.2.2	Análisis en el Dominio de la Frecuencia.....	53
3.3	MODELO DE LOS ELEMENTOS DE LA RED.....	54
3.3.1	Red Externa y Distorsión de Fondo.....	55
3.3.2	Líneas y Cables.....	56
3.3.3	Transformadores .....	56
3.3.4	Bancos de Capacitores .....	56
3.3.5	Cargas.....	57
3.3.6	Metodologías de Modelación de Carga Armónica Agregada Variante en el Tiempo ..	61
3.4	CARACTERIZACIÓN DE ELEMENTOS VARIANTES EN EL TIEMPO.....	63
3.4.1	Distorsión de Fondo variante en el tiempo .....	64
3.4.2	Cargas armónicas agregadas variantes en el tiempo .....	65

**CAPÍTULO 4**

**MODELACIÓN Y SIMULACIÓN**

4.1	CASO BASE .....	74
4.2	INFORMACIÓN DISPONIBLE .....	75
4.2.1	SCADA.....	75
4.2.2	Varcorders.....	76
4.2.3	Medición en Grandes Consumidores .....	77
4.2.4	Base de Datos de Clientes y Luminarias.....	77
4.3	DISTRIBUCIÓN DE CARGA.....	77



4.4	MODELACIÓN EN DIGSILENT .....	79
4.4.1	DlgSILENT .....	79
4.4.2	Interfaz de Intercambio de Archivos - DGS .....	79
4.4.3	Lenguaje de Escritura de Programas - DPL.....	80
4.5	CASOS DE ESTUDIO.....	83
4.5.1	Cocinas de Inducción .....	83
4.5.2	Paneles Fotovoltaicos .....	84
4.5.3	Cargadores de Vehículos Eléctricos .....	86
4.5.4	Distorsión Externa .....	88
<b>CAPÍTULO 5</b>		
<b>RESULTADOS</b>		
5.1	ANÁLISIS DEL CASO BASE .....	90
5.1.1	Transformadores de Distribución .....	90
5.1.2	Alimentador .....	95
5.2	ANÁLISIS DE LOS CASOS DE ESTUDIO .....	97
5.2.1	Transformadores de Distribución .....	97
5.2.2	Alimentador .....	101
<b>CAPÍTULO 6</b>		
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>		
6.1	CONCLUSIONES.....	104
6.2	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	105
<b>REFERENCIAS .....</b>		<b>107</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>113</b>
ANEXO 1: Histogramas de Distribución de Frecuencia.....		113
ANEXO 2: Perfiles diarios de magnitud de corrientes armónicas de los diferentes tipos de consumidores. ....		118
ANEXO 3: Interfaz de Intercambio de Archivos DGS con Excel.....		121
ANEXO 4: Diagrama Unifilar del alimentador 0324 en DlgSILENT. ....		124



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Representación en Series de Fourier de una onda distorsionada [2].	24
Figura 2. 2 (a) Componente Fundamental (b) Tercer armónico (c) Quinto armónico (d) Séptimo armónico [3].	26
Figura 2. 3 Señal de corriente distorsionada causada por la resistencia no lineal [2].	27
Figura 2. 4 Onda Distorsionada [2].	27
Figura 2. 5 Corriente armónica producida por una carga no lineal [2].	28
Figura 2. 6 PCC en el lado de alta tensión del Transformador para clientes industriales [2].	42
Figura 2. 7 PCC en el lado de baja tensión del Transformador para clientes comerciales [2].	42
Figura 3. 1 Análisis de armónicos en el dominio de la frecuencia.	53
Figura 3. 2 Representación General de un Sistema de Distribución para Estudios de Armónicos.	55
Figura 3. 3 Modelo de la Red Externa y Distorsión de Fondo.	56
Figura 3. 4 Niveles de Agregación de Cargas.	58
Figura 3. 5 Grafica Polar de Magnitud y Angulo de corrientes armónicas [32].	59
Figura 3. 6 PDF de Magnitudes [32].	60
Figura 3. 7 PDF de Ángulos [32].	60
Figura 3. 8 Medición de corriente en un Consumidor Residencial [11].	61
Figura 3. 9 Medición de corriente en un Hotel [11].	61
Figura 3. 10 Modelación Basada en Componentes.	62
Figura 3. 11 Curva de distorsión armónica.	65
Figura 3. 12 Curva de Demanda de clientes residenciales - Estrato C.	66
Figura 3. 13 Histograma de la magnitud del 3er armónico de corriente de la clase residencial.	71
Figura 3. 14 Diagramas de caja de la magnitud del 3er armónico de corriente de la clase residencial.	71
Figura 3. 15 Perfil de la magnitud de las corrientes armónicas de la clase residencial.	72
Figura 3. 16 Histograma del ángulo de fase del 3er armónico de corriente de la clase comercial.	73
Figura 4. 1 Alimentador 0324 SIG.	74
Figura 4. 2 Curva de Carga Apilada por Grupo de Consumo.	75
Figura 4. 3 Medición del SCADA del alimentador 0324.	76
Figura 4. 4 Ubicación de Varcorders en el alimentador 0324.	76
Figura 4. 5 Ubicación de los medidores en el Hospital.	77
Figura 4. 6 Áreas y ubicación de los equipos en el alimentador 0324.	78
Figura 4. 7 Ajuste con curvas de demanda y con Medición.	79
Figura 4. 8 Modelo del alimentador en DIgSILENT.	80
Figura 4. 9 Esquema de integración de la DPL.	81
Figura 4. 10 Diagrama de Flujo de la DPL.	82
Figura 4. 11 Alimentador con Cocinas de Inducción.	83



Figura 4. 12 Perfil de Carga.....	83
Figura 4. 13 Modelo de las cocinas de inducción en DIgSILENT.....	84
Figura 4. 14 Ubicación de Paneles en el Alimentador.....	85
Figura 4. 15 Perfil de Generación del Panel Fotovoltaico.....	85
Figura 4. 16 Perfil de Corrientes Armónicas.....	85
Figura 4. 17 Elemento PVsys en DIgSILENT.....	86
Figura 4. 18 Ubicación en el alimentador.....	87
Figura 4. 19 Elemento PVsys en DIgSILENT.....	87
Figura 4. 20 Modelo de Vehículos Eléctricos en DIgSILENT.....	88
Figura 4. 21 Armónicos de Voltaje en la Subestación 03 Monay.....	88
Figura 4. 22 Voltajes Armónicos para el caso de Distorsión Externa.....	89
Figura 5. 1 Perfil de Carga del Transformador #21776.....	91
Figura 5. 2 Perfil de Carga del Transformador #29818.....	91
Figura 5. 3 3er Armónico de Corriente del Transformador #21776.....	92
Figura 5. 4 3er Armónico de Corriente del Transformador #29818.....	92
Figura 5. 5 THD de Corriente del Transformador #21776.....	92
Figura 5. 6 THD de Corriente del Transformador #29818.....	93
Figura 5. 7 3er Armónico de Voltaje del Transformador #21776.....	93
Figura 5. 8 3er Armónico de Voltaje del Transformador #29818.....	94
Figura 5. 9 THD de Voltaje del Transformador #21776.....	94
Figura 5. 10 THD de Voltaje del Transformador #29818.....	94
Figura 5. 11 Perfil de Carga del Alimentador 0324.....	95
Figura 5. 12 Corrientes Armónicas del Alimentador 0324.....	96
Figura 5. 13 Voltajes Armónicos del Alimentador 0324.....	96
Figura 5. 14 Perfil de Carga del Transformador #7639.....	97
Figura 5. 15 Perfil de Carga del Transformador #21776.....	98
Figura 5. 16 Perfil de Carga del Transformador #6534.....	98
Figura 5. 17 THD de Corriente del Transformador #7639.....	99
Figura 5. 18 THD de Corriente del Transformador #21776.....	99
Figura 5. 19 THD de Corriente del Transformador #6534.....	99
Figura 5. 20 THD de Voltaje del Transformador #7639.....	100
Figura 5. 21 THD de Voltaje del Transformador #21776.....	100
Figura 5. 22 THD de Voltaje del Transformador #6534.....	101
Figura 5. 23 Perfil de Carga del Alimentador 0324.....	101
Figura 5. 24 Corrientes Armónicas del Alimentador 0324.....	102
Figura 5. 25 Voltajes Armónicos del Alimentador 0324.....	102
Figura 5. 26 Voltajes Armónicos del Alimentador 0324.....	103
Figura A1. 1 3er armónico de corriente a las 22h00 de un consumidor residencial.....	113





---

Figura A1. 2 5to armónico de corriente a las 19h00 de un consumidor residencial.....	113
Figura A1. 3 7mo armónico de corriente a las 06h00 de un consumidor residencial.....	114
Figura A1. 4 3er armónico de corriente a las 20h00 de un consumidor comercial.....	114
Figura A1. 5 5to armónico de corriente a las 16h00 de un consumidor comercial.....	115
Figura A1. 6 7mo armónico de corriente a las 10h00 de un consumidor comercial.....	115
Figura A1. 7 3er armónico de corriente a las 18h00 de un consumidor industrial.....	116
Figura A1. 8 5to armónico de corriente a las 09h00 de un consumidor industrial.....	116
Figura A1. 9 7mo armónico de corriente a las 15h00 de un consumidor industrial.....	117
Figura A2. 1 Espectro de Armónicos de Corriente de un consumidor residencial.....	118
Figura A2. 2 Espectro de Armónicos de Corriente de un consumidor comercial.....	118
Figura A2. 3 Espectro de Armónicos de Corriente de un consumidor industrial.....	119
Figura A2. 4 Espectro de Armónicos de Corriente de otros consumidores.....	119
Figura A2. 5 Espectro de Armónicos de Corriente de las luminarias.....	120
Figura A3. 1 Almacenamiento de la información del alimentador 0324 en Excel.....	121
Figura A3. 2 Modelo de Red Externa en DIgSILENT.....	122
Figura A3. 3 Transformador de Distribución del Alimentador en DIgSILENT.....	122
Figura A3. 4 Transformador de Distribución del Alimentador en DIgSILENT.....	123
Figura A4. 1 Diagrama Unifilar del alimentador 0324 modelado en DIgSILENT.....	124
Figura A4. 2 Diagrama de árbol detallado del alimentador 0324 modelado en DIgSILENT.....	125



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Relación entre el Orden Armónico y Secuencia de fase [3].	26
Tabla 2. 2 Cargas Lineales y No lineales en una instalación residencial [5].	33
Tabla 2. 3 Equipos de Medición de Armónicos [26].	40
Tabla 2. 4 Límites de Distorsión armónica de voltaje en porcentaje del voltaje nominal de frecuencia fundamental [27].	43
Tabla 2. 5 Límites del contenido Armónico de Corriente [27].	44
Tabla 2. 6 Multiplicadores recomendados para aumentos en los límites de corriente de armónicos [27].	45
Tabla 2. 7 Niveles de compatibilidad para tensiones armónicas individuales para la red de Distribución de Baja Tensión según IEC 61000-2-2 [2].	46
Tabla 2. 8 Límites de corriente armónica según la Norma IEC 61000-3-2, clase A y B [2].	47
Tabla 2. 9 Límites de corriente armónica según la Norma IEC 61000-3-2, clase C [2].	47
Tabla 2. 10 Límites de corriente armónica según la Norma IEC 61000-3-2, clase D [2].	47
Tabla 2. 11 Límites de corriente armónica según la Norma IEC 61000-3-4 en porcentaje [2].	48
Tabla 2. 12 Niveles de compatibilidad de Tensiones Armónicas para sistemas de BT y MT [2].	49
Tabla 2. 13 Niveles de planificación de Tensiones Armónicas para sistemas de MT [2].	49
Tabla 2. 14 Límites de las Tensión Armónicas individuales y THD según la Regulación CONELEC 004/01 [28].	51
Tabla 3. 1 Modelos de Cargas para la frecuencia fundamental y frecuencia armónica.	57
Tabla 3. 2 Características de los Equipos de Medición.	69
Tabla 3. 3 Cantidad de muestras por cada clase de consumo.	70
Tabla 3. 4 Cantidad de muestras por cada clase de consumo.	72
Tabla 4. 1 Número de clientes del alimentador 0324.	74
Tabla 4. 2 Consumo de los clientes del alimentador 0324.	75
Tabla 4. 3 Perfil de Armónicos.	84
Tabla 4. 4 Perfil de Armónicos de Cargadores de Vehículos Eléctricos.	87
Tabla 5. 1 Información de Transformadores analizados en el Caso Base.	90
Tabla 5. 2 Información de Transformadores analizados los Casos de Estudio.	97

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio  
Institucional

---

Karla Gabriela Genovez Ramírez en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Modelo y análisis de armónicos en sistemas de distribución", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, Septiembre de 2018.



Karla Gabriela Genovez Ramírez

C.I: 0105706493

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio  
Institucional

---

Bryan Freddy Ureña Torres en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Modelo y análisis de armónicos en sistemas de distribución", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, Septiembre de 2018.



Bryan Freddy Ureña Torres

C.I: 0104596234



Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Karla Gabriela Genovez Ramírez, autor del trabajo de titulación “Modelo y Análisis de Armónicos en Sistemas de Distribución”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, Septiembre de 2018.

Karla Gabriela Genovez Ramírez

C.I: 0105706493

Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Bryan Freddy Ureña Torres, autor del trabajo de titulación “Modelo y Análisis de Armónicos en Sistemas de Distribución”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, Septiembre de 2018.



Bryan Freddy Ureña Torres

C.I: 0104596234



**ESTA TESIS HA SIDO DESARROLLADA DENTRO DEL CONVENIO ENTRE LA  
UNIVERSIDAD DE CUENCA Y LA EMPRESA ELÉCTRICA REGIONAL CENTRO  
SUR C.A.**



## AGRADECIMIENTOS

*Queremos expresar nuestra más sincera gratitud a:*

*Nuestra familia, especialmente a nuestros padres, por su esfuerzo, amor y apoyo incondicional.*

*Nuestro director PhD. Santiago Torres, quién con su experiencia y conocimientos nos guió en el desarrollo de este proyecto.*

*Al personal de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A, por habernos ayudado y facilitado la información, especialmente a los Ingenieros Manolo Molina, Patricio Quituisaca y Sergio Zambrano por su predisposición y colaboración para la culminación del trabajo de titulación.*

*Los docentes de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Cuenca por la sabiduría transmitida.*

***Bryan & Karla***





## DEDICATORIAS

*A mis padres, Iván y Katy quiénes con su amor me han infundado valores y principios para forjar mi camino, y sobretodo, me han enseñado que con esfuerzo, dedicación y perseverancia puedo alcanzar mis metas. A mis hermanos, Sebastián, Paola y Andrés, por motivarme y acompañarme en cada paso de mi vida. A Bryan por todo el cariño e incondicional apoyo brindado durante este tiempo.*

**Karla Genovez Ramírez**

*A mi abuelito Jorge Arturo Torres Torres (+), ejemplo de padre y maestro, honesto, sencillo y laborioso. A mi familia, por su cariño constante. A mis padres, quienes, con amor y esfuerzo, han encaminado mi vida. A Karla, compañera y guía, por transmitirme con afecto sus mejores virtudes, responsabilidad y perseverancia.*

**Bryan Ureña Torres**



---

## CAPÍTULO 1

### INTRODUCCIÓN

---

Un sistema eléctrico en condiciones ideales presenta formas de onda de voltaje y corriente sinusoidales de amplitud y frecuencia constante. Sin embargo, los sistemas eléctricos no operan bajo estas condiciones, ya que sus componentes provocan diversos efectos que modifican las formas de onda sinusoidales [1].

Las ondas distorsionadas se analizan descomponiéndolas en una suma infinita de senos y cosenos de frecuencias múltiples de la fundamental, donde a cada componente de frecuencia se le denomina armónico. La deformación causada por la presencia de armónicos en una onda de voltaje o corriente se denomina 'distorsión armónica' [2]. La distorsión se produce por la operación de dispositivos no lineales, en los cuales la corriente no es proporcional al voltaje aplicado. Las corrientes armónicas circulan a través de las impedancias del sistema, ocasionando caídas de tensión distorsionadas en los equipos de transporte y conversión de energía [2], [3].

Los sistemas eléctricos de potencia operan con porcentajes de distorsión armónica dentro de límites que se establecen en normas, estándares y regulaciones. Los sistemas de generación y transmisión, por lo general, tienen bajos niveles de distorsión armónica, mientras que los sistemas de distribución que conectan la mayor cantidad de usuarios del sistema eléctrico presentan niveles más altos de distorsión armónica por la proximidad a los usuarios finales [2], [3]. En las redes de distribución, los niveles de armónicos se han incrementado por el uso intensivo de dispositivos de estado sólido.

Dispositivos individuales o grandes instalaciones generan, en mayor o menor medida, corrientes distorsionadas dependiendo de las características de los dispositivos y la red a la cual se conectan [4]. Por lo general, cada carga no lineal en consumidores produce corrientes armónicas poco significativas, pero el efecto colectivo puede producir corrientes armónicas importantes [5].

Los voltajes armónicos en el sistema eléctrico provocan mal funcionamiento, y en algunos casos, daño de equipos eléctricos como bancos de capacitores,



transformadores, motores y generadores, equipos de medición y equipos electrónicos de control. Algunos de los problemas más comunes causados por niveles altos de distorsión armónica pueden ser el aumento de resistencia y pérdidas adicionales en los conductores, cables y transformadores, sobrecalentamiento del neutro, sobrecalentamiento y vibración en transformadores y motores AC, entre otros [1] – [3], [6]. Por lo tanto, el estudio de los efectos provocados por las cargas no lineales en los elementos del sistema eléctrico, y las acciones de mitigación se deben considerar en las etapas de planificación y operación de redes de distribución.

Las empresas de distribución implementan campañas de medición para determinar los niveles de armónicos en sus redes de distribución y comprobar si cumplen con los límites establecidos por los estándares o las entidades de regulación [4]. El análisis de armónicos en redes de distribución se realiza, no solamente para evaluar si se cumplen los niveles de distorsión armónica con relación a los estándares, sino también para evaluar el posible incremento de la distorsión armónica por la introducción de nuevas fuentes de corrientes armónicas e inclusive determinar la efectividad de algunas medidas de mitigación [7]. Los estudios de armónicos en los sistemas eléctricos se pueden realizar aplicando dos metodologías principales: análisis y procesamiento de mediciones, o modelación y simulación de armónicos.

Existen métodos de análisis en el dominio del tiempo, en el dominio de la frecuencia y métodos híbridos de tiempo-frecuencia [1], [8]. En este trabajo la red se analiza en el dominio de la frecuencia mediante dos submodelos, el primero para determinar las corrientes en la frecuencia fundamental, y el segundo para obtener las corrientes y voltajes en frecuencias armónicas. Se desarrolló una metodología para obtener el modelo de elementos que generan armónicos como cargas y distorsión externa. Los demás elementos de la red tienen modelos dependientes de la frecuencia similares a los utilizados en estudio de flujos de potencia armónica.

Las cargas lineales se representan mediante impedancias que dependen de la frecuencia, mientras que las cargas no lineales se modelan como fuentes de corriente que inyectan señales de corriente armónica en el punto de conexión. Sin embargo, la metodología utilizada considera las cargas como elementos no lineales



agregados variantes en el tiempo que representan un conjunto de usuarios agrupados por clases de consumo conectados a los terminales de baja tensión del transformador. Los perfiles de carga se determinan mediante un procedimiento de distribución de carga aplicando curvas de demanda obtenidas en estudios de investigación de la carga [40]. Los espectros de corriente armónica para cada clase se establecen mediante un proceso de caracterización desarrollado en esta investigación.

La distorsión armónica producida por cargas externas a la red en estudio, denominada “distorsión de fondo”, se modela con una fuente de voltaje armónico conectada en el punto de conexión con el sistema externo. El espectro de voltajes armónicos se obtiene a partir de mediciones.

El software de modelación y simulación DIgSILENT permite analizar armónicos en sistemas eléctricos utilizando el módulo de calidad de energía. Con la ayuda de la interfaz de intercambio de archivos “DGS” y los datos almacenados en el Sistema de Información Geográfica “SIG” se construye el modelo de red. Para el análisis diario de un sistema eléctrico, se desarrolla un procedimiento de automatización mediante el lenguaje de programación de DIgSILENT “DPL”.

La metodología se implementó en el alimentador 0324 de la CENTROSUR que está conformado por 167 transformadores de distribución y pertenece a la subestación 03 Monay. Además, se crearon casos de estudio para analizar la afección en el nivel de armónicos debido a la introducción de cocinas de inducción, paneles fotovoltaicos, cargadores de vehículos eléctricos y distorsiones externas de voltaje.

## 1.1 JUSTIFICACIÓN

Los Sistemas de Distribución interconectan una gran variedad de consumidores residenciales, comerciales e industriales que utilizan diversas cargas no lineales y producen distorsión armónica en la red. El desarrollo tecnológico de los dispositivos de estado sólido y los programas de eficiencia energética extienden el uso de diversos aparatos electrónicos y nuevos equipos como vehículos eléctricos, lámparas compactas, lámparas led o paneles fotovoltaicos e inversores. Cada carga no lineal produce corrientes armónicas poco significativas, pero el efecto colectivo



de varias cargas utilizadas simultáneamente puede producir corrientes armónicas importantes. Estos dispositivos generan corrientes armónicas y caídas de tensión armónica en los elementos de la red.

La distorsión armónica es un problema de calidad de la energía y requiere una consideración especial, ya que provoca problemas adversos en los elementos que conforman los sistemas eléctricos. El análisis de armónicos en redes de distribución se realiza, no solamente para evaluar si se cumplen los niveles de distorsión armónica, sino también para evaluar el posible incremento de la distorsión armónica por la introducción de nuevas fuentes de corrientes armónicas.

Los estudios de armónicos en sistemas de distribución requieren de modelos y herramientas de simulación adecuadas que consideran la gran cantidad y diversidad de elementos que forman parte del sistema. Es muy complejo obtener un modelo de red que incorpore a cada dispositivo individual. Se pueden combinar diferentes dispositivos lineales y no lineales para formar una carga agregada. Los perfiles de carga, la composición de la carga y las condiciones del sistema producen corrientes armónicas que varían en el tiempo. Los modelos de cargas de armónicas agregadas variantes en el tiempo deben incluir fenómenos no deterministas y aleatorios, haciendo uso de metodologías para la modelación y simulación.

La Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A. – CENTROSUR, implementa una campaña permanente de medición de calidad de energía para monitorear los índices de calidad de servicio eléctrico de los diferentes tipos de clientes y de los alimentadores. Sin embargo, no se han realizado estudios de armónicos de la red de la CENTROSUR, y no existe en la literatura una metodología estandarizada que permita caracterizar las cargas armónicas para obtener un modelo adecuado para redes de distribución. Por lo tanto, es necesario establecer una metodología que permita caracterizar las cargas armónicas agregadas variantes en el tiempo en el Sistema de Distribución de la CENTROSUR. El modelo obtenido de cargas armónicas será utilizado en futuros estudios de armónicos para evaluar la incorporación de diferentes elementos no lineales dentro de las redes de distribución.



## 1.2 ALCANCE

El estudio pretende establecer la metodología de modelación de cargas armónicas agregadas variantes en el tiempo y de elementos que conforman la red de distribución, a partir de información de mediciones recopilada por la CENTROSUR. Mediante el software DIgSILENT se creará el modelo del alimentador 0324 del Sistema de Distribución, y se analizará la distorsión armónica aplicando flujos de potencia armónica con el módulo de Calidad de la Energía. Se compararán los resultados de simulación con datos de medición para retroalimentar y validar el modelo obtenido.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo general

Obtener el modelo de cargas armónicas agregadas variantes en el tiempo para realizar estudios de armónicos en el Sistema de Distribución de la CENTROSUR.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- a) Determinar la metodología de caracterización de las cargas armónicas agregadas variantes en el tiempo del Sistema de Distribución.
- b) Caracterizar las cargas armónicas agregadas variantes en el tiempo del Sistema de Distribución de la CENTROSUR.
- c) Establecer el procedimiento para modelar y simular una red de distribución en el software DIgSILENT.
- d) Aplicar el proceso en un alimentador del Sistema de Distribución de la CENTROSUR.

## 1.4 CONTENIDO

El estudio está conformado por capítulos estructurados de la siguiente manera:

El **Capítulo 2** presenta los conceptos fundamentales de los armónicos, así como las causas de distorsión armónica de corriente y voltaje, índices para la evaluación de la distorsión armónica, fuentes y efectos de los armónicos en la red, elementos para el



control de la distorsión armónica, medición, límites y normativas de la distorsión armónica en sistemas de distribución.

La revisión del estado del arte se realiza en el **Capítulo 3**. Se explican las técnicas de análisis de armónicos y los modelos de los elementos que conforman la red. También se describe la metodología propuesta para la obtención de modelos de carga armónica agregada variante en el tiempo.

En el **Capítulo 4** se presenta el modelo del alimentador 0324 y los casos de estudio para analizar la afección de dispositivos no lineales en la red. Además, se utiliza el software DigSILENT para la simulación.

El análisis y comparación de resultados se presenta en el **Capítulo 5**. En este capítulo se estudian los resultados obtenidos en la simulación y los datos de medición para verificar el modelo obtenido. También se presentan los resultados de los casos de estudios.

El **Capítulo 6** presenta las conclusiones y recomendaciones del trabajo realizado para futuras investigaciones.

## CAPÍTULO 2

### FUNDAMENTOS DE LOS ARMÓNICOS

#### 2.1 DEFINICIÓN DE ARMÓNICOS

Una señal periódica y continua puede ser analizada mediante series de Fourier al descomponerse en una suma infinita de componentes sinusoidales, donde la frecuencia de cada elemento es múltiplo de la frecuencia fundamental. Los componentes sinusoidales con frecuencia múltiplo entero de la frecuencia fundamental se conocen como componentes armónicos o simplemente armónicos.

En los sistemas eléctricos, los armónicos representan las componentes sinusoidales que conforman una señal de corriente o tensión, donde la frecuencia de cada componente armónica es múltiplo de la frecuencia de la componente fundamental del sistema, generalmente 50 y 60 Hz. En la Figura 2.1 se observa una señal con frecuencia fundamental de 60 Hz dividida en sus componentes sinusoidales [2].

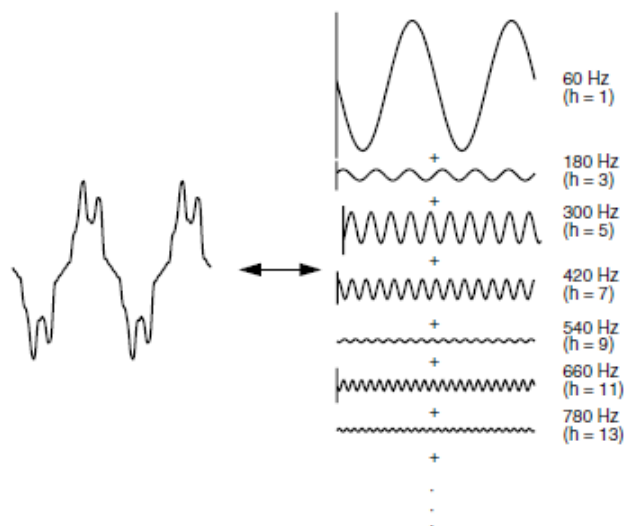


Figura 2. 1 Representación en Series de Fourier de una onda distorsionada [2].

Una onda periódica puede representarse mediante Series de Fourier en su forma compacta con la siguiente expresión [1]:

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_f t - \theta_n) \quad (2.1)$$





Dónde:

$$A_0 = \frac{a_0}{2} \quad (2.2)$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (2.3)$$

$$\theta_n = \tan^{(-1)} \frac{b_n}{a_n} \quad (2.4)$$

$A_0$ : Amplitud de la componente de DC

$A_n$ : Amplitud de la componente armónica

$\theta_n$ : Angulo de Fase

Los armónicos se describen principalmente por:

- Amplitud: representada en relación con la componente fundamental o con el valor nominal de corriente.
- Angulo de Fase: representa el valor del ángulo entre la componente armónica y la componente fundamental.
- Orden armónico: se representa en múltiplos de la frecuencia de la componente fundamental.

$$n = \frac{w_n}{w_f} \quad (2.5)$$

Dónde:

$w_n$ : Frecuencia de la componente armónica

$n$ : N-ésimo componente armónico

## 2.2 ORDEN ARMÓNICO Y SECUENCIA DE FASE

Un sistema trifásico balanceado presenta ondas de corriente y voltaje sinusoidales de igual magnitud y frecuencia, desfasadas 120° entre cada fase. En sistemas trifásicos con distorsión armónica, la frecuencia del componente armónico,

determina la secuencia del fasor. En la Figura 2.2 se observa la secuencia de fases de la componente fundamental, así como la secuencia de fases del tercer, quinto y séptimo orden armónico.

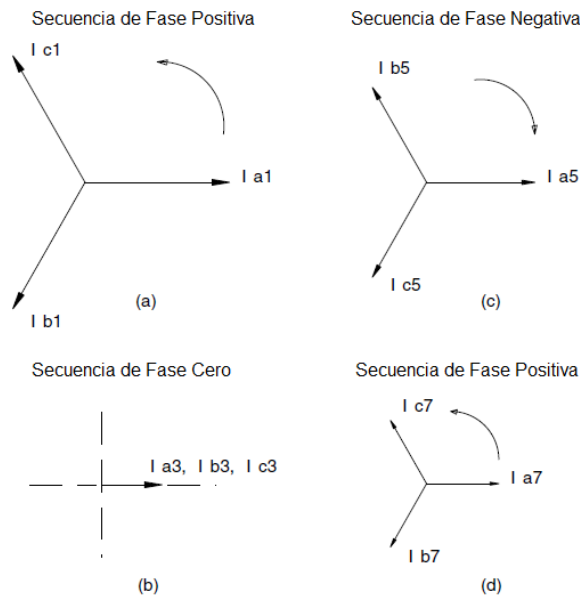


Figura 2. 2 (a) Componente Fundamental (b) Tercer armónico (c) Quinto armónico (d) Séptimo armónico [3].

Los ángulos armónicos se referencian tomando como base el ángulo de la componente fundamental. El ángulo de desplazamiento de fase tiene el efecto de alterar la forma de la forma de onda compuesta, sin embargo, el orden de secuencia de fase de los armónicos no se ve afectado [3]. En la Tabla 2.1 se presentan un resumen del orden armónico con su respectiva secuencia de fase.

Tabla 2. 1 Relación entre el Orden Armónico y Secuencia de fase [3].

Orden Armónico	Secuencia
1,4,7,10,13,16,19	Positiva
2,5,8,11,14,17,20	Negativa
3,6,9,12,15,18,21	Cero

### 2.3 DISTORSIÓN ARMÓNICA

Las cargas no lineales producen ondas de corriente distorsionada que deforman las ondas sinusoidales de voltaje en los puntos de conexión, debido a que la corriente resultante no es proporcional a la tensión aplicada. En la Figura 2.3 se observa la

onda sinusoidal de voltaje y la onda de corriente distorsionada por el efecto no lineal de la carga.

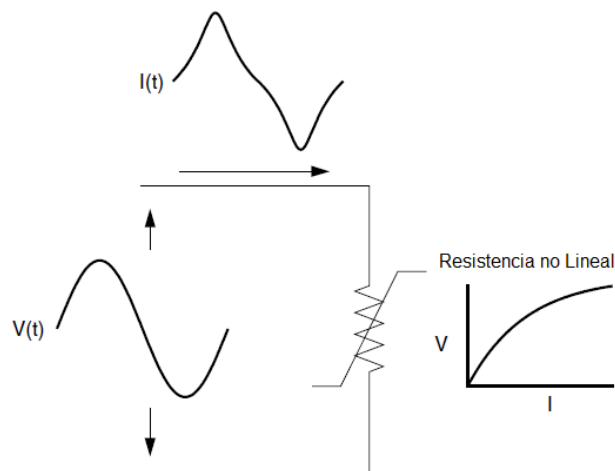


Figura 2. 3 Señal de corriente distorsionada causada por la resistencia no lineal [2].

Las ondas sinusoidales distorsionadas pueden ser analizadas utilizando Series de Fourier, es decir, tratando a la señal como la suma de su componente fundamental y sus componentes armónicas. Una onda distorsionada contiene varias componentes armónicas, por tal razón se denomina 'distorsión armónica'. En la Figura 2.4 se puede observar una onda distorsionada y su componente armónico. El término "distorsión" se refiere a la deformación que presenta la onda sinusoidal, mientras que el término "armónico" indica la presencia de componentes armónicos dentro de la onda sinusoidal distorsionada.

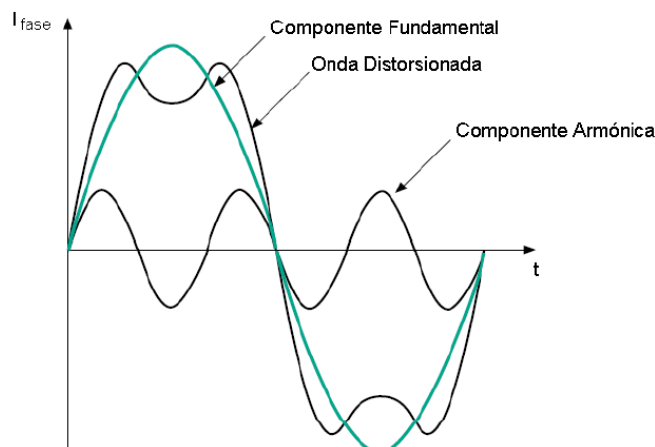


Figura 2. 4 Onda Distorsionada [2].

### 2.3.1 Distorsión Armónica de Corriente y Tensión

En un sistema eléctrico de potencia real, las condiciones de operación son desbalanceadas, presentando formas de onda tanto en voltaje como corriente distorsionadas. Incluso en el punto de generación, las ondas de voltaje contienen distorsiones debido a la no uniformidad en el campo magnético de excitación. Los sistemas de generación y transmisión por lo general tienen niveles de distorsión armónica inferiores al 1,0% [3]. Los sistemas de distribución, que conectan la mayor cantidad de usuarios del sistema eléctrico, presentan niveles más altos de distorsión armónica por la proximidad a una gran cantidad de cargas no lineales [1], [2], [3].

Las cargas no lineales se pueden modelar como fuentes de corriente que inyectan señales de corriente armónica en el punto de conexión con la red. Las corrientes armónicas circulan a través de las impedancias del sistema, ocasionando caídas de tensión distorsionadas en los equipos de transporte y conversión de energía como líneas de transmisión y distribución, cables, transformadores, etc. En la Figura 2.5 se observa una red con un generador, una línea de transporte y una carga no lineal.

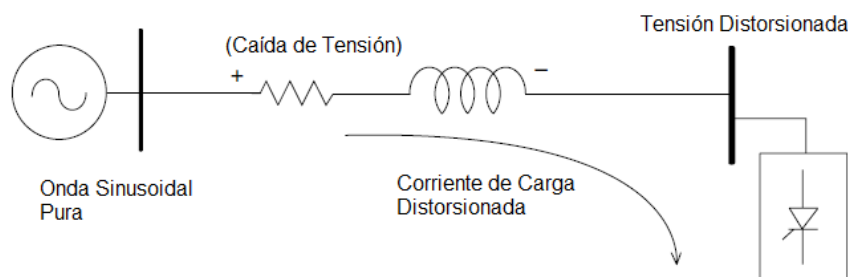


Figura 2. 5 Corriente armónica producida por una carga no lineal [2].

