

**ANÁLISIS DE CORRELACIÓN DE RUIDO ELÉCTRICO EN LOS  
TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN T2767 Y T2769 DE LA  
COMPAÑÍA ENERGÉTICA DE OCCIDENTE**



**ÁNGELA MARÍA LONDOÑO TOBÓN**

**CRISTHIAN ALEXANDER SÁNCHEZ CHARRIA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA**

**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN**

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

**INGENIERÍA FÍSICA**

**POPAYÁN**

**2018**

**ANÁLISIS DE CORRELACIÓN DE RUIDO ELÉCTRICO EN LOS  
TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN T2767 Y T2769 DE LA  
COMPAÑIA ENERGÉTICA DE OCCIDENTE**

**ÁNGELA MARÍA LONDOÑO TOBÓN**

**CRISTHIAN ALEXANDER SÁNCHEZ CHARRIA**

Trabajo en modalidad de investigación presentado como requisito para optar al  
título de Ingeniero Físico

**Director**

**Mg. JUAN FERNANDO FLÓREZ MARULANDA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA**

**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN**

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

**INGENIERÍA FÍSICA**

**POPAYÁN**

**2018**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma del director

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Popayán, Abril de 2018

## CONTENIDO

	pág.
1. INTRODUCCIÓN .....	14
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.1 OBJETIVOS.....	15
1.1.1 Objetivo general.....	15
1.1.2 Objetivos específicos .....	15
2. MARCO TEÓRICO.....	16
2.1 Topologías de las redes de distribución.....	16
2.1.1 Topología típica entre transformador y un usuario.....	18
2.1.2 Topología típica entre transformador y múltiples usuarios.....	19
2.2 Líneas eléctricas de distribución .....	20
2.3 Transformadores.....	21
2.4 Usuarios.....	22
2.5 Comunicación PLC .....	23
2.5.1 Clasificación de los sistemas PLC.....	24
2.7.2 Aplicaciones de la comunicación PLC.....	25
2.7.3 Problemas con la comunicación PLC.....	26
2.8 Descripción del Ruido Eléctrico .....	26

2.9	Análisis de las señales en el dominio del tiempo y de la frecuencia ....	26
2.10	Transformada rápida de FOURIER (FFT) para el análisis frecuencial 28	
2.11	Armónicos en la red de distribución de energía eléctrica .....	28
2.12	Fuentes generadoras de Armónicos.....	29
2.13	Efectos de los Armónicos sobre los Transformadores de distribución 29	
2.14	Indicadores esenciales de la Distorsión Armónica .....	30
2.15	Índices para la medición de Armónicos .....	31
2.16	Índices para Armónicos de Tensión .....	31
2.17	Filtro de armónicos .....	32
2.17.2	Filtros pasivos.....	32
2.17.3	Tipos de filtros pasivos.....	33
2.17.4	Filtro Sintonizado. ....	34
2.18	Correlación lineal simple.....	34
2.18.1	Coeficiente de correlación lineal de Pearson.....	35
■	Equipo Cassy Lab II.....	35
3.	Procedimiento experimental .....	37
3.1	Paso 1: Medidas realizadas en el laboratorio de máquinas de la Universidad de Cauca .....	38
3.2	Paso 2: Montaje en los transformadores T2767 y T2769 .....	42
3.3	Paso 3 : Medidas realizadas en los T2769 y T2767 .....	44

3.4	Paso 4: analizar el contenido espectral de los transformadores de distribución .....	45
3.5	Paso 5: Calculo y análisis de los indicadores THDv y Dhv .....	47
3.6	distorsión Armónica Individual de Tensión (Dhv) .....	55
4	FILTRO RLC PASIVO SINTONIZADO.....	60
4.1	Calculo de elementos del filtro pasivo sintonizado.....	60
4.2	Sintonización del filtro .....	60
4.3	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA VALIDAR EL FILTRO PASIVO SINTONIZADO .....	61
4.4	Resultados Obtenidos.....	63
4.5	Análisis de Correlación del Contenido Espectral en los Transformadores de Distribución de CEO (Compañía Energética de Occidente) .....	68
5	CONCLUSIONES.....	79
6	RECOMENDACIONES .....	81
7	BIBLIOGRAFIA .....	82

## LISTA DE TABLAS

pág.

<b>Tabla 1.</b> Relaciones de transformaciones más comunes. ....	21
<b>Tabla 2.</b> Máxima distorsión armónica de tensión permitida por la norma IEEE 519.....	32
<b>Tabla 3.</b> Característica equipo Cassy Lab II. ....	36
<b>Tabla 4.</b> Ficha resumen diseño experimental para medición de ruido eléctrico. ....	37
<b>Tabla 5.</b> Fechas otorgadas por CEO para la intervención de los transformadores de estudio .....	42
<b>Tabla 6.</b> Días y hora de la semana en los cuales se realizaron las mediciones en BT (Baja Tensión), transformadores T2767 y T2769. ....	44
<b>Tabla 7.</b> Promedio de porcentaje de DTHv para las fases (X, Y y Z) en diferentes días de la semana Transformador T2769. ....	49
<b>Tabla 8.</b> Promedio de % DTHv para las fases (X, Y y Z) en diferentes días de la semana Transformador T2767.....	49
<b>Tabla 9.</b> Promedio de THDV por Hora para el transformador T2769. ....	50
<b>Tabla 10.</b> Promedio de THDV por Hora para el transformador T2767. ....	50
<b>Tabla 11.</b> Menor % THDv para el Transformador T2769.....	54
<b>Tabla 12.</b> Menor % THDv para el Transformador T2767.....	54
<b>Tabla 13.</b> Menor porcentaje de THDv por horas para el transformado T2767..	54
<b>Tabla 14.</b> Menor % de THDv por horas para el transformado T2769. ....	55
<b>Tabla 15.</b> Mediciones tomadas de THDv y Dhv Transformador T2769. ....	58
<b>Tabla 16.</b> Mediciones tomadas de THDv y Dhv Transformador T2767. ....	59
<b>Tabla 17.</b> Mediciones de THDv y Dhv Transformador T2767.....	60
<b>Tabla 18.</b> Resultados antes y después de la implementación del filtro. ....	67
<b>Tabla 19.</b> Porcentaje THDv para armónico de 300 Hz y 420Hz .....	68
<b>Tabla 20.</b> Coeficientes de correlación de Pearson, para la misma hora del día entre los transformadores T2767 y T2769. ....	70
<b>Tabla 21.</b> Coeficiente de correlación de Pearson para Diferente hora del día y diferente transformador.....	70
<b>Tabla 22.</b> Coeficiente de correlación de Pearson para Diferente hora mismo trafo 2769.....	71
<b>Tabla 23.</b> Coeficiente de correlación de Pearson para diferente hora del día mismo trafo T2767.....	71
<b>Tabla 24.</b> Porcentaje de respuesta Amarre "01" (Amarre actual) a encuestas realizadas entre día 04 de febrero y 12 de febrero de 2016. ....	72

<b>Tabla 25.</b> Número promedio de PLC_TU que reportan Amarre “01” (Amarre actual) según hora de encuesta (periodo comprendido entre las 04:00 pm del 12 de febrero hasta las 04:00 am del 17 de febrero de 2016). .....	77
<b>Tabla 26.</b> Mayor % de THDv para el transformador T2767. ....	78



## LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Conexión entre transformadores, modelo americano .....	16
Figura 2. Conexión entre transformadores, modelo europeo .....	17
Figura 3. Topología típica entre usuario y transformador, caso departamento del Cauca .....	18
<b>Figura 4.</b> Topología típica entre transformador y sus usuarios. ....	19
<b>Figura 5.</b> Cables desnudo aleación de aluminio AAAC .....	20
<b>Figura 6.</b> Conductor forrado aleación de aluminio AAC en fases y AAAC en neutro.....	20
<b>Figura 7.</b> Transformador de distribución trifásico. ....	21
<b>Figura 8.</b> Vinculación entre un usuario bifásico y transformador.....	23
<b>Figura 9.</b> Sistema externo y sistema interno. ....	25
<b>Figura 10.</b> (a) Señal periódica en el dominio del tiempo y (b) contenido espectral de la señal periódica.....	27
<b>Figura 11.</b> Filtros pasivos en paralelo con la red.....	33
<b>Figura 12.</b> Diagrama eléctrico de filtros pasivos.....	33
<b>Figura 13.</b> Equipo Cassy Lab II. ....	36
<b>Figura 14.</b> (a) Unidades sensoras conectadas eventualmente y (b) funciones básicas del Software Cassy Lab. ....	39
<b>Figura 15.</b> (a) Cassy Lab II en conexión fases (X, Y y Z) y (b) Cassy Lab II conectado con un Pc y en funcionamiento.....	40
<b>Figura 16.</b> Espectro de frecuencias señal de BT laboratorio de Maquinas. ....	41
<b>Figura 17.</b> THDv medida en el laboratorio de Máquinas. ....	42
<b>Figura 18.</b> (a) Conexión fases (X, Y y Z) con las entradas analógicas del Cassy Lab II trafo T2769 y (b) Conexión fases (X, Y y Z) con las entradas analógicas del Cassy Lab II trafo T2767. ....	43
<b>Figura 19.</b> (a) Cassy Lab II energizado con las fases (Neutro y X) del trafo T2769 y (b) Cassy Lab II energizado con las fases (Neutro y X) del trafo T2767. ....	43
<b>Figura 20.</b> (a) Señal en el dominio del tiempo trafo T2767 día Miércoles 04 de Octubre y (b) Señal en el dominio del tiempo trafo T2769 día Miércoles 12 de Julio. ....	45
<b>Figura 21.</b> (a), (b) y (c) Contenidos espectrales fases (X, Y y Z) Transformador T2769 [Fuente propia]. (d), (e) y (f) contenidos espectrales fases (X, Y y Z) Transformador T2767. ....	46

<b>Figura 22.</b> THDv (Distorsión Armónica Total de Tensión) Transformador T2769.	48
<b>Figura 23.</b> THDv (Distorsión Armónica Total de Tensión) Transformador T2767.	48
<b>Figura 24.</b> Promedio de % de THDv para cada hora del transformador T2767.	52
<b>Figura 25.</b> Promedio de % de THDv para cada hora del transformador T2769.	53
<b>Figura 26.</b> Dvh fase 01. Transformador T2769.	55
<b>Figura 27.</b> Dhv (Distorsión Armónicos Individual de Tensión), Fase 02. Transformador T2769.	56
<b>Figura 28.</b> Dhv (Distorsión Armónicos Individual de Tensión), Fase 03. Transformador T2769.	56
<b>Figura 29.</b> Dhv (Distorsión Armónicos Individual de Tensión), Fase 01. Transformador T2767.	57
<b>Figura 30.</b> Dhv (Distorsión Armónicos Individual de Tensión), Fase 02. Transformador T2767.	57
<b>Figura 31.</b> Dhv (Distorsión Armónicos Individual de Tensión), Fase 03. Transformador T2767.	58
<b>Figura 32.</b> Gráficas de impedancia vs frecuencia para (a) 5to armónico, capacitancia 495nf, (b) 7o armónico, capacitancia 495nf, (c) 5to armónico, capacitancia 70nf y (d) 7o armónico, capacitancia 70nf.	61
<b>Figura 33.</b> Filtro RLC pasivo.	62
<b>Figura 34.</b> Configuración integrado xr 2206 cp.	63
<b>Figura 35.</b> (a) Espectro sin filtro con el generador de onda y (b) espectro con filtro con el generador de onda.	64
<b>Figura 36.</b> Espectro sin filtro para frecuencia de 300 Hz, capacitancia 70nf, (b) Espectro con filtro para frecuencia de 300 Hz, capacitancia 70nf, (c) Espectro sin filtro para frecuencia de 300 Hz, capacitancia 495nf y (d) Espectro con filtro para frecuencia de 300 Hz, capacitancia 495nf.	65
<b>Figura 37.</b> (a) espectro sin filtro para frecuencia de 420 Hz, capacitancia 70nf, (b) espectro con filtro para frecuencia de 420 Hz, capacitancia 70nf , (c) espectro sin filtro para frecuencia de 420 Hz, capacitancia 495nf y (d) espectro con filtro para frecuencia de 420 Hz, capacitancia 495nf.	66
<b>Figura 38.</b> Porcentaje de THDV antes y después de la implementación del filtro para 300 y 420 Hz.	67
<b>Figura 39.</b> (a) Grafica de dispersión entre la misma hora , T2767 y T2769, (b) grafica de dispersión entre diferente hora , T2767 y T2769, (c) grafica de dispersión entre diferente hora, mismo transformador T2769. y (d) grafica de dispersión entre diferente hora , mismo transformador T2769.	69
<b>Figura 40.</b> Porcentaje de respuesta de cada PLC_TU frente a encuestas entre el 04 de febrero y 12 de febrero de 2016.	74