La distorsión armónica de tensión puede afectar a los elementos que comparten el mismo punto de conexión. Incluso las cargas lineales, que están conectadas al mismo punto, generan corrientes armónicas si la forma de onda de tensión de suministro está distorsionada [3].

## 2.4 ÍNDICES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA

Los niveles de distorsión armónica de una forma de onda de tensión o corriente se describen mediante el espectro armónico completo con magnitudes y ángulos de



fase de cada componente armónico individual [2]. Los niveles de distorsión armónica se evalúan mediante índices que se describen a continuación.

#### 2.4.1 Distorsión Armónica Individual

La distorsión armónica individual de corriente (IHD) se define como la relación entre el valor eficaz de la corriente armónica individual y el valor eficaz de la corriente fundamental [3].

$$IHD_k = \frac{I_k}{I_1} \quad (2.6)$$

Dónde:

$k$ : Orden Armónico.

$I_1$ : Valor eficaz de la onda fundamental de corriente.

$I_k$ : Valor eficaz del armónico  $k$ .

De forma similar se expresa la distorsión armónica individual de tensión (VHD) [3]:

$$VHD_k = \frac{V_k}{V_1} \quad (2.7)$$

Dónde:

$k$ : Orden Armónico.

$V_1$ : Valor eficaz de la onda fundamental de tensión.

$V_k$ : Valor eficaz del armónico  $k$ .

#### 2.4.2 Distorsión Armónica Total (THD)

Este índice determina el contenido armónico de una onda distorsionada, y se define como la relación entre el valor eficaz del componente armónico total de la señal y el valor eficaz de la frecuencia fundamental. Generalmente se expresa como un porcentaje de la componente fundamental.

La distorsión armónica de corriente  $THD_I$  es generada por cargas no lineales conectadas a la red. El índice de contenido armónico de corriente  $THD_I$  se define por la siguiente ecuación [18]:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1} * 100\% \quad (2.8)$$

La distorsión armónica de tensión  $THD_V$  es producida por la circulación de corrientes armónicas en la red. De manera similar, los armónicos de tensión  $THD_V$  se definen por la siguiente ecuación [18]:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}}{V_1} * 100\% \quad (2.9)$$

### 2.4.3 Distorsión Total de Demanda (TDD)

La distorsión total de demanda se define como un indicador de referencia que determina los límites aceptables de distorsión de la onda de corriente. Este índice se representa mediante la relación entre la componente armónica total de corriente y la demanda máxima de corriente de la carga [2].

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{K=2}^{\infty} I_K^2}}{I_L} * 100\% \quad (2.10)$$

Dónde:

**$K$** : Orden Armónico.

**$I_K$** : Valor del armónico individual.

**$I_L$** : Demanda máxima de la onda fundamental de corriente

## 2.5 FUENTES DE ARMÓNICOS

El desarrollo tecnológico de los dispositivos de estado sólido y los programas de eficiencia energética promueven el uso de diversos aparatos electrónicos como:



reguladores de velocidad ajustables, computadores, televisores, cargadores de baterías, lámparas compactas, lámparas led, cargadores de vehículos eléctricos, paneles fotovoltaicos, sistemas de almacenamiento de energía e inversores; los cuales se encuentran conectados a los sistemas de baja y media tensión y distribuidos por toda la red [3]. A continuación, se describen fuentes de generación de armónicos más frecuentes.

### **2.5.1 Convertidores de Potencia**

Los convertidores producen corrientes armónicas por su operación característica de conexión y desconexión. La distorsión armónica producida depende de los parámetros del convertidor como: configuración, tipo de control, voltaje terminal, así como las características de los circuitos CD. Se utilizan en industrias metalúrgicas, transmisión de energía eléctrica en HVDC, control de motores, ferrocarriles, convertidores de baja potencia para fuentes monofásicas y trifásicas [2].

### **2.5.2 Reguladores de Velocidad Ajustables (ASD)**

Los ASD son dispositivos electrónicos de potencia que convierten el voltaje de CA y la frecuencia en voltaje y frecuencia variables. La variación de la tensión y la frecuencia permiten al ASD controlar la velocidad del motor según los requerimientos de la aplicación. Estos dispositivos pueden ser fuentes de armónicos por sus frecuencias de operación. Se aplican fundamentalmente en instalaciones industriales, por ejemplo, en mecanismos de elevación, maquinas, herramientas, ventiladores, equipos de aire acondicionado y bombeo [2].

### **2.5.3 Transformadores**

Los transformadores producen armónicos por las características no lineales de la magnetización del núcleo, es decir, por histéresis magnética y saturación del núcleo. El transformador está diseñado para operar en la región lineal donde la corriente de magnetización es directamente proporcional al flujo magnético. Sin embargo, esta proporcionalidad puede variar cuando el núcleo magnético se satura provocando que el transformador opere en su región no lineal. Los niveles de distorsión armónica se incrementan durante eventos transitorios y su efecto es notorio en redes de distribución debido a la conexión de cientos de transformadores [2].



#### **2.5.4 Máquinas Rotativas**

Las máquinas rotativas producen armónicos de menor magnitud que los transformadores. Estas máquinas generan distorsiones armónicas debido a las variaciones periódicas de velocidad o carga, saturación magnética de la máquina, bobinados o ranuras, e imperfecciones en los polos de las máquinas síncronas [19].

#### **2.5.5 Hornos de Arco**

El horno de arco eléctrico es una fuente de corrientes armónicas de gran magnitud concentrada en un lugar específico. La corriente de un horno de arco no es periódica y varía en el tiempo. Los hornos de arco son cargas dinámicas donde la magnitud y orden de los armónicos son variables ya que dependen de los procesos de refinado y fisión del material, la longitud del arco dentro del horno y las etapas de operación del horno [19].

#### **2.5.6 Hornos de Inducción**

Los hornos de inducción son utilizados en la industria metalúrgica para la fundición de materiales. Están compuestos de circuitos convertidores de potencia que producen un amplio espectro de corrientes armónicas. Los hornos son fuentes importantes de armónicos, además pueden sintonizar las frecuencias de resonancia de la red que estén dentro del rango de su operación [20].

#### **2.5.7 Lámparas Fluorescentes Compactas (CFL) y Lámparas Led (LED)**

Actualmente, lámparas CFL y LED se han convertido en la principal fuente lumínica de instalaciones comerciales y residenciales debido a sus características lumínicas y bajo consumo energético. Las corrientes armónicas producidas por cada dispositivo tienen magnitudes casi despreciables. Sin embargo, la concentración masiva de lámparas produce grandes niveles de corrientes armónicas y ocasiona distorsiones armónicas de tensión. Estas lámparas tienen un alto contenido armónico, con una distorsión armónica total de corriente (THDI) que en la mayoría de los casos es superior al 100 % [21].



### 2.5.8 Electrodomésticos

El uso extensivo de modernos electrodomésticos residenciales ha incrementado la distorsión armónica de las redes de distribución, debido a la implementación de dispositivos electrónicos para su funcionamiento. En la Tabla 2.2 se muestra cargas típicas de una instalación residencial.

Tabla 2. 2 Cargas Lineales y No lineales en una instalación residencial [5].

Nombre del Equipo	Característica de la aplicación
Lámparas Fluorescentes compactas	No lineal
Lámparas Incandescentes	Lineal
Computadoras PC	No lineal
Laptop	No lineal
Televisión LCD	No lineal
Refrigerador	No lineal
Congelador	No lineal
Lavadora	No lineal
Secadora	Lineal
Cocina Eléctrica	Lineal
Horno Eléctrico	Lineal
Microondas	No lineal
Tostadora	Lineal
Cafetera	Lineal
Plancha	Lineal
Licuada	No lineal
Copiadora	No lineal
Impresora	No lineal
Aspiradora	No lineal
Hornos	No lineal

### 2.5.9 Cargadores de Vehículos Eléctricos

La adopción de vehículos eléctricos en el sector del transporte implica el uso intensivo de cargadores de vehículos eléctricos. Las características y potencia de los cargadores dependen de la función del vehículo eléctrico. La concentración de estos dispositivos influye en los flujos de potencia, perfiles de tensión y en la



distorsión armónica de la red. Los cargadores de vehículos eléctricos son dispositivos no lineales que producen corrientes armónicas considerables [22].

## 2.6 EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS

Las corrientes armónicas provocan diversos impactos en el sistema eléctrico como aumento de la distorsión de voltaje, disminución del factor de potencia y resonancia del sistema. Además, la interacción de las corrientes armónicas con los elementos conectados al sistema eléctrico, en particular condensadores, transformadores y máquinas rotativas, causan pérdidas adicionales, sobrecalentamiento y sobrecarga. También pueden ocasionar deterioro del aislamiento, mal funcionamiento o interferencia de los equipos eléctricos y electrónicos [2].

### 2.6.1 Bancos de Condensadores

Los bancos de condensadores son utilizados para corregir el factor de potencia y controlar el nivel de tensión de la red. Están compuestos por elementos capacitivos que presentan más de una frecuencia de resonancia. Los bancos de condensadores no son fuentes generadoras de armónicos, pero modifican la impedancia de la red y las frecuencias de resonancia. El fenómeno de resonancia implica el flujo de excesivas corrientes y valores altos o bajos de impedancia que dan lugar a tensiones armónicas elevadas en el punto de conexión. Los armónicos provocan mayores niveles de tensión dieléctrica y calentamiento adicional en los bancos de condensadores [23].

### 2.6.2 Factor de Potencia Verdadero (True Power Factor)

El factor de Potencia se define como la relación entre la potencia activa y la potencia aparente del sistema. Para el caso de una señal sinusoidal pura, el factor de potencia se calcula como el coseno del ángulo de fase  $\cos \phi$ .

Sin embargo, para el caso de una señal distorsionada, el factor que considera la contribución de toda la potencia activa, incluyendo la potencia de frecuencia fundamental y de frecuencia armónica se conoce como factor de potencia verdadero. Este factor se define como la relación entre la potencia activa total del espectro de frecuencia y la potencia aparente.



Algunos equipos no lineales operan con un factor de potencia cercano a la unidad, mientras que el factor de potencia verdadero se encuentra entre 0,5 o 0,6 debido al contenido armónico generado por la carga. Utilizar únicamente el factor de potencia puede dar una falsa idea de las características de operación de ciertas cargas armónicas [2].

### 2.6.3 Transformadores

Los armónicos incrementan las pérdidas de potencia del transformador, y por lo tanto la temperatura en los bobinados aumenta reduciendo el tiempo de vida del aislamiento. Otros problemas comunes son resonancias entre la impedancia inductiva del transformador y la impedancia capacitiva de la red, vibraciones mecánicas. Las pérdidas del transformador consisten en pérdidas sin carga (o pérdidas del núcleo) y pérdidas con carga [23], [24].

Las pérdidas en el núcleo se originan por el flujo generado en el núcleo cuando un transformador es excitado por la tensión aplicada. Están relacionadas con el material magnético utilizado y con el diseño del núcleo. Las corrientes armónicas que fluyen el transformador no afectan significativamente a las pérdidas sin carga.

Las pérdidas con carga se generan por la corriente fundamental y las corrientes armónicas que fluyen a través de los devanados, siendo las principales pérdidas del transformador. Consisten en pérdidas  $I^2R$  y pérdidas en los devanados y demás estructuras del transformador. Estas pérdidas aumentan la temperatura del bobinado del transformador [24].

### 2.6.4 Máquinas Rotativas

Las máquinas eléctricas de instalaciones industriales y comerciales pueden verse afectadas por las distorsiones armónicas de tensión provocando sobrecalentamiento, ruido y vibración.

El sobrecalentamiento del rotor ha sido el principal problema asociado con las distorsiones armónicas de tensión, ya que en los terminales de las máquinas las tensiones armónicas se traducen en flujos magnéticos armónicos que giran a una frecuencia diferente de la frecuencia síncrona del rotor, induciendo corrientes de



altas frecuencias armónicas al rotor. Un aumento en la temperatura de operación causará reducción de la vida útil de la máquina. En máquinas de accionamiento de velocidad ajustable, es necesario analizar las velocidades de resonancia mecánica para evitar cualquier daño debido a la amplificación de los torques pulsantes [23].

### **2.6.5 Sistemas de Protección**

La circulación de corrientes armónicas puede influir en el funcionamiento de los dispositivos de protección, afectando la capacidad de interrupción de los dispositivos de sobrecorriente como interruptores, fusibles y relés. Generalmente, estos dispositivos se dimensionan en base a corrientes de carga eficaz (RMS) sin distorsión armónica.

Las corrientes armónicas limitan la capacidad de detección de corriente de los dispositivos de interrupción termo magnética. En algunos casos, los interruptores emplean solenoides para disipar el calor adicional producido por las pérdidas de frecuencias superiores a la fundamental. Dicho calor eleva la temperatura del dispositivo térmico y reduce el punto de disparo. Los fusibles son dispositivos accionados térmicamente y por lo tanto son susceptibles al calentamiento provocado por el efecto piel de las corrientes armónicas.

Los relés de protección disminuyen su rendimiento debido a las tensiones y corrientes armónicas. En la mayoría de los casos, las distorsiones pueden causar disparos cuando no existan condiciones de falla o pueden causar que el dispositivo no dispare durante la falla. Además, pueden modificar el ángulo de fase entre los componentes fundamentales y armónicos de una forma de onda de corriente o tensión alterando significativamente la respuesta del relé [23].

### **2.6.6 Conductores**

El flujo de corriente armónica a través de la red eléctrica ocasiona pérdidas en líneas y cables debido a dos factores: el incremento del valor eficaz de la corriente y la distribución del flujo de corriente en la sección transversal del conductor, incluyendo el efecto piel y el efecto de proximidad.



El efecto piel aumenta con la frecuencia y con el diámetro del conductor. Se origina debido a las corrientes que fluyen en la superficie externa del conductor. Además, la concentración de dichas corrientes aumenta la resistencia efectiva del conductor. El efecto de proximidad se debe al campo magnético generado por la distribución de las corrientes distorsionadas en los conductores adyacentes. Las corrientes armónicas de secuencia cero producen elevaciones de corriente en el conductor neutro de los sistemas de distribución [23].

### **2.6.7 Sistemas de Comunicación**

Las corrientes armónicas crean interferencias en los circuitos de comunicación y pueden ocasionar problemas de ruido, pérdida de información y disminución en los índices de calidad de transmisión de la información. El grado de interferencia dependerá del espectro de frecuencias de los armónicos y de la susceptibilidad del sistema de comunicación.

Existen cuatro tipos de acoplamiento entre líneas eléctricas y líneas de comunicación. El primer acoplamiento es producido por la inducción de voltajes entre la red de distribución y los conductores del sistema de comunicación. El segundo se origina por voltajes inducidos entre un conductor de un sistema de comunicación y la tierra. El tercer mecanismo se debe al acoplamiento capacitivo entre los dos conductores. El último mecanismo es el acoplamiento conductivo en el cual aumenta el potencial a tierra local por malas conexiones en el neutro del sistema de comunicación conectado a tierra [23].

## **2.7 ELEMENTOS PARA EL CONTROL DE ARMÓNICOS**

Para controlar el nivel de armónicos en los sistemas eléctricos se pueden realizar las siguientes acciones:

- Disminuir las corrientes armónicas producidas por la carga.
- Añadir filtros para drenar las corrientes armónicas fuera del sistema o bloquear las corrientes armónicas que circulan desde el sistema.
- Modificar la respuesta en frecuencia del sistema implementando filtros, inductores o capacitores.



Existen varios dispositivos que pueden ser simples como bancos de condensadores, que, mediante las acciones de agregar, redimensionar o reubicar, pueden modificar de manera efectiva una respuesta de frecuencia y disminuir la distorsión armónica, o dispositivos complejos como filtros basados en elementos pasivos o dispositivos electrónicos de potencia. La efectividad de tales soluciones deberá considerar fundamentalmente dos aspectos: el primero consiste en aislar apropiadamente una carga de las perturbaciones armónicas, y el segundo consiste en limitar los efectos de armónicos producidos por una carga específica [2].

### **2.7.1 Filtros Activos**

Los filtros activos o compensadores activos de armónicos, son dispositivos que están destinados al acondicionamiento de potencia. Estos dispositivos no se limitan únicamente al filtrado armónico, también cumplen diversas funciones como amortiguación y aislamiento de la propagación armónica, medición de armónicos, control de potencia reactiva para la corrección del factor de potencia y regulación de voltaje, equilibrio de carga y reducción de parpadeo luminoso (flicker) [25].

### **2.7.2 Filtros Pasivos**

Los filtros pasivos son dispositivos compuestos de elementos resistivos, inductivos, y capacitivos que se implementan para bloquear o desviar el flujo de las corrientes armónicas. Se emplean para proporcionar un camino de alta o baja impedancia, de tal manera que las corrientes armónicas se desvíen a través del filtro. Los filtros pasivos se diseñan para cumplir las siguientes características: evitar niveles de tensiones armónicas significativas y proporcionar potencia reactiva para compensar el factor de potencia del sistema [2].

### **2.7.3 Filtros Pasivos Serie**

El filtro serie está compuesto por un circuito resonante en paralelo conectado en serie con la carga. Está diseñado para soportar cortocircuitos y corrientes nominales del sistema, y para evitar y atenuar la circulación de una componente en particular presentando una alta impedancia [2].



#### 2.7.4 Filtros Pasivos en derivación

Los filtros pasivos en derivación están compuestos por un circuito resonante en serie que se conecta en paralelo con la impedancia de la red. Los dispositivos se sintonizan estableciendo un camino de baja impedancia para la circulación de corrientes de una frecuencia armónica determinada. Usualmente, los filtros se ajustan a una frecuencia ligeramente más baja que la frecuencia armónica a filtrarse para proporcionar un margen de seguridad. Entre las configuraciones de los filtros se encuentran: filtros pasa altos de primer y segundo orden, filtros C y filtro sintonizados LC, siendo los más habituales [2].

#### 2.7.5 Transformadores en Zigzag

Los transformadores en zigzag son empleados generalmente en instalaciones comerciales para reducir la corriente armónica que circula por el neutro. Actúan como filtros y presentan un camino de baja impedancia para eliminar los componentes armónicos de secuencia cero. Los transformadores deben instalarse entre la carga y el circuito que se está protegiendo para evitar problemas de aumento de temperatura de transformadores y conductores de neutro [2].

### 2.8 MEDICIÓN DE ARMÓNICOS

Se han desarrollado de instrumentos de medición y técnicas fundamentadas en mediciones para evaluar los diversos efectos provocados en la red por los armónicos de corriente y tensión. Los propósitos de realizar mediciones de armónicos se detallan a continuación:

- Evaluar los índices de calidad en los diferentes puntos de conexión del sistema eléctrico.
- Determinar si los niveles de armónicos son aceptables en comparación con normas y regulaciones.
- Identificar las perturbaciones del sistema y su impacto a través de un problema conocido.
- Respaldar la información de sistemas que tienen distorsiones armónicas.



El análisis de armónicos en redes de distribución se realiza no solamente para evaluar si se cumplen los niveles de distorsión armónica con relación a los estándares, sino también para evaluar el posible incremento distorsión armónica por la introducción de nuevas fuentes de corrientes armónicas e inclusive determinar la efectividad de algunas medidas de mitigación [7].

### 2.8.1 Áreas en donde se realiza el registro

Para facilitar la extracción de información, datos y efectuar cualquier tipo de medición se debe escoger áreas o puntos de conexión de cargas generadoras de armónicos o elementos pasivos como condensadores [2].

### 2.8.2 Equipos de medición

Los equipos de medición efectúan el registro de armónicos, tienen varias funciones y pueden ser analógicos o digitales. Existen analizadores armónicos que evalúan la magnitud de las ondas de frecuencias armónicas y analizadores de espectros que estudian un rango de frecuencia específico y evalúan la magnitud dentro de dicho rango [26]. En la siguiente Tabla se listan los equipos utilizados para la medición de armónicos.

Tabla 2. 3 Equipos de Medición de Armónicos [26].

Equipo de Medición	Característica
Osciloscopio	Permite obtener la información inmediata y cualitativa de la magnitud y el tipo de distorsión de la señal de corriente y tensión
Analizadores de espectros	Analizan la señal y muestran la distribución de energía en función de la frecuencia y magnitud relativa.
Analizadores de Onda	Extraen la información de la amplitud de una señal periódica y suministran el espectro de líneas de una señal observada.
Analizadores de Distorsión	Proveen de información de la distorsión armónica total de la señal armónica.
Equipo Digital de Medición de Armónicos	Adquisición de datos para medición de armónicos en base a dos técnicas: Filtros digitales y Transformada Rápida de Fourier.





## 2.9 MARCO REGULATORIO DE ARMÓNICOS

La regulación de la calidad de suministro eléctrico y la operación óptima del sistema eléctrico de potencia implica la adopción de recomendaciones y medidas de mitigación que determinan límites tolerables y definen acciones para atenuar los efectos provocados por la distorsión armónica en la red, estableciendo guías y normas para todas las partes involucradas en el sistema, tanto usuarios como suministradores de energía con la finalidad de no afectar a los elementos conectados al SEP.

Los estándares y normas internacionales, como los estándares IEEE y las normas IEC, son ampliamente adoptados por muchos países para establecer su propio marco regulatorio. En Ecuador se aplica la regulación CONELEC 004/01, emitida por el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC) en el año 2001, en la cual se establecen los niveles de calidad de energía de la prestación de servicio eléctrico de distribución y los procedimientos de evaluación que deben adoptar las Empresas Eléctricas de Distribución del Ecuador.

### 2.9.1 Standard IEEE 519

La norma IEEE 519 “Prácticas Recomendadas y Requerimientos para el control de armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia” establece los límites de inyección de corrientes armónicas de clientes individuales a la red y los límites de la distorsión armónica total de la tensión proporcionada por las empresas de distribución. Además, la norma considera que los armónicos de orden superior a 40 son despreciables. Los límites de distorsión armónica de corriente y tensión se establecen para el estado estacionario de la red.

La norma especifica que el control de las distorsiones armónicas de corriente y tensión es una responsabilidad compartida entre la empresa distribuidora y el usuario. La empresa distribuidora es responsable de limitar las distorsiones armónicas de tensión, mientras que los usuarios finales serán los responsables de limitar la inyección armónica de corriente a valores aceptables en función de la relevancia que cada usuario tiene en el sistema de potencia.

Por otra parte, su aplicación se recomienda como valores de diseño para el sistema de potencia considerando el “peor de los casos” en condiciones normales de operación. Según especifica la norma, las mediciones y análisis de los límites de corriente y tensión armónica se realizarán en el punto común de acoplamiento PCC. El PCC es el punto de conexión entre los usuarios y el sistema eléctrico, en donde nuevos usuarios pueden conectarse y obtener servicio en el futuro.

Los análisis de armónicos se consideran en conjunto entre el sistema de suministro y los usuarios, y se enfoca principalmente en clientes industriales y comerciales. En el análisis, la norma no considera a cada carga armónica específica dentro de una instalación. Con frecuencia, los clientes industriales tienen suministro de energía a través de un transformador de servicio dedicado en donde el PCC está en el lado de alta tensión, así mismo los clientes comerciales se sirven a través de un transformador de servicio común en donde el PCC está en el lado de baja tensión del transformador. Sin embargo, los clientes residenciales generan mayores valores de corrientes armónicas por la diversidad de cargas que utilizan.

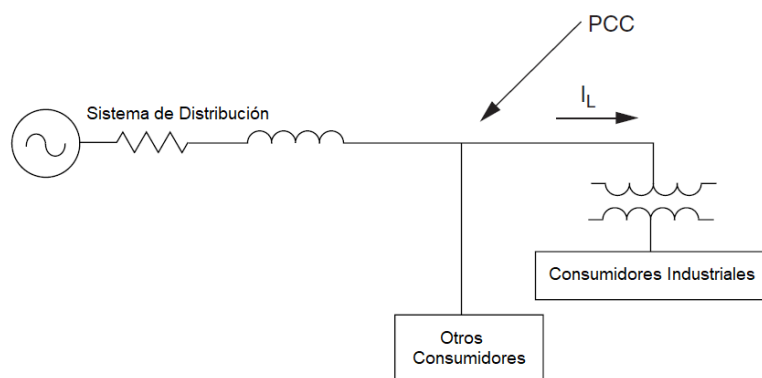


Figura 2. 6 PCC en el lado de alta tensión del Transformador para clientes industriales [2].

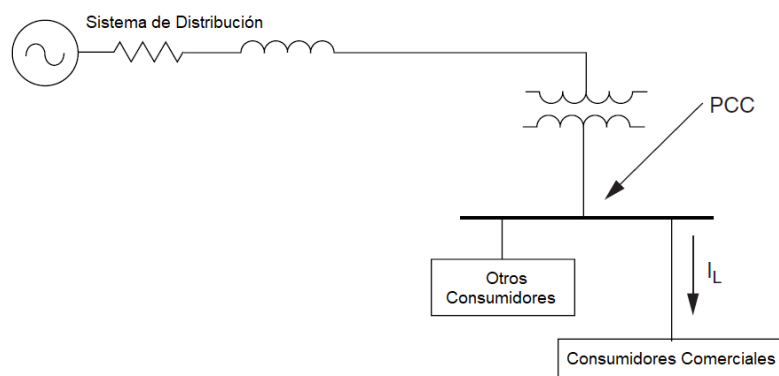


Figura 2. 7 PCC en el lado de baja tensión del Transformador para clientes comerciales [2].

### 2.9.1.1 Límites Permitidos

Los límites de inyección de corriente armónica asignados en la norma se establecen en función del tamaño relativo de la carga en relación con el tamaño del sistema de potencia. El sistema se define por su potencia de cortocircuito, y la relación de cortocircuito se representa como la porción entre la corriente máxima de cortocircuito en el PCC y la máxima demanda de corriente de carga (componente de frecuencia fundamental) en el PCC.

#### 2.9.1.1.1 Límites del contenido Armónico de Tensión

Los límites de los armónicos de tensión de línea a neutro en el PCC se determinan en función de los índices de distorsión armónica individual y distorsión armónica total  $THD_v$  para los valores mostrados en la Tabla 2.4. La distorsión armónica individual máxima se expresa en porcentaje, en función de la tensión nominal de operación de la barra en el PCC.

Tabla 2. 4 Límites de Distorsión armónica de voltaje en porcentaje del voltaje nominal de frecuencia fundamental [27].

Vn en PCC, [kV]	VHDk [%]	THDv [%]
$V_n \leq 1$	5,0	8,0
$1 \leq V_n \leq 69$	3,0	5,0
$69 \leq V_n \leq 161$	1,5	2,5
$161 \leq V_n$	1,0	1,5

El control de los armónicos de tensión se consigue con el control de la impedancia del sistema. El incremento de la impedancia depende de dos casos, el primer caso ocurre cuando el sistema entra en resonancia, y el segundo caso cuando el sistema no es lo suficientemente fuerte para alimentar apropiadamente a las cargas conectadas. En este caso, se deberá adicionar nuevos transformadores y líneas para mejorar el sistema, además de mantener valores bajos de distorsión armónica para evitar que el sistema entre en resonancia [2].

#### 2.9.1.1.2 Límites del contenido Armónico de Corriente

Los límites de inyección armónica de corriente en el PCC dependen de los niveles de tensión de la red. Los límites del contenido armónico se definen para diversos



tipos de sistemas y evitan que los niveles de tensión armónica sobrepasen los valores máximos de distorsión permitidos y expresados en la Tabla 2.4. En la Tabla 2.5 se presentan los límites de inyección armónica considerando los siguientes aspectos.

- El 25% de los valores especificados en la Tabla 2.4 se establecen para los armónicos pares.
- No se considera las distorsiones producidas por componentes de corriente directa, que corresponden a la armónica cero.
- “Todos los equipos de generación de energía están limitados a estos valores de distorsión actual, independiente de la relación  $I_{cc}/I_L$ ”

Tabla 2. 5 Límites del contenido Armónico de Corriente [27].

$I_{cc}/I_L$	Orden Armónico [%]					TDD [%]
	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	
<b><math>120 \text{ [V]} \leq V_n \leq 69 \text{ [kV]}</math></b>						
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 – 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 – 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 – 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0
<b><math>69 \text{ [kV]} &lt; V_n \leq 161 \text{ [kV]}</math></b>						
<20	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20 – 50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50 – 100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
100 – 1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
>1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0
<b><math>161 \text{ [kV]} &lt; V_n</math></b>						
<25	1,0	0,5	0,38	0,15	0,1	1,5
25 - 50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
$\geq 50$	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Nota:  $I_{cc}$ : corriente máxima de cortocircuito en el PCC.  $I_L$ : demanda máxima de la corriente fundamental en el PCC en condiciones normales de funcionamiento de la carga.

Para cargas generadoras de armónicas que utilicen convertidores con orden de pulsos “q” mayores a 6, se recomienda que los límites establecidos en la Tabla 2.4 y 2.5 se incrementen por un factor multiplicador mostrado en la Tabla 2.6 con la finalidad de reducir las componentes armónicas de orden inferior.

$$\sqrt{\frac{q}{6}} \tag{2.11}$$

Tabla 2. 6 Multiplicadores recomendados para aumentos en los límites de corriente de armónicos [27].

Orden de los armónicos limitados al 25% de los valores dados en la Tabla 2.2 y 2.3	Multiplicador
5, 7	1,4
5, 7, 11, 13	1,7
5, 7, 11, 13, 17, 19	2,0
5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25	2,2
↓	↓

## 2.9.2 Norma IEC 61000 para Armónicos

La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) y el Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC) han establecido normas y recomendaciones para limitar el contenido armónico de corriente y tensión de baja frecuencia en redes industriales y domésticas. Los estándares IEC serie 61000 son también conocidos como EN serie 61000, ya que la comunidad europea ha adoptado las normas establecidas por IEC. Las normas relacionadas a armónicos son las descritas a continuación.

IEC 61000-2-2: “Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes de suministro público en Baja Tensión”.

IEC 61000-3-2: “Límites para emisiones de Corrientes Armónicas en equipos con entrada de corriente igual o superior a 16 Amperios por fase”.

IEC 61000-3-4: “Limitación de emisiones de Corrientes Armónicas en Sistemas de alimentación de energía de Baja Tensión para equipos con rango de corriente mayor a 16 Amperios”.

IEC 61000-3-6: “Valoración de Límites de emisión para cargas distorsionadas en redes de Media y Alta Tensión.”

### 2.9.2.1 IEC 61000-2-2

El estándar 61000-2-2 precisa los niveles de compatibilidad de las perturbaciones en sistemas de baja frecuencia y sistemas de señalización de red. El estándar se adapta a sistemas monofásicos y trifásicos con tensiones nominales de 240 V y 415



V respectivamente, y con frecuencia nominal de 50 Hz o 60 Hz. Los niveles de compatibilidad se aplican en el PCC y se determinan en función del porcentaje de la tensión fundamental. Los niveles establecidos para tensiones armónicas individuales de redes Baja Tensión se muestran en la Tabla 2.7. En ocasiones excepcionales, los niveles pueden verse excedidos.

Tabla 2. 7 Niveles de compatibilidad para tensiones armónicas individuales para la red de Distribución de Baja Tensión según IEC 61000-2-2 [2].

Orden Impar				Orden Par	
no múltiplos de 3		múltiplos de 3			
Orden h	Tensión armónica [%]	Orden h	Tensión armónica [%]	Orden h	Tensión armónica [%]
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,4	6	0,5
13	3	21	0,3	8	0,5
$\geq 17$	$2,27(17/h)-0,27$	$\geq 21$	$0,5(10/h)-0,25$	$\geq 10$	$0,5(10/h)+0,25$

Nota: Se considera que los componentes armónicos mayores al orden 40 son menores al 8%.

### 2.9.2.2 IEC 61000-3-2

La norma IEC 61000-3-2 define los límites de inyección de corriente armónica para equipos con corrientes de menores o iguales a 16 A por fase que están conectados a una red de distribución de Baja Tensión y satisfacen los límites de compatibilidad establecidos en la norma IEC 61000-2-2. Con el propósito de reducir las corrientes armónicas, la norma clasifica las cargas eléctricas en cuatro categorías:

Clase A: Equipos trifásicos balanceados y equipos monofásicos que no incluyen en la categoría B, C, D.

Clase B: Herramientas portátiles y equipos de soldadura de arco que no son instrumentos profesionales.

Clase C: Equipos eléctricos de iluminación, incluyendo dispositivos de regulación (dimmer).

Clase D: Equipo eléctrico con consumo de potencia activa menor a 600 W y equipos con entradas de corriente que tengan “formas de ondas especiales”.



Los límites permitidos en la norma IEC 61000-3-2 para los armónicos de corriente individual se muestran en las siguientes Tablas.

Tabla 2. 8 Límites de corriente armónica según la Norma IEC 61000-3-2, clase A y B [2].

Orden Armónico h	Corriente Armónica Máxima Permissible [A]	
	CLASE A	CLASE B
<b>Armónicas Impares</b>		
3	2,30	3,45
5	1,14	1,71
7	0,77	1,16
9	0,40	0,60
11	0,33	0,50
13	0,21	0,32
$15 \leq h \leq 39$	$0,15 \cdot 15/h$	$0,23 \cdot 15/h$
<b>Armónicas Pares</b>	<b>CLASE A</b>	<b>CLASE B</b>
2	1,08	1,62
4	0,43	0,65
6	0,30	0,45
$8 \leq h \leq 40$	$0,23 \cdot 8/h$	$0,35 \cdot 8/h$

Tabla 2. 9 Límites de corriente armónica según la Norma IEC 61000-3-2, clase C [2].

Orden Armónico h	Corriente Armónica Máxima Permissible [A]
2	2
3	$30 \cdot \text{Factor de potencia}$
5	10
7	7
9	5
$11 \leq h \leq 39$	3
Nota: Considerar en porcentaje de la corriente fundamental de entrada.	

Tabla 2. 10 Límites de corriente armónica según la Norma IEC 61000-3-2, clase D [2].

Orden Armónico h	Corriente Armónica Máxima Permissible [%]	
	[mA/W]	[A]
2	3,4	2,3
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,50	0,4
13	0,35	0,33
$11 \leq h \leq 39$	$3,85/h$	Ver CLASE A



### 2.9.2.3 IEC 61000-3-4

La norma IEC 61000-3-4 extiende la aplicación del estándar 61000-3-2 para las corrientes armónicas emitidos por equipos eléctricos y electrónicos, cuya corriente de entrada excede los 16 A y se establece hasta los 75 A por fase. Los equipos se conectan a redes de distribución de Baja Tensión, con frecuencia nominal de 50 o 60 Hz. Los límites armónicos de corriente establecidos en la norma se muestran en la Tabla 2.11.

Tabla 2. 11 Límites de corriente armónica según la Norma IEC 61000-3-4 en porcentaje [2].