**Figura 41.** Número total de PLC\_TU que responden a encuestas ejecutadas entre el 04 de febrero y 12 de febrero de 2016 con Amarre "01" (Amarre actual).  
.....76

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Características de las topologías entre usuarios.....	16
Anexo B. Transformada Rápida de Fourier (FFT) Para el Análisis Frecuencial	20
Anexo C. Indicadores esenciales de la distorsión armónica .....	26
Anexo D. Equipo Cassy Lab II .....	28
Anexo E. Medidas y repeticiones .....	29
Anexo F. Algoritmo Desarrollado en MATLAB.....	30
Anexo G. Graficas contenido espectral transformadores T2769 y T2767). .....	34
Anexo H. Filtro sintonizado .....	35
Anexo I. Intervención Piloto AFSAA - Resultados Trafo T2767).....	41
Anexo J. Amplitudes del contenido espectral transformadores T2769 y T2767). .....	44

## Resumen

En el presente trabajo de investigación se plantea como objetivo general establecer las franjas horarias más adecuadas para la transmisión de señales PLC (*Power Line Communication*) sobre redes de distribución de los transformadores T2767 y T2769 de la Compañía Energética de Occidente CEO. Para llevarlo a cabo, se implementó un diseño experimental donde se tiene en cuenta los intervalos de tiempo en los puntos donde se realizarán las medidas de voltaje de la señal de BT (Baja Tensión) en el dominio del tiempo, utilizando el quipo Cassy Lab II. Con las medidas de la señal de BT en el dominio del tiempo se realiza la FFT (*Fast Fourier Transform*) para el análisis de su contenido espectral. En donde se determina que el 5to y 7to armónico tienen mayor aporte al contenido espectral.

Se implementó un algoritmo desarrollado en MATLAB para determinar dos indicadores de calidad de energía eléctrica THDv (Distorsión Armónica Total de Tensión) y Dhv (Distorsión Armónica Individual de Tensión). Estos indicadores se utilizan para determinar características de la red eléctrica. Conociendo los armónicos más representativos, se diseña y construye un filtro pasivo sintonizado RLC el cual está constituido por elementos pasivos, los cuales permitirán al filtro sintonizarse a las frecuencias requeridas. Se realizan medidas de tensión y se calcula la THDv antes de implementar el filtro y después de su implementación para determinar el buen funcionamiento del mismo. Posteriormente, se hizo un análisis de correlación lineal de Pearson entre las medidas realizadas en los transformadores de estudio y todas las combinaciones posibles para encontrar la relación existente entre la misma hora del día, diferente hora del día y la ubicación de los transformadores de estudio.

Palabras clave: PLC, Transformador, Contenido espectral, Distorsión armónica, Filtro sintonizado, Mitigación, Baja Tensión, Resonancia, Tensión, Ancho de banda, Factor de calidad, Energía eléctrica, distribución.

## 1. INTRODUCCIÓN

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Smart grid es una nueva tecnología de medición de energía la cual se quiere instalar sobre las redes de medición convencionales, abiertas y trenzadas, con el propósito de minimizar los costos que tiene el uso de una infraestructura de telecomunicaciones. Esto implica usar el sistema, o red de distribución, como una red de comunicación, viéndose afectada por el deterioro en la calidad de potencia por la presencia de nuevas cargas no lineales.

La calidad en el suministro de energía eléctrica ha ido adquiriendo mayor importancia debido a la presencia de cargas no lineales en todos los niveles de potencia (doméstico, comercial e industrial). Estas nuevas cargas son importantes para todos los actores de la cadena del sector eléctrico debido a que implican un aumento en el consumo de energía, y una mayor calidad de vida para los usuarios. Sin embargo, su presencia ha afectado la calidad de potencia o la calidad del servicio prestado.

Teniendo en cuenta los aspectos mencionados anteriormente, el desafío está en controlar y/o reducir los efectos de estas cargas en la calidad de potencia.

Una pobre calidad de potencia trae consigo diversos costos, tanto técnicos como económicos. Conseguir una buena calidad de suministro de energía implica actuar en distintos frentes, iniciando con un proceso de generación óptimo, una distribución adecuada e identificando que las perturbaciones propias de la red no afecten los equipos conectados a la misma. Por otra parte, deben mitigar o aislar la red de los efectos causados por los equipos conectados a ella.

Como se deteriora la calidad de la potencia, y afecta tanto a los equipos de los usuarios como a los equipos de comunicación PLC, es necesario conocer el comportamiento del ruido que está afectando la calidad en el suministro de energía eléctrica.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo general.**

Establecer las franjas horarias más adecuadas para la transmisión de señales PLC (Power Line Communication) sobre redes de distribución de los transformadores T2767 y T2769 de la Compañía Energética de Occidente, a partir del análisis espectral de las señales de tensión de los devanados secundarios.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Calcular el contenido espectral de las señales de voltaje de los transformadores objeto de estudio en diferentes días de la semana y diferentes horas del día.
- Diseñar y construir un filtro pasivo que suprima los componentes de tensión con mayor aporte al contenido espectral de la señal de BT (Baja Tensión).
- Analizar la correlación entre contenido espectral, hora del día y día de la semana para cada uno de los dos transformadores de distribución objeto de estudio

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 TOPOLOGÍAS DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN

En Colombia, las estructuras de las redes de distribución son diversas pues se encuentra implementado tanto el modelo americano como el europeo. Las redes de media tensión se identifican de forma visual, dado que las líneas R, S y T se encuentran dispuestas horizontalmente [8].

El modelo americano consiste en un sistema de cuatro hilos multiaterrizado: tres fases y neutro. Este último es común encontrarlo conectado a los bajantes de los pararrayos, al tanque de los transformadores, a las puestas a tierra de los cables de guarda e interconectado al neutro del secundario del transformador. En el modelo americano el neutro se encuentra aterrizado en intervalos frecuentes, por ejemplo, en promedio cada tres postes es normal encontrar el neutro aterrizado, además la distribución de media tensión se hace con voltajes entre 4 y 34 KV, con longitudes entre 15 y 50 kilómetros (Ver figura 1.1). La conversión MT/BT se hace a través de un transformador con TAP central que suministra voltajes de 120 V o 220 V dependiendo del tipo de carga[1]. La longitud típica de redes secundarias es de 200 metros, con un promedio de 5 a 20 usuarios por transformador. En Colombia un ejemplo de este modelo se observa en el departamento de Caldas donde se encuentran redes de media tensión conformadas por 3 líneas (R, S y T) y neutro; esto obedece a que quienes diseñaron las redes en esa zona fueron americanos[2].

**Figura 1.** Conexión entre transformadores, modelo americano

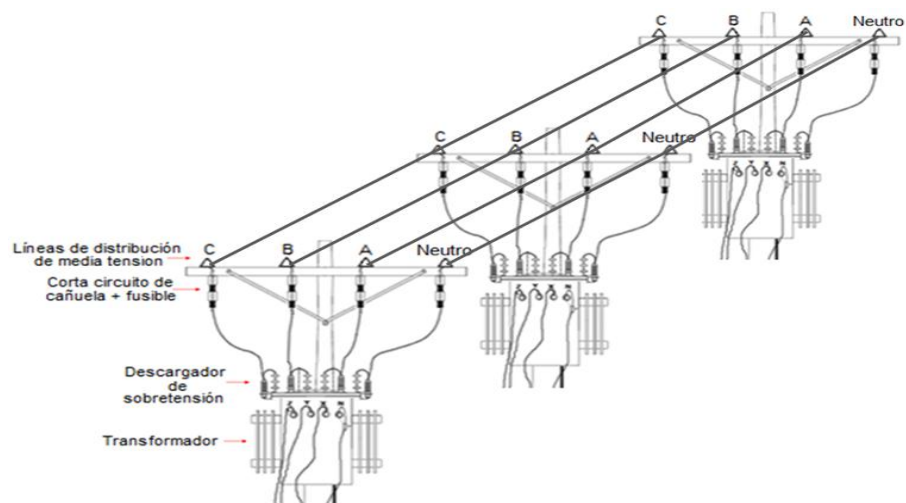




Figura [3].

Por otro lado se tiene el modelo europeo el cual está conformado por un sistema de tres hilos (Ver figura 1.2), las tres fases uniaterrizado, es decir, el neutro se encuentra aterrizado directamente en el transformador de la subestación y no en el recorrido de toda la línea como en el sistema americano. En el modelo europeo se presentan más sobretensiones temporales que en el modelo americano.[4] En áreas urbanas el sistema es trifásico, con transformadores de hasta 630 kVA que pueden atender el orden de 300 hogares. La conversión de MT/BT normalmente se hace con configuración en estrella y neutro aterrizado, resultando un voltaje de fase de 400 V y un voltaje de fase a neutro de 230 V. En Colombia un ejemplo de este modelo se observa en el departamento del Cauca, ya que las redes entre los transformadores no cuentan con neutro y solo se conectan por las líneas (R, S y T) de media tensión; esto obedece a que quienes diseñaron las redes en esa zona fueron europeos[4].

Figura 2. Conexión entre transformadores, modelo europeo

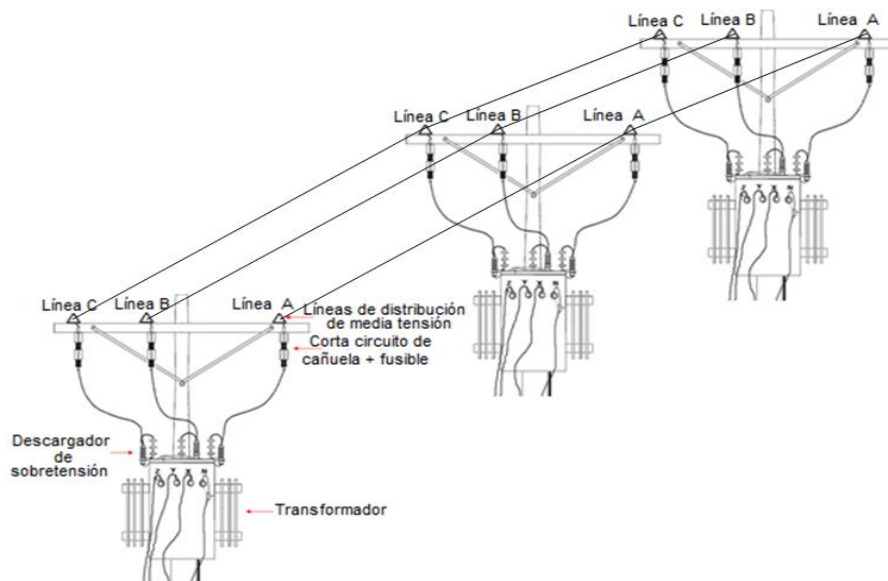


Figura [3].

**2.1.1 Topología típica entre transformador y un usuario.** Los transformadores de baja tensión pueden ser aéreos o subterráneos. De ellos se desprenden cuatro líneas asociadas a las fases R, S, T y Neutro, las cuales conforman el circuito o red de baja tensión. Cuando el transformador cuenta con caja de distribución, a ésta llegan las fases del transformador y salen las líneas que alimentan los circuitos de baja tensión. En caso que el transformador no cuenta con caja de distribución, las fases se conectan a empalmes de los cuales se alimentan los circuitos de baja tensión.