Orden Armónico h	Máxima corriente Armónica Permitida [%]
<b>Armónicos Impares no múltiplos de 3</b>	
5	10,7
7	7,2
11	3,1
13	2,0
17	1,2
19	1,1
23	0,9
25	0,8
29	0,7
31	0,7
<b>Armónicos Impares múltiplos de 3</b>	
3	21,6
9	3,8
15	0,7
≥ 21	≤ 0,6
Para Armónicos pares considerar: $\leq 8/h$ ó $\leq 0,6$	

### 2.9.2.4 IEC 61000-3-6

La norma IEC 61000-3-6 define los límites de inyección armónica de corriente para equipos conectados a los Sistemas de suministro de Media Tensión (MT) y Alta Tensión (AT). La norma considera para la MT y AT los niveles de tensión entre 1 - 35 kV, y 35 - 230 kV, respectivamente. Los niveles de tensión superior a 230 kV se consideran como Extra Alta Tensión (EAT) y los niveles menores a 1 kV se consideran como Baja Tensión (BT).





La norma provee los niveles de compatibilidad y planificación de las perturbaciones armónicas de tensión establecida para los sistemas de suministro de MT y BT. El nivel de compatibilidad se enfoca en el nivel de afinidad entre equipo y ambiente que se puede lograr. Generalmente, el nivel de compatibilidad se basa en un 95 % de probabilidad. Los niveles se determinan como un porcentaje de la tensión fundamental de los sistemas de MT y BT y se presentan en la Tabla 2.12.

Tabla 2. 12 Niveles de compatibilidad de Tensiones Armónicas para sistemas de BT y MT [2].

Orden Impar				Orden Par	
no múltiplos de 3		múltiplos de 3			
Orden h	Tensión armónica [%]	Orden h	Tensión armónica [%]	Orden h	Tensión armónica [%]
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	2	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	0,2+1,3*25/h				

A diferencia de los niveles de compatibilidad, los niveles de planificación son más rigurosos y se definen de acuerdo con los criterios especificados por las compañías de suministro de energía. Se determinan en función del porcentaje del valor de tensión inicial en el sistema de MT y se especifican en la Tabla 2.13 [2].

Tabla 2. 13 Niveles de planificación de Tensiones Armónicas para sistemas de MT [2].

Orden Impar				Orden Par	
no múltiplos de 3		múltiplos de 3			
Orden h	Tensión armónica [%]	Orden h	Tensión armónica [%]	Orden h	Tensión armónica [%]
5	5	3	4	2	1,6
7	4	9	1,2	4	1
11	3	15	0,3	6	0,5
13	2,5	2	0,2	8	0,4
17	1,6	>21	0,2	10	0,4
19	1,2			12	0,2
23	1,2			>12	0,2
25	1,2				
>25	0,2+0,5*25/h				

### 2.9.3 Regulación CONELEC 004/01

El Consejo Nacional de Electricidad CONELEC en el año 2001 emitió la regulación CONELEC – 004/01 donde establecen los niveles de calidad de energía de la prestación de servicio eléctrico de distribución y los procedimientos de evaluación que deben adoptar las Empresas Eléctricas de Distribución del Ecuador.

En la regulación, el índice para evaluar la distorsión de la onda sinusoidal de tensión considera las siguientes expresiones.

$$V_i' = \left( \frac{V_i}{V_n} \right) * 100 \quad (2.12)$$

$$THD = \left( \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{40} (V_i)^2}}{V_n} \right) * 100 \quad (2.13)$$

Dónde:

$V_i'$ : Factor de distorsión armónica individual de voltaje.

$THD$ : Factor de distorsión total por armónicos, expresado en porcentaje

$V_i$ : Valor eficaz del voltaje armónico “i” (para  $i = 2 \dots 40$ ) expresado en voltios

$V_n$ : Voltaje nominal del punto de medición expresado en voltios

La Empresa de Distribución está sujeta a realizar mediciones mensuales mediante las siguientes consideraciones:

- Registro de cada punto de medición, equivalente al 0,15% de los transformadores de distribución, en los bornes de bajo voltaje, no menor a 5% de la muestra de la medición.
- La selección de los puntos debe considerarse los niveles de voltaje, tipo de zona (urbana o rural), y la topología de la red, a fin de que las mediciones sean representativas de todo el sistema.
- Una vez realizada la selección de puntos, la Empresa Distribuidora debe notificar, por lo menos 2 meses antes de efectuar las mediciones.



En cada punto de medición, para cada mes, el registro se efectuará durante un periodo no inferior a 7 días continuos, en intervalos de medición de 10 minutos.

Las mediciones se deben realizar con un medidor de distorsiones armónicas de voltaje de acuerdo con los procedimientos especificados en la norma IEC 61000-4-7. Los equipos de medición de voltaje deben estar equipados simultáneamente con analizadores de armónicos.

En la Tabla 2.14 se establecen los límites de voltajes armónicos individuales  $V_i$  y la distorsión armónica de voltaje THD, expresados en porcentaje de la fundamental. Se consideran los armónicos comprendidos desde el segundo hasta el cuadragésimo.

Tabla 2. 14 Límites de las Tensión Armónicas individuales y THD según la Regulación CONELEC 004/01 [28].

Orden Armónico, THD h	Tensión nominal respecto al punto de medición [%]	
	V > 40 kV	V ≤ 40 kV
<b>Armónicos Impares no múltiplos de 3</b>		
5	2,0	6,0
7	2,0	5,0
11	1,5	3,5
13	1,5	3,0
17	1,0	2,0
19	1,0	1,5
23	0,7	1,5
25	0,7	1,5
> 25	0,1+0,6*25/h	0,2+1,3*25/h
<b>Armónicos Impares múltiplos de 3</b>		
3	1,5	5,0
9	1,0	1,5
15	0,3	0,3
21	0,2	0,2
> 21	0,2	0,2
<b>Armónicos Pares</b>		
2	1,5	2,0
4	1,0	1,0
6	0,5	0,5
8	0,2	0,5
10	0,2	0,5
12	0,2	0,2
> 12	0,2	0,5
<b>THD</b>	<b>3</b>	<b>8</b>



---

## CAPÍTULO 3

### MODELO DE RED PARA ESTUDIOS DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

---

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

Para el estudio de armónicos en sistemas eléctricos existen metodologías de análisis en el dominio del tiempo y de la frecuencia. En este trabajo, el sistema eléctrico se analiza en el dominio de la frecuencia mediante la representación de la red en estado estable. En este capítulo se detallan los modelos para cada elemento del sistema establecidos en la literatura. También se establece la metodología de caracterización de elementos variantes en el tiempo para simular el sistema durante un periodo de tiempo.

#### 3.2 FILOSOFÍAS DE ANÁLISIS DE ARMÓNICOS

Los armónicos en los sistemas eléctricos se estudian aplicando modelos en el dominio del tiempo, de la frecuencia o híbridos de tiempo y frecuencia. El método de análisis debe seleccionarse en función de los objetivos de estudio y la complejidad de operación de los elementos que generan armónicos en la red [1]. En [8] se presentan los métodos más relevantes del estado del arte.

##### 3.2.1 Análisis en el Dominio del Tiempo

En el dominio del tiempo los elementos del sistema se modelan mediante ecuaciones diferenciales que representan su comportamiento dinámico. Este conjunto de ecuaciones es no lineal, en consecuencia, se requiere de métodos numéricos y la Transformada Rápida de Fourier para su resolución. Los métodos más comunes son: análisis de variables de estado y análisis nodal.

El método de variables de estado se utiliza para modelar dispositivos electrónicos con características de operación complejas; fue usado por primera vez para analizar convertidores de potencia AC-DC. Por otra parte, el análisis nodal es eficiente para el estudio de transitorios electromagnéticos [1], [8].

### 3.2.2 Análisis en el Dominio de la Frecuencia

El sistema eléctrico se estudia en un instante determinado de operación representando la red en estado estable a partir de dos submodelos [1]. El primero modela la red en la frecuencia fundamental (modelo usado en flujos de potencia) con el que se calculan las corrientes del sistema. El segundo modela la red en la frecuencia armónica para estudiar la circulación de corrientes armónicas.

El modelo para frecuencia armónica se obtiene aplicando el método de inyección de corriente, ampliamente usado en la literatura, en el cual las cargas no lineales se representan como fuentes de corriente. Además, se considera la variación de la impedancia o 'dependencia de la frecuencia' de los elementos inductivos y capacitivos.

El sistema puede resolverse aplicando varias técnicas presentadas en [8]. Sin embargo, el método denominado 'flujos de potencia armónica' es el más utilizado en programas de simulación, ya que el algoritmo es robusto y tiene buenas propiedades de convergencia. A partir del modelo de red, se forma la matriz de dominio armónico descrito en [4], con la que se realiza un flujo de potencia para establecer las corrientes en frecuencia fundamental. Luego, se ejecuta un flujo de potencia armónica para determinar las corrientes y voltajes en las frecuencias armónicas en estudio, como se observa en la Figura 3.1.

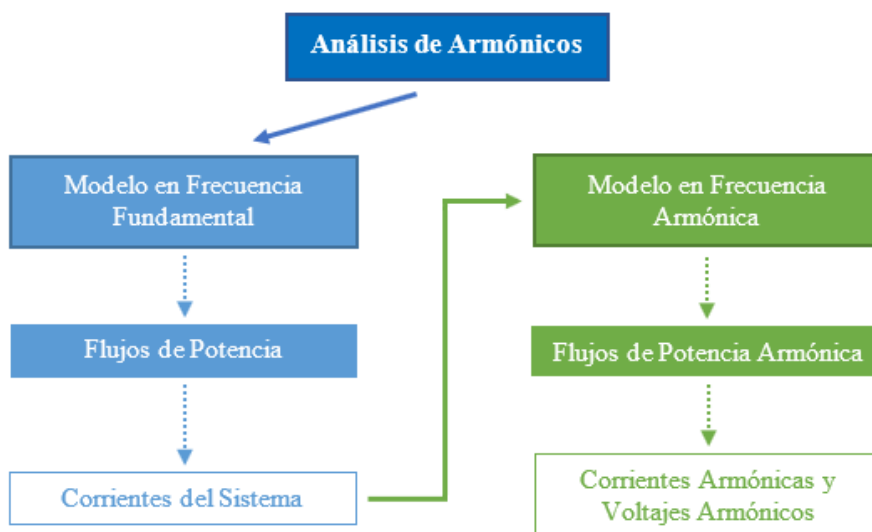


Figura 3. 1 Análisis de armónicos en el dominio de la frecuencia.



### 3.3 MODELO DE LOS ELEMENTOS DE LA RED

La distorsión armónica de voltaje se produce por la circulación de corrientes armónicas generadas por la operación de cargas no lineales dentro y fuera de la red, provocando caídas de voltajes distorsionados, consecuentemente, voltajes armónicos. Los elementos externos producen voltajes armónicos en el punto de conexión; esta distorsión externa se denomina 'distorsión armónica de fondo'. De igual manera, las cargas no lineales internas generan corrientes armónicas dentro del sistema contribuyendo a la distorsión de voltaje.

La distorsión armónica de voltaje en el cualquier punto de la red depende de [1], [9], [30]:

- 1) El nivel de corto circuito en el punto de conexión.
- 2) Los voltajes armónicos externos o 'distorsiones de fondo' en el punto de conexión.
- 3) Las corrientes armónicas producidas por las cargas no lineales dentro de la red en estudio.
- 4) La impedancia de los elementos de la red en distintas frecuencias.

En este trabajo, los sistemas de distribución se analizan en el dominio de la frecuencia. Se requiere definir un modelo de red para la frecuencia fundamental y otro modelo para evaluar las frecuencias armónicas.

Para estudiar un alimentador de distribución en este dominio, se utiliza una fuente de voltaje que representa al sistema externo en la frecuencia fundamental, una fuente de voltaje armónico para modelar las distorsiones armónicas de fondo en la frecuencia armónica. Además, se aplica el método de inyección de corriente armónica para representar las cargas no lineales, y los otros elementos de la red (líneas, cables y transformadores) tienen modelos dependientes de la frecuencia, como se observa en la Figura 3.2.

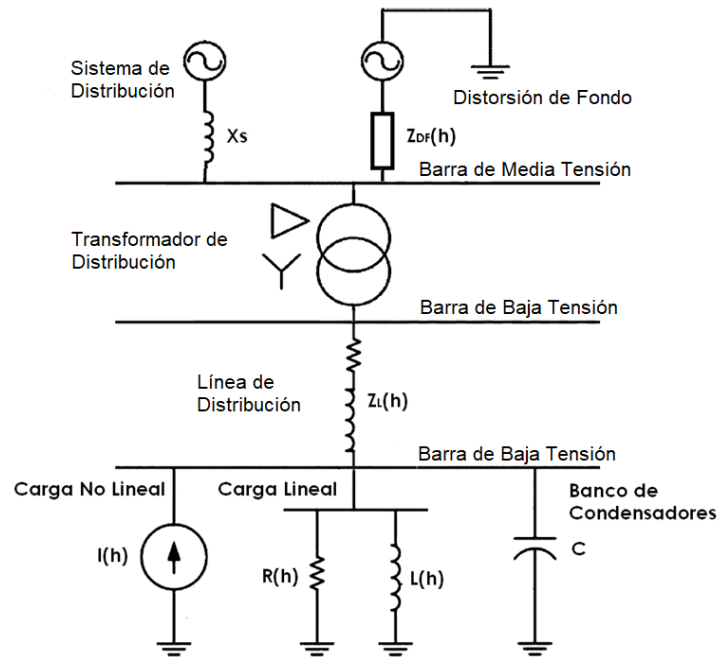


Figura 3. 2 Representación General de un Sistema de Distribución para Estudios de Armónicos.

A continuación, se detallan las características más importantes de los modelos utilizados en el estado del arte para representar cada elemento de la red.

### 3.3.1 Red Externa y Distorsión de Fondo

La red externa representa el sistema externo que suministra la energía en la frecuencia fundamental. Se modela con un equivalente de Thévenin mediante una fuente de voltaje en serie con una impedancia calculada a partir de la potencia de cortocircuito en el punto de conexión.

La distorsión armónica de fondo representa la distorsión producida por cargas no lineales fuera del alimentador. Las corrientes armónicas generadas por elementos externos (cargas no lineales en otros alimentadores de la misma subestación, en subestaciones adyacentes o en el sistema de subtransmisión) se propagan por la red provocando voltajes armónicos en el punto de conexión. Para simplificar la modelación, se utiliza un equivalente de Thévenin conformado por una fuente de voltaje armónico en serie con una impedancia dependiente de la frecuencia [1], [30], [9].

El nivel de cortocircuito indica que tan fuerte es el sistema externo; para valores altos, el impacto de la distorsión de fondo es mayor, aunque la afeción provocada

por las cargas no lineales dentro del alimentador es menor. Lo opuesto sucede con valores bajos de cortocircuito.

En la Figura 3.3 se presenta el modelo de red externa para el flujo de potencia a frecuencia fundamental, y distorsión de fondo para el flujo de potencia a frecuencias armónicas.

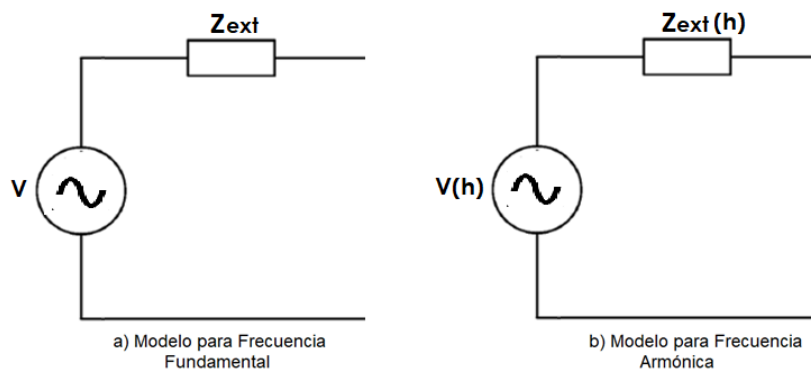


Figura 3. 3 Modelo de la Red Externa y Distorsión de Fondo

### 3.3.2 Líneas y Cables

Se pueden representar por equivalentes  $\pi$  dependientes de la frecuencia, incluyendo un factor de corrección para el efecto piel. Además, estos elementos modifican la impedancia de la red [4]. Varios estudios y modelos de dependencias de la frecuencia se presentan en [34-36].

### 3.3.3 Transformadores

Los transformadores están compuestos por elementos que presentan dependencia de la frecuencia. Los modelos utilizados en frecuencias armónicas son equivalentes a los usados en flujos de potencia. Se considera la capacitancia de acoplamiento magnético únicamente si las frecuencias analizadas están por encima de los 10kHz [4]. Modelos y estudios de armónicos en transformadores se presentan en [37-38]

### 3.3.4 Bancos de Capacitores

Los bancos de capacitores modifican la impedancia de la red, y la circulación de corrientes armónicas puede producir fenómenos de resonancia provocando elevaciones de corriente en algunos ordenes armónicos [39]. El modelo utilizado en estudios de armónicos considera la dependencia de la frecuencia [4].





### 3.3.5 Cargas

Las cargas representan los equipos eléctricos y electrónicos que utilizan los usuarios del sistema eléctrico. En estudios de flujos de potencia únicamente es necesario establecer la potencia suministrada a la carga. Mientras que, en estudios de armónicos, se incluye la generación de corrientes armónicas por las cargas no lineales. A continuación, se describen los modelos más relevantes del estado del arte, así como las metodologías más utilizadas para crear modelos de carga agregada variante en el tiempo.

#### 3.3.5.1 Tipos de Cargas

Los consumidores utilizan diferentes dispositivos que pueden clasificarse como cargas lineales y no lineales. En la siguiente tabla se presenta los modelos utilizados para representar las cargas.

Tabla 3. 1 Modelos de Cargas para la frecuencia fundamental y frecuencia armónica.

Carga	Modelo en Frecuencia Fundamental	Modelo en Frecuencia Armónica
<b>Lineal</b>	Carga de potencia constante. 	Impedancia dependiente de la frecuencia. 
<b>No Lineal</b>	Carga de potencia constante. 	Fuente de corriente armónica. 
<b>Equivalente de Norton</b>	Cargas de potencia constante en paralelo. 	Impedancia dependiente de la frecuencia en paralelo con una fuente de corriente armónica. 

#### 3.3.5.2 Cargas Agregadas

Es complejo obtener un modelo de red que incorpore a cada dispositivo utilizado por los consumidores. Se pueden combinar diferentes dispositivos lineales y no lineales

para formar una carga compuesta. Estas agrupaciones se denominan ‘cargas agregadas’. Se pueden establecer diferentes niveles de agregación de carga: conjuntos de dispositivos de un usuario, un consumidor, grupo de consumidores de una misma clase, grupo de consumidores conectados a un transformador de distribución o todos los consumidores un alimentador de distribución [7], [9]. En la Figura 3.4 se presenta la topología común de un sistema de distribución donde se observan los diferentes niveles de agregación.

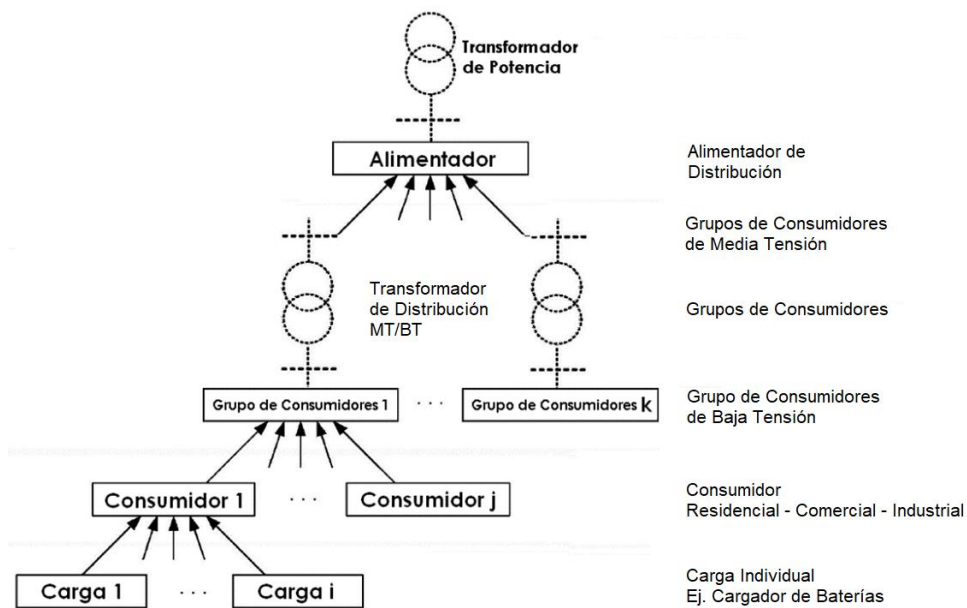


Figura 3. 4 Niveles de Agregación de Cargas.

El nivel de agregación de la carga se establece en función del estudio. Para el análisis de sistemas de distribución, se requiere desarrollar un procedimiento de caracterización de la carga que permita simplificar la representación de los dispositivos eléctricos y electrónicos utilizados por los consumidores.

### 3.3.5.3 Atenuación de Corrientes Armónicas

Algunos equipos no lineales producen magnitudes y fases de corrientes armónicas diferentes cuando operan con bajos o altos niveles de potencia. Este efecto se conoce como atenuación [10]. Cuando aumenta la distorsión de voltaje en la red o cuando se disminuye la impedancia del sistema, las corrientes armónicas generadas por las cargas no lineales pueden incrementar o disminuir. Varios estudios de atenuación se presentan en [31], [32].

### 3.3.5.4 Diversidad de Armónicos

Las corrientes armónicas generadas por las cargas no lineales pueden variar en el ángulo de fase. Este efecto se conoce como diversidad de ángulos, y se debe principalmente a los cambios en la impedancia de la red, las características de operación de la carga o distorsiones de voltaje [10], [33].

El espectro total de corrientes armónicas resulta de la suma vectorial de los espectros armónicos de corriente que genera cada carga no lineal. La cancelación de armónicos se produce debido a que la diversidad de ángulos en las corrientes armónicas disminuye la magnitud de la suma vectorial. Es decir, las variaciones de los ángulos de fase disminuyen la corriente armónica resultante [32].

En las Figuras 3.5 – 3.7 se observan las mediciones de alimentadores de distribución y el resultado de la suma vectorial del 5to armónico de corriente. En las Figuras 3.6 y 3.7 se presentan las curvas de densidad de probabilidad o *probability density function* (PDF) de las mediciones realizadas. Éstas curvas de densidad de probabilidad indican el comportamiento de las magnitudes y ángulos armónicos en determinados valores de corriente y grados respectivamente.

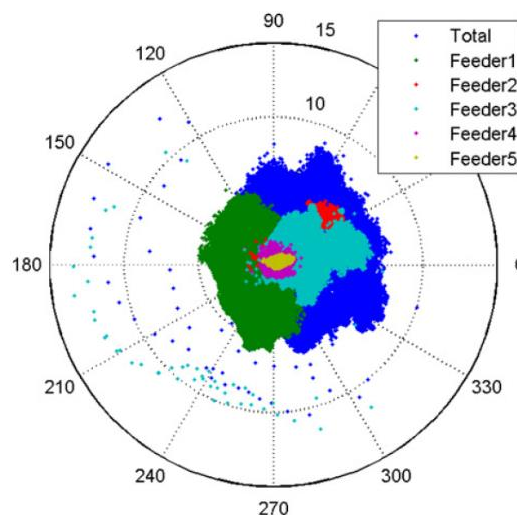


Figura 3. 5 Grafica Polar de Magnitud y Angulo de corrientes armónicas [32].

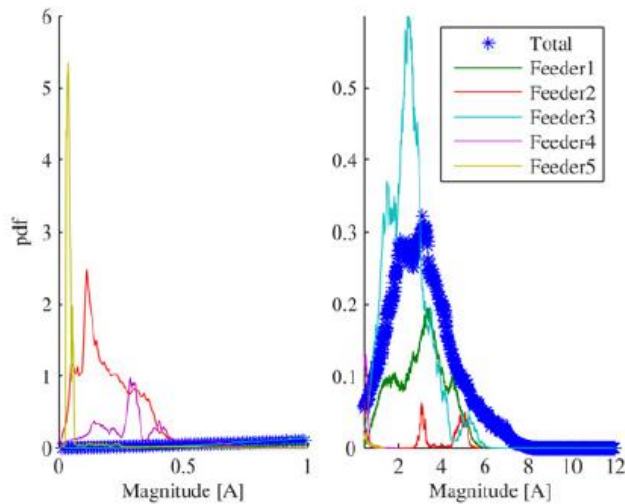


Figura 3. 6 PDF de Magnitudes [32].

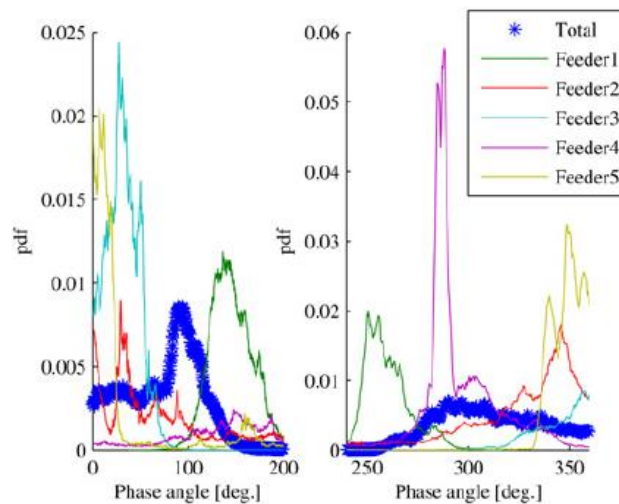


Figura 3. 7 PDF de Ángulos [32].

### 3.3.5.5 Variación en el Tiempo

Los usuarios tienen diversos perfiles de carga debido a los diferentes hábitos de consumo y composiciones de carga. Los perfiles de carga, la composición de la carga y las condiciones del sistema (por ejemplo: las distorsiones armónicas de fondo) producen corrientes armónicas que también varían en el tiempo. En las Figuras 3.8 y 3.9 se presentan la medición de corriente diaria de un consumidor residencial y un hotel, donde se observa que la magnitud de las corrientes varía continuamente a lo largo del día.

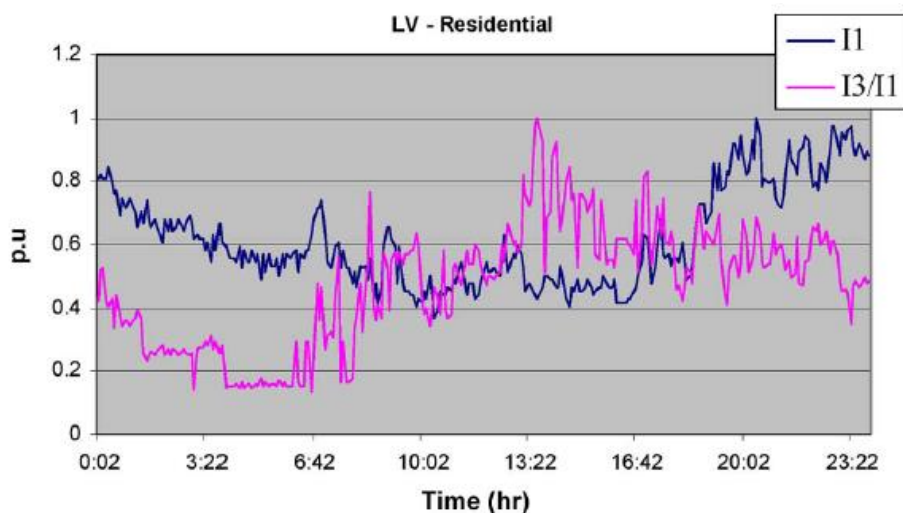


Figura 3. 8 Medición de corriente en un Consumidor Residencial [11].

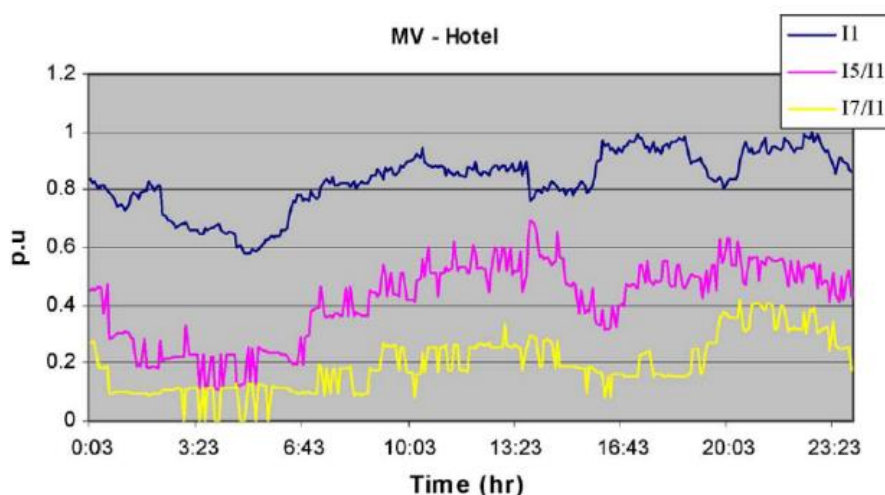


Figura 3. 9 Medición de corriente en un Hotel [11].

### 3.3.6 Metodologías de Modelación de Carga Armónica Agregada Variante en el Tiempo

Para analizar el comportamiento de un sistema de distribución a lo largo del día, se debe establecer una metodología de caracterización que considere los siguientes criterios:

- Representar adecuadamente la parte lineal y no lineal de la carga.
- Definir un nivel de agregación que simplifique la modelación.
- Crear curvas de comportamiento para representar la variación en el tiempo.
- Incluir las características aleatorias de la carga no lineal.

Los métodos más utilizados en la literatura son: modelos basados en componentes o llamados también 'component based', y modelos basados en mediciones llamados también 'measurements based'.

### 3.3.6.1 Metodología Basada en Componentes

Se aplica una metodología bottom-up para construir el modelo de un consumidor, combinando varios submodelos definidos para cada dispositivo utilizado por el usuario. El modelo de cada dispositivo se obtiene a partir su circuito eléctrico o con medición, el cual representa el comportamiento del equipo durante un periodo de tiempo. Con modelos genéricos para cada dispositivo, se combinan en diferentes proporciones y se construye el modelo de un consumidor. Además, se pueden agrupar consumidores para formar modelos de grupos, tal como se observa en la Figura 3.10.

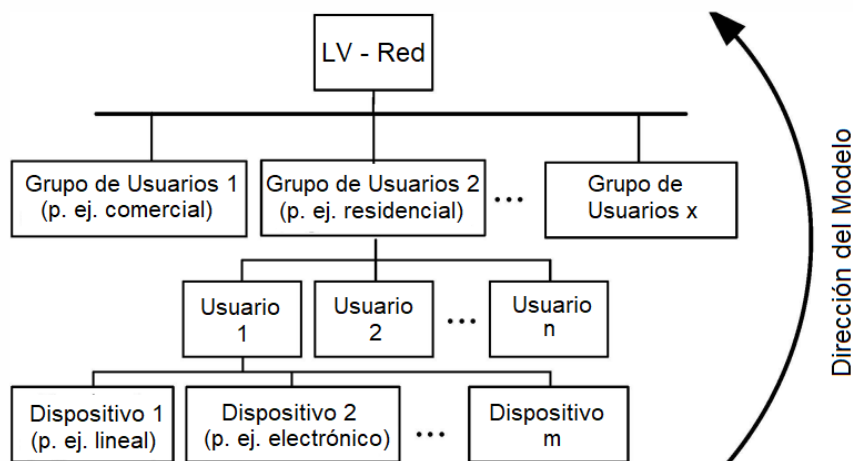


Figura 3. 10 Modelación Basada en Componentes.

El uso de modelos genéricos para cada dispositivo puede ser inadecuado, ya que existe una gran variedad de equipos disponibles en el mercado, que, a pesar de tener la misma funcionalidad, tienen diferente topología eléctrica, diferentes componentes y diversos espectros de corrientes armónicas. Además, cada usuario tiene diferente composición de carga y diversos hábitos de consumo. La información sobre hábitos de consumo no siempre está disponible [5].

En [11] se establece un procedimiento a partir de la composición de cuatro tipos genéricos de carga no lineal, mediante un proceso iterativo y aleatorio, que se aplica en una red de distribución en [12] y [13]. En [14] se incluye una carga no lineal



variable que se ajusta utilizando medición para obtener resultados precisos. En [15] se establece un modelo de carga con modelos exponenciales y ZIP. En [5] se obtienen modelos de consumidores residenciales a partir de modelos para cada equipo electrodoméstico, los cuales se combinan para realizar varios estudios en diferentes niveles de agregación de carga.

### 3.3.6.2 Metodología Basada en Mediciones

Se obtiene el modelo del sistema evaluando la información de armónicos recopilada por equipos de medición colocados en diferentes puntos de la red. Las mediciones muestran el resultado de la interacción de varios dispositivos de un consumidor o grupos de consumidores conectados a un mismo punto. Los datos contienen de forma inherente efectos como cancelación y atenuación de armónicos, donde también la localización de la medición establece el nivel de agregación de la carga. La precisión y confiabilidad de los modelos depende de la cantidad y calidad de la información disponible [7].

Los datos pueden ser analizados utilizando diferentes técnicas que incluyen métodos estadísticos, funciones de distribución de probabilidad, curvas de distribución acumulada, sub intervalos de tiempo, métodos deterministas-estadísticos [5]. Los modelos pueden obtenerse tanto para todo un alimentador, como para usuarios individuales. El análisis combinado de mediciones en diferentes niveles de agregación puede dar resultados más confiables [7].

En [7] se presenta un modelo estocástico de consumidores residenciales, que se obtiene clasificando las mediciones bajo diferentes parámetros como cantidad de dispositivos electrónicos o hábitos de consumo de los clientes. En [16] se obtiene un modelo de un tren eléctrico basado en la medición, aplicando métodos estadísticos de probabilidad para obtener los parámetros eléctricos de la carga. La simulación de un modelo balanceado de un sistema de distribución balanceado en el software de simulación DlgSILENT se presenta en [17].

## 3.4 CARACTERIZACIÓN DE ELEMENTOS VARIANTES EN EL TIEMPO

El análisis en el dominio de la frecuencia limita el estudio del sistema a un instante de operación determinado, a pesar de que el consumo de energía eléctrica varía en





el tiempo. Generalmente, la topología de la red se mantiene constante, mientras que las cargas tienen un comportamiento dinámico.

Para el estudio del sistema en un periodo de tiempo, es necesario elaborar una metodología de caracterización de elementos variantes en el tiempo. Tanto la distorsión producida por elementos externos o distorsión armónica de fondo, como la distorsión generada por las cargas armónicas dentro de la red, requieren de este procedimiento de caracterización. Por otra parte, los otros elementos de la red permanecen sin cambios.