Los transformadores de baja tensión pueden alimentar hasta 150 usuarios en redes altamente complejas y con distancias tan largas como 300 y 500 m, estos usuarios pueden ser monofásicos, bifásicos y trifásicos, todos por medio de un cable denominado acometida. La vinculación típica entre un usuario bifásico y un transformador se presenta en la figura 4 [11]. Dada la dinámica de crecimiento de los usuarios, es común encontrar que no se hallen vinculados al transformador más cercano, incluso se dan casos en los cuales usuarios de una misma manzana no se encuentran asociados al mismo transformador, o casos extremos donde usuarios de un mismo sector se hallan conectados a diferentes barrajes.

**Figura 3.** Topología típica entre usuario y transformador, caso departamento del Cauca

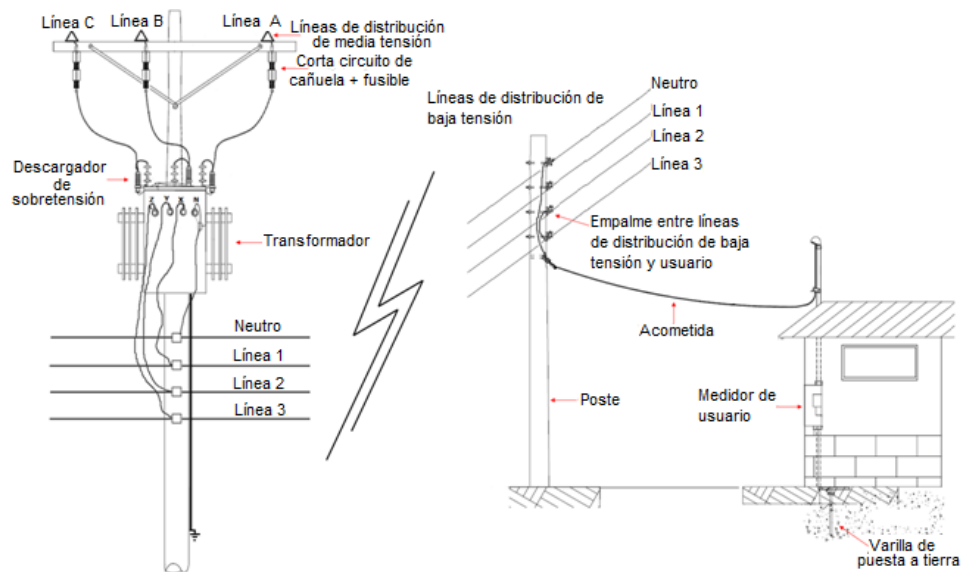


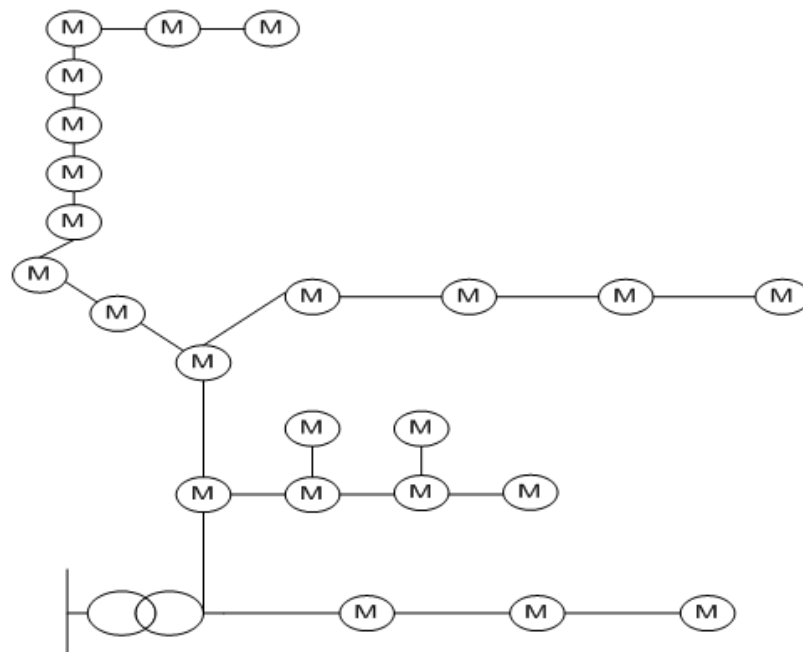
Figura [12].

Se observa que el poste del circuito de baja tensión (figura 4) solo contiene un circuito, sin embargo, los postes pueden tener empalmes de diferentes circuitos de baja tensión de otros transformadores.

**2.1.2 Topología típica entre transformador y múltiples usuarios.** El diseño de la red de baja tensión juega un papel de suma importancia al momento de escoger un transformador. En este diseño se define la capacidad que el transformador debe tener para suministrar la energía a una cantidad de usuarios predefinido, de aquí que un transformador puede alimentar desde un usuario, aunque con ello se subutilice notoriamente, hasta ciento cincuenta (150) usuarios en zonas urbanas. En promedio un transformador ubicado en zona urbana alimenta setenta (70) usuarios en configuraciones o topologías relativamente complejas [13]. Otro aspecto importante en la topología entre transformador y usuarios es la distancia entre ellos, en zonas urbanas los usuarios que se encuentran más cerca del transformador están a distancias de línea de vista de entre 20 y 25 metros, y los usuarios más alejados están a un promedio de 300 metros. Sin embargo, la distancia real que debe recorrer la señal desde el transformador hasta el usuario depende de la topología exacta de la red de distribución [11].

En la figura 6 se observa un ejemplo de una topología entre un transformador y sus usuarios, donde los usuarios están identificados con un círculo que encierra una M y el transformador por dos círculos entrelazados. Las uniones entre ellos representan la red de BT (Baja tensión) que vincula los usuarios al transformador.

**Figura 4.** Topología típica entre transformador y sus usuarios.



Fuente: [12].

Las principales características de la topología entre un usuario y un transformador se presentan en la tabla 1. Mayor detalle sobre las topologías de red (ver Anexo A).

## 2.2 LÍNEAS ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN

La composición de una red eléctrica está constituida principalmente por las líneas eléctricas de distribución y otros los elementos, las líneas eléctricas de distribución están conformadas por conductores encargados del transporte de la energía, desde la subestación de distribución hasta las subestaciones tipo poste [14]. Los cables usados como conductores en redes aéreas deben cumplir con todas las especificación establecidas en el apartado 17.10 del RETIE. Todos los cables conductores en cobre se ha reducido debido al incremento en los costos de este elemento y a la cantidad de robos que se presentan [15].

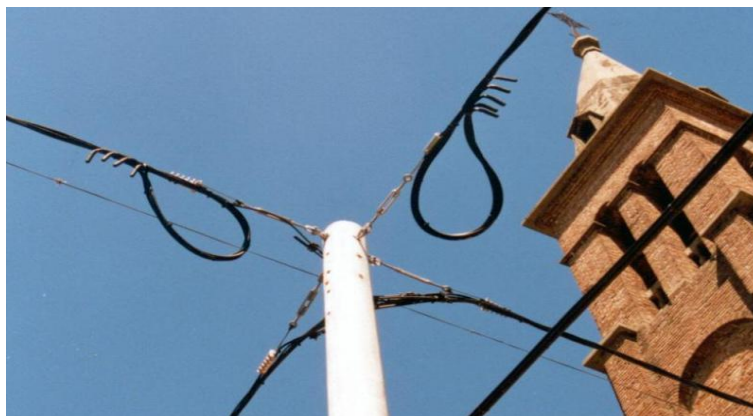
Se implementan conductores desnudos para circuitos primarios o de media tensión, (ver figura 6). Para circuitos secundarios se pueden usar cables desnudos, pero principalmente se están implementando los conductores forrados trenzados compuestos por AAC (Conductor en Aluminio Aleación 1350) en fase y AAAC (Aleación de Aluminio 6201 para cables tipo multiplex DPX, TPX, CPX en líneas Aéreas) en neutro con el fin de evitar manipulaciones por parte de terceros [16] [17], (ver figuras 5 y 6).

**Figura 5.** Cables desnudo aleación de aluminio AAAC



Fuente: Propia.

**Figura 6.** Conductor forrado aleación de aluminio AAC en fases y AAAC en neutro.



Fuente: Propia.

## 2.3 TRANSFORMADORES

En los sistemas de distribución, todos los transformadores son usados para reducir los niveles de tensión de la energía eléctrica en dicho punto (figura 8). Las relaciones de transformación de tensión más comunes en distribución se presentan en la Tabla 1. Para las transformaciones de media tensión a baja tensión se emplean transformadores monofásicos con valores de potencia o nominales de (25 - 37.5 - 50 – 75) kVA, y transformadores trifásicos con potencia de (30 - 45 - 75 - 112.5) y (150) kVA. El sistema de protecciones de un transformador de distribución consta de cortacircuitos, fusibles y pararrayos tipo válvula, y DPS (Dispositivo de Protección contra Sobretensiones).

**Tabla 1.** Relaciones de transformaciones más comunes.

Tensión de entrada	Tensión de salida
110 kV	34,5/13,2 kV
34,5 kV	13,2 kV
34,5 kV	440 V
13,2 kV	440 V
13,2 kV	240/120 V
7.6 kV	240/120 V

Fuente: [19].

En la sección 17.10 del RETIE se establecen todos los requisitos que debe cumplir los transformadores que van a ser instalados en Colombia [20].

**Figura 7.** Transformador de distribución trifásico.



Fuente: [21].

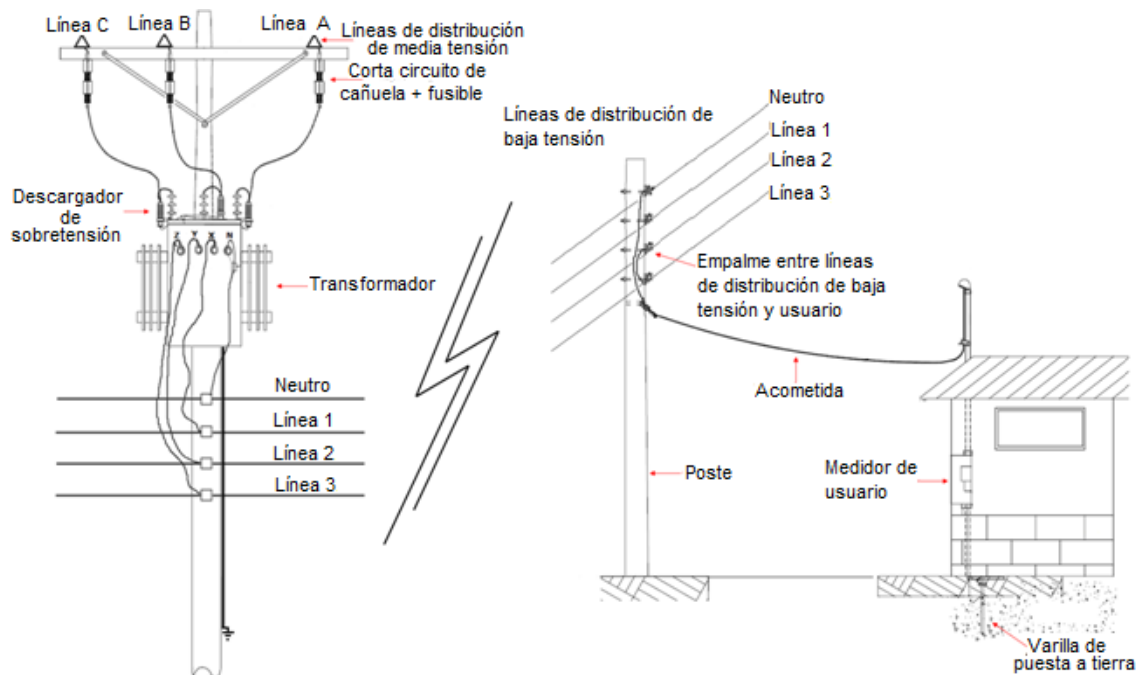
## 2.4 USUARIOS

Se pueden presentar diferentes tipos de usuarios dependiendo de la distribución de carga que se demandan, sean distribuciones de cargas comerciales, residenciales, o industriales. El caso de estudio serán usuarios con carga de tipo residencial, en este caso se tendrá los siguientes tipos de usuarios:

1. Usuario monofásico: conectados entre una fase y neutro.
2. Usuario bifásico: conectados a dos fases y neutro.
3. Usuario trifásico: conectados a tres fases y neutro.

Un ejemplo de una vinculación típica entre un usuario bifásico y un transformador se presenta en la figura 8.

**Figura 8.** Vinculación entre un usuario bifásico y transformador.



Fuente: [12].

Se utiliza las líneas de distribución de energía eléctrica para la transmisión de información a través de un sistema de comunicación llamado PLC (Power Line Communication).

## 2.5 COMUNICACIÓN PLC

El concepto de Comunicaciones sobre Líneas de Potencia viene del inglés Power Line Communications. El sistema puede ser usado para proveer servicios de telecomunicación como: Internet de banda ancha, voz sobre IP (VoIP), video y audio por demanda, servicios de valor agregado como la AMR (Automatic Meter Reading) para medición de servicios públicos (agua, gas, luz, etc), distribución automática DSM (Demand Side Management) como el control remoto y mantenimiento del alumbrado público, acceso remoto a edificios inteligentes y adquisición de datos, entre otros [22].

La tecnología PLC es simplemente un conjunto de elementos y sistemas de transmisión que, basándose en una infraestructura de transporte y distribución eléctrica clásica, permite ofrecer a los clientes servicios clásicos de un operador de telecomunicaciones [23]. Una forma de prestar el servicio de comunicación por PLC es utilizando redes híbridas, ya sea PLC-Fibra Óptica, PLC-Satélite y PLC-Wifi. Estas conexiones híbridas permiten tener redes más económicas, ya que combinan tramos de red con tecnologías que se adapten mejor a las características de la infraestructura de distribución, lo que

representa costos menores, con características similares a redes con tecnología no híbrida. A pesar de estos beneficios y de que algunas de estas tecnologías híbridas permiten una solución económica para zonas rurales, predominan hasta el momento distribuciones sustentadas totalmente por la red eléctrica, utilizando todos los beneficios y características de la transmisión por medio de las líneas de bajo y medio voltaje [24]. Se presentan problemas tales como desacoples de impedancia que producen reflexiones, la atenuación de la línea eléctrica se incrementa con la distancia y con la frecuencia, su impedancia varía con el tiempo en un rango muy grande según estén o no conectados ciertos aparatos eléctricos, no es un sistema lineal e invariante en el tiempo, lo que añade más dificultad a su uso y complica su caracterización respecto a atenuación, ruido y distorsión, la diversidad de dispositivos que pueden estar conectados hace que el ruido introducido por estos sea variado. Además, la red eléctrica del hogar no está diseñada para transmitir señales a alta frecuencia, por lo que al hacerlo se convierte en una fuente de ruido que hay que limitar [25].

**2.5.1 Clasificación de los sistemas PLC.** Existen varias formas de clasificar los sistemas PLC, pero generalmente, se clasifican en dos grandes grupos [26]:

1. PLC indoor o interno.
2. PLC outdoor o externo.

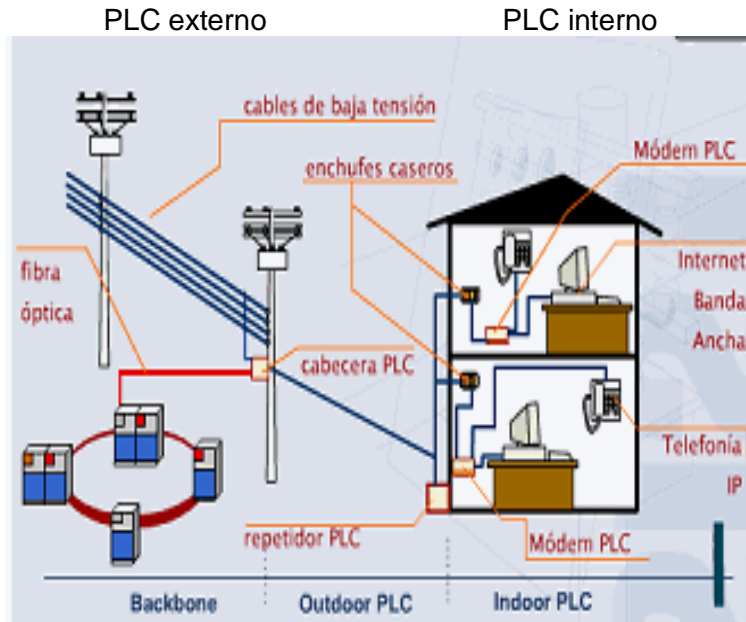
**PLC *indoor* o interno:** Está sistema utiliza la red doméstica que se encuentra en la parte interna de la casa o el edificio, es decir, desde el punto donde se encuentra el medidor de energía. El PLC Interno se puede a su vez clasificar de dos formas. Una de ellas es Banda Ancha, la cual es utilizada para crear entornos de redes LAN en edificios u oficinas, con lo cual se evita hacer un tendido de red adicional que sea solo para manejo de datos. La otra es Banda Angosta, que es utilizada para aplicaciones de automatización de la casa o edificio, es decir “Domótica”, como lo es control de cierres y aperturas, monitoreo y control de encendido de luces y electrodomésticos. Utiliza las frecuencias más altas de 5 MHz a 30 ó 40 MHz [27].

**PLC *outdoor* o externo:** Puede ser utilizado por medio de las redes de media y baja tensión de las compañías eléctricas. Este sistema presenta variantes, entre las que se cuenta el sistema de Banda Ancha, también denominado BPL “Broadband Power Line”. Éste normalmente utiliza la red de baja y en algunos casos también la de media tensión, como solución de última milla para distribución de servicios de banda ancha como internet. La otra variante es la Banda Angosta. En este caso se utilizan las redes de media y baja tensión, generalmente por parte de las mismas compañías eléctricas, con el fin de hacer comunicación entre centrales o subestaciones, hacer controles o monitoreo de las líneas eléctricas, control de alumbrado público y se puede utilizar para servicios de tele medición de consumo a los usuarios, corte y reconexión remota del suministro eléctrico y control contra fraude eléctrico.



Utiliza frecuencias bajas de 1 MHz a 5 ó 10 MHz. En la figura 9 se ilustra en forma general los dos grupos de PLC que existen [28].

**Figura 9.** Sistema externo y sistema interno.



Fuente: [29].

**2.7.2 Aplicaciones de la comunicación PLC.** Tradicionalmente se emplea la comunicación PLC para las siguientes aplicaciones [30].

- Lectura remota de contadores de energía eléctrica
- Control remoto de equipamiento
- Telediagnóstico
- Servicios de distribución de internet de alta velocidad, TV y música
- Juegos on-line

**2.7.3 Problemas con la comunicación PLC.** Uno de los problemas o dificultades con la comunicación PLC, es principalmente el medio físico en el cual se realiza esta comunicación. La red eléctrica como medio físico es bastante hostil para la transmisión de datos, en ella se encuentran derivaciones, transformadores, malas conexiones, impedancias variables y ruido generado por los elementos que se interconectan [31]. Para el caso de los transformadores, estos elementos están formados por bobinas, las cuales producen alta impedancia con el aumento de la frecuencia. La corriente y el voltaje de la señal en alta frecuencia se atenúan de manera crítica con el aumento de la frecuencia, esto se aprecia claramente con la definición de impedancia inductiva [32]. Las líneas de potencia domiciliaria están diseñadas para llevar potencia y no datos, sus frecuencias no son superiores a 400 Hz (típicamente 50 o 60 Hz). Se deben tener en cuenta las perturbaciones como alto ruido, alta atenuación y distorsión de la señal [33].

## **2.8 DESCRIPCIÓN DEL RUIDO ELÉCTRICO**

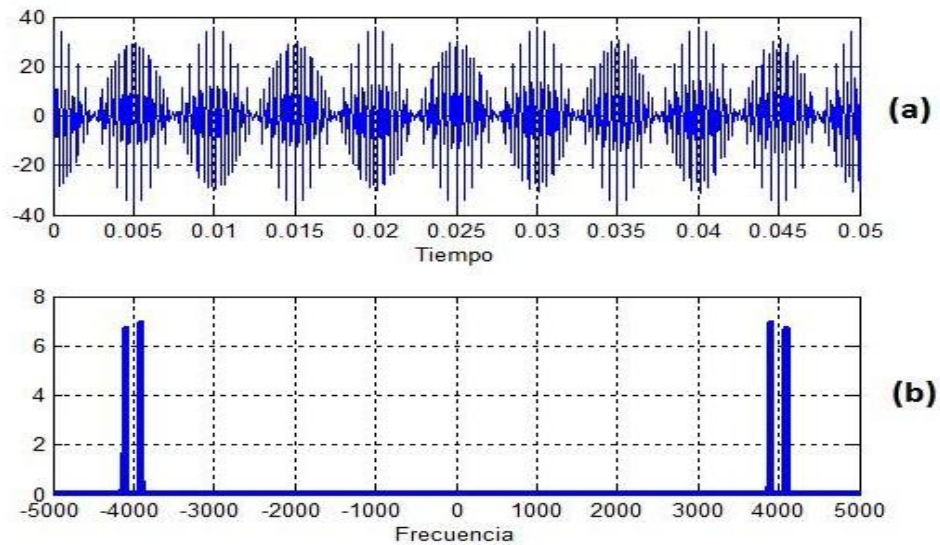
El ruido comprende señales indeseables sin relación alguna con la señal de interés, introduciéndose en ésta y causa distorsiones. Existen señales de ruido aleatorias, es decir, que son de naturaleza impredecible, y señales de ruido no aleatorias, que se pueden predecir y eliminar con un diseño adecuado [31].

En un contexto general, se dividen los filtros armónicos en pasivos y activos. Su diferencia esencial radica sobre si proveen una acción de filtrado dentro de un ancho de banda seleccionado (pasivo) o como resultado de un proceso en el tiempo real que guía la inyección de la mitigación de corrientes y tensiones armónicas (activo) [46]. Uno de los métodos más comunes para el control de la distorsión armónica en BT es el uso de técnicas de filtrado pasivas, que hacen uso de filtros sintonizados o pasa altas. Los filtros armónicos pasivos pueden ser diseñados como elementos sintonizados que proveen un camino de baja impedancia a las corrientes y tensiones armónicas a una frecuencia puntual, o como componentes pasa altas o pasa banda que pueden filtrar armónicas sobre cierto rango de frecuencias.

## **2.9 ANÁLISIS DE LAS SEÑALES EN EL DOMINIO DEL TIEMPO Y DE LA FRECUENCIA**

La mayoría de las señales se mide en el dominio del tiempo, presentando la amplitud de la señal en un intervalo de tiempo, sin embargo, esto no permite la mejor representación de la información contenida en ella. Existen propiedades de la señal que no se pueden analizar en el dominio del tiempo, pero sí en el dominio de frecuencia [40]. El espectro de una señal periódica consiste en la representación de las componentes de frecuencia de la misma (figura 10).

**Figura 10.** (a) Señal periódica en el dominio del tiempo y (b) contenido espectral de la señal periódica.



Fuente: [40].

Intuitivamente se sabe que la frecuencia está relacionada con la velocidad de cambio: si 'algo' cambia rápidamente, se tiene una frecuencia alta y si cambia lentamente su frecuencia es baja, y si no cambia, su frecuencia es cero. Por ejemplo, la frecuencia de un periódico (*publicación diaria: frecuencia diaria*) es mayor de que la de una revista (*publicación semanal: frecuencia semanal*) [5].