La metodología desarrollada a continuación está basada en mediciones, es decir, parte de información real obtenida del sistema de distribución de la CENTROSUR para caracterizar los elementos. Antes de utilizar este procedimiento es importante considerar los siguientes aspectos:

- a) Información disponible.
- b) Técnicas de análisis de la información.
- c) Intervalo de modelación (horas o minutos).
- d) Software que permita aplicar el modelo obtenido en simulaciones.

Como resultado de esta metodología se obtienen curvas o perfiles de voltajes armónicos, de carga y de corrientes armónicas, que contienen el comportamiento diario de los elementos, con los cuales se simulan los escenarios correspondientes a cada intervalo de tiempo, durante todo el periodo de tiempo.

### **3.4.1 Distorsión de Fondo variante en el tiempo**

Es necesario recopilar mediciones de voltajes armónicos en el punto de conexión con la red externa. Estas mediciones deben realizarse durante un periodo de tiempo no menor a una semana. Con la información disponible se establece el perfil diario de voltajes armónicos. En la Figura 3.11 se presenta una medición diaria de voltajes armónicos de una subestación de la CENTROSUR. Es necesario crear un perfil completo de voltajes armónicos específico para cada alimentador o sistema en estudio.



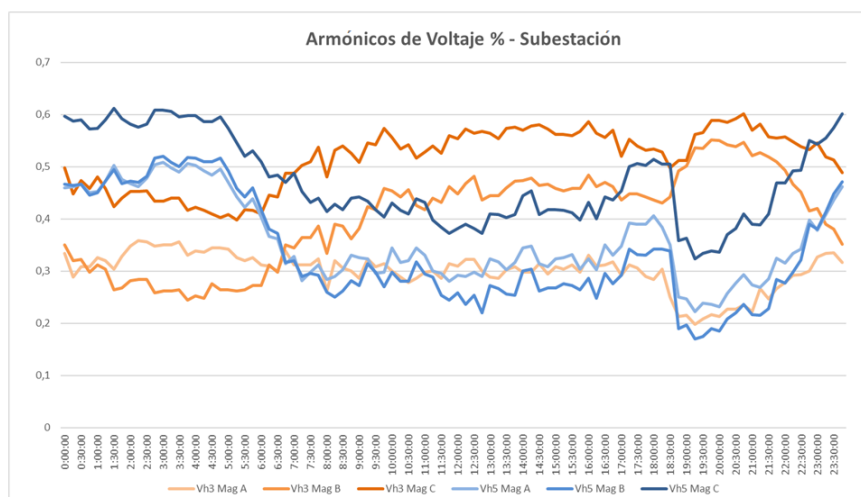


Figura 3. 11 Curva de distorsión armónica.

### 3.4.2 Cargas armónicas agregadas variantes en el tiempo

Para representar adecuadamente la carga, se debe construir un modelo con la componente lineal y no lineal. Sin embargo, las mediciones realizadas en clientes o grupos de clientes proveen de información agregada tanto del consumo energético, como de la generación de corrientes armónicas, siendo imposible obtener un equivalente de Norton. A pesar de esto, cada consumidor se puede representar como una única carga no lineal, cuya potencia y corrientes armónicas se determinan con medición.

Los usuarios finales del sistema de distribución se agrupan por clase de consumo en clientes residenciales, comerciales, industriales, otros y luminarias. En cada clase de consumo, el perfil de carga y las corrientes armónicas son similares, ya que los hábitos de consumo energético y la composición de la carga son semejantes. Los perfiles de carga de los consumidores pueden determinarse utilizando curvas genéricas de demanda obtenidas de estudios de investigación de la carga. Además, para simplificar la caracterización de las fuentes armónicas de corriente para cada cliente, las cargas se agrupan por clase de consumo y se obtienen perfiles de corrientes armónicas por cada clase respectivamente.

Por lo tanto, esta metodología propone obtener los perfiles de carga y corrientes armónicas de los consumidores por clase de consumo, conectados en los terminales de baja tensión de los transformadores de distribución, para ser tratados como cargas no lineales que representan a cada grupo de consumo.

### 3.4.2.1 Modelo para la frecuencia fundamental

Este procedimiento permite obtener una curva de carga de un conjunto de clientes agrupados por clase de consumo en los terminales de baja tensión de los transformadores de distribución.

Para esto, primero se debe conocer la curva de carga de cada cliente conectado al transformador. Aunque no es posible realizar mediciones en todos los clientes para conseguir la información exacta, se realiza una estimación mediante la aproximación de la curva de potencia usando los resultados del estudio de investigación de la carga desarrollado en [40]. En este estudio se presentan curvas de demanda para cada clase y estrato de consumo. En la Figura 3.12 se presenta la curva de demanda diaria de un cliente residencial del estrato C, con un consumo mensual entre 110 y 180 kWh.

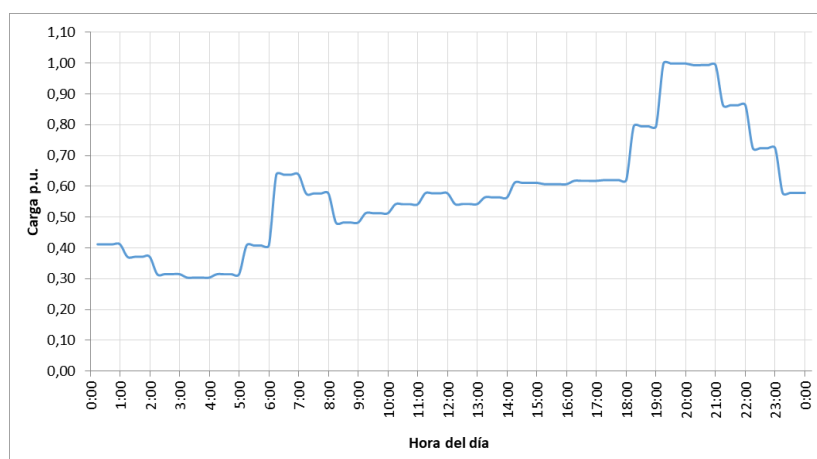


Figura 3. 12 Curva de Demanda de clientes residenciales - Estrato C

Utilizando el consumo mensual del cliente, su curva correspondiente y el factor de carga, se puede estimar la potencia del usuario en cualquier instante del día con la siguiente formula:

$$D(kWh_{mes}, t) = \frac{F_D(kWh_{mes}, t)}{24 * \frac{365}{12}} * kWh_{mes} \quad (3.1)$$

Dónde:



$D$ : Demanda de la carga a la hora  $t$ .

$F_D$ : Factor de demanda a la hora  $t$ .

$F_C$ : Factor de carga.

$kWh_{mes}$ : Consumo mensual de energía.

$t$ : Hora.

Este procedimiento se aplica para todos los clientes conectados a un transformador de distribución. Luego, se totalizan los perfiles de carga por clase de consumo. Finalmente se obtiene un perfil de carga aproximado por grupo de consumo.

La estimación mejora si se tiene medición del transformador, ya que se puede realizar un último ajuste distribuyendo o retirando potencia de manera proporcional a todas las cargas para ajustarse a la medición real. La potencia reactiva se distribuye proporcionalmente entre todos los clientes.

Para establecer un modelo en un alimentador de distribución es necesario obtener una base de datos con información de consumo mensual de los todos los clientes y medición de potencia activa y reactiva en cabecera del alimentador. Para mejorar la estimación, se puede realizar medición en grandes consumidores o utilizar información de medición en tramos del alimentador.

En general, los pasos para obtener el modelo de carga agregada por grupo de consumo en un alimentador son:

- 1) Crear la base de datos de los clientes con información de consumo
- 2) Realizar medición en grandes consumidores del sistema
- 3) Obtener una base de datos de las luminarias del alimentador
- 4) Medir potencia activa y reactiva en la cabecera del alimentador
- 5) Crear un perfil de carga para cada cliente dentro de la base de datos
- 6) Crear un perfil de carga para los clientes medidos.
- 7) Crear un perfil de carga para las luminarias.



- 8) Obtener una curva total de clientes estimados, clientes medidos y luminarias.
- 9) Comparar la curva total aproximada con la medición en cabecera.
- 10) Las curvas tienen un error de estimación, entonces se tiene que distribuir la diferencia entre la potencia de medida y aproximada en las curvas de carga de clientes estimados, utilizando un factor proporcional de ajuste.
- 11) Con las curvas de carga ajustadas, se debe agrupar los clientes por transformador.
- 12) Totalizar las cargas por grupo de consumo para cada transformador dentro del sistema en estudio.

### **3.4.2.2 Caracterización de fuentes armónicas de corriente variantes en el tiempo**

En este procedimiento se obtiene un perfil diario de la magnitud de las fuentes de corriente armónicas por grupo de consumo. Para esto, la medición debe ser clasificada y analizada por clase de consumo para obtener los perfiles que serán utilizados en simulaciones.

#### **3.4.2.2.1 Información Disponible**

La información requerida se recopila en campañas de medición de calidad de producto realizada en toda el área de concesión de la CENTROSUR. Los puntos de medición se establecen en subestaciones, transformadores de distribución, consumidores de media tensión, y usuarios finales.

La medición contiene información de un periodo de 7 días, con intervalos de 10 minutos, en la cual se almacenan parámetros como tensiones, corrientes, potencias, armónicos de voltaje y corriente, entre otros.

Las características de los equipos de medición que se presentan a continuación:

Tabla 3. 2 Características de los Equipos de Medición.

Fluke 1744	PQ-box 100	PQM 702
 <ul style="list-style-type: none"> <li>• Analiza y registra los parámetros de la calidad del suministro eléctrico basado en el estándar de calidad EN50160.</li> <li>• Medida de los parámetros eléctricos más comunes: V, A, W, VA, VAR, PF, energía, flicker, eventos de tensión y THD.</li> <li>• Registro de la magnitud de armónicos de voltaje y corriente.</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• Instrumento portátil con clase de protección IP65 diseñado para analiza redes de hasta 1100 V RMS.</li> <li>• Cumple con los requisitos de la norma IEC61000-4-30 para equipos de medición categoría A.</li> <li>• Registro de eventos, flicker, frecuencia, simetría de tensión de red, sincronización.</li> <li>• Registro de magnitud de armónicos de voltaje, y magnitud y ángulos de armónicos de corriente.</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diagnóstico de calidad de la energía de acuerdo al estándar EN50160.</li> <li>• Satisface los requerimientos del estándar IEC-61000 para analizadores de clase A.</li> <li>• Se sincroniza a una señal estándar mediante el módulo GPS incorporado.</li> <li>• Registro de magnitud y ángulos de armónicos de voltaje y corriente</li> </ul>

### 3.4.2.2 Análisis de Mediciones

Se utilizó información recopilada desde del año 2015, la cual fue clasificada por grupo de consumo con las siguientes consideraciones:

- Para los usuarios residenciales se empleó la medición registrada en los transformadores de distribución, debido a que estos consumidores representan el mayor grupo de consumo del transformador.
- La medición recopilada de consumidores de media tensión fue clasificada para caracterizar a los usuarios comerciales e industriales.
- Los consumidores catalogados como “otros” tienen una composición de carga similar a los consumidores comerciales, por lo tanto, los resultados del análisis de la clase comercial son usados para esta clase.



- Para las luminarias se realizó la medición de la lámpara GPL de doble nivel de potencia.
- Se consideran los armónicos pares e impares hasta el orden 13, debido a que las magnitudes de los armónicos superiores son despreciables.
- El estudio se divide en dos partes: análisis de magnitudes armónicas y análisis de ángulos armónicos.

Para analizar la información, es necesario almacenar la medición en bases de datos y utilizar un software de procesamiento estadístico. Con la ayuda del software Excel, se crearon bases de datos para cada tipo de cliente y se desarrollaron macros para automatizar el ingreso de la información.

### a) Análisis de Magnitudes Armónicas

La cantidad de muestras utilizadas por cada clase se presenta en la Tabla 3.3.

Tabla 3. 3 Cantidad de muestras por cada clase de consumo.

Clase de Consumo	Residencial	Comercial	Industrial	Luminarias
Muestras	782	711	445	1

A continuación, se realizó un pre-procesamiento para convertir los datos de magnitudes de corriente armónica, almacenados en amperios, a valores porcentuales referidos a la magnitud de la corriente de frecuencia fundamental mediante la siguiente expresión:

$$I_{h\%} = \frac{I_h}{I_1} \quad (3.2)$$

$I_{h\%}$ : Corriente armónica de orden  $h$  en porcentaje referido a la corriente fundamental

$I_1$ : Corriente fundamental en Amperios

$I_h$ : Corriente armónica de orden  $h$  en Amperios

Usando filtros de datos e histogramas se evalúa la distribución de frecuencia de un conjunto de datos. En la Figura 3.13 se presenta un histograma del 3er armónico de

corriente de consumidores residenciales a las 12:00 horas, donde se observa que los datos presentan tendencia.

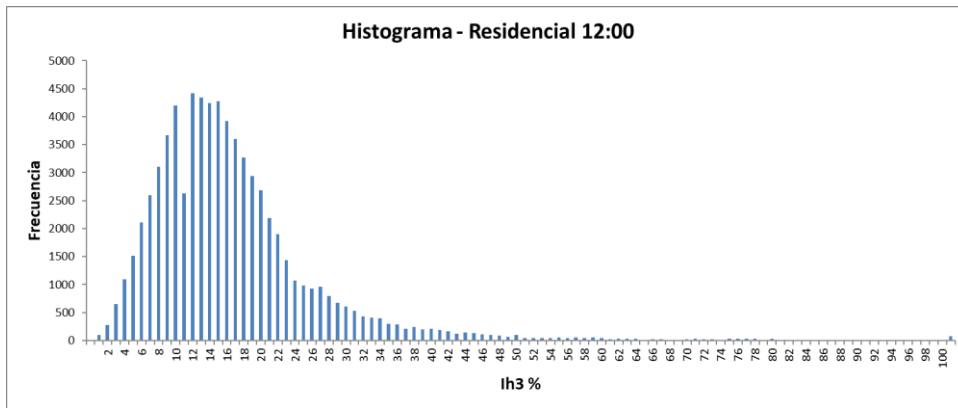


Figura 3. 13 Histograma de la magnitud del 3er armónico de corriente de la clase residencial.

Los diagramas de caja también se utilizan para representar la distribución de los datos. Estos diagramas se evalúan en intervalos de tiempo y se agrupan para observar el comportamiento durante un periodo. En la Figura 3.14 se presentan diagramas de caja del 3er armónico de corriente de los consumidores residenciales analizados en intervalos de una hora, donde se observa la tendencia en cada hora durante un día.

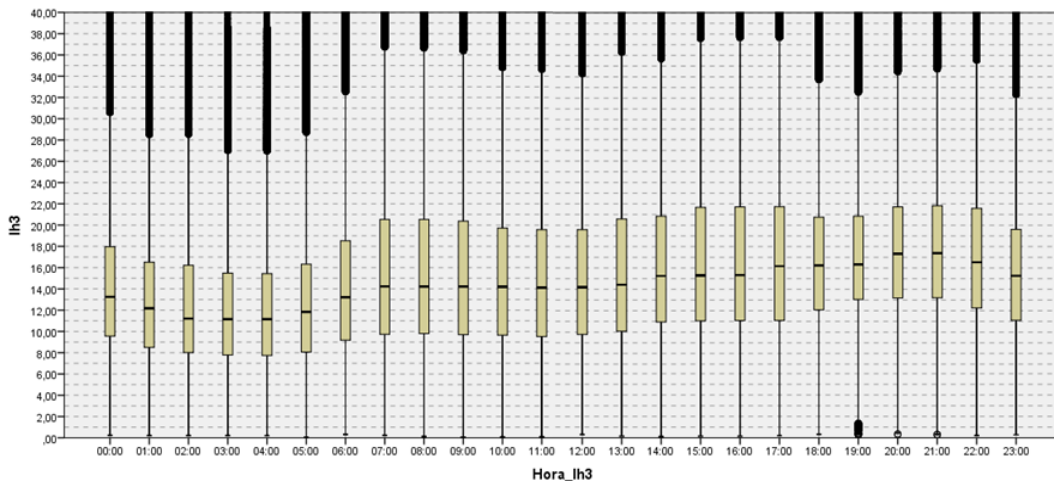


Figura 3. 14 Diagramas de caja de la magnitud del 3er armónico de corriente de la clase residencial.

Este comportamiento de los datos se replica en todos los órdenes armónicos y clases de consumo. De la misma forma se analizaron los datos en días laborables y no laborables, sin embargo, no se encontraron diferencias.

Para simplificar la modelación, se tomaron los valores promedio de los conjuntos de datos agrupados en intervalos de 15 minutos ya que los histogramas de frecuencia muestran que los datos se aproximan a una distribución simétrica, ver ANEXO 1. Con estos valores se creó el perfil diario promedio de corrientes armónicas por cada clase de consumo. En la Figura 3.15 se presenta el perfil de un consumidor residencial.

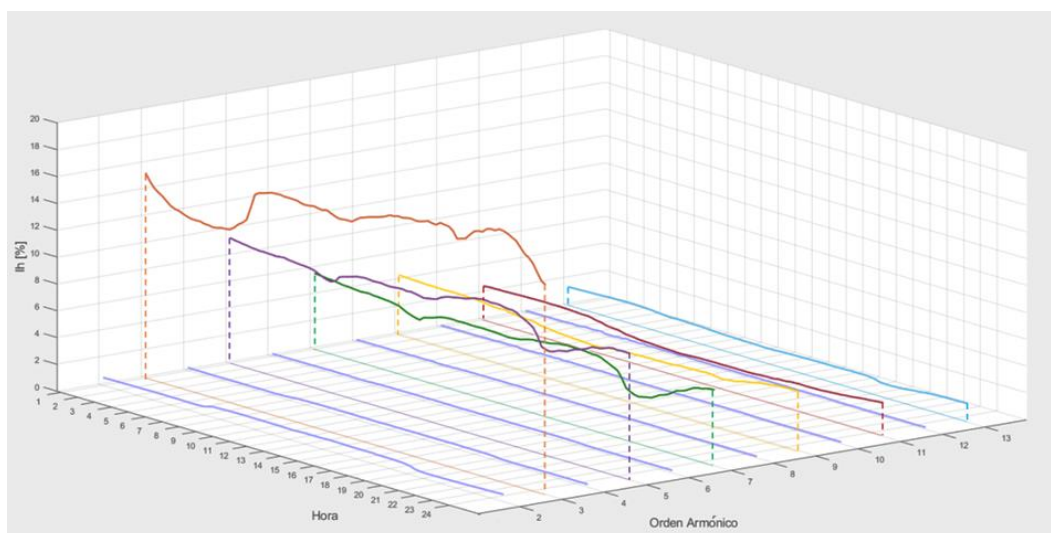


Figura 3. 15 Perfil de la magnitud de las corrientes armónicas de la clase residencial.

En la Figura anterior se observa que la magnitud del 3er armónico es la más representativa, y las magnitudes de los armónicos pares son despreciables. Los perfiles de todas las clases de consumo se presentan en el ANEXO 2.

### b) Análisis de Ángulos Armónicos

En la siguiente Tabla se presenta la cantidad de muestras utilizadas para caracterizar los ángulos armónicos de cada clase de consumo:

Tabla 3. 4 Cantidad de muestras por cada clase de consumo.

Clase de Consumo	Residencial	Comercial	Industrial	Luminarias
Muestras	135	189	120	1

En la Figura 3.16 se presenta un histograma del 5to armónico de corriente de consumidores comerciales a las 12:00 horas.



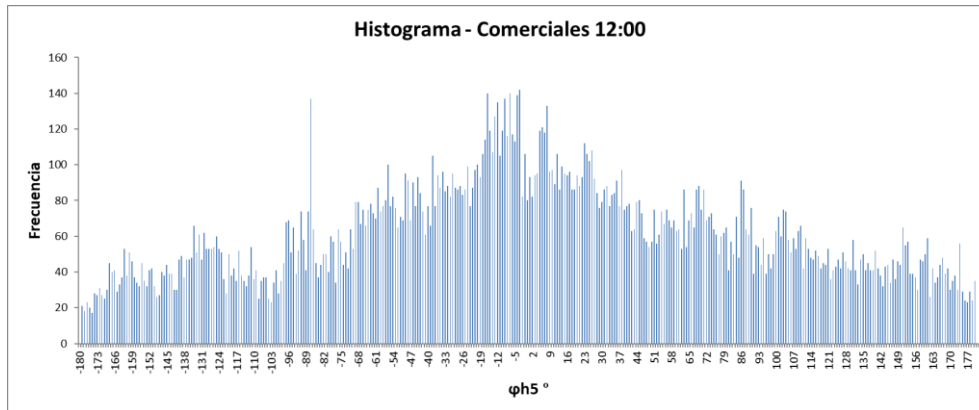


Figura 3. 16 Histograma del ángulo de fase del 3er armónico de corriente de la clase comercial.

En la Figura anterior se observa que los datos de los ángulos armónicos no presentan una tendencia definida, replicando este comportamiento en todas las frecuencias armónicas de los diferentes tipos de consumidores. Por lo tanto, para simplificar la modelación no se consideraron los ángulos armónicos en este estudio.

## CAPÍTULO 4

### MODELACIÓN Y SIMULACIÓN

#### 4.1 CASO BASE

En este escenario se modela el estado actual del sistema. La metodología se implementó en el alimentador 0324 de la Subestación 03 que suministra energía eléctrica a la parroquia Monay.

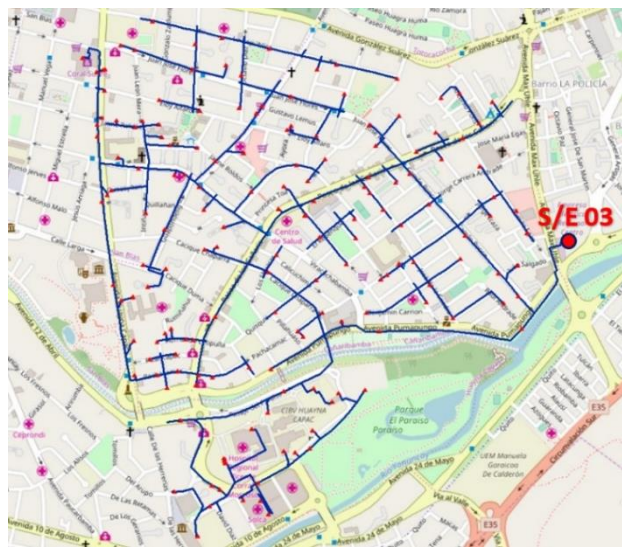


Figura 4. 1 Alimentador 0324 SIG.

El alimentador está compuesto por 167 transformadores de distribución que conectan 6691 clientes y 1563 luminarias. En la Tabla 4.1 y 4.2 se presenta la composición del alimentador analizado por cantidad de clientes y potencia por grupo de consumo respectivamente, mientras que en la Figura 4.2 se observa la gráfica apilada de carga.

Tabla 4. 1 Número de clientes del alimentador 0324

Clientes	# Clientes	# Clientes %
Residenciales	5658	84,57%
Comerciales	836	12,50%
Industriales	114	1,70%
Otros	82	1,23%
<b>Total</b>	<b>6690</b>	<b>100,00%</b>
Luminarias	1563	-

Tabla 4. 2 Consumo de los clientes del alimentador 0324

Clientes	Potencia kW	Potencia %
Residenciales	1618,67	51,96%
Comerciales	624,57	20,05%
Industriales	69,58	2,23%
Otros	446,89	14,35%
Luminarias	355,29	11,41%
<b>Total</b>	<b>3115</b>	<b>100,00%</b>

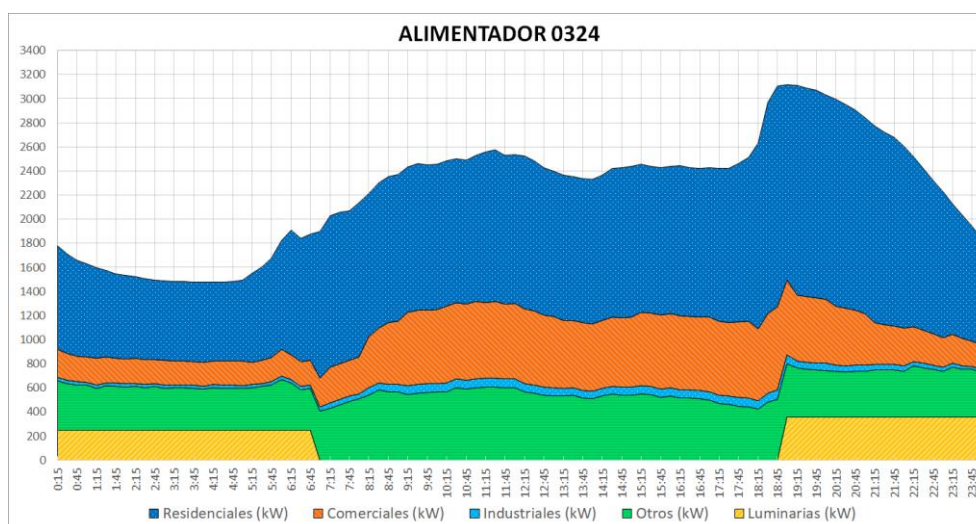


Figura 4. 2 Curva de Carga Apilada por Grupo de Consumo.

## 4.2 INFORMACIÓN DISPONIBLE

El procedimiento de ajuste de carga requiere de información de medición de potencia activa y reactiva en diferentes partes del sistema, así como las bases de datos de consumo de clientes y luminarias. Información adicional se puede incorporar para mejorar la distribución de carga y disminuir el error en la estimación. A continuación, se detalla la información utilizada para obtener el modelo del alimentador en estudio.

### 4.2.1 SCADA

El sistema SCADA almacena en tiempo real la información de potencia activa y reactiva recopilada por los equipos de medición instalados en la cabecera de los alimentadores de las subestaciones. En la Figura 4.3 se presenta la curva de potencia activa y reactiva promedio del alimentador 0324 en el mes de junio del 2017.

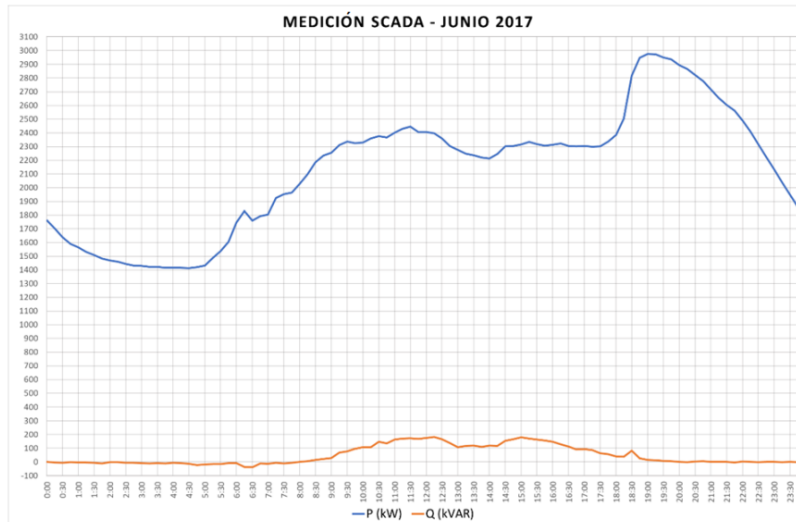


Figura 4. 3 Medición del SCADA del alimentador 0324.

#### 4.2.2 Varcorders

Los Varcorders son equipos de medición diseñados para niveles de media tensión, los cuales almacenan datos de corriente, factor de potencia y potencia reactiva. La potencia activa se calcula a partir de la información recopilada, asumiendo un voltaje constante en el punto de medición. En el año 2014, se colocaron tres Varcorder dentro del alimentador 0324, dos en líneas aéreas de media tensión y uno en el Coral Centro, como se observa en la siguiente Figura.

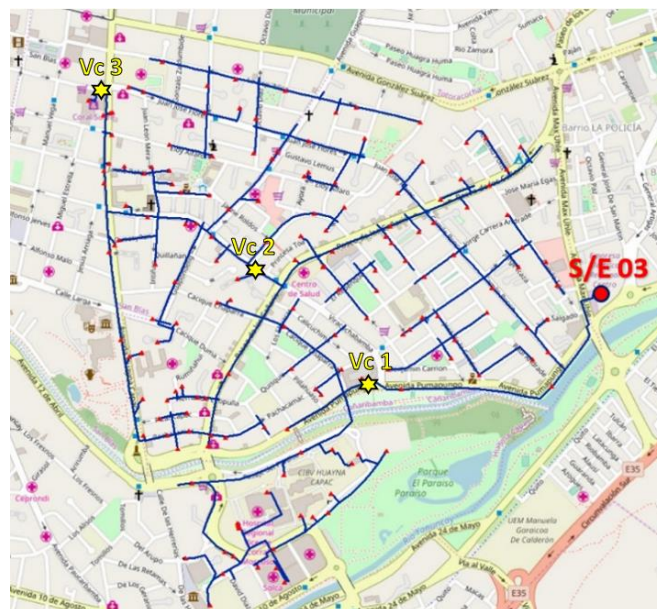


Figura 4. 4 Ubicación de Varcorders en el alimentador 0324.

### 4.2.3 Medición en Grandes Consumidores

Se colocaron equipos de medición en los transformadores del Hospital Vicente Corral Moscoso, debido a que representa el 8% de la carga del alimentador, aproximadamente. Los medidores se colocaron en el mes de mayo y junio de 2018, como se observa en la Figura 4.5.

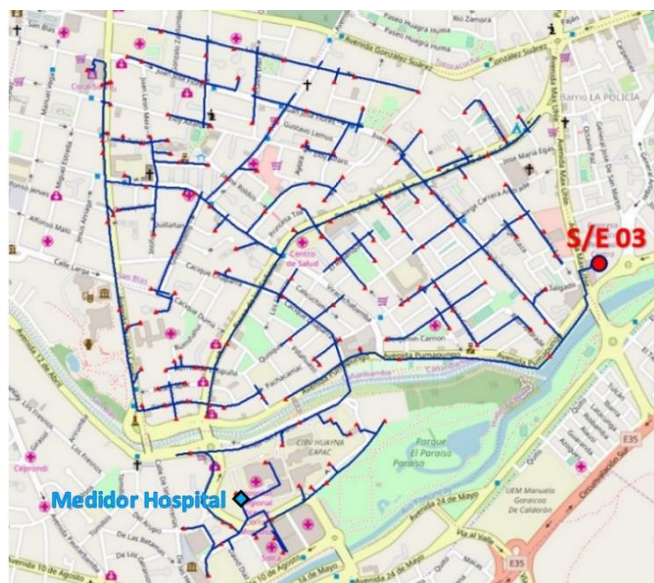


Figura 4. 5 Ubicación de los medidores en el Hospital.

### 4.2.4 Base de Datos de Clientes y Luminarias

La información de consumos mensuales en clientes es esencial para estimar el perfil de carga. Para esto se formó la base de datos de clientes del alimentador, con información del consumo mensual, la clase de consumo y el transformador al que se conecta cada cliente, partiendo de los datos de facturación y del SIG. Es necesario rellenar la información incompleta dentro de la base o depurar si es incorrecta. De igual manera, se construyó la base de datos de las luminarias, con información del consumo de la luminaria, niveles de potencia y transformador al que se conecta.

## 4.3 DISTRIBUCIÓN DE CARGA

El ajuste de los perfiles de carga de los clientes sigue la metodología establecida en el Capítulo 3, a partir de la información presentada anteriormente. Además, para mejorar la precisión del modelo, se realizó un ajuste por áreas, como se observa en la Figura 4.6, usando medición del año 2014 del SCADA y los varcorder. El alimentador 0324 está ubicado en una zona urbana con una baja tasa de



crecimiento de carga, esto permite realizar un último ajuste proporcional para obtener un perfil de carga de clientes en el año 2018.

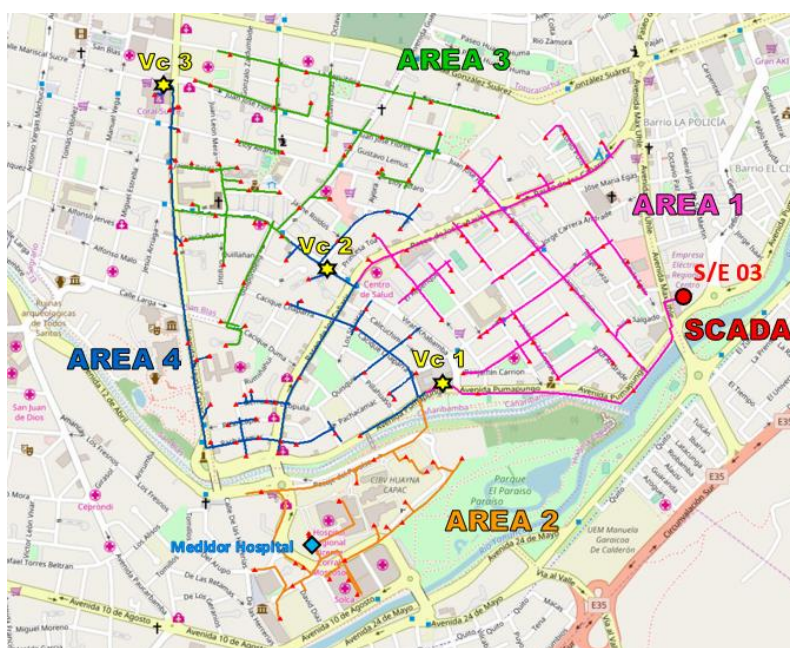


Figura 4. 6 Áreas y ubicación de los equipos en el alimentador 0324.

A continuación, se detallan los pasos para ajustar el perfil de carga por grupo de consumo en cada transformador de distribución:

- 1) Obtener el perfil de carga inicial de cada cliente mediante de las curvas de demanda y el consumo mensual.
- 2) Obtener el perfil de carga de las luminarias.
- 3) Ajustar la potencia del área 3 con la medición del varcorder 2.
- 4) Ajustar la potencia de las áreas 2 y 4 con la medición del varcorder 1 y 3, la medición en el hospital.
- 5) Ajustar la potencia del área 1 con la información del SCADA del año 2014.
- 6) Con la medición de SCADA del año 2018, se realiza el último ajuste distribuyendo la potencia restante de manera proporcional entre todos los clientes.
- 7) Obtener los perfiles de carga por grupo de consumo en cada transformador de distribución.

En la siguiente Figura se presenta la curva de carga de todo el alimentador obtenida aplicando las curvas de demanda [40] en cada cliente, y el resultado de la

distribución de carga por áreas con medición del año 2014 y 2018. Se observa que el ajuste con curvas de demanda se aproxima bastante a la medición del alimentador.

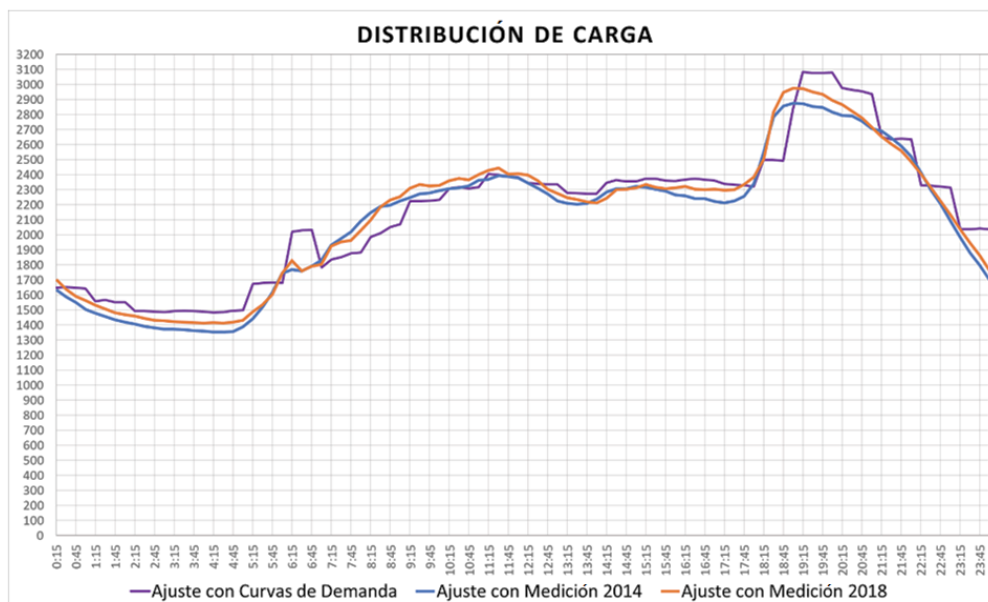


Figura 4. 7 Ajuste con curvas de demanda y con Medición.

## 4.4 MODELACIÓN EN DIGSILENT

### 4.4.1 DigSILENT

Se utiliza el software Power Factory de DigSILENT para la modelación y simulación. Este programa permite analizar sistemas eléctricos de generación, transmisión y distribución. Incluye una gran cantidad de componentes y funciones que permiten simplificar la modelación y simulación de los sistemas, mediante algoritmos de última generación y scripts definidos por el usuario. Para el estudio de armónicos se utiliza el módulo de Calidad de Energía que simula flujos de potencia armónica.

### 4.4.2 Interfaz de Intercambio de Archivos - DGS

DigSILENT Power Factory posee una interfaz de intercambio de archivos llamada "DGS". Con esta interfaz se puede importar un modelo de red completo almacenado tanto en bases de datos de ODBC, MS-SQL o ODBC System DSN, como también en archivos de formato ASCII text, XML, Microsoft Excel o Microsoft Access.

En este trabajo se utilizaron hojas de datos en Microsoft Excel. Los objetos que conforman la red deben ser organizados dentro del archivo como se indica en la documentación de la interfaz [41] y en el ANEXO 3. La información almacenada en el SIG puede ser adaptada en el formato DGS para obtener un modelo completo con georreferenciación. Al importar el archivo de Excel con la interfaz DGS en Power Factory, se crea el modelo completo del alimentador. En la Figura 4.8 se observa el diagrama unifilar de la red.

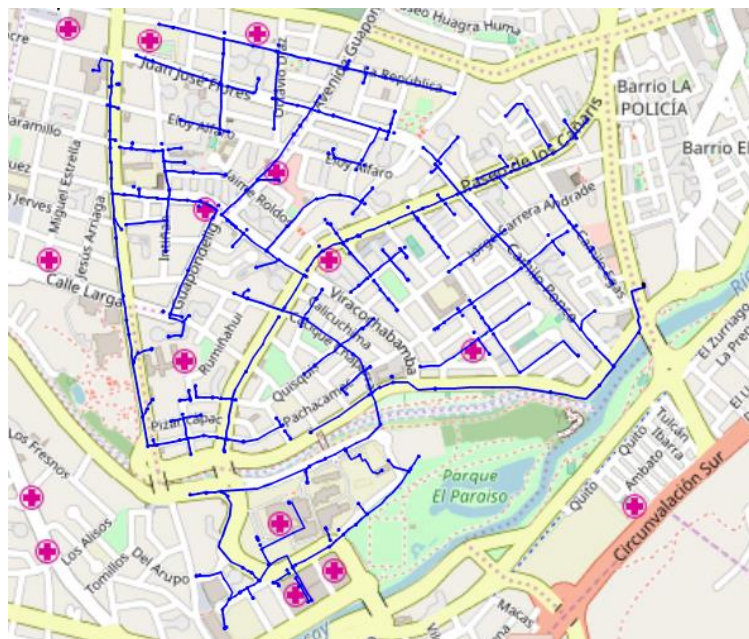


Figura 4. 8 Modelo del alimentador en DIgSILENT.

#### 4.4.3 Lenguaje de Escritura de Programas - DPL

DIgSILENT Power Factory permite realizar instrucciones de programación creadas por el usuario a través de un conjunto de funciones incorporadas en el lenguaje de escritura de programas “DPL” o “DIgSILENT Programming Language”. Los scripts desarrollados en este estudio, son utilizados para automatizar procedimientos iterativos que facilitan el análisis temporal de una red.

En la red, las características de la distorsión de fondo y las cargas no lineales varían en el tiempo, mientras que la topología de la red se mantiene constante. Para analizar la red durante un día, es necesario el sistema en cada intervalo de tiempo; esto implica que las características de los elementos de red varían en el tiempo deben actualizarse en cada simulación.



La información necesaria para el modelo temporal es:

- a) Perfiles de Carga de clientes por clase de consumo de cada transformador de distribución.
- b) Perfiles de las Fuentes de Corriente Armónica para cada clase de consumo.
- c) Perfil de la Distorsión de Fondo.

Para automatizar el procedimiento de simulación se desarrolló un script en DPL. Los perfiles de las cargas, las fuentes de corriente y la distorsión de fondo se almacenan en un archivo de Excel. Con la DPL se importan los valores correspondientes a cada escenario, se realiza la simulación y se almacenan los resultados en el mismo archivo. En la siguiente Figura se presenta un diagrama general del proceso.

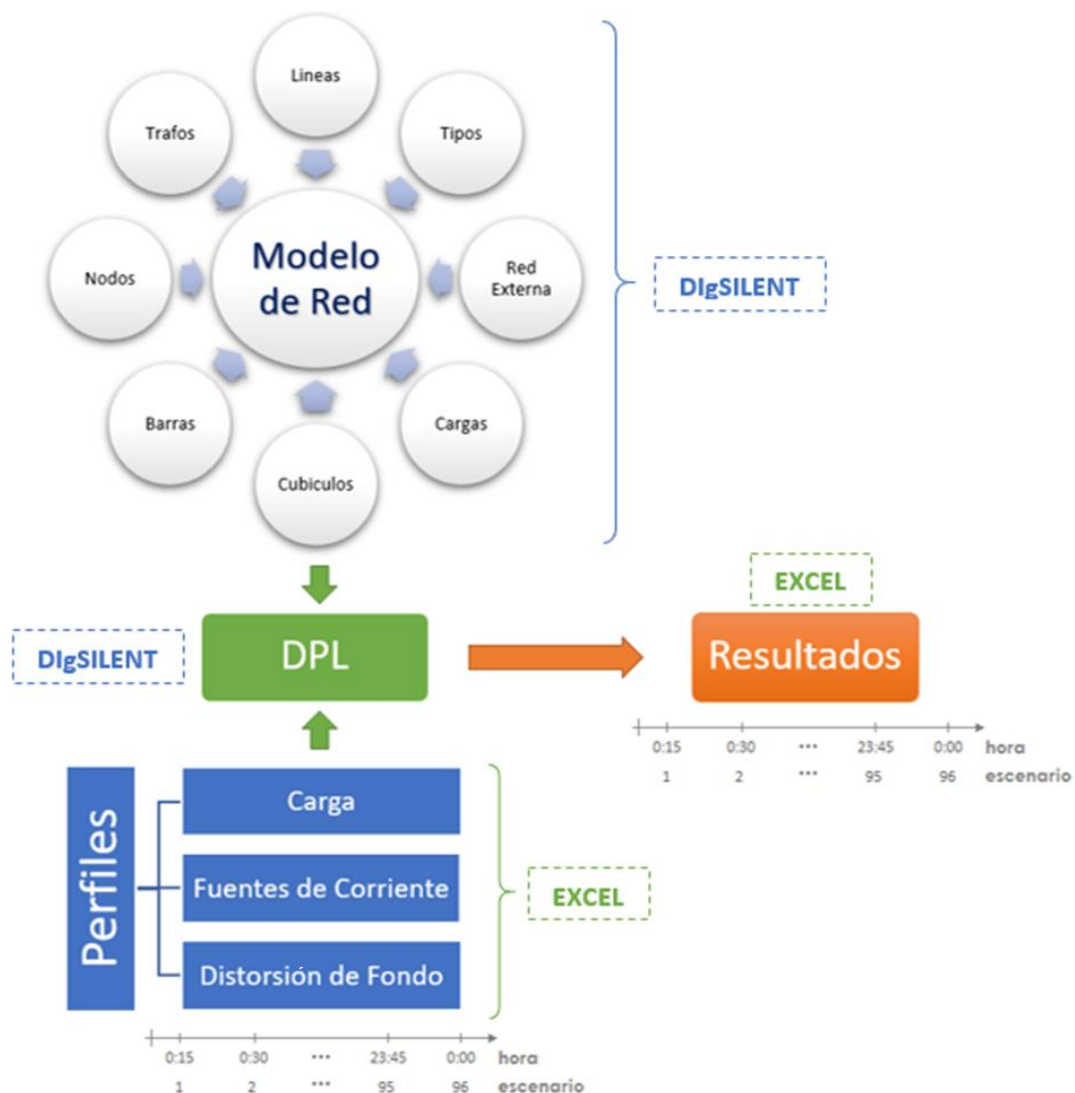


Figura 4. 9 Esquema de integración de la DPL.

En la Figura 4.10 se presenta el diagrama de flujo de la DPL. El script importa los datos correspondientes a cada intervalo de simulación, es decir, configura la potencia y las fuentes armónicas de las cargas, y los voltajes armónicos de la red externa. Se realiza un flujo de potencia para establecer las condiciones iniciales de circulación de corrientes. Luego de esto, se corren flujos de potencia armónica desde la 2da hasta la 13ava frecuencia armónica. En cada ejecución se almacenan en el mismo archivo de Excel los resultados de los voltajes y corrientes armónicas en las barras de baja tensión de los transformadores y en la cabecera del alimentador. Finalmente se ejecuta un flujo de potencia armónica que abarca todas las frecuencias armónicas para guardar los resultados de distorsión armónica total de voltaje y corriente. Este procedimiento se realiza para cada intervalo de simulación hasta completar todo el período de tiempo. La simulación completa comprende de un periodo de tiempo de un día, con 96 escenarios definidos para cada intervalo de 15 minutos.

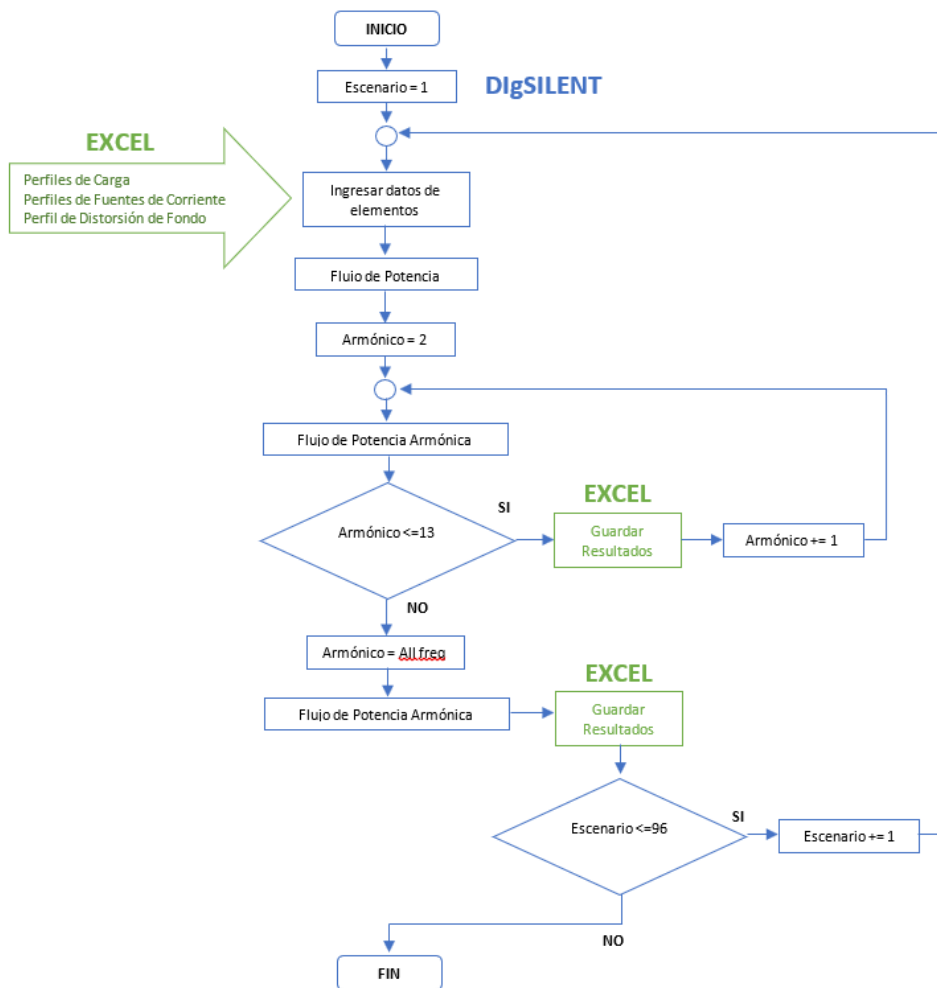


Figura 4. 10 Diagrama de Flujo de la DPL.

## 4.5 CASOS DE ESTUDIO

### 4.5.1 Cocinas de Inducción

Se introdujo un total de 25 cocinas de inducción equivalente al 3,85% de la demanda máxima del alimentador como se observa en la Figura 4.11. Las cocinas tienen una potencia individual de 6 kW y un factor de demanda de 0,8, en demanda máxima representan 120 kW. El perfil de carga se obtuvo de [39] y se presenta en la Figura 4.12; el perfil de armónicos se tomó de [42] y se detalla en la Tabla 4.3.

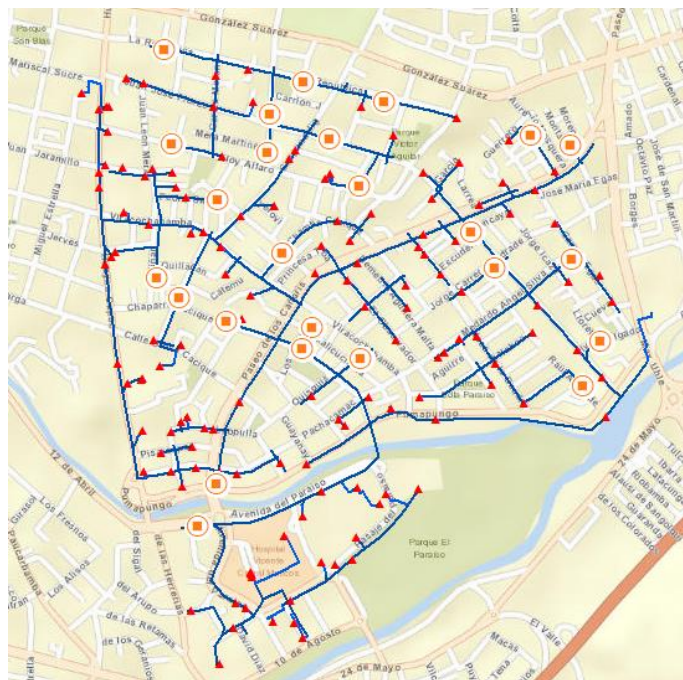


Figura 4. 11 Alimentador con Cocinas de Inducción.



Figura 4. 12 Perfil de Carga.

Tabla 4. 3 Perfil de Armónicos.

Distorsión Armónica de Corriente %							
H3	H5	H7	H9	H11	H13	H15	H17
7,84	1,80	1,56	0,56	1,33	0,89	0,60	0,55

Para modelar las cocinas en DiGSILENT se incluyó una nueva carga “ElmLod” conectada a los transformadores de distribución como se observa en la siguiente Figura.

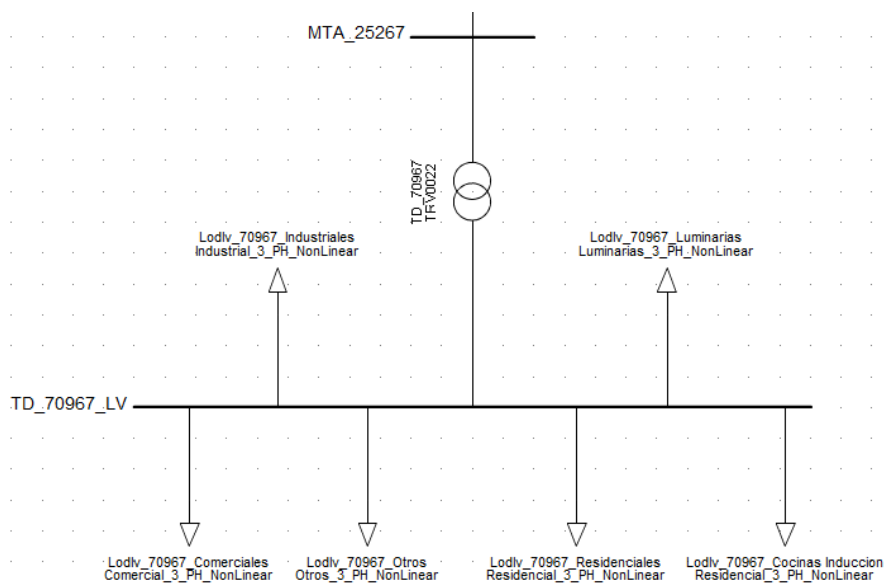


Figura 4. 13 Modelo de las cocinas de inducción en DiGSILENT.

#### 4.5.2 Paneles Fotovoltaicos

El análisis de optimización de recursos distribuidos en el alimentador 0324 [43], plantea la conexión de 56 paneles fotovoltaicos en usuarios de baja tensión como se observa en la Figura 4.14, con un total aproximado de 926 kW de generación. El perfil de generación promedio se obtuvo a partir de las mediciones en el panel fotovoltaico instalado en la CENTROSUR [44], la curva promedio de generación se observa en la Figura 4.15. El perfil de corrientes armónicas se midió con un equipo Fluke 430 en el inversor de la micro red de la Universidad de Cuenca en el campus Balzay. Los inversores comerciales tienen características similares de inyección de armónicos.

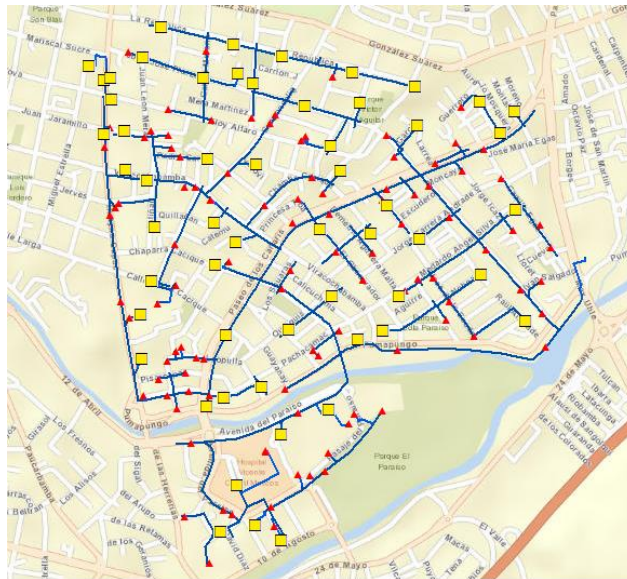


Figura 4. 14 Ubicación de Paneles en el Alimentador.

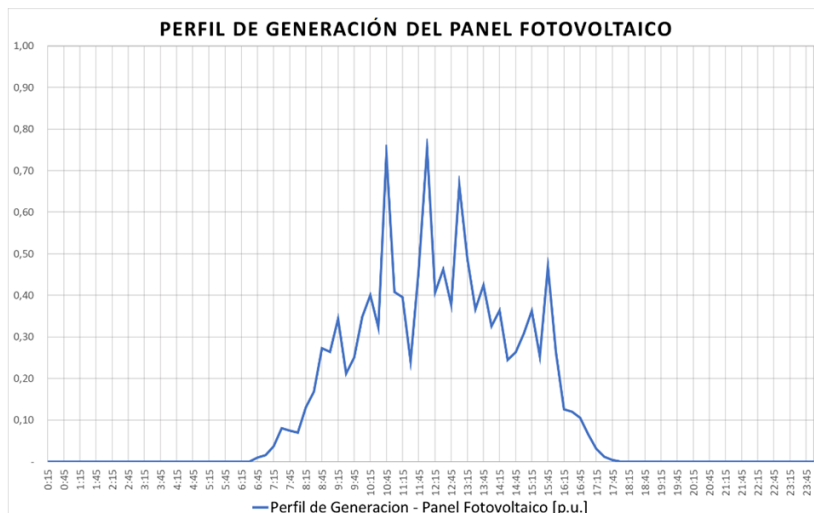


Figura 4. 15 Perfil de Generación del Panel Fotovoltaico.

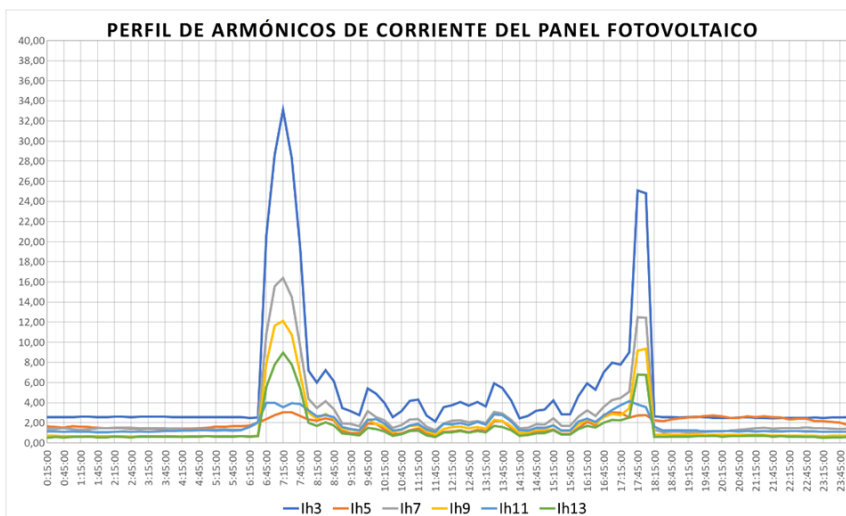


Figura 4. 16 Perfil de Corrientes Armónicas.

Para modelar los paneles fotovoltaicos en DIgSILENT se utilizó el objeto “ElmPvsys”. La inyección de corrientes armónicas se configura de manera similar al objeto “ElmLod”.

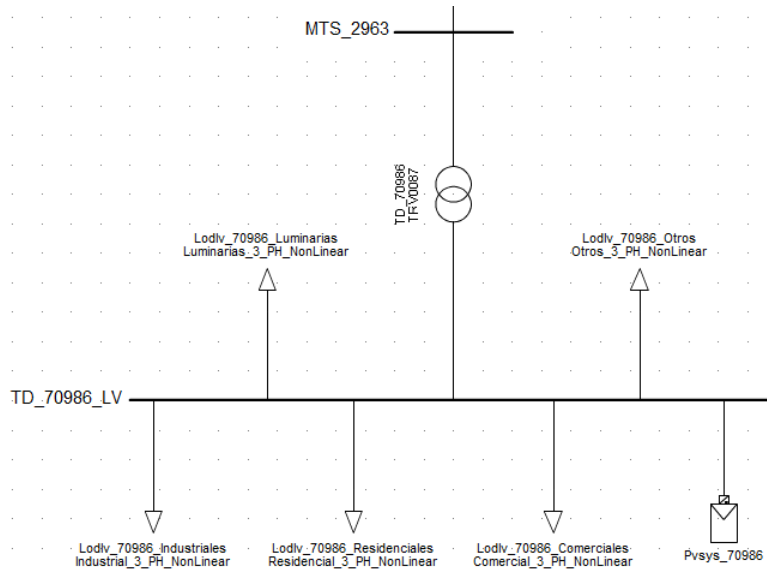


Figura 4. 17 Elemento PVsys en DIgSILENT.

### 4.5.3 Cargadores de Vehículos Eléctricos

Se ingresaron 71 cargadores en 63 transformadores dentro del alimentador como se observa en la Figura 4.18. Estos cargadores de uso doméstico tienen un consumo de 5,83 kW y están clasificados en el nivel 2 según el estándar SAE J1772 [45]. La curva de carga se obtuvo de [46] y se presenta en la Figura 4.19. Los armónicos generados por los cargadores se detallan en la Tabla 4.4 [45]. Generalmente, THDi de los cargadores de vehículos es aproximadamente un 6%.



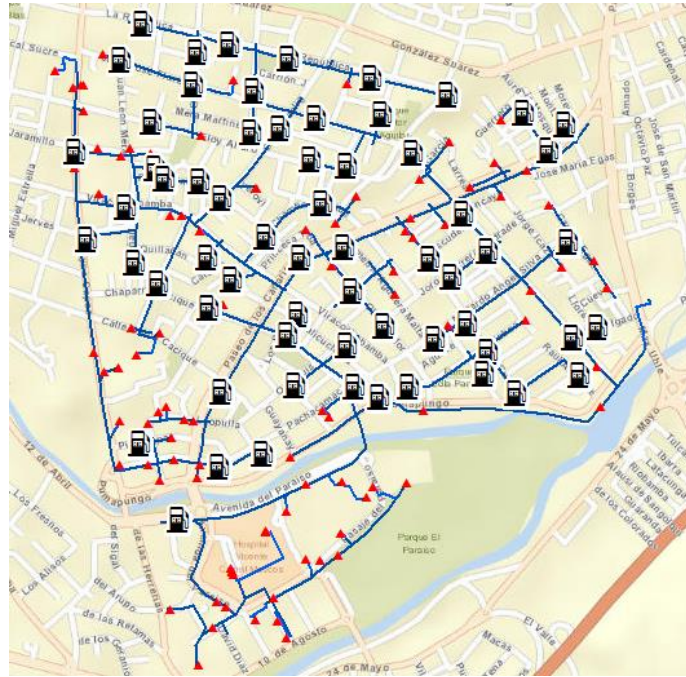


Figura 4. 18 Ubicación en el alimentador.

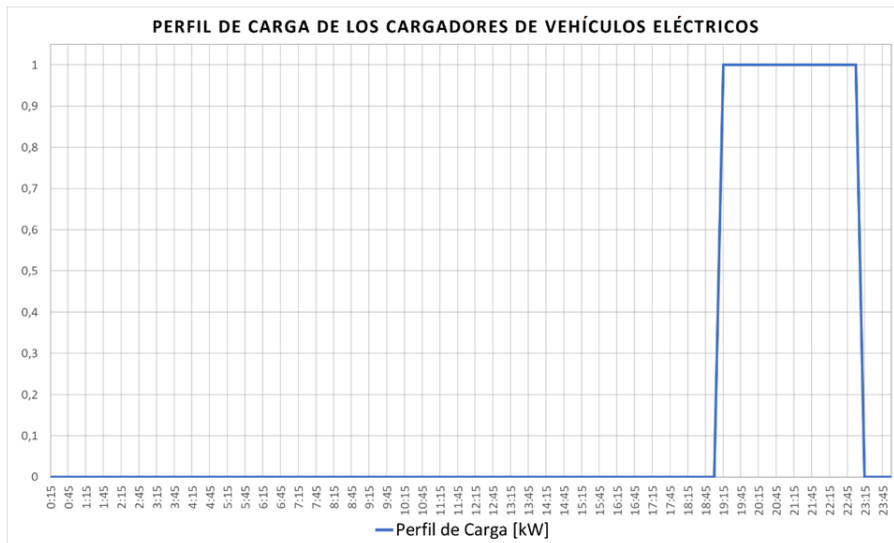


Figura 4. 19 Elemento PVsys en DigSILENT.

Tabla 4. 4 Perfil de Armónicos de Cargadores de Vehículos Eléctricos.

Distorsión Armónica de Corriente %		
H3	H5	THD
6,25	1,845	6,51

Los cargadores se modelan en DigSILENT incluyendo un nuevo objeto “ElmLod” conectada a los transformadores de distribución como se observa en la siguiente Figura.

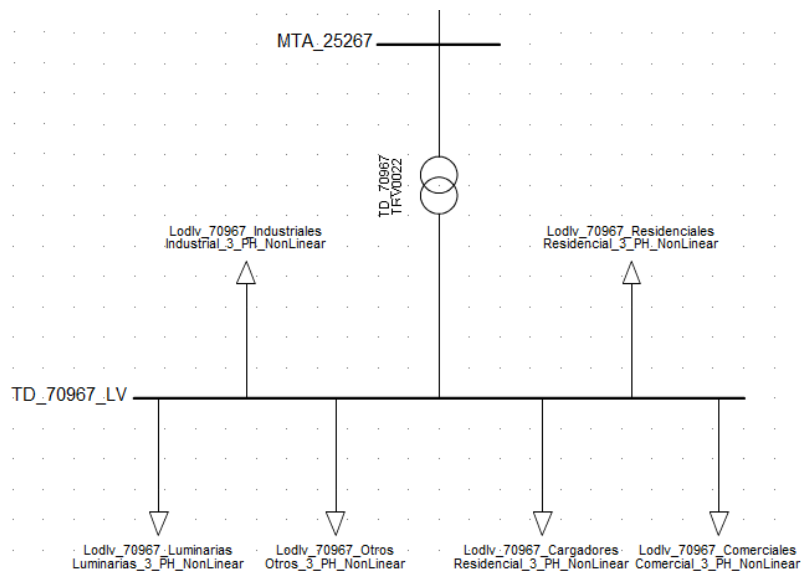


Figura 4. 20 Modelo de Vehículos Eléctricos en DlgSILENT.

#### 4.5.4 Distorsión Externa

La medición registrada en la subestación 03 muestra periodos en que la distorsión armónica de voltaje se eleva súbitamente, como se observa en la Figura 4.21. Esto es ocasionado por factores externos al alimentador o incluso a la subestación, y debe ser estudiado con mayor información para determinar sus causas.

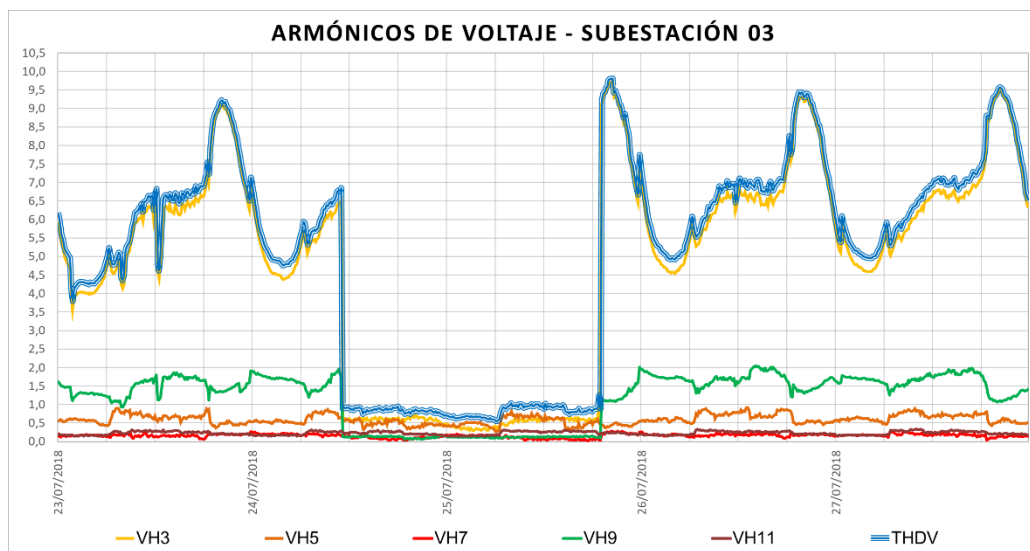


Figura 4. 21 Armónicos de Voltaje en la Subestación 03 Monay.

Con la medición se obtuvo el perfil de armónicos de voltaje para el peor escenario y se presenta en la Figura 4.22. Estos datos se ingresan en el elemento “ElmXnet” para la simulación en DlgSILENT.



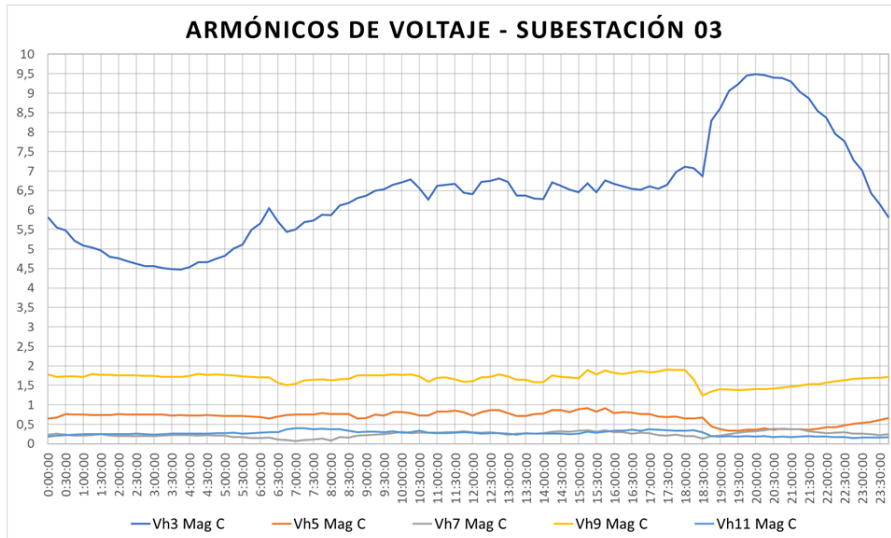


Figura 4. 22 Voltajes Armónicos para el caso de Distorsión Externa.



## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de simulación para los escenarios planteados en el capítulo 4. En el caso base, se comparan los resultados de simulación con mediciones para determinar la precisión del modelo desarrollado, donde se analiza el perfil de carga, corrientes y voltajes armónicos tanto de los transformadores de distribución como del alimentador. De igual manera, se detallan los resultados del caso base y los casos de estudio para establecer el impacto en la distorsión armónica de corriente y voltaje dentro del alimentador.

#### 5.1 ANÁLISIS DEL CASO BASE

Los resultados de la simulación en DIgSILENT se contrastan con medición realizada en transformadores y la subestación. La similitud entre los resultados y la medición determinan la precisión tanto del modelo carga para estudios de flujos de potencia, como del modelo de carga no lineal para estudios de armónicos. A continuación, se presentan los resultados más relevantes.

##### 5.1.1 Transformadores de Distribución

El alimentador 0324 está compuesto por 167 transformadores de distribución, de los cuales se tomaron dos elementos con medición para verificar los resultados. En la Tabla 5.1 se presenta la información de los transformadores.