La frecuencia se mide en ciclos por segundo que es lo que se llama Hertzios:

$$f = \frac{1}{\text{segundos}} = \text{Hz} \quad (1).$$

El espectro de frecuencia de una señal consiste en la representación de las componentes de frecuencia de la misma. Esta representación muestra las frecuencias que existen en la señal. Básicamente se necesita la información contenida en la frecuencia con la representación temporal, parte de la información contenida en la señal no es evidente. Otra posible aplicación del estudio en el dominio de la frecuencia es el estudio de las causas de las distorsiones de las señales durante una transmisión.

El método más utilizado para el estudio en el dominio de la frecuencia de las señales es el "*Análisis de Fourier*", se basa en la descomposición de una señal en componentes sinusoidales. Es el método más utilizado como consecuencia de que cuando se aplica a un sistema una entrada sinusoidal (*en general, una entrada periódica*) el sistema responde dando como salida otra señal sinusoidal

(de diferente fase y amplitud). Hay varios métodos de análisis de Fourier. La elección de uno u otro vendrá determinada por el tipo de señal que se quiera estudiar. Para señales periódicas, se utilizan las series de Fourier (*ondas sinusoidales relacionadas armónicamente*). En el caso de señales no periódicas (*señales de energía*) se trabaja con la transformada de Fourier. La serie de Fourier o la transformada permite obtener la descripción en el dominio de la frecuencia o espectro de la señal, la cual brinda información que de otra forma no se podría obtener [5] [6].

## **2.10 TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT) PARA EL ANÁLISIS FRECUENCIAL**

Toda señal periódica, sin importar cuán complicada parezca, puede ser reconstruida a partir de sinusoides cuyas frecuencias son múltiplos enteros de una frecuencia fundamental, eligiendo las amplitudes y fases adecuadas. La FFT es un algoritmo para el cálculo de la Transformada Discreta de Fourier (DFT). Su importancia radica en el hecho que elimina gran parte de los cálculos repetitivos a que está sometida la DFT, por lo tanto se logra un cálculo más rápido. Además, la FFT generalmente permite una mayor precisión en el cálculo de la DFT, disminuyendo los errores de redondeo [41]. El desarrollo del algoritmo para el cálculo de la FFT se encuentra en el Anexo B.

## **2.11 ARMÓNICOS EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

Los armónicos han sido históricamente la perturbación más estudiada, ya que su existencia se conoce desde los comienzos de la distribución de la energía eléctrica. Su estudio y la evolución de las técnicas de medida han sido en gran parte los promotores del interés en otros aspectos de la calidad de la energía eléctrica, hasta llegar a la situación actual [42]. Los armónicos en las formas de onda de tensión y de corriente, son componentes de frecuencia de valores múltiplos de la frecuencia fundamental. Estas componentes armónicas se producen por la conexión de cargas no lineales a la red de distribución. Estas cargas absorben corrientes no lineales que al circular por las impedancias del sistema dan origen a un suministro irregular de energía, que influye en el funcionamiento de los equipos conectados a la red, de modo que los transformadores de distribución deben funcionar en un régimen para el cual no están diseñados [43].

## 2.12 FUENTES GENERADORAS DE ARMÓNICOS

Las principales fuentes generadoras de armónicos son [44]:

- Hornos de arco y otros elementos de descarga tipo arco, tales como lámparas fluorescentes. Los hornos de arco se consideran más como generadores de armónicos de tensión que de corriente, apareciendo típicamente todos los armónicos (2º,3º,4º,5º...) pero predominando los impares con valores típicos con respecto a la fundamental de 20% del 3er armónico, 10% del 5º, 6% del 7º, 3% del 9º.
- Núcleos magnéticos en transformadores y máquinas rotativas que requieren corriente de tercer armónico, controladores de velocidad ajustables usados en ventiladores, bombas y controladores de procesos.
- Fuentes conmutadas para equipos electrónicos, rectificadores basados en diodos o tiristores para equipos de soldadura, cargadores de baterías.
- Compensadores estáticos de potencia reactiva. estaciones en DC de transmisión de alta tensión, convertidores de AC a DC (rectificadores).

## 2.13 EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS SOBRE LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

La mayoría de los transformadores están diseñados para operar con corriente alterna a una frecuencia fundamental de (50 ó 60 Hz), lo que implica que operando en condiciones de carga nominal, y con una temperatura no mayor a la temperatura ambiente especificada, el transformador debe ser capaz de disipar el calor producido por sus pérdidas sin sobrecalentarse ni deteriorar su vida útil [45]. Las pérdidas en los transformadores consisten en pérdidas sin carga o de núcleo y pérdidas con carga, que incluyen las pérdidas de  $I^2R$ , pérdidas por corrientes de Eddy y pérdidas adicionales en el tanque, sujetadores, u otras partes de hierro [7]. De manera individual, el efecto de los armónicos en estas pérdidas se explica a continuación [8],[7],[9]:

- Pérdidas sin carga o de núcleo: producidas por el voltaje de excitación en el núcleo. La forma de onda de voltaje en el primario es considerada sinusoidal independientemente de la corriente de carga, por lo que no se considera que aumentan para corrientes de carga no sinusoidales. Aunque la corriente de magnetización consiste de armónicos, éstos son muy pequeños comparados con las de la corriente de carga, por lo que sus efectos en las pérdidas totales son mínimos.
- Pérdidas  $I^2R$ : si la corriente de carga contiene armónicos, entonces estas pérdidas también aumentarían por el efecto piel.

- Pérdidas por corrientes de Eddy: estas pérdidas a frecuencia fundamental son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga y al cuadrado de la frecuencia, razón por la cual se puede tener un aumento excesivo de éstas en los devanados que conducen corrientes de carga no sinusoidal (y por lo tanto también en su temperatura).

Pérdidas adicionales: estas pérdidas aumentan la temperatura en las partes estructurales del transformador, y dependiendo del tipo de transformador contribuirán o no en la temperatura más caliente del devanado. Se considera que varían con el cuadrado de la corriente y la frecuencia

Sin embargo, la presencia de armónicos por cargas no lineales en la red genera unos valores de distorsión armónica. Estos valores, representados en porcentajes (%), son útiles para conocer el grado de contaminación de la red [46].

## **2.14 INDICADORES ESENCIALES DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA**

La existencia de indicadores permite cuantificar y evaluar la distorsión armónica de las ondas de tensión y de corriente. Estos son:

- Factor de potencia.
- Factor de cresta.
- Potencia de distorsión.
- Espectro en frecuencia.
- Distorsión armónica o TDHv (Distorsión Armónica Total de Tensión)
- Distorsión armónica individual de tensión (Dv)

Los indicadores son indispensables para determinar las acciones correctivas requeridas, Mayor información sobre los indicadores (ver Anexo C). Para el efecto de este trabajo de grado se tendrán en cuenta dos indicadores el Dv y THDv [19].

## 2.15 ÍNDICES PARA LA MEDICIÓN DE ARMÓNICOS

Para analizar los efectos producidos por los armónicos se utilizan generalmente índices que cuantifican el nivel de contaminación armónica de las ondas. Para el análisis los índices son comparados con valores límites dados por las normas o con valores de soportabilidad de los equipos. A continuación, se presentan las definiciones de los índices de tensión más importantes para la medición de armónicos [47].

## 2.16 ÍNDICES PARA ARMÓNICOS DE TENSIÓN

Para tensión se tiene dos tipos de índices: distorsión armónica individual ( $D_v$ ) y distorsión armónica total de tensión (THD $_v$ ). El índice de distorsión armónica individual se define mediante la ecuación (2):

$$D_v = \frac{V_i}{V_n} * 100\% \quad (2)$$

donde.:

$D_v$ : distorsión armónica individual de tensión.

$V_i$ : Tensión de cada armónico.

$V_n$ : Tensión nominal del alimentador.

La distorsión armónica total THD es un término utilizado para determinar el efecto de los armónicos en los sistemas de potencia. Según la IEEE 519 [48], la Distorsión Armónica Total (THD) está dada por (3):

$$TDH = \frac{\sqrt{S}}{C} * 100 \quad (3)$$

donde:

$S$ : Suma de todas las magnitudes al cuadrado de las componentes armónicas.

$C$ : Cuadrado de la magnitud de la componente fundamental.

Existe un THD tanto para tensión como para corriente. El THDi (Distorsión Armónica Total de Corriente) es generado por las cargas conectadas a la red eléctrica en BT (Baja Tensión), mientras que el THD $_v$  se genera por la fuente como resultado de una corriente muy distorsionada, es decir, en cuantas más cargas distorsionadas se tengan en un sistema, mayor probabilidad habrá de producirse distorsión armónica total de tensión [49]. La distorsión armónica total de tensión se expresa a partir del factor llamado THD $_v$ , el cual es usado para

definir el efecto armónico sobre la tensión en un sistema de potencia, ya sea en baja, media y alta tensión [49]. Como la THDv es principalmente debido a la corriente de cargas no sinusoidales, la THDv y la THDi, están fuertemente relacionadas [50]. Los límites recomendados por la IEEE 519 se relacionan con el índice de THDv. La Tabla 2 establece los límites de la distorsión armónica total de tensión proporcionado por la compañía proveedora de servicio eléctrico.

La distorsión armónica de total tensión (THDv) se define según (4):

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} * 100 \quad (4)$$

donde:

$h$  = Número de orden del armónico.

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

$V_h$  = Magnitud del armónico individual de tensión.

**Tabla 2.** Máxima distorsión armónica de tensión permitida por la norma IEEE 519.

Tensión V at PCC	Armónicos individuales (%)	Distorsión Armónica Total de Tensión THDv (%)
$V \leq 1.0$ kV	5.0	8.0
$1$ Kv < $V \leq 69$ kV	3.0	5.0
$69$ kV < $V \leq 161$ kV	1.5	2.5
$161$ kV < $V$	1.0	1.5

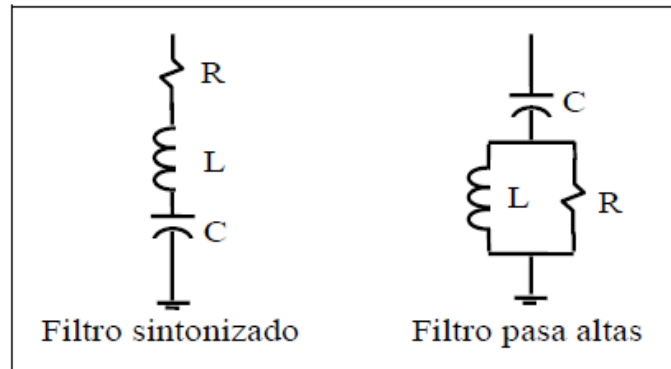
Fuente: [44].

## 2.17 FILTRO DE ARMÓNICOS

**2.17.2 Filtros pasivos.** El filtro pasivo es un filtro que se sintoniza para una armónica en especial, o un rango determinado. Estos filtros son los más utilizados en los sistemas eléctricos por su bajo costo y fácil instalación, aunque en algunos casos trae consigo problemas de resonancia. La figura 11 muestra la configuración de estos filtros.



**Figura 11.** Filtros pasivos en paralelo con la red.



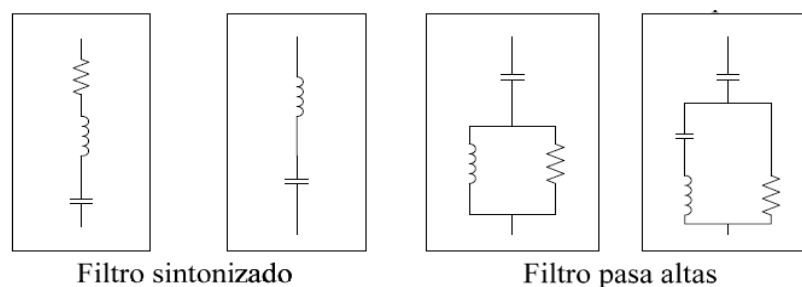
Fuente: [48].