Tabla 5. 1 Información de Transformadores analizados en el Caso Base

<b>Número de Transformador</b>	21776	29818
<b>Object ID - SIG</b>	70981	187510
<b>Potencia [kVA]</b>	75	50
<b>Clientes conectados BT</b>	123	30
<b>Fecha de Medición</b>	30 de diciembre de 2015 al 06 de enero de 2016	11 al 18 de enero de 2017

**a) Perfil de Carga**

Como se observa en las Figuras 5.1 y 5.2, el perfil de carga simulado de los transformadores se acerca al valor obtenido mediante mediciones. Por lo tanto, el procedimiento implementado, empleando únicamente información del consumo mensual, proporciona perfiles de carga que se aproximan al consumo real de los usuarios dentro de los transformadores de distribución.

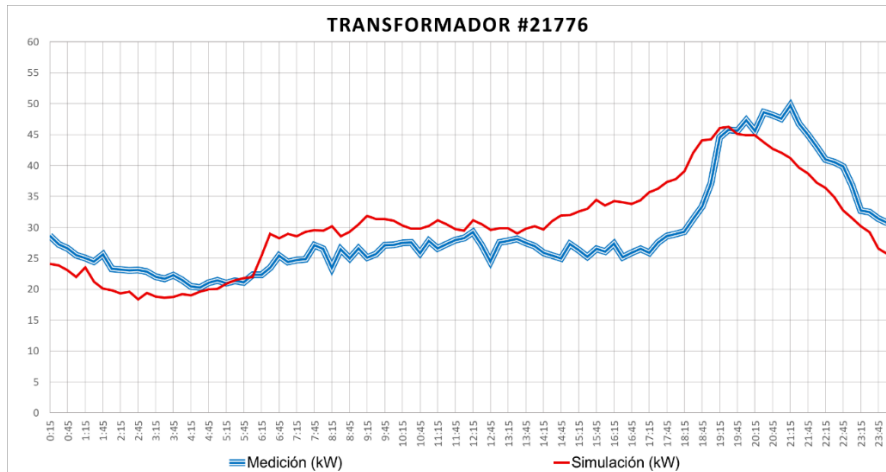


Figura 5. 1 Perfil de Carga del Transformador #21776.

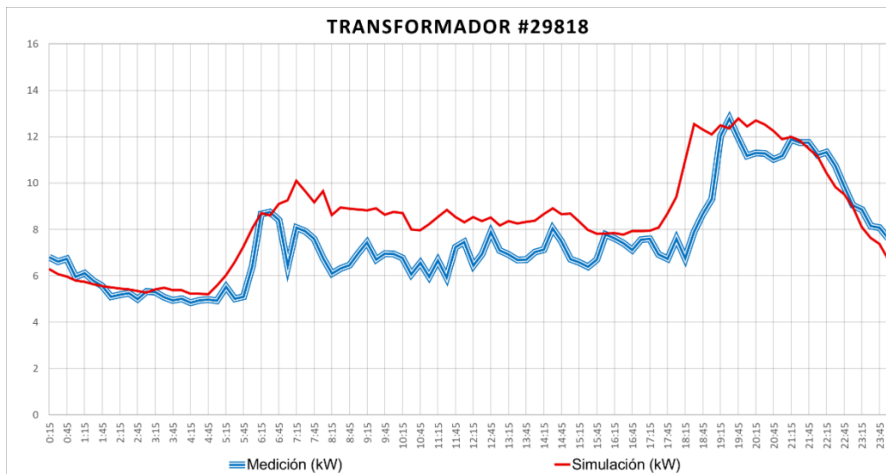


Figura 5. 2 Perfil de Carga del Transformador #29818.

**b) Distorsión de Corriente**

En las Figuras 5.3 y 5.4 se presenta el 3er armónico de corriente, y en las Figuras 5.5 y 5.6 se observa la distorsión armónica total de corriente de cada transformador respectivamente. En ambos casos, los resultados de simulación se aproximan al valor medido con una pequeña subestimación. Sin embargo, el modelo de carga no lineal provee resultados bastante aproximados, considerando que la aproximación

los perfiles de carga no es exacta, además los espectros de inyección de corrientes armónicas para cada grupo de consumo se obtuvieron a partir de valores promedio.

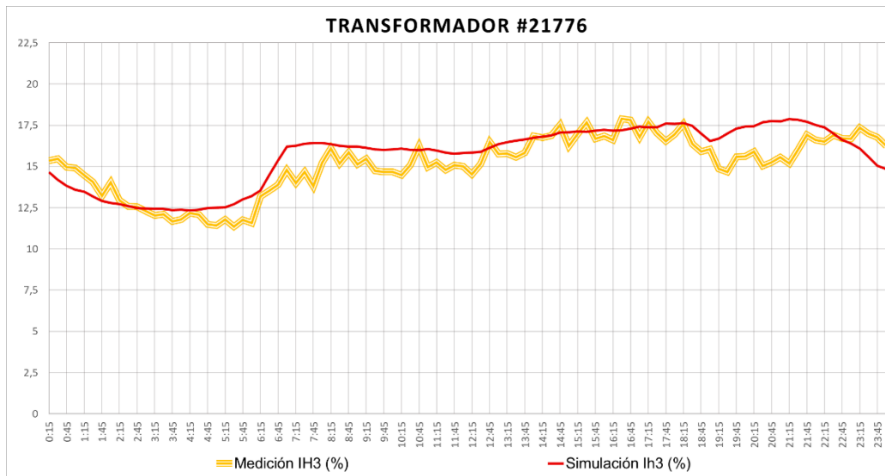


Figura 5. 3 3er Armónico de Corriente del Transformador #21776.

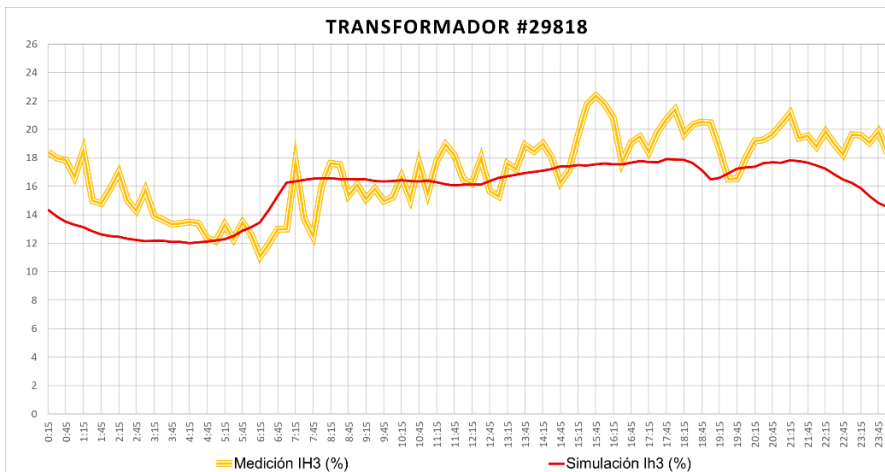


Figura 5. 4 3er Armónico de Corriente del Transformador #29818.

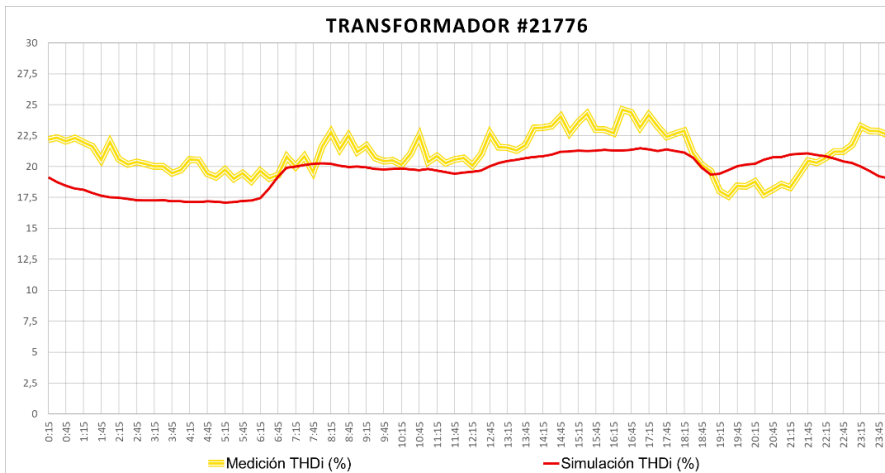


Figura 5. 5 THD de Corriente del Transformador #21776.

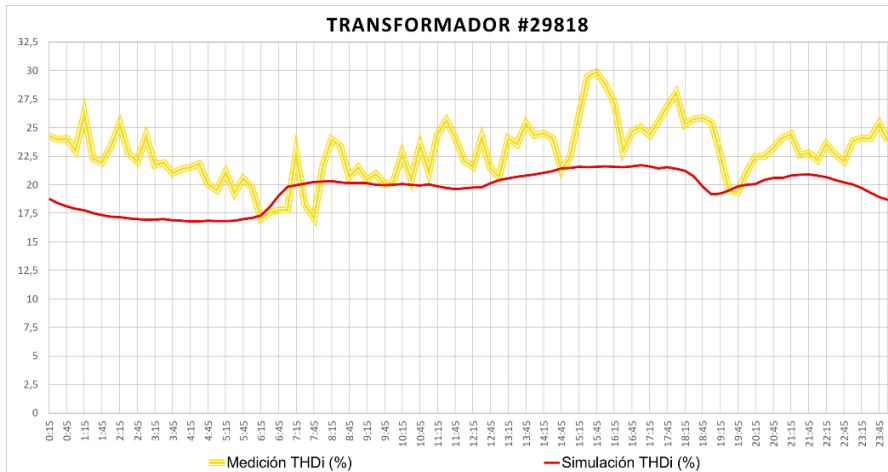


Figura 5. 6 THD de Corriente del Transformador #29818.

### c) Distorsión de Voltaje

En las Figuras 5.7 y 5.8 se presenta el 3er armónico de voltaje, y en las Figuras 5.9 y 5.10 se observa la distorsión armónica total de voltaje de cada transformador. El modelo de carga para flujos de potencia armónica consiste en una fuente de corriente que no considera adecuadamente los desbalances de fase, por lo tanto, los resultados de algunos componentes armónicos de voltaje armónicos de secuencia cero tienden a sobreestimarse. También, los armónicos de voltaje resultantes dependen en gran medida de los niveles de distorsión de fondo, debido al alto nivel de cortocircuito de la subestación. Para mejorar los resultados, es necesario medición simultánea en transformadores y la subestación. Se debe considerar además que la distorsión armónica de voltaje dentro del alimentador es baja.

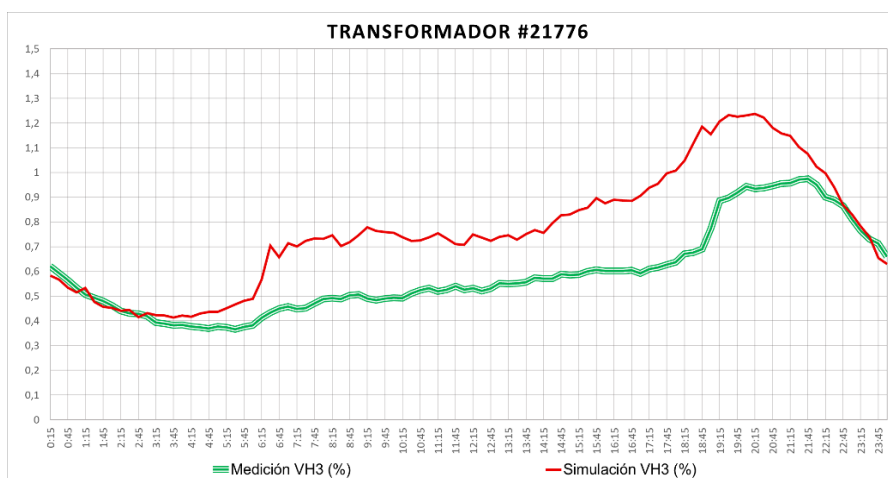


Figura 5. 7 3er Armónico de Voltaje del Transformador #21776.

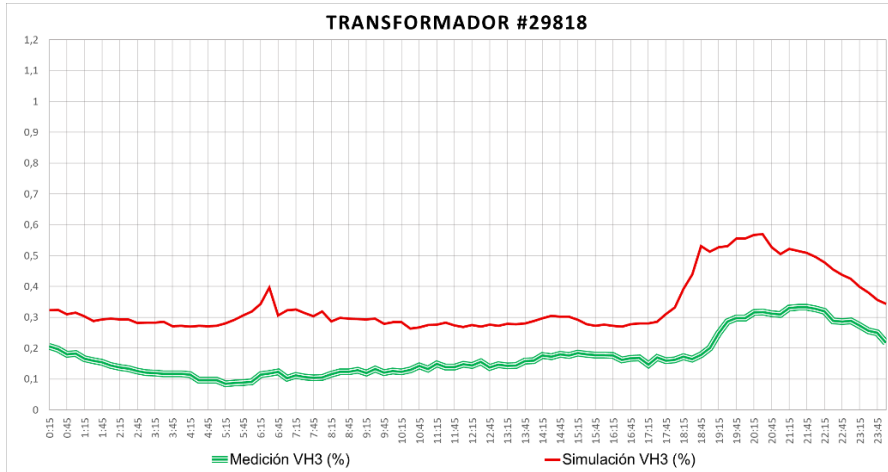


Figura 5. 8 3er Armónico de Voltaje del Transformador #29818.

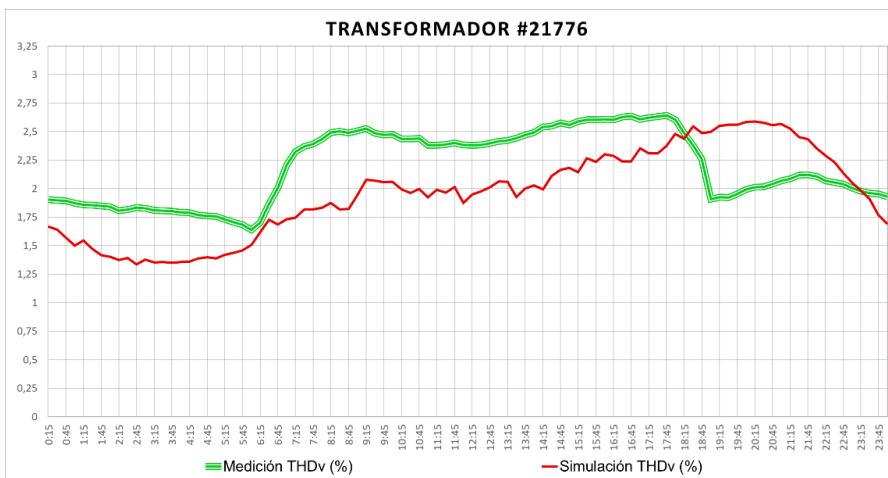


Figura 5. 9 THD de Voltaje del Transformador #21776.

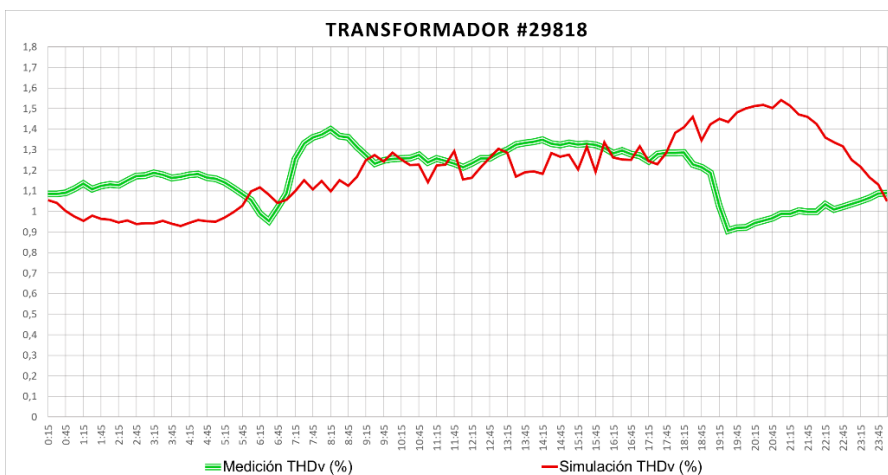


Figura 5. 10 THD de Voltaje del Transformador #29818.

## 5.1.2 Alimentador

La subestación 03 tiene un equipo de medición que almacena información de potencia activa y reactiva, armónicos de voltaje y de corriente de toda la subestación. A continuación, se comparan las mediciones con los resultados de simulación.

### a) Perfil de Carga

El perfil de carga simulado es igual al medido, ya que el procedimiento de asignación de potencia a las cargas parte del perfil medido. En la Figura 5.11 se presenta tanto el perfil de carga de cada grupo de consumo, así como el perfil simulado y medido en la cabecera del alimentador.

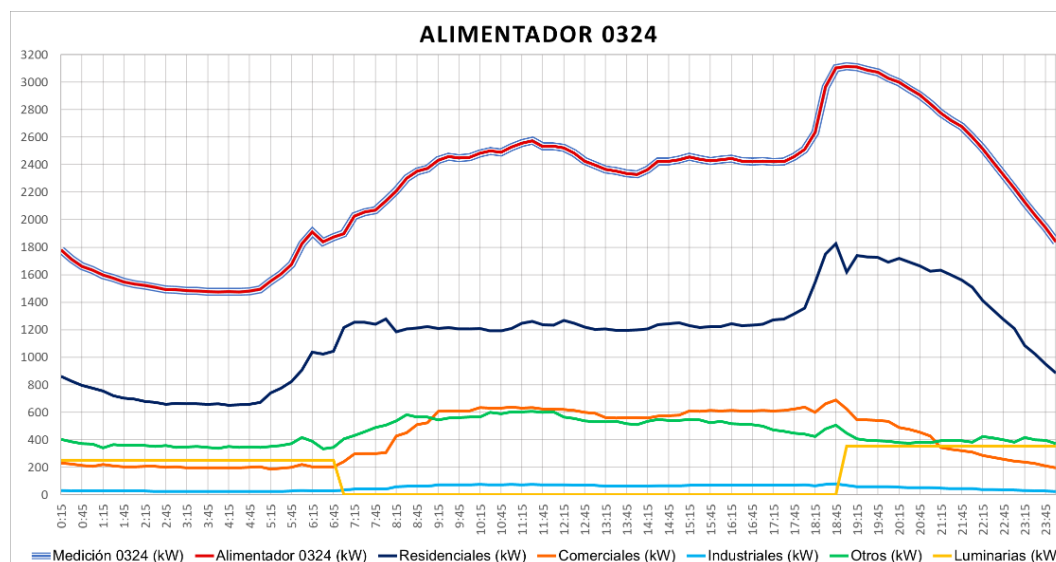


Figura 5. 11 Perfil de Carga del Alimentador 0324.

### b) Distorsión de Corriente

La corriente armónica que se observa en la cabecera del alimentador se presenta en la Figura 5.12. Este resultado no puede ser comparado con medición ya que no existen mediciones disponibles.

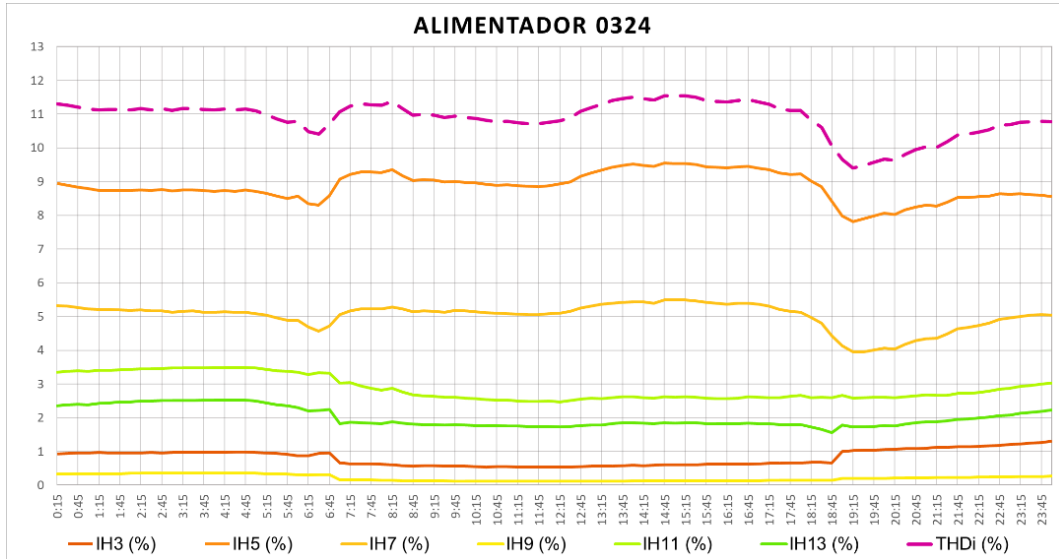


Figura 5. 12 Corrientes Armónicas del Alimentador 0324.

**c) Distorsión de Voltaje**

En la Figura 5.13 se observa la distorsión armónica total de voltaje en la cabecera del alimentador. Al igual que en los transformadores, el modelo produce resultados de voltajes armónicos sobreestimados, aunque se debe considerar que el porcentaje de distorsión en el alimentador es bajo, por tanto, la variación porcentual también resulta baja.

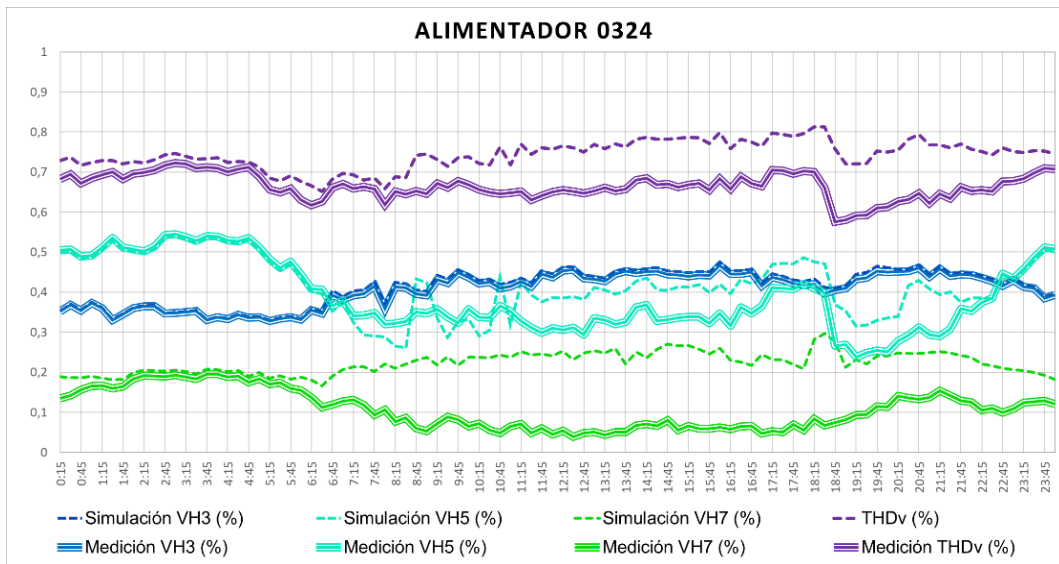


Figura 5. 13 Voltajes Armónicos del Alimentador 0324.



## 5.2 ANÁLISIS DE LOS CASO DE ESTUDIO

### 5.2.1 Transformadores de Distribución

En cada caso de estudio, se introdujeron nuevas cargas en transformadores específicos del alimentador, por lo tanto, se seleccionaron tres transformadores que son afectados en cada escenario y además están localizados en diferentes partes del alimentador. En la Tabla 5.2 se presenta la información de los transformadores.

Tabla 5. 2 Información de Transformadores analizados los Casos de Estudio.

Número de Transformador	7639	21776	6534
Object ID - SIG	70967	70981	70990
Potencia [kVA]	75	75	75
Cientes conectados BT	91	112	132
Localización en Alimentador	Inicio	Mitad	Final

#### a) Perfil de Carga

En las Figuras 5.14 – 5.16 se presenta el perfil de carga de los transformadores para cada caso de estudio. Se observa el incremento en la demanda para los casos de introducción de cocinas de inducción y cargadores de vehículos eléctricos, así como también la reducción del consumo en el caso de paneles fotovoltaicos. En el caso de la distorsión externa se utiliza el perfil del caso base, ya que únicamente varían los voltajes armónicos de la distorsión de fondo.

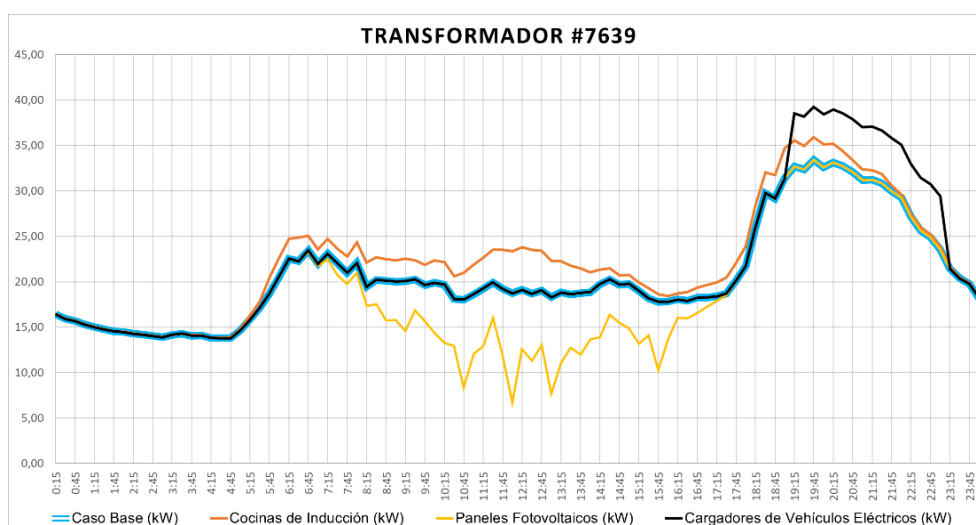


Figura 5. 14 Perfil de Carga del Transformador #7639.

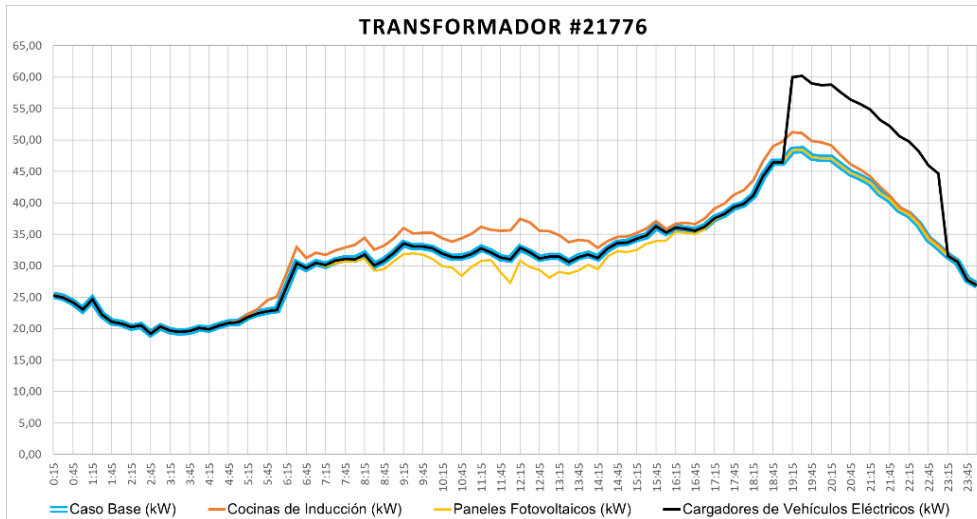


Figura 5. 15 Perfil de Carga del Transformador #21776.

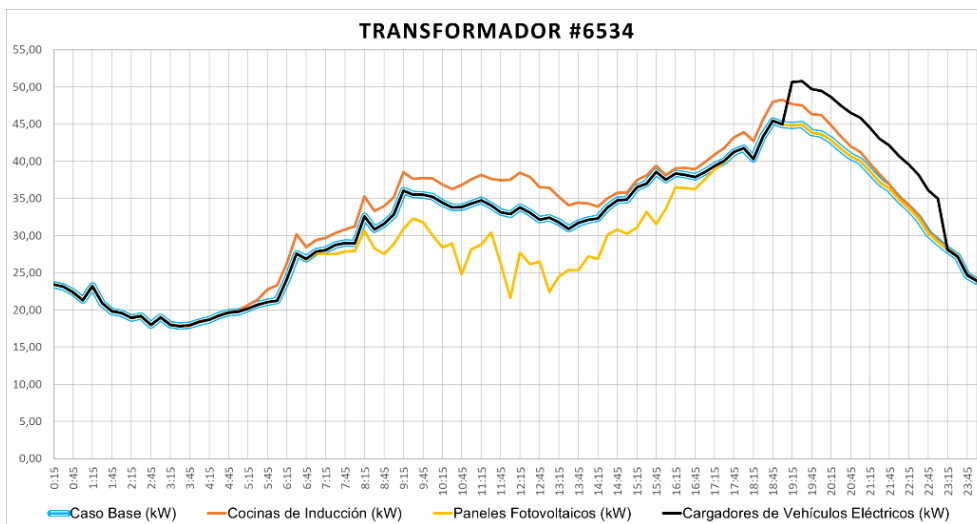


Figura 5. 16 Perfil de Carga del Transformador #6534.

**b) Distorsión de Corriente**

En las Figuras 5.17 – 5.19 se observa la distorsión armónica total de corriente de cada transformador. La distorsión de corriente se mantiene casi constante para los casos de cocinas de inducción, cargadores de vehículos eléctricos y distorsión de fondo, mientras que al introducir paneles fotovoltaicos se eleva significativamente.

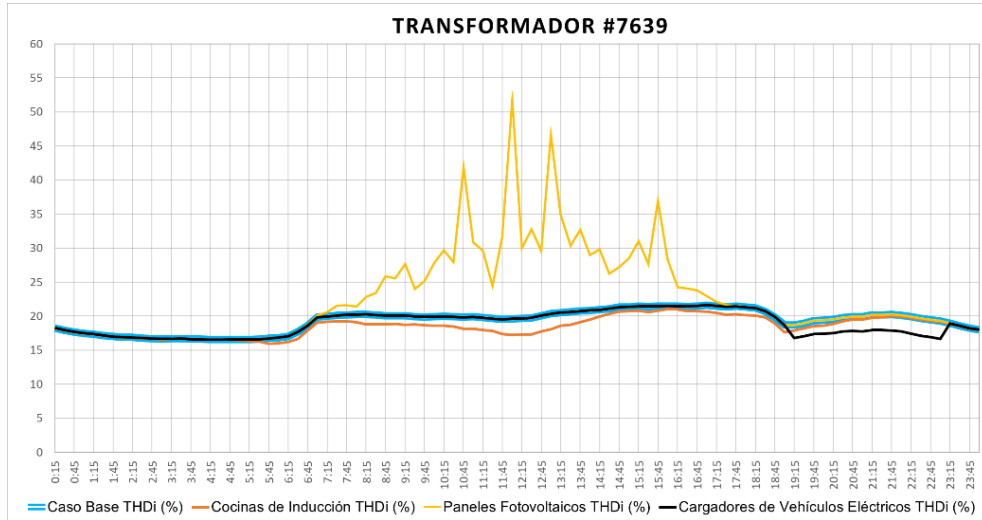


Figura 5. 17 THD de Corriente del Transformador #7639.

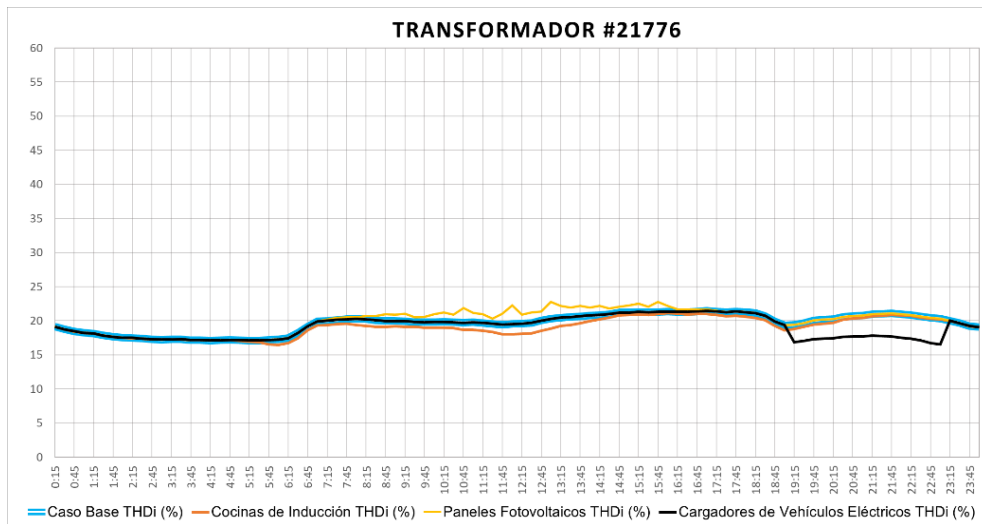


Figura 5. 18 THD de Corriente del Transformador #21776.

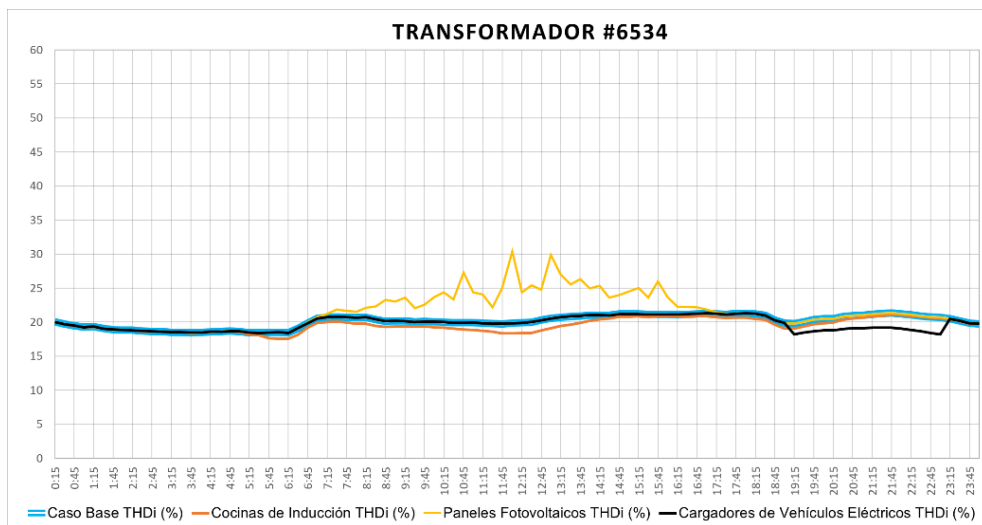


Figura 5. 19 THD de Corriente del Transformador #6534.

c) Distorsión de Voltaje

Como se observa en las Figuras 5.20 – 5.22, la distorsión armónica de voltaje tiene un mayor incremento en el caso de la distorsión externa, en cambio no se aprecian variaciones significativas en los demás casos de estudio.

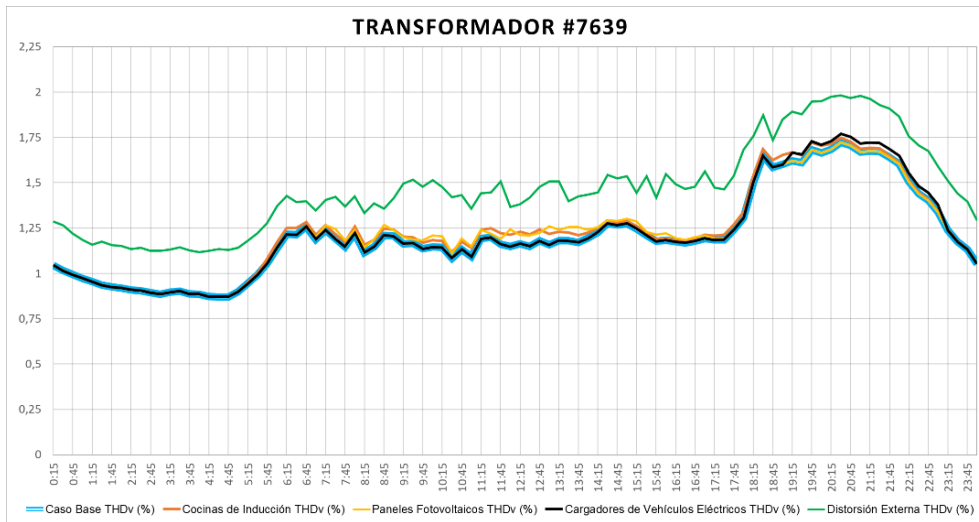


Figura 5. 20 THD de Voltaje del Transformador #7639.

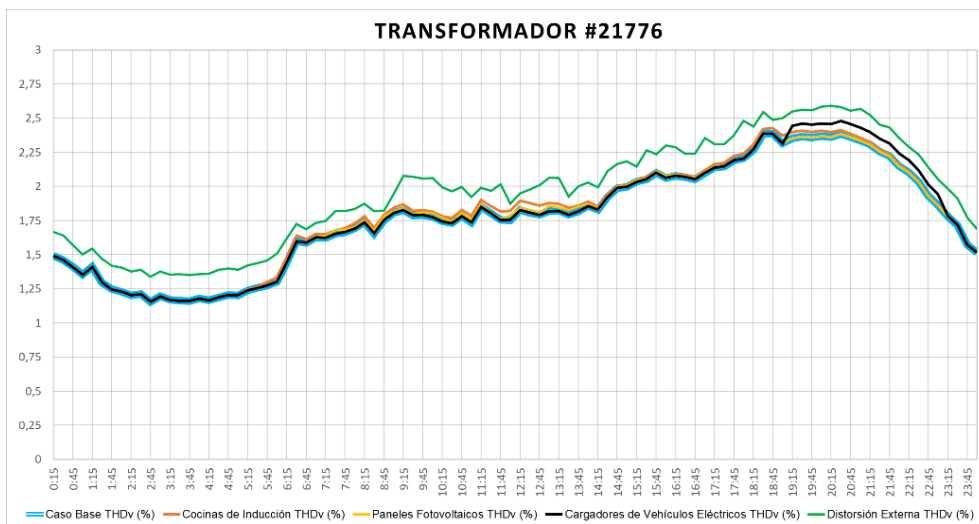


Figura 5. 21 THD de Voltaje del Transformador #21776.

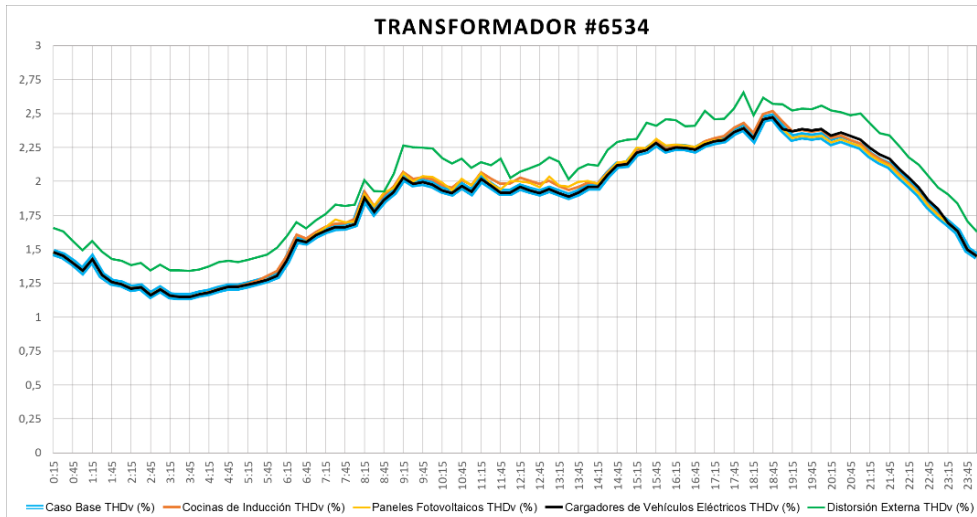


Figura 5. 22 THD de Voltaje del Transformador #6534.

### 5.2.2 Alimentador

#### a) Perfil de Carga

El perfil de carga del alimentador para cada caso de estudio se presenta en la Figura 5.23. Se observa el incremento en la demanda del alimentador para los casos de cocinas de inducción y cargadores de vehículos eléctricos, así como también la reducción del consumo por la generación introducida en el caso de paneles fotovoltaicos.

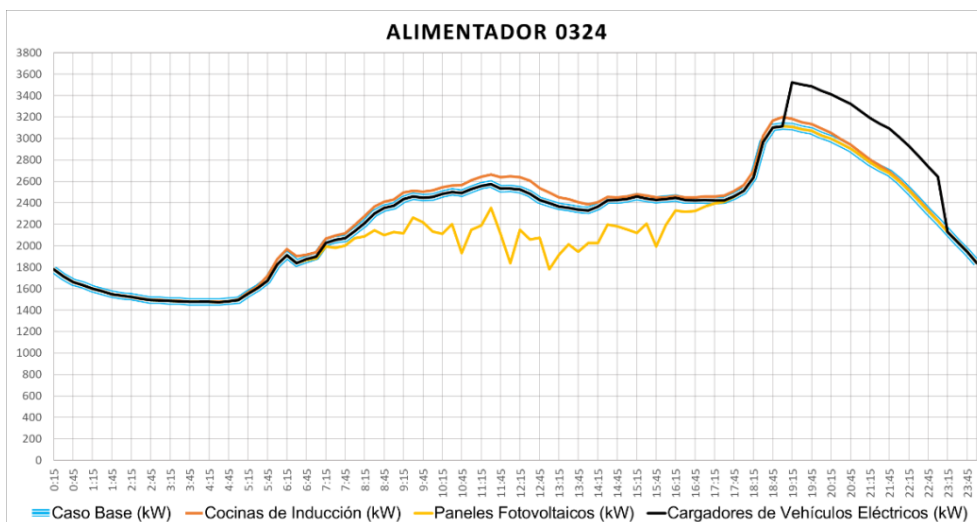


Figura 5. 23 Perfil de Carga del Alimentador 0324.

**b) Distorsión de Corriente**

Como se observa en las Figura 5.24, la distorsión armónica de corriente, al igual que en los transformadores, se mantiene casi constante para los casos de cocinas de inducción, cargadores de vehículos eléctricos y distorsión de fondo, aunque se incrementa al introducir paneles fotovoltaicos.

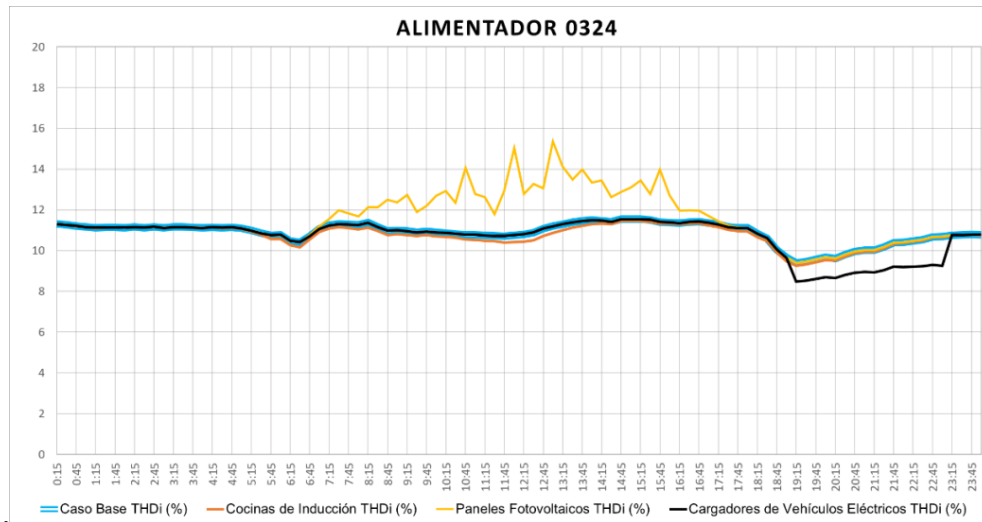


Figura 5. 24 Corrientes Armónicas del Alimentador 0324.

**c) Distorsión de Voltaje**

En las Figuras 5.25 y 5.26 se presenta la distorsión armónica de voltaje del alimentador en cada caso, donde se observa un gran incremento en el caso de la distorsión externa.

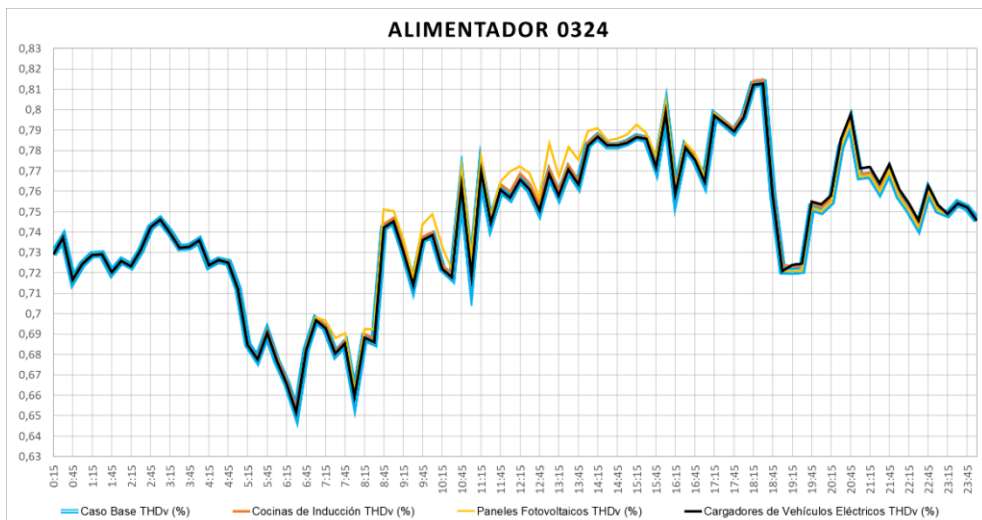


Figura 5. 25 Voltajes Armónicos del Alimentador 0324.

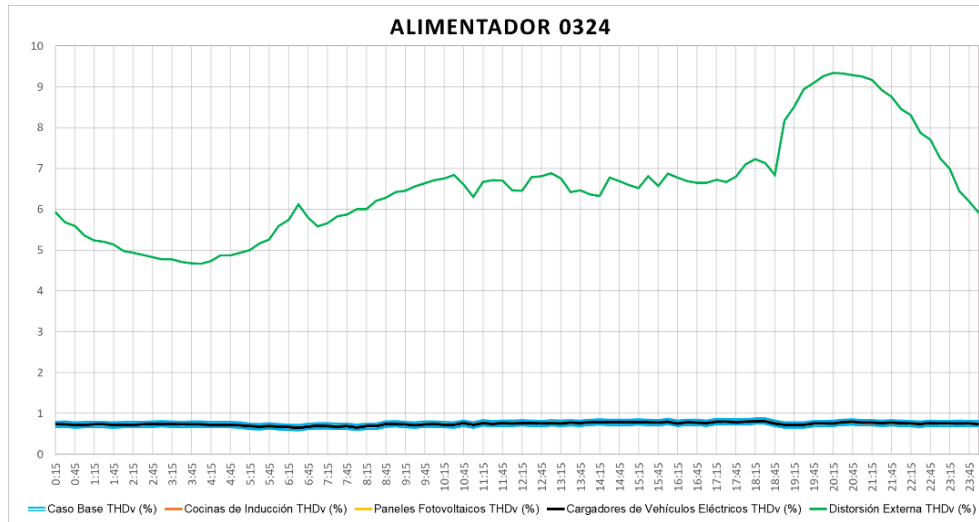


Figura 5. 26 Voltajes Armónicos del Alimentador 0324.



---

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

#### 6.1 CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló una metodología basada en información de mediciones que permite caracterizar las cargas armónicas variantes en el tiempo y puede implementarse para determinar los niveles de distorsión armónica de voltaje y corriente en las redes de distribución.

Dentro de la red en estudio, las cargas se modelaron como elementos no lineales agrupados para cada clase de consumo, debido a que las mediciones realizadas en clientes o grupos de clientes proporcionan información agregada del consumo energético y distorsión armónica, siendo imposible obtener un equivalente de Norton; mientras que los elementos externos a la red se representan con una fuente de voltajes armónicos en el punto de conexión del sistema. Por otra parte, se utilizaron modelos dependientes de la frecuencia para representar los otros elementos de la red.

El software Power Factory de DigSILENT es una herramienta de análisis para el estudio de armónicos en sistemas eléctricos ya que integra un módulo de Calidad de Energía, con algoritmos de flujos de potencia armónica para obtener los voltajes y corrientes armónicas, y la interfaz de intercambio de archivos "DGS", que simplifica la construcción del modelo de red. Además, el lenguaje de programación "DPL" permite automatizar el proceso de simulación y almacenamiento de resultados cuando se requiere analizar un sistema eléctrico durante un periodo de tiempo determinado. El procedimiento desarrollado en el software facilita la modelación, simulación y análisis de cualquier red de distribución.

Se obtuvo el modelo del alimentador 0324 de la CENTROSUR, y se verificó la validez de la metodología implementada al observar que los resultados de perfiles de carga y corrientes armónicas en transformadores se aproximan a la medición. Sin embargo, se establecen las siguientes consideraciones:





- El procedimiento de distribución de carga constituye una herramienta apropiada para estimar los perfiles de carga de los clientes, no obstante, estos perfiles son aproximados ya que se parte de curvas de demanda promedio y de la información de consumo mensual del usuario.
- Los perfiles de magnitudes de las corrientes armónicas para cada clase de consumo se determinaron a partir de valores promedio ya que la distribución de datos muestra una forma simétrica.
- Los voltajes armónicos resultantes se sobreestiman por el modelo de carga armónica utilizado, puesto que no considera la componente lineal de la carga. Además, la medición comparada en transformadores pudo recopilarse en condiciones de distorsión de fondo diferentes a las establecidas en la simulación.
- El resultado de las corrientes armónicas en la cabecera del alimentador no puede ser comprobado ya que no se dispone de información.

En los casos de estudio presentados se observan leves incrementos de corriente armónica al introducir cocinas de inducción y cargadores de vehículos, en cambio los paneles fotovoltaicos ocasionan mayor distorsión. A pesar de esto, no se observan cambios significativos en los voltajes armónicos, que además se encuentran dentro de los límites establecidos en la regulación CONELEC 004/01. El impacto más importante se produce por la elevada distorsión de voltajes armónicos provocada por elementos externos al alimentador, y probablemente a la subestación.

## 6.2 RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- Obtener mediciones en diferentes modelos de cocinas de inducción, inversores de paneles solares y cargadores de vehículos eléctricos para mejorar el espectro de corrientes armónicas.
- Medir las corrientes armónicas en la cabecera del alimentador para comparar con los resultados de simulación obtenidos en este trabajo.



- Realizar medición simultánea en la subestación y los transformadores de distribución para analizar los voltajes armónicos en las mismas condiciones de operación del sistema.
- Complementar el modelo de carga para estudios de armónicos incluyendo la componente lineal de la carga y los ángulos en las fuentes de corriente de armónica.
- Aplicar diferentes técnicas de análisis de datos para mejorar la metodología de caracterización de fuentes de corriente.
- Formar casos de estudio que consideren la introducción masiva de dispositivos no lineales para determinar posibles impactos en el Sistema de Distribución.
- Determinar las causas por las cuales se producen grandes variaciones en los voltajes armónicos de la subestación.



---

REFERENCIAS

---

- [1] J. Arriaga, B. Smith, N. Watson y A. R. Wood, *Power System Harmonic Analysis*, John Wiley & Sons, 1997.
- [2] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso y H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 2.<sup>a</sup> ed., Nueva York, USA: McGraw – Hill, 2003.
- [3] C. Sankaran, *Electrical Power System Quality*, 1.<sup>a</sup> ed., Nueva York, USA: CRC Press, 2001.
- [4] Probabilistic Aspects Task Force of the Harmonics Working Group, “Time-Varying Harmonics: Part 1 – Characterizing measured data”, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 13, no. 3, pp. 938 - 944, Jul. 1998.
- [5] D. Salles-Correa, *Methodology for Evaluating the Collective Harmonic Impact of Residential Loads in Modern Power Distribution Systems*, tesis Ph. D., Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Estatal de Campinas, Campinas, 2012.
- [6] T. A. Short, *Distribution Reliability and Power Quality*, 1.<sup>a</sup> ed., New York, USA: CRC Press, 2005.
- [7] A. M. Blanco, A. Grevener, J. Meye y P. Schegner, “Stochastic harmonic load model of residential users based on measurements”, *2015 IEEE Eindhoven PowerTech Conf.*, Eindhoven, Netherlands, 29 Jun. - 2 Jul. 2015.
- [8] IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, “Harmonic Analysis in Frequency and Time Domain”, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 28, no. 3, pp. 1813 – 821, Jul. 2013.
- [9] IEEE Task Force on Harmonic Modelling and Simulation, IEEE PES T&D Committee, “Impact of Aggregate Linear Load Modelling on Harmonic Analysis: A Comparison of Common Practice and Analytical Models”, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 18, no. 2, Abr. 2003.



- [10] A. Mansoor, W. M. Grady, A. H. Chowdhury y M. J. Samotyj, "An Investigation of Harmonics Attenuation and Diversity Among Distributed Single-phase Power Electronic Loads", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 10, no. 1, En. 1995.
- [11] M.T. Au y J. V. Milanovic. "Development of Stochastic Aggregate Harmonic Load Model Based on Field Measurements", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 22, no. 1, En. 2007.
- [12] M.T. Au y J.V. Milanovic, "Establishing Harmonic Distortion Level of Distribution Network based on Stochastic Aggregate Harmonic Load Models", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 22, no. 2, pp. 1086-1092, Abr. 2007.
- [13] M.T. Au y J. V. Milanovic, "Stochastic Assessment of Harmonic Distortion Level of Medium Voltage Radial Distribution Network", *International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, Stockholm, Sweden, Jun. 2006.
- [14] M. M. Silva, M. L. Gonzalez, W. Uturbey, E. G. Carrano *et al.*, "Evaluating Harmonic Voltage Distortion in Load-Variating Unbalanced Networks using Monte Carlo Simulations", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 9, no. 9, pp. 855–865, Jun. 2015.
- [15] A.J. Collin, J. Acosta, B. P. Hayes y S. Z. Djokic, "Component-based Aggregate Load Models for Combined Power Flow and Harmonic Analysis", *7th Mediterranean Conf. and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion*, Agia Napa, Cyprus, Nov. 2010.
- [16] S. Gao, X. Lin, J. Yang, *et al.*, "Measurement-Based Compartmental Modeling of Harmonic Sources in Traction Power Supply System", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 32, no. 2, Ap. 2017.
- [17] A. Bosnovic, H. Renner, A. Abart, E. Traxler, *et al.*, "Validation of Aggregated Harmonic Current Source Models Based on Different Customer Type Configurations", *Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ)*, Tallinn, Estonia, Ag. 2016.



- [18] J. A. Suárez, G. F. Di Mauro, D. Anaut y C. Agüero, “Análisis de la Distorsión Armónica y los Efectos de Atenuación y Diversidad en áreas Residenciales”, *IEEE Latin America Trans.*, vol. 3, no. 5, dic. 2005.
- [19] N. R. Noroña, *Diagnóstico de Perturbaciones Armónicas en el Sistema Nacional Interconectado*, Tesis de Pregrado, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2011.
- [20] R. C. Dugan y L. E. Conrad, “Impact of Induction Furnace Interharmonics on Distribution Systems”, *1999 IEEE Transmission and Distribution Conf.*, Nueva Orleans, USA, 11-16 Abr.
- [21] J. Strack, J. A. Suárez, G. Di Mauro y S. Jacob, “Impacto de la Iluminación Residencial Eficiente en la Calidad de la Energía de una Red de Distribución”, *INGE CUC*, vol. 10, no. 2, pp. 9–19, dic. 2014.
- [22] A. J. Collin, S. Z. Djokic, H. F. Thomas y J. Meyer, “Modelling of Electric Vehicle Chargers for Power System Analysis”, *11th International Conf. Electrical Power Quality and Utilization (EPQU)*, Lisbon, Portugal, 17-19 Oct. 2011.
- [23] J. C. Balda, D. C. Griffith, A. McEachern, R. J. Ferraro *et al.*, “Effects of Harmonics on Equipment”, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 8, no. 2, pp. 672 - 680, Abr. 1993.
- [24] M.T Bishop, J.F Baranowski, D. Heath y S.J Benna, “Evaluating Harmonic-Induced Transformer Heating”, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 11, no. 1, pp. 305 – 311, En. 1996.
- [25] H. Akagi, “Active Harmonic Filters”, *in Proc. of IEEE*, vol. 93, no. 12, pp. 2128 – 2141, 5 Dic. 2005
- [26] G. Reyes-Calderón, *Armónicas en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica*, Tesis de Pregrado, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, México, 1996.



[27] IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, IEEE Std. 519-2014, Institute of Electrical and Electronics Engineers. ISBN 978-0-7381-9005-1, USA, 2014.

[28] “Calidad del Servicio Eléctrico de Distribución”, Regulación No. CONELEC 004-01, Consejo Nacional de Electricidad, Ecuador, 23 May. 2001.

[30] M. Rawa, D. Thomas y M. Summer, “Background Voltage Distortion and Percentage of Nonlinear Load Impacts on the Harmonics Produced by a Group of Personal Computers”, *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Europe, Gothenburg, Sweden, Sept. 2014.

[31] S. Djokic y A. Collin, “Cancellation and attenuation of harmonics in low voltage networks”, *Proc. 16th IEEE Harmonic and Quality Power Int. Conf.*, pp. 137–1415, 2014.

[32] V. Cuk, J. F. Cobben, W. L. Kling y P. Ribeiro, “Analysis of harmonic current summation based on field measurements”, *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 7, no. 12, pp. 1391–1400, 2013.

[33] E. Ahmed, W. Xu y G: Zhang, “Analyzing systems with distributed harmonic sources including the attenuation and diversity effects”, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 20, no. 4, pp. 2602–2612, 2005.

[34] B. Poudel y V. Cecchi, “Frequency-Dependent Transmission Line Modeling for Steady State Power System Harmonic Analysis”, *North American Power Symposium (NAPS)*, USA, Oct. 2015.

[35] K. Malekian, U. Schmidt, A. Hoshmeh y A. Shirvani, “Frequency Dependent Model of Underground Cables for Harmonic Calculations in Frequency Domain”, *6th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*, Yogyakarta, Indonesia, Oct. 2014.

[36] H. Renner, *Beitrag zur Problematik der Oberschwingungsimpedanz- und Oberschwingungsemissionsermittlung in Elektrischen Energie-versorgungsnetzen*, Ph.D. tesis, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Graz University of technology, 1994.



- [37] N. Chiesa y B. Gustavsen, "Frequency-Dependent Modeling of Transformer Winding Impedance From R(w)/L Measurements", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 19, no. 3, Jun. 2014.
- [38] G. Funk y T. Hantel, "Frequenzabhängigkeit der Betriebsmittel von Drehstromnetzen," etzArchiv Bd. 9 (1987) H. 11, pp. 349–356.
- [39] J. Bergeal y L. Moller, "Influence of load characteristic on the propagation of disturbances", in CIRED, 1981.
- [40] S. Zambrano y M. Molina, "Investigación y Caracterización de la Carga", 2015.
- [41] *DGS Data Exchange Interface DigSILENT Power Factory*, DigSILENT GmbH, Alemania, 2018.
- [42] E. Alomoto y F. Álvarez, *Análisis técnico de la calidad de producto de acuerdo a la Regulación 004/01 por la incorporación de Cocinas de Inducción en el alimentador Mulaló – Joseguango bajo de la S/E Mulaló, perteneciente a ELEPCO S.A. en el año 2014*, Tesis de Grado, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, 2015.
- [43] M. Guanquiza, *Integración de Generación Distribuida con Almacenamiento en ambientes Urbanos – Dimensionamiento y Localización*, Tesis MSc., Departamento de Ingeniería Eléctrica, Instituto Politécnico de Leiria, Leiria, 2017.
- [44] G. Pedroza, "Análisis del impacto en transitorios y niveles de tensión relacionados con la conexión de micro-redes eléctricas al Sistema de Distribución", Tesis MSc., Departamento de Ingeniería Eléctrica, Instituto Politécnico de Leiria, Leiria, 2017.
- [45] J. Gómez, *Impacto de las estaciones de carga para vehículo eléctrico en la ciudad de Cuenca – Ecuador*, Instituto Politécnico de Leiria, Leiria, 2017.
- [46] J. Vélez, *Análisis y Estimación de la Demanda Eléctrica con la Implementación de Vehículos Eléctricos conectados a una Red de Distribución en Cuenca y El*



---

*Ecuador*, Tesis de Grado, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Cuenca, Cuenca, 2017.



ANEXOS

ANEXO 1: Histogramas de Distribución de Frecuencia.

Consumidores Residenciales

3er Armónico – 12h00

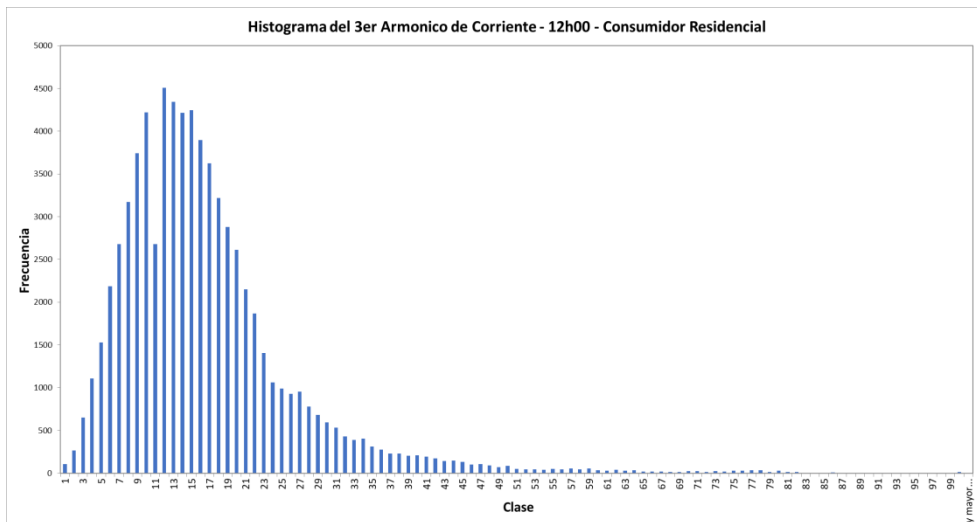


Figura A1. 1 3er armónico de corriente a las 22h00 de un consumidor residencial.

5to Armónico – 19h00

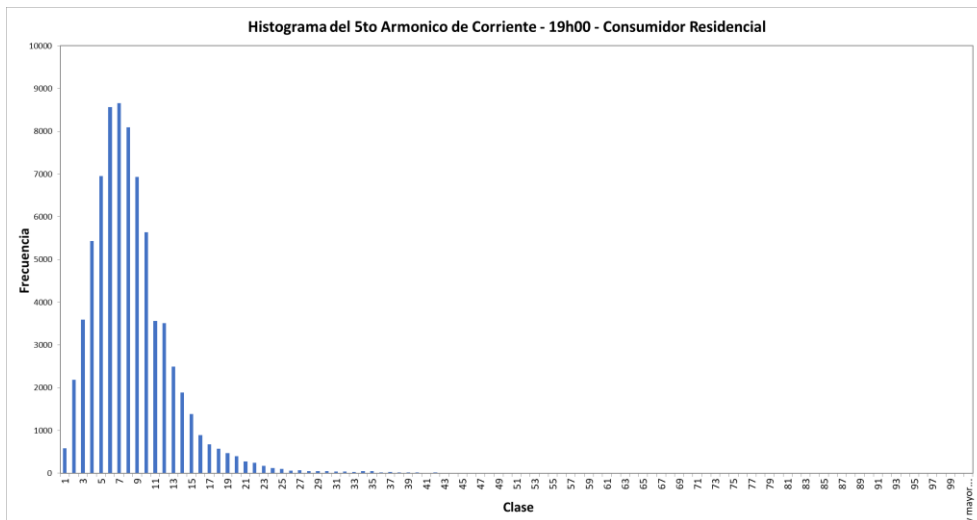


Figura A1. 2 5to armónico de corriente a las 19h00 de un consumidor residencial.

7mo Armónico – 06h00

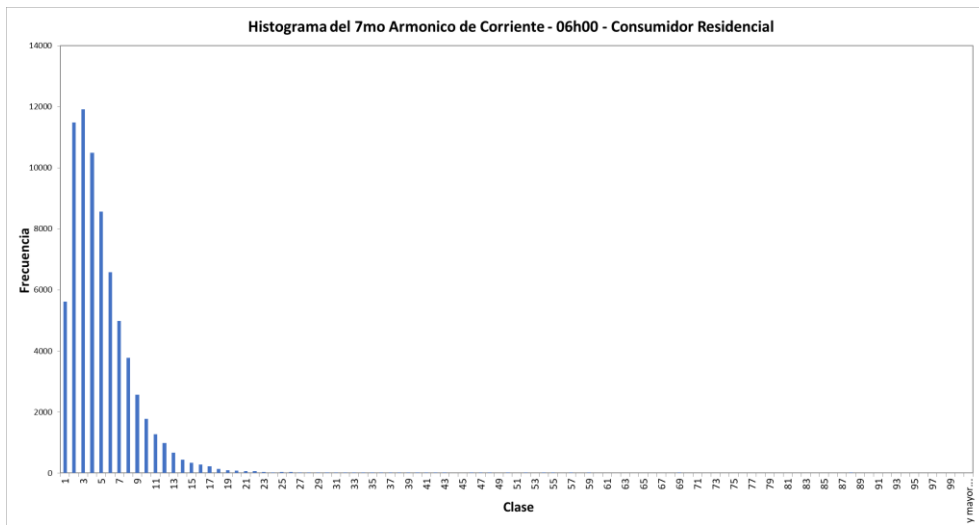


Figura A1. 3 7mo armónico de corriente a las 06h00 de un consumidor residencial.

Consumidores Comerciales

3er Armónico – 20h00

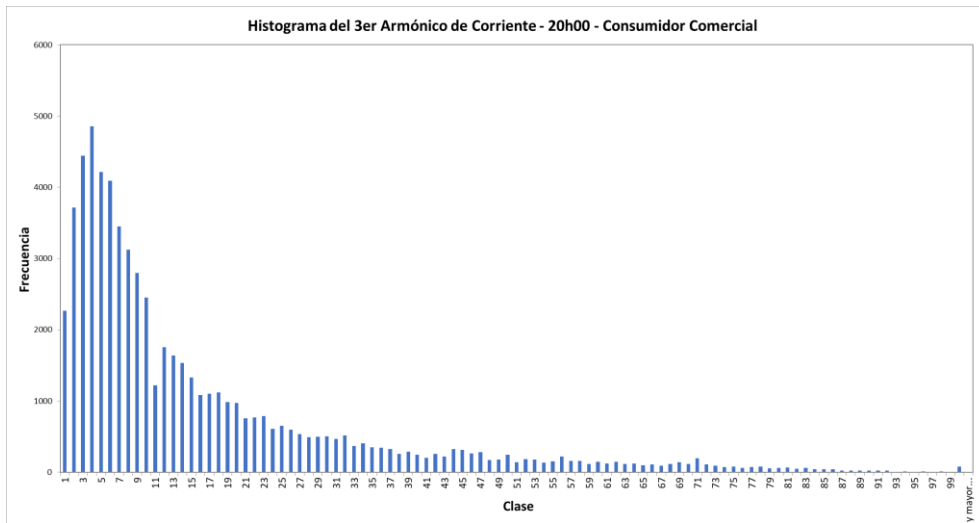


Figura A1. 4 3er armónico de corriente a las 20h00 de un consumidor comercial.



5to Armónico – 16h00

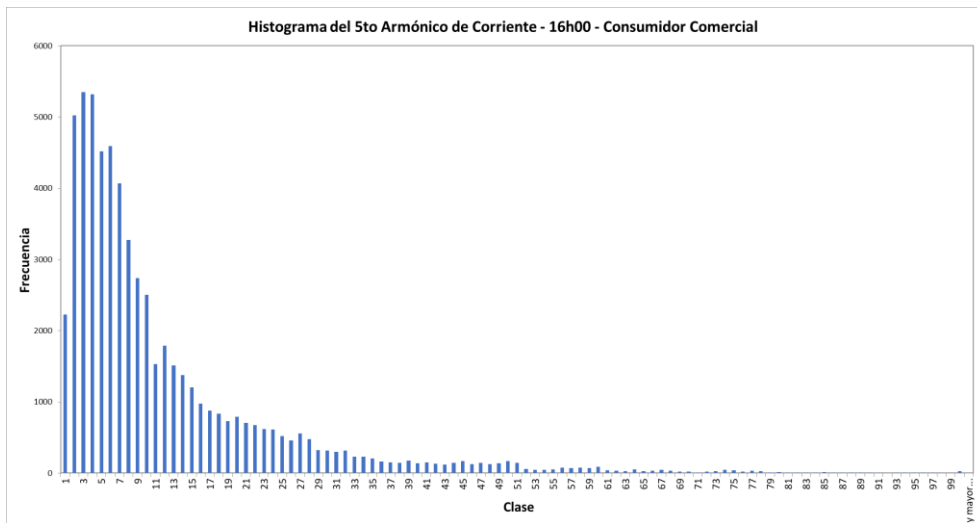


Figura A1. 5 5to armónico de corriente a las 16h00 de un consumidor comercial.