El filtro presenta una impedancia baja a una corriente de una frecuencia determinada, esto significa que los elementos del filtro entran en resonancia serie, ocasionando la circulación de esta corriente. De esta manera, a partir de un valor del banco de capacitores, se obtiene el valor del inductor del filtro.

**2.17.3 Tipos de filtros pasivos.** Los filtros pasivos son los más comunes para mitigar armónicas en BT, se puede clasificar (figura 12) como:

- Filtros sintonizados
- Filtros pasa altas o pasa banda (primero, segundo y tercer orden)

**Figura 12.** Diagrama eléctrico de filtros pasivos.



Fuente: [48].

Para el caso de estudio en particular, sólo se tratará la temática de los filtros pasivos sintonizados.

**2.17.4 Filtro Sintonizado.** Probablemente es el filtro más común en la mitigación de armónicas en BT. El filtro pasivo sintonizado presenta muy baja impedancia al cambio de frecuencia, a través de la cual toda la corriente de la frecuencia en particular será derivada [52]. En el Anexo H Se brinda mayor información sobre filtros sintonizados, puntos de resonancia paralela, factor de calidad, valores recomendados y aspectos relevantes. Las ecuaciones para el cálculo de los componentes del filtro pasivo sintonizado se presentan a continuación:

Teniendo en cuenta la condición de resonancia para un circuito RLC pasivo:

$$X_l = X_c \quad (5)$$

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \quad (6)$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (7)$$

donde,  $f$  hace referencia a las frecuencias que se desean mitigar, es decir 300 HZ y 420Hz.

Un factor importante para la construcción del filtro es el factor de calidad  $Q$ :

$$Q = \frac{X_l}{R} \quad (8)$$

donde,  $R$  es la resistencia interna del inductor. El factor de calidad del filtro, para baja tensión, se encuentra entre 30 y 60. El valor de  $Q$  debe conservarse entre dichos valores debido a su relación inversamente proporcional con la resistencia interna del inductor, que afecta la impedancia total del circuito en la frecuencia de sintonía. El valor de  $R$  depende del proceso de construcción de las bobinas. Este valor está dado por la resistencia propia del conductor, las pérdidas en el núcleo y el entrehierro.

## 2.18 CORRELACIÓN LINEAL SIMPLE

El concepto de relación o correlación se refiere al grado de variación conjunta existente entre dos o más variables. En este capítulo se estudia un tipo particular de relación llamada lineal, se toma en cuenta únicamente dos variables (simple)[53] .

Una relación lineal positiva entre dos variables  $X_i$  e  $Y_i$  indica que los valores de las dos variables varían de forma parecida, es decir los sujetos que puntúan alto en  $X_i$  tienden a puntuar alto en  $Y_i$  y los que puntúan bajo en  $X_i$  tienden a puntuar bajo en  $Y_i$ . Una relación lineal negativa significa que los valores de las dos variables varían de forma inversa: los sujetos que puntúan alto en  $X_i$  tienden a puntuar bajo en  $Y_i$ . y los que puntúan bajo en  $X_i$  tienden a puntuar alto en  $Y_i$ . [54] .

Un primer acercamiento al tipo de relación existente entre dos variables es a través del diagrama de dispersión, en este se forma una nube de puntos la cual indica el tipo de relación existente entre las variables.

**2.18.1 Coeficiente de correlación lineal de Pearson.** El coeficiente de correlación de Pearson, pensado para variables cuantitativas (escala mínima de intervalo), es un índice que mide el grado de covarianza entre distintas variables relacionadas linealmente. Suele ser representado por la letra  $r$  y está definido por la siguiente expresión:

$$R_{xy} = \frac{\sum Z_x Z_y}{N} \quad (9)$$

Este coeficiente hace referencia a la media de los productos cruzados de las puntuaciones estandarizadas de  $X$  y de  $Y$ . Téngase en cuenta que las puntuaciones estandarizadas muestran, precisamente, la posición en desviaciones de un individuo respecto a su media. Reflejan la medida en que dicho individuo se separa de la media [55].

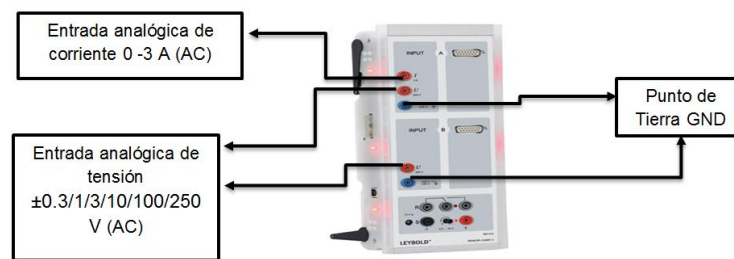
El coeficiente de correlación de Pearson toma valores entre -1 y 1; un valor de 1 indica relación lineal perfecta positiva: cuando cada individuo manifieste la misma superioridad o inferioridad en cada una de ellas. Esto se cumple cuando su posición relativa sea la misma, es decir, cuando sus puntuaciones tipo sean iguales ( $Z_x = Z_y$ ). Un valor de -1 indica relación lineal perfecta negativa: los valores de  $Z_x$  y  $Z_y$  son exactamente iguales pero de signo contrario, resultando los productos cruzados de  $Z_x$  y  $Z_y$  negativos. Un valor de 0 indica una relación lineal nula: para un valor obtenido de  $X$  se podrá obtener cualquier valor de  $Y$ ; es decir, para un valor determinado de  $Z_x$  la misma cantidad de valores positivos y negativos de  $Z_y$ . De todo ello resulta que la suma de productos cruzados valdrá cero ya que habrá tantos productos positivos como negativos [55]

## 2.19 EQUIPO CASSY LAB II

Es de suma importancia conocer los equipos disponibles en el laboratorio del Departamento de Física de la Universidad del Cauca, con el fin de identificar aquellos que tengan las características apropiadas para el registro de las señales de tensión y cálculo del espectro de las mismas, necesarias en este

proyecto, e igualmente que cumplan con los rangos de tensión y potencia requeridos en las redes de distribución de los transformadores T2767 y T2769. El equipo que cumple con las condiciones necesarias es el Cassy Lab II - LEYBOLD (ver figura 13.) Todas las funciones del equipo en cuestión se encuentran en el Anexo D.

**Figura 13.** Equipo Cassy Lab II.



Fuente: Propia.

Para realizar las mediciones de ruido eléctrico se necesitan dos equipos Cassy Lab II conectados en paralelo, con características como las que se presentan en la tabla 3.

**Tabla 3.** Característica equipo Cassy Lab II.

ENTRADAS ANALÓGICAS DE TENSIÓN	ENTRADAS A Y B (CONECTOR TIPO HEMBRILLA DE SEGURIDAD DE 4 MM)
Resolución	12bit
Rangos de medición	$\pm 0.3/1/3/10/100/250$ V
Error de medición	$\pm 1$ % mas 0.5 % del valor final del rango
Razón de exploración	Máx. 200.000 valores/s (=100.000 valores/s por entrada)
Número de datos	Prácticamente sin límite (depende del PC)

Fuente: [51].

### 3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Con la intención de contar con el contenido espectral de las señales de tensión en los transformadores T2767 y T2769 de la CEO, se plantea un diseño experimental para la medición y valoración del ruido eléctrico, el cual se resume a continuación (tabla 4).

**Tabla 4.** Ficha resumen diseño experimental para medición de ruido eléctrico.

ETAPA	CONCEPTO
Planeación	Se plantea el problema del ruido eléctrico y se evalúa si es posible estudiar el fenómeno. En caso afirmativo, se buscan las pruebas y actividades para llevar a cabo el experimento.
Hipótesis	Las diferentes cargas eléctricas generan armónicos que puedan llegar a interferir con la comunicación PLC.
Variables Independientes y Factores	La fuente de energía, cada una de las cargas (Inductiva, Capacitiva, Resistiva) son las variables independientes. Las respuestas entre la conexión de cada uno de estos son los factores.
Tratamiento	Utilizando el equipo Cassy Lab II, se realizara la toma de datos en los transformadores T2767 y T2769 para el análisis de los armónicos generados por los distintas cargar eléctricas.
Mediciones y Repeticiones	Se toman medidas durante 6 días de la semana en cada uno de los transformadores T2767 y T2769, cada 10 minutos en un intervalo de 4 horas por día. Para mayor de detalle ver Anexo H.
Unidad Experimental	El experimento se realizara tomando como punto de medida los transformadores T2767 y T2769, con el equipo Cassy Lab II que permite obtener el comportamiento de la señal tanto en el dominio del tiempo como en frecuencia.
Variable Dependiente	Componentes de Ruido eléctrico de alta frecuencia generado por las diferentes cargas eléctricas conectadas a la red de distribución.
Aleatorización	Los datos se tomaran en un punto determinado, considerando que se realizara la toma de datos en diferentes horas del día, y días de la semana.
Efectos del Ruido	El ruido generados por las diferentes cargar eléctricas puede afectar la comunicación PLC, en este caso se está afectando la comunicación PLC entre los transformadores T2767 y T2769 de C.E.O
Interpretación y Conclusiones	Recopilar toda la información necesaria para plantear una solución al problema de ruido eléctrico. Una vez recopilada la información y obtenidas las componentes en frecuencia del ruido. Realizar el diseño de los filtros pasivos y hallar la correlación del contenido espectral y hora del día y día de la semana para cada uno de los transformadores.

Fuente: Propia.

El diseño experimental se soporta en un procedimiento organizado en los siguientes cinco pasos:

1. Medidas realizadas en el laboratorio de Máquinas Universidad del Cauca.
2. Montaje en los transformadores T2767 y T2769.
3. Medidas realizadas en los transformadores de estudio.
4. Analizar el contenido espectral de los transformadores.
5. Indicadores de THDv y Dv.

Los detalles de estos pasos se describen en las secciones subsecuentes.

### **3.1 PASO 1: MEDIDAS REALIZADAS EN EL LABORATORIO DE MÁQUINAS DE LA UNIVERSIDAD DE CAUCA**

Se realizan mediciones en el laboratorio de Máquinas de la Universidad del Cauca con el fin de conocer en detalle las características del equipo Cassy Lab II, Se debe tener presente las funciones que el mismo puede realizar y determinar parámetros y límites del diseño experimental. Para las medidas en el laboratorio se plantean los siguientes objetivos:

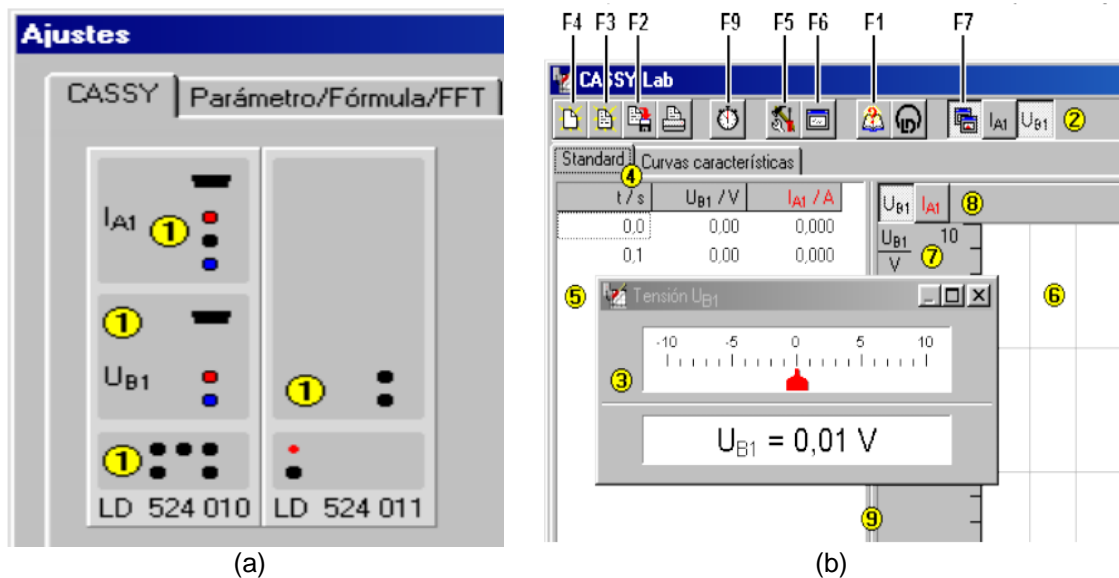
- Conocer las capacidades del equipo Cassy Lab II para medir señales en BT.
- Determinar la frecuencia óptima para realizar el registro de señales.
- Determinar las amplitudes de los armónicos de tensión mediante la FFT.
- Calcular la THDv para las medidas del laboratorio.

En el proceso de conocer las capacidades del Cassy Lab II, se estudia (figura 14) la interfaz del software del equipo Cassy Lab II. Se ilustran las unidades sensoras (figura 15) habilitadas para realizar las mediciones de ruido eléctrico. Para llevar a cabo una medición, sólo se requiere hacer un clic sobre la entrada o salida (1) respectiva. En la figura 15 (b) se observan las funciones básicas las cuales pueden ser ejecutadas con los botones rápidos (2) de la línea superior:

- F4 borrar la última medición, todas las mediciones o los ajustes.
- F3 abrir archivo.
- F2 adjuntar archivo.

- F9 iniciar/ parar medición.
- F6 mostrar módulos.
- F1 ayuda.
- F7 activar / desactivar instrumentos de visualización.

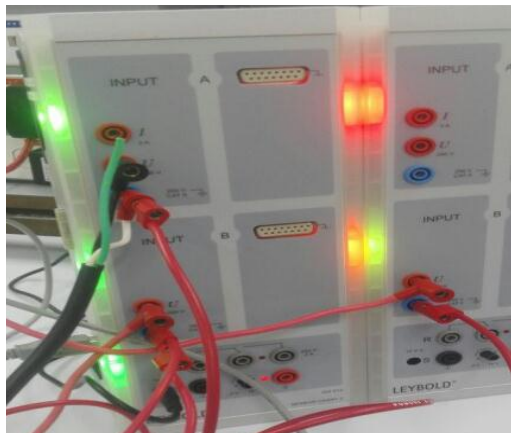
**Figura 14.** (a) Unidades sensoras conectadas eventualmente y (b) funciones básicas del Software Cassy Lab.



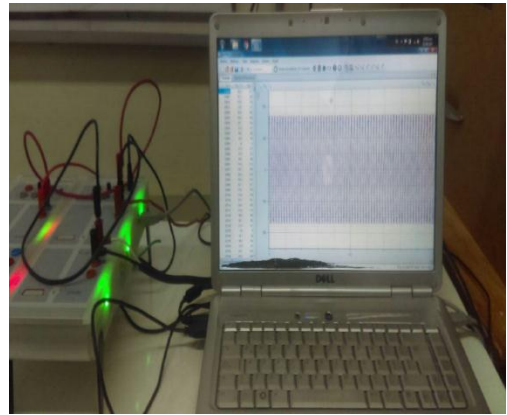
Fuente: [51].

Los montajes experimentales con el equipo Cassy Lab II conectado a un PC (Computador Portátil) se ilustran en las figuras 15 (a) y (b). Se observa que el tipo de conexión que se presenta entre las fases y el equipo es tipo Plug and Play, teniendo en cuenta la posición en donde se conectan las fases ( $U_{A1}$ ,  $U_{B1}$  y  $U_{A2}$ ), para su respectivo análisis frecuencial.

**Figura 15.** (a) Cassy Lab II en conexión fases (X, Y y Z) y (b) Cassy Lab II conectado con un Pc y en funcionamiento.



(a)



(b)

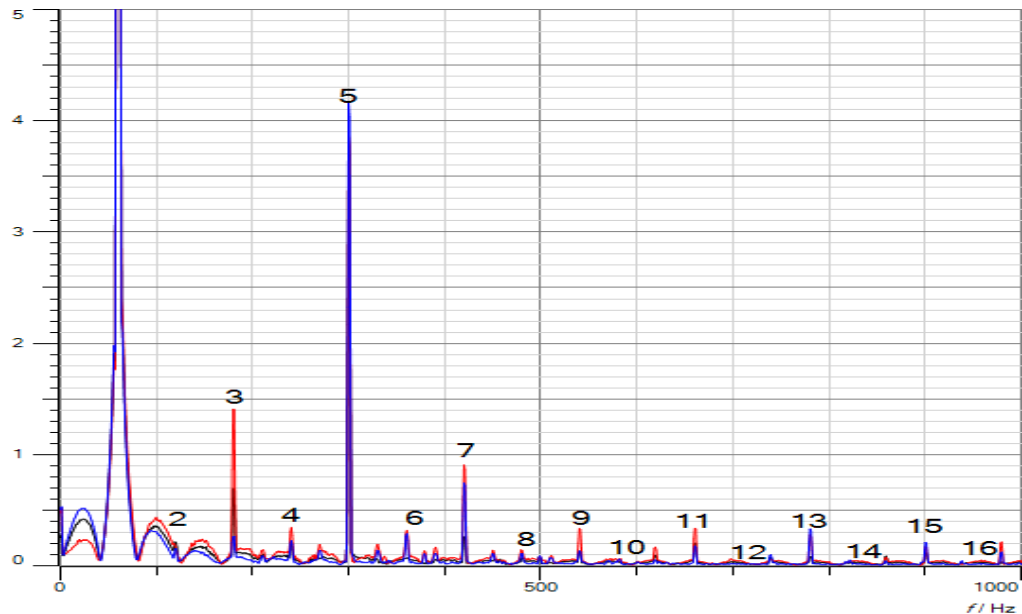
Fuente: Propia.

Se tiene en cuenta el teorema de Nyquist para encontrar la frecuencia de muestreo correcta que permita reconstruir la señal de BT. El Cassy Lab II tiene un ancho de banda de 0 a 1 kHz; según el teorema de Nyquist, se debe muestrear la señal de BT al doble de este ancho de banda, por esta razón se escoge una frecuencia de muestreo de 2 kHz para reconstruir la señal. Con esta frecuencia de muestreo se toman 2001 muestras por segundo, la capacidad de almacenar datos con esta frecuencia depende básicamente de los recursos Software y Hardware del computador. Teniendo en cuenta estos recursos, se realizan diferentes tipos de mediciones con un intervalo de tiempo de 1 segundo cada 5 minutos y cada 10 minutos durante una hora, Al observar los espectros de frecuencia de la señal de BT se determina que el mismo no varía con tanta rapidez, por esta razón se toman las medidas de BT cada 10 minutos, esto también se aplicara en los transformadores de estudio.

Se observa en la figura 17 el espectro de frecuencias de la señal de BT en el laboratorio de Maquinas, con sus tres fases (X, Y y Z), midiendo la señal en un ancho de banda de 1 kHz se observa la amplitud de tensión de 16 armónicos en el dominio de frecuencias. La señal eléctrica tiene una frecuencia fundamental de 60 Hz y sus armónicos serían los múltiplos de esta frecuencia fundamental.



**Figura 16.** Espectro de frecuencias señal de BT laboratorio de Maquinas.

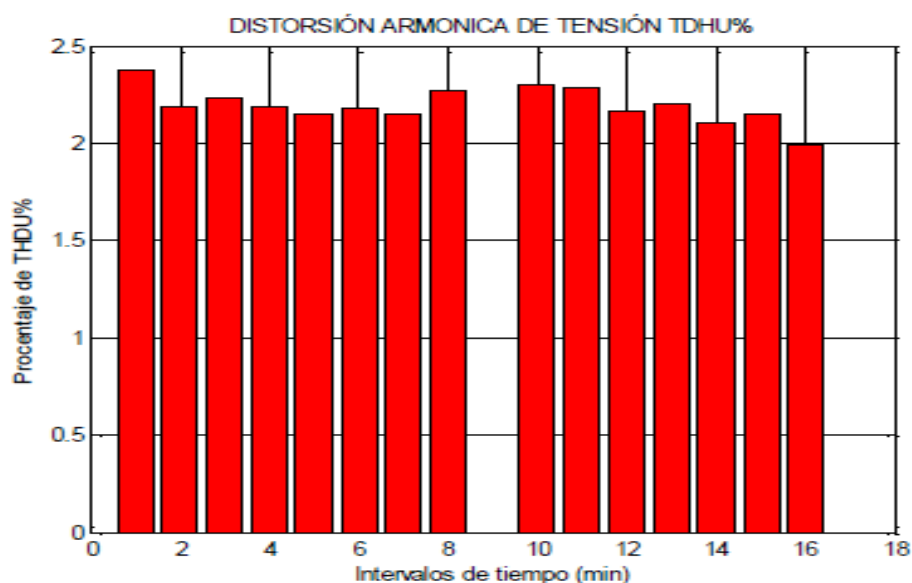


Fuente: Propia.

Con las medidas de la señal eléctrica BT y su FFT tomadas con el Cassy Lab II, desde su componente software se extraen las amplitudes de los armónicos desde el fundamental (60 Hz) hasta el 16<sup>o</sup> (960Hz) en un archivo en Excel para cada intervalo de un segundo, con el fin de determinar la THDv de la señal. Los autores desarrollaron un algoritmo en el entorno de MATLAB, disponible en el Anexo A. Algoritmo Desarrollado en MATLAB.

El algoritmo desarrollado crea una matriz con las amplitudes de los armónicos de tensión e implementa la fórmula (4) para determinar la THDv en el intervalo de tiempo que comprende la medición. A continuación se presenta un diagrama de barras (figura 17), donde se ilustra la THDv.

**Figura 17.** THDv medida en el laboratorio de Máquinas.



Fuente: Propia.

El indicador de THDv se obtuvo tomando medidas de la señal eléctrica en un intervalo de 1 segundo cada 5 minutos, con una frecuencia de muestreo de 2 KHz durante 1 Hora (ver figura 17). El THDv tiene un comportamiento estable durante las medidas, su amplitud encuentra entre 2 y 2.5 %. Para el caso de la novena medida no aparece un valor de THDv a causa de la caída de tensión en una de las fases en ese instante.

### 3.2 PASO 2: MONTAJE EN LOS TRANSFORMADORES T2767 Y T2769

Se realiza la solicitud de permisos a la CEO para intervenir en los transformadores T2767 y T2769. Estos permisos se autorizan entre julio y octubre de 2017 (ver tabla 5).

**Tabla 5.** Fechas otorgadas por CEO para la intervención de los transformadores de estudio

TRAFO T2767	TRAFO T2769
(10 de Julio – 28 de Julio) de 2017	(03 de Octubre – 27 de Octubre) de 2017

Fuente: Propia.

Se realizan las siguientes conexiones en los transformadores T2769 y T2767:

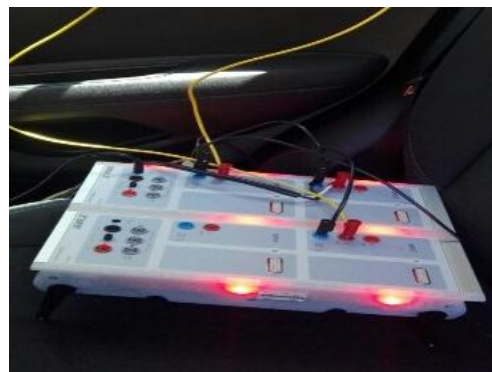
1. Se conecta las fases (Neutro y X) de los trafos en estudio mediante una extensión de cable 4x10 AWM y un multitoma genérico. De esta forma se cuenta con un punto dónde se puedan energizar el equipo y un computador con 120 V (Ver figura 2.8 (a) y (b)).
2. Se dispone a conectar el equipo Cassy Lab II con su correspondiente regulador de tensión y el computador desde el multitoma General.
3. Se conecta el Cassy Lab II al computador por medio de un cable USB Tipo B.
4. Se conectan cada una de las fases de los trafos en estudio a las entradas analógicas del equipo dejando el montaje listo para realizar las mediciones de tensión en BT (Ver figura 19 (a) y (b)).