7mo Armónico – 10h00

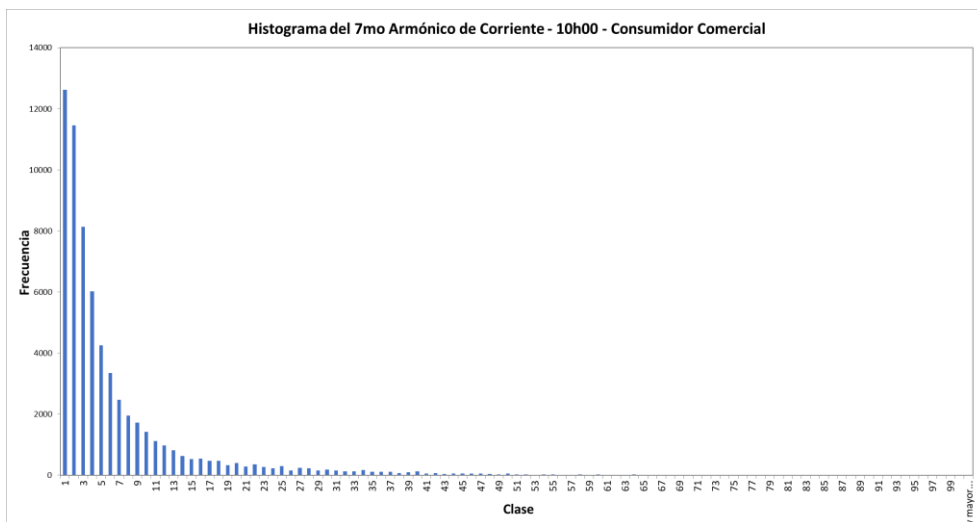


Figura A1. 6 7mo armónico de corriente a las 10h00 de un consumidor comercial.

Consumidores Industriales

3er Armónico – 18h00

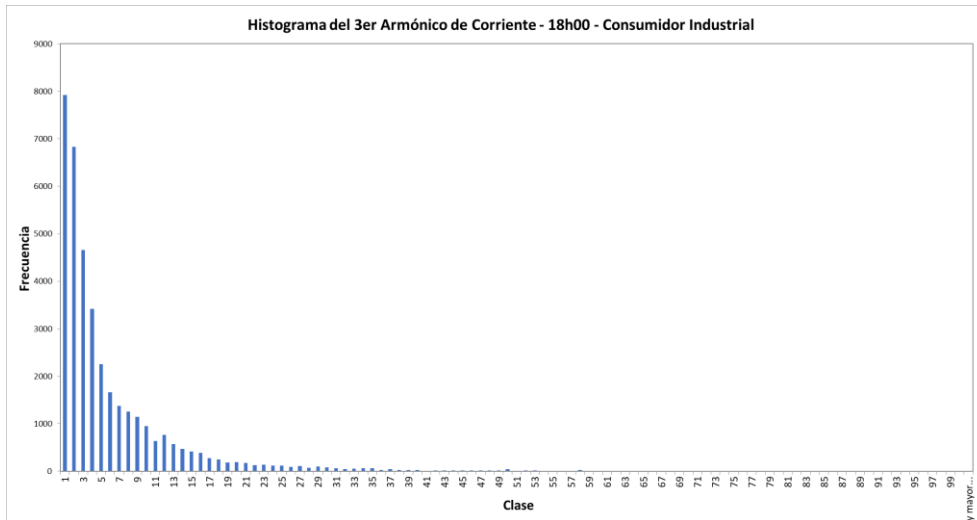


Figura A1. 7 3er armónico de corriente a las 18h00 de un consumidor industrial.

5to Armónico – 09h00

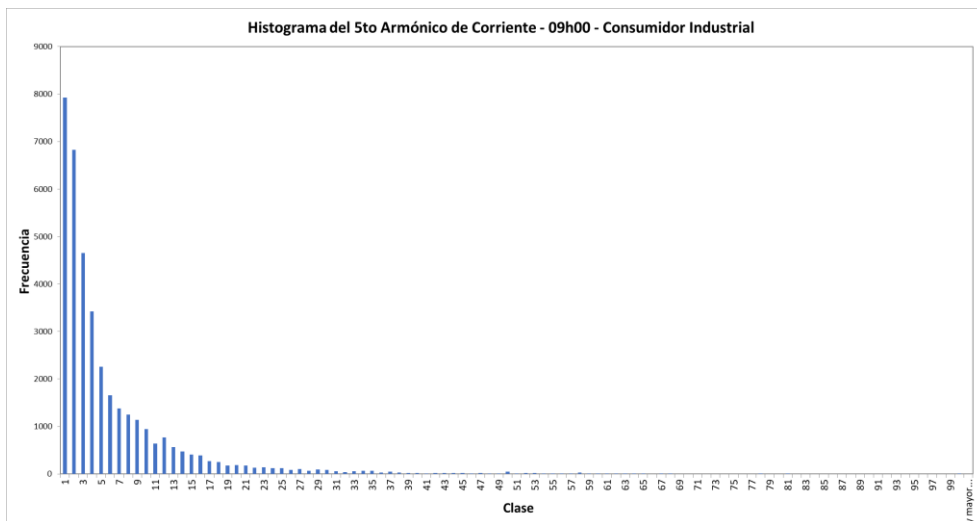


Figura A1. 8 5to armónico de corriente a las 09h00 de un consumidor industrial.

7mo Armónico – 15h00

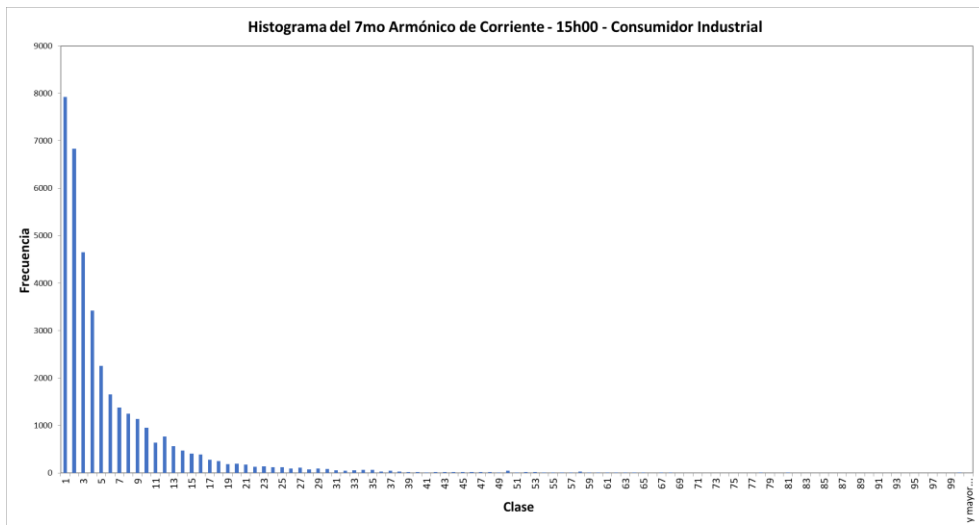


Figura A1. 9 7mo armónico de corriente a las 15h00 de un consumidor industrial.

**ANEXO 2:** Perfiles diarios de magnitud de corrientes armónicas de los diferentes tipos de consumidores.

**Consumidores Residenciales**

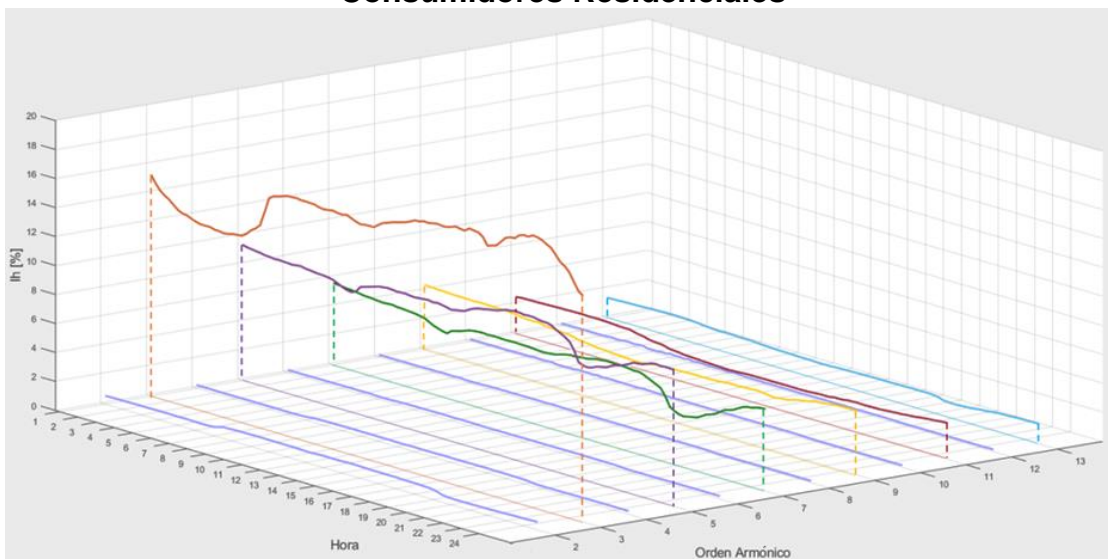


Figura A2. 1 Espectro de Armónicos de Corriente de un consumidor residencial.

**Consumidores Comerciales**

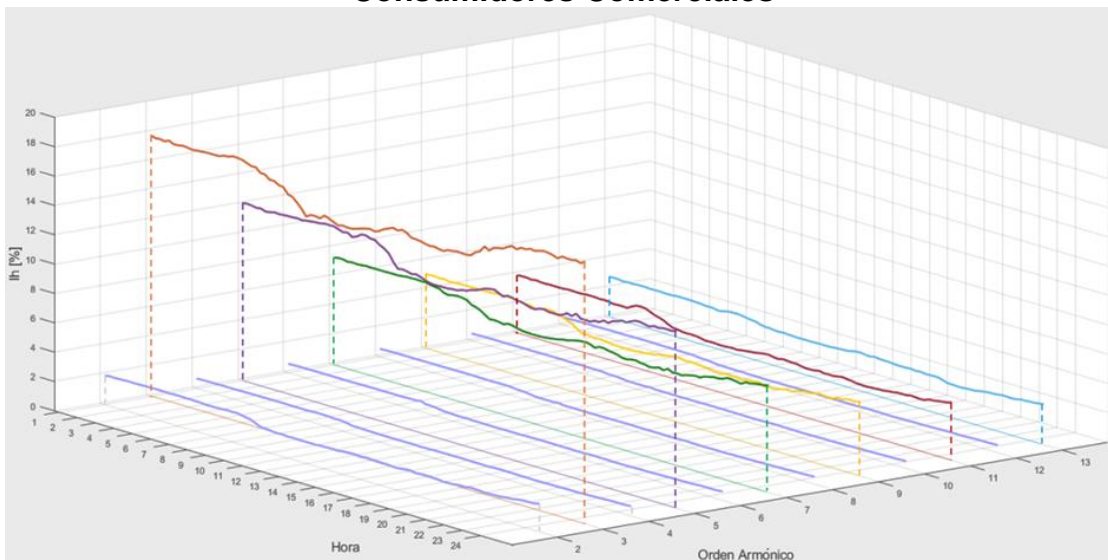


Figura A2. 2 Espectro de Armónicos de Corriente de un consumidor comercial.

### Consumidores Industriales

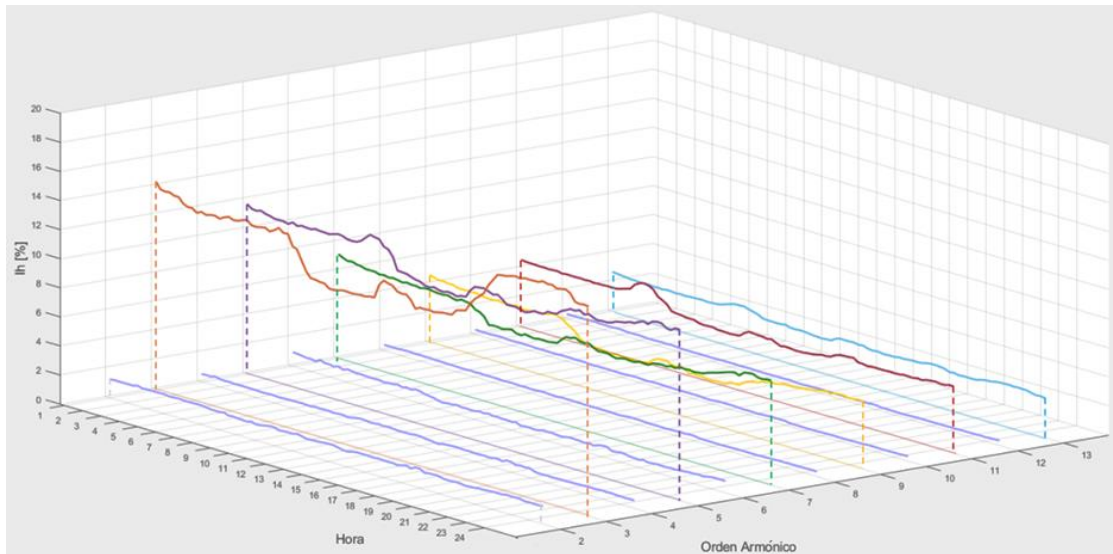


Figura A2. 3 Espectro de Armónicos de Corriente de un consumidor industrial.

### Otros Consumidores

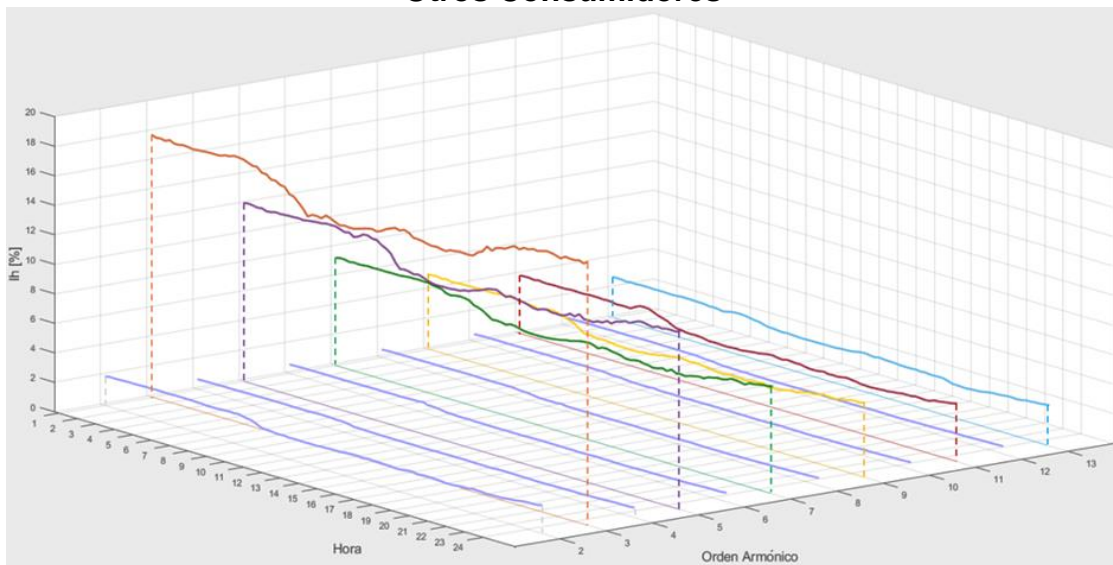


Figura A2. 4 Espectro de Armónicos de Corriente de otros consumidores.

### Luminarias

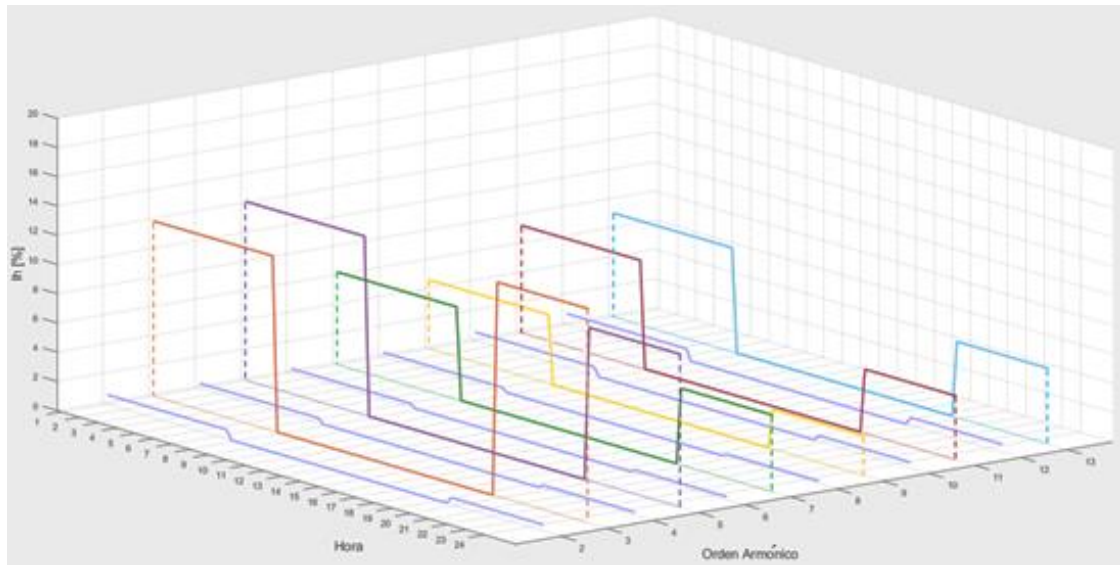


Figura A2. 5 Espectro de Armónicos de Corriente de las luminarias.





**ANEXO 3: Interfaz de Intercambio de Archivos DGS con Excel.**

Para cada clase de objeto usado dentro de la red, se debe asignar una hoja con el sobrenombre característico del “elemento” o “tipo” especificado en el manual del software. Por ejemplo, el elemento carga general se denomina “ElmLod”, y el tipo de carga llama “TypLod”.

En cada hoja se enlistan todos los elementos de una misma clase. Los encabezados contienen el nombre característico de las variables que definen a cada elemento. Por ejemplo, para el elemento carga general es necesario ingresar un identificador “ID”, un nombre “loc\_name”, la potencia activa “plini”, etc.

Las variables que definen las características de un objeto se encuentran documentadas en la referencia técnica del software.

La información almacenada en el SIG puede ser adaptada en el formato DGS para obtener un modelo completo con georreferenciación. El archivo en Excel se importa al crear un nuevo proyecto. En la Figura 4.8 se presenta una hoja de datos de Excel que contiene una lista de elementos “carga general”, y se observa el alimentador 0324 creado en el software.

1	ID(=40)	loc_name1	loc_name2	fold_id(=)	thr_name(=)	mode_imp	u0	pl_recap	l_scale	typ_id	ghmc	icurrent	codini	plini	qlini	P	Q	R	S
2	Lodiv_70997_R	Lodiv_70997_R		2	ProTraf_3556	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
3	Lodiv_70998_R	Lodiv_70998_R		2	ProTraf_3576	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
4	Lodiv_60478_R	Lodiv_60478_R		2	ProTraf_7027	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
5	Lodiv_63509_R	Lodiv_63509_R		2	ProTraf_25902	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
6	Lodiv_71000_R	Lodiv_71000_R		2	ProTraf_3581	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
7	Lodiv_71787_R	Lodiv_71787_R		2	ProTraf_24138	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
8	Lodiv_70982_R	Lodiv_70982_R		2	ProTraf_3530	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
9	Lodiv_70995_R	Lodiv_70995_R		2	ProTraf_3554	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
10	Lodiv_70996_R	Lodiv_70996_R		2	ProTraf_3555	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
11	Lodiv_102592_R	Lodiv_102592_R		2	ProTraf_31709	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
12	Lodiv_67226_R	Lodiv_67226_R		2	ProTraf_3514	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
13	Lodiv_70744_R	Lodiv_70744_R		2	ProTraf_19029	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
14	Lodiv_213406_R	Lodiv_213406_R		2	ProTraf_42824	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
15	Lodiv_187175_R	Lodiv_187175_R		2	ProTraf_40296	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
16	Lodiv_187176_R	Lodiv_187176_R		2	ProTraf_40297	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
17	Lodiv_69973_R	Lodiv_69973_R		2	ProTraf_20978	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
18	Lodiv_67373_R	Lodiv_67373_R		2	ProTraf_3565	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
19	Lodiv_81040_R	Lodiv_81040_R		2	ProTraf_3177	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
20	Lodiv_81121_R	Lodiv_81121_R		2	ProTraf_2431	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
21	Lodiv_70981_R	Lodiv_70981_R		2	ProTraf_3528	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
22	Lodiv_71404_R	Lodiv_71404_R		2	ProTraf_23261	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
23	Lodiv_75937_R	Lodiv_75937_R		2	ProTraf_2854	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
24	Lodiv_169541_R	Lodiv_169541_R		2	ProTraf_38481	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
25	Lodiv_169542_R	Lodiv_169542_R		2	ProTraf_38479	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
26	Lodiv_169543_R	Lodiv_169543_R		2	ProTraf_38480	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
27	Lodiv_169544_R	Lodiv_169544_R		2	ProTraf_38477	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
28	Lodiv_169545_R	Lodiv_169545_R		2	ProTraf_38478	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
29	Lodiv_169546_R	Lodiv_169546_R		2	ProTraf_38475	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
30	Lodiv_169547_R	Lodiv_169547_R		2	ProTraf_38476	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
31	Lodiv_169548_R	Lodiv_169548_R		2	ProTraf_38474	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
32	Lodiv_71421_R	Lodiv_71421_R		2	ProTraf_24487	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
33	Lodiv_128901_R	Lodiv_128901_R		2	ProTraf_34509	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
34	Lodiv_137538_R	Lodiv_137538_R		2	ProTraf_35188	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
35	Lodiv_114498_R	Lodiv_114498_R		2	ProTraf_33152	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
36	Lodiv_70978_R	Lodiv_70978_R		2	ProTraf_3524	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
37	Lodiv_70979_R	Lodiv_70979_R		2	ProTraf_3526	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				
38	Lodiv_70986_R	Lodiv_70986_R		2	ProTraf_3544	PQ	1	0	1	Residencial_3_PH_NonLinear	Hmccur_Residencial	0	0	0	0				

Figura A3. 1 Almacenamiento de la información del alimentador 0324 en Excel.

### Distorsión de Fondo

La distorsión de fondo se configura en la página de Calidad de la Energía del elemento “ElmXnet” como se observa en la Figura 4.9. Es importante tener presente que los voltajes armónicos se ingresan en componentes de secuencia y en valores por unidad.

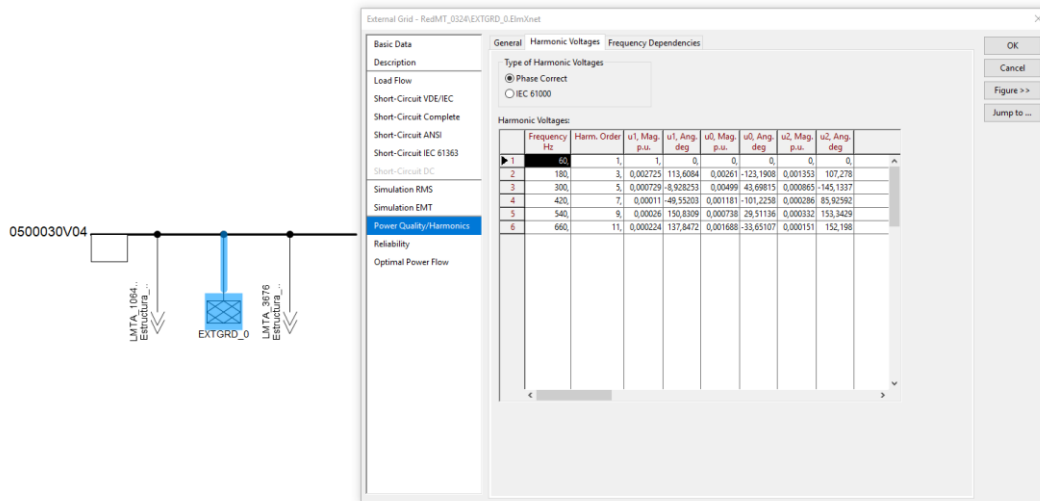


Figura A3. 2 Modelo de Red Externa en DlgSILENT.

### Cargas Armónicas

Se utiliza el objeto “ElmLod” para modelar la carga por clase de consumo. Cada transformador de distribución está conectado con cinco cargas que representan cada clase, como se observa en la Figura 4.10.

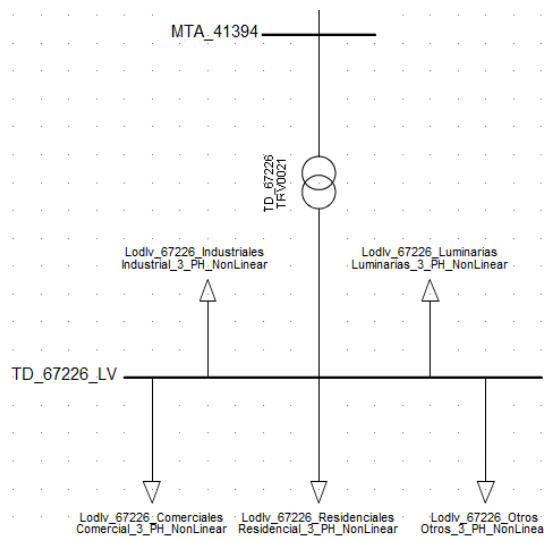


Figura A3. 3 Transformador de Distribución del Alimentador en DlgSILENT.

Se debe asignar un tipo de carga “TypLod” configurado como fuente de corriente en flujos de potencia armónica. La fuente de corriente armónica se configura en la página de Armónicos/Calidad de la Energía, donde se ingresan las magnitudes de cada orden armónico, como se presenta en la siguiente Figura.

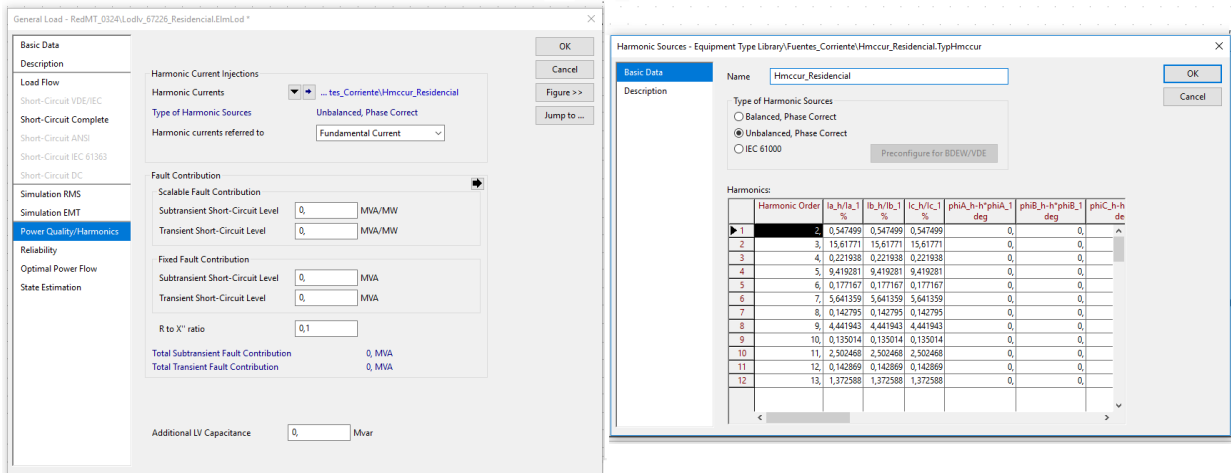


Figura A3. 4 Transformador de Distribución del Alimentador en DigSILENT.

ANEXO 4: Diagrama Unifilar del alimentador 0324 en DlgSILENT.

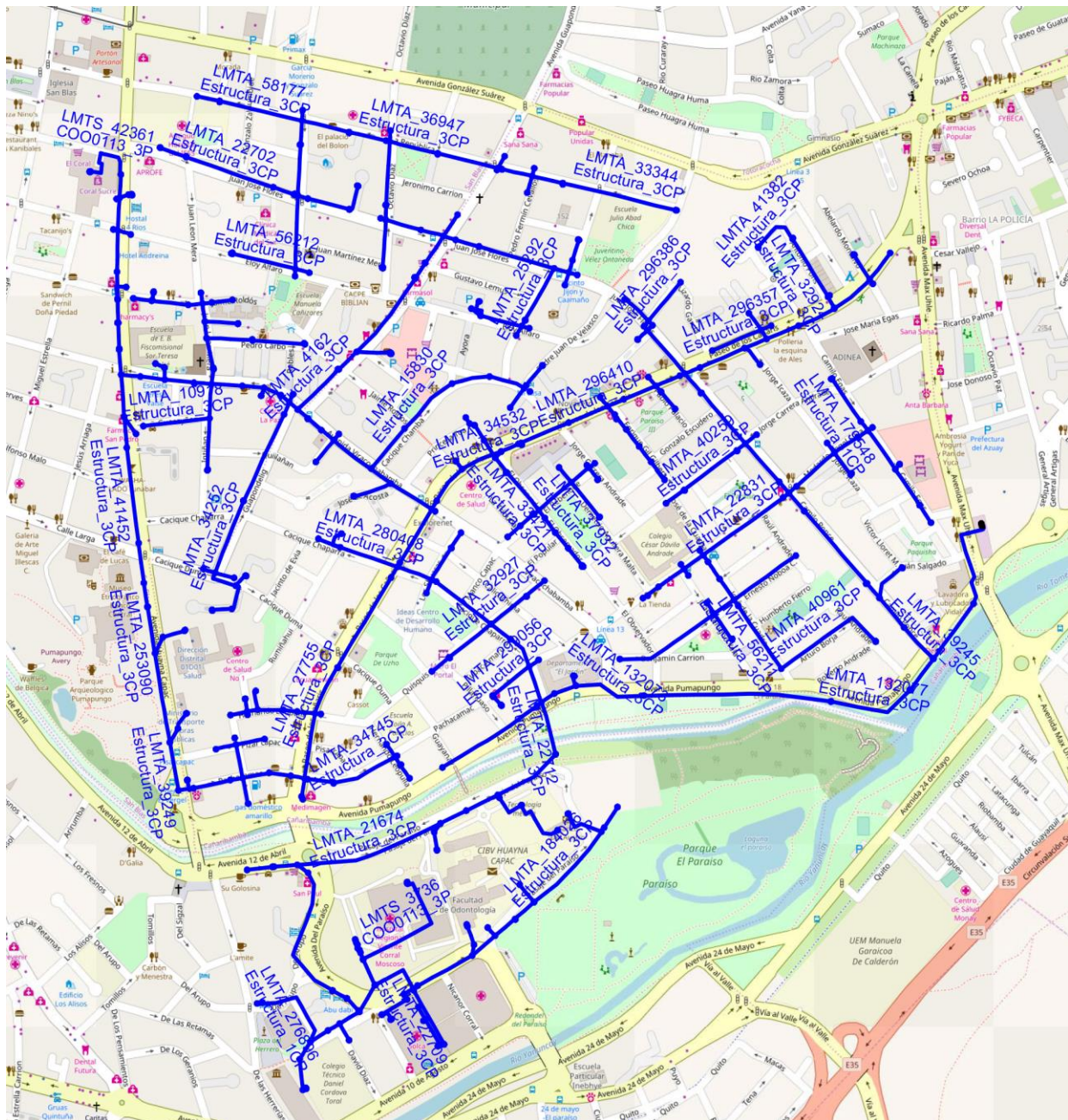


Figura A4. 1 Diagrama Unifilar del alimentador 0324 modelado en DlgSILENT.



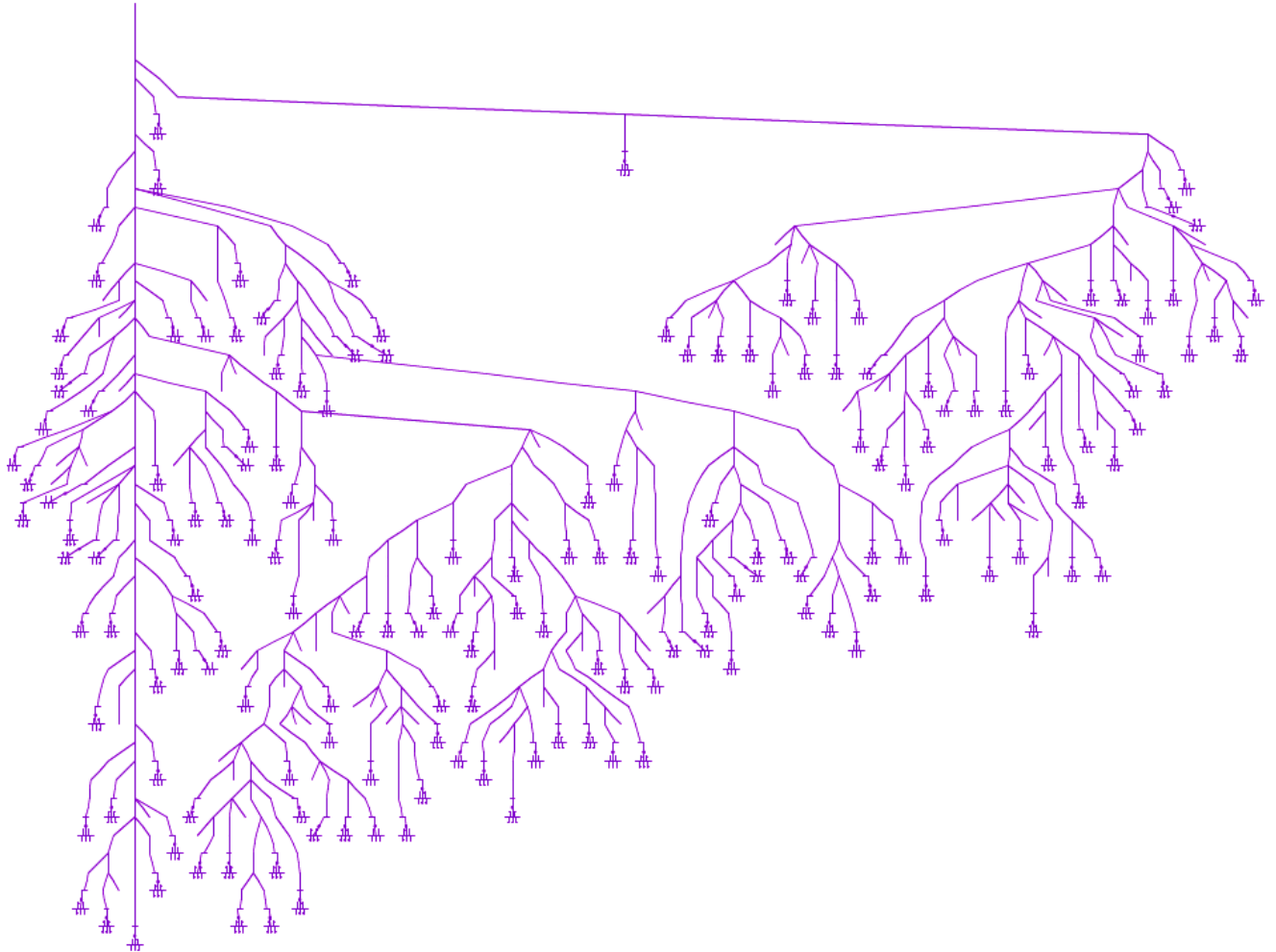


Figura A4. 2 Diagrama de árbol detallado del alimentador 0324 modelado en DigSILENT.