En la figura 18 (a) y (b) se muestra el Cassy Lab II energizado tomando como fuente de alimentación las fases (Neutro y X), dejando el equipo listo para el funcionamiento. En la figura 19 (a) y (b) se ilustran las conexiones desde las fases de los transformadores hasta el equipo Cassy Lab II, el color amarillo corresponde a la fase X, el color azul a la fase Y y el color rojo a la fase Z.

**Figura 18.** (a) Conexión fases (X, Y y Z) con las entradas analógicas del Cassy Lab II trafo T2769 y (b) Conexión fases (X, Y y Z) con las entradas analógicas del Cassy Lab II trafo T2767.



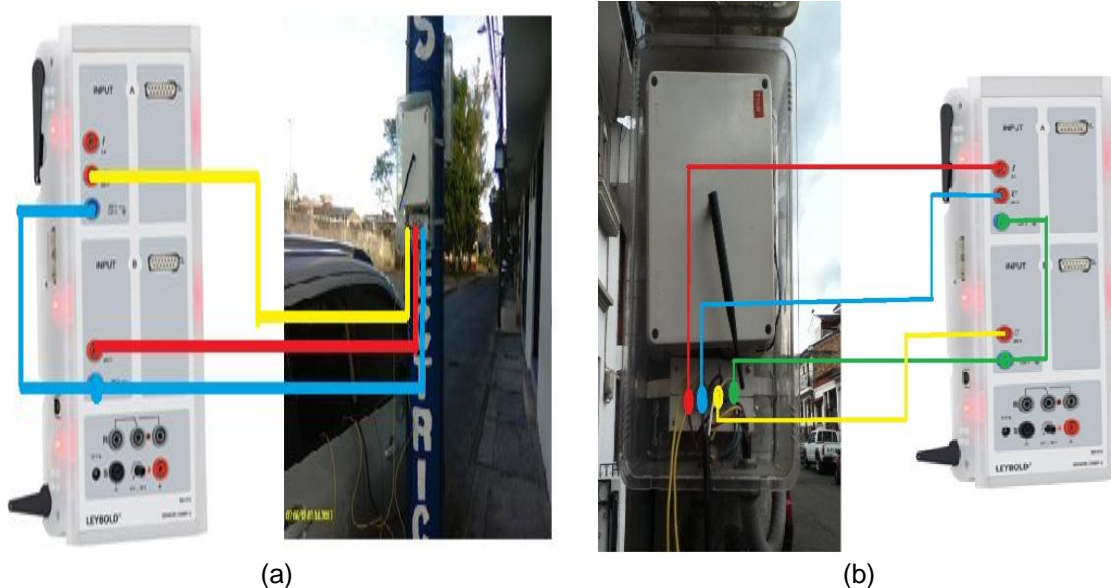
(a)



(b)

Fuente: Propia.

**Figura 19.** (a) Cassy Lab II energizado con las fases (Neutro y X) del trafo T2769 y (b) Cassy Lab II energizado con las fases (Neutro y X) del trafo T2767.



Fuente: Propia.

### 3.3 PASO 3 : MEDIDAS REALIZADAS EN LOS T2769 Y T2767

El registro de las medidas se realizó en los horarios establecidos para los transformadores T2767 y T2769 como se observa en la tabla 6.

**Tabla 6.** Días y hora de la semana en los cuales se realizaron las mediciones en BT (Baja Tensión), transformadores T2767 y T2769.

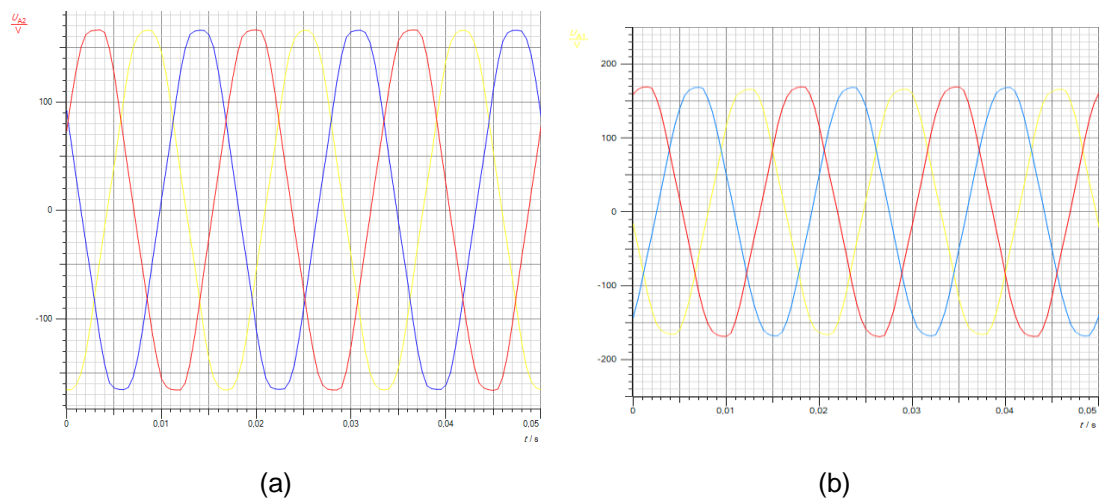
DÍA DE LA SEMANA	TRANSFORMADOR T2767	TRANSFORMADOR T2769
Miércoles	04 Octubre de 2017 – 6pm a 10pm	12 Julio de 2017 – 3pm a 7pm
Jueves	05 Octubre de 2017 – 10pm a 2am	13 Julio de 2017 – 7pm a 11pm
Viernes	06 Octubre de 2017 – 11am a 3pm	14 Julio de 2017 – 11pm a 3am
Sábado	07 Octubre de 2017 – 2am a 6am	15 Julio de 2017 – 3am a 7am
Domingo	08 Octubre de 2017 – 6am a 10am	
Lunes	09 Octubre de 2017 – 3pm a 7pm	17 Julio de 2017 – 7am a 11am
Martes		18 Julio de 2017 – 11am a 3pm

Fuente: Propia.

Se realizan las medidas de la señal eléctrica en BT (Baja Tensión) en los transformadores T2769 y T2767. El equipo entrega mediciones de la señal eléctrica en el dominio del tiempo y su correspondiente FFT, necesaria para el

cálculo del contenido espectral. Para calcular los indicadores de THDv y Dhv, se usa el algoritmo en MATLAB (ver Anexo B. Graficas contenido espectral transformadores T2769 y T2767), se utilizan las amplitudes de los armónicos en el dominio de frecuencias (). La toma de medidas se realizó en los días mencionados en la tabla 6 para los transformadores en estudio. Por cada intervalo de 4 horas se realizan 25 medidas, una cada 10 minutos. Cada medida corresponde a un intervalo de la señal de 1 segundo que a frecuencia de muestreo de 2KHz corresponde a 2001 datos por segundo de la señal. Cada dato es un valor numérico de tipo real. En la figura 20 (a) y (b) se ilustran la medida No.25, esto en un intervalo de un segundo de la señal de BT de los trafos T2769 y T2767, en el intervalo de 4 horas del 12 julio y 04 de Octubre de 2017.

**Figura 20.** (a) Señal en el dominio del tiempo trafa T2767 día Miércoles 04 de Octubre y (b) Señal en el dominio del tiempo trafa T2769 día Miércoles 12 de Julio.

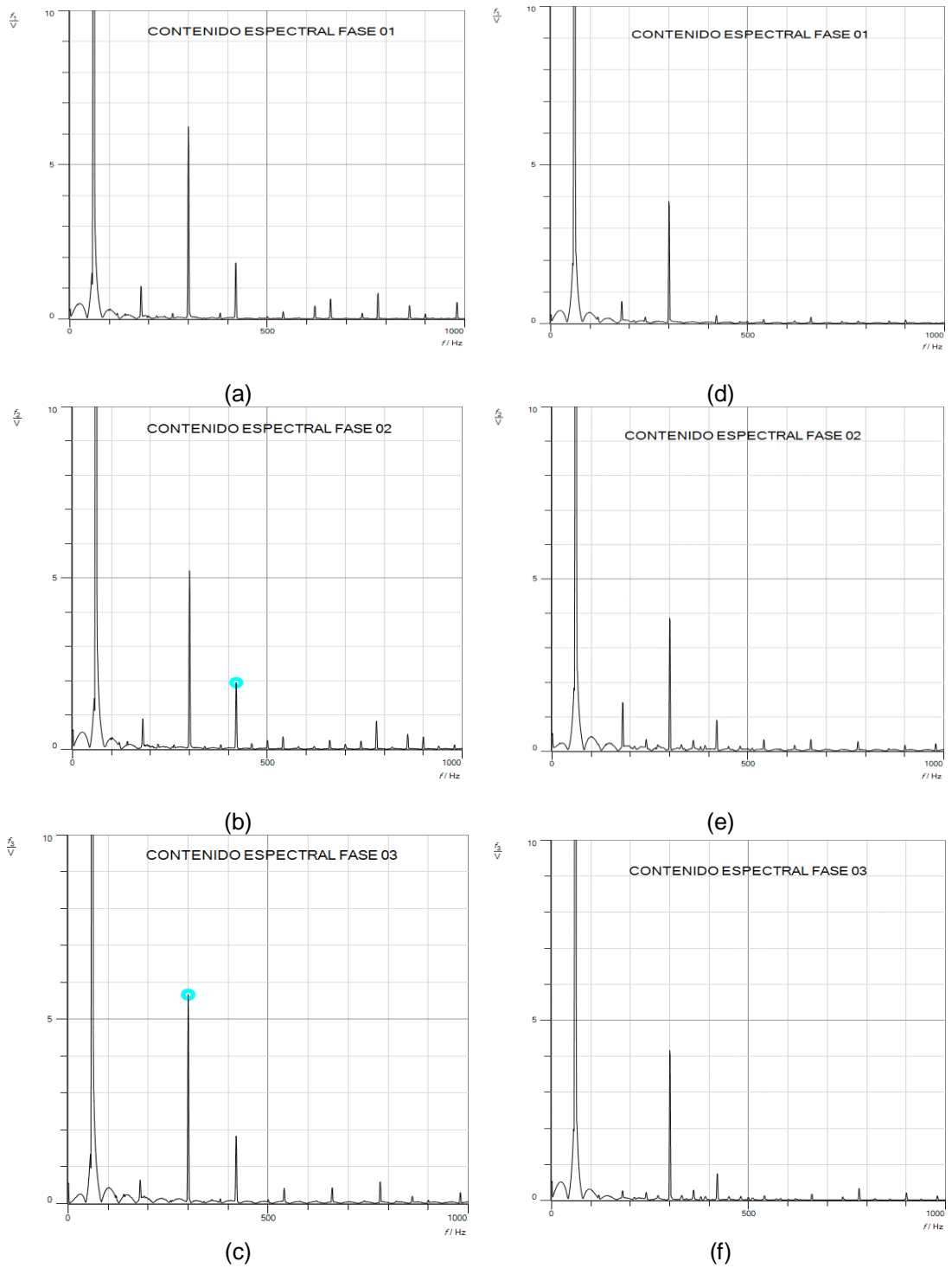


Fuente: Propia.

### 3.4 PASO 4: ANALIZAR EL CONTENIDO ESPECTRAL DE LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

A continuación, se ilustra el contenido espectral de la señal de BT (Baja Tensión), para cada una de las tres fases (X, Y y Z) en los transformadores T2767 y T2769.

**Figura 21.** (a), (b) y (c) Contenidos espectrales fases (X, Y y Z) Transformador T2769 [Fuente propia]. (d), (e) y (f) contenidos espectrales fases (X, Y y Z) Transformador T2767.



Fuente: Propia.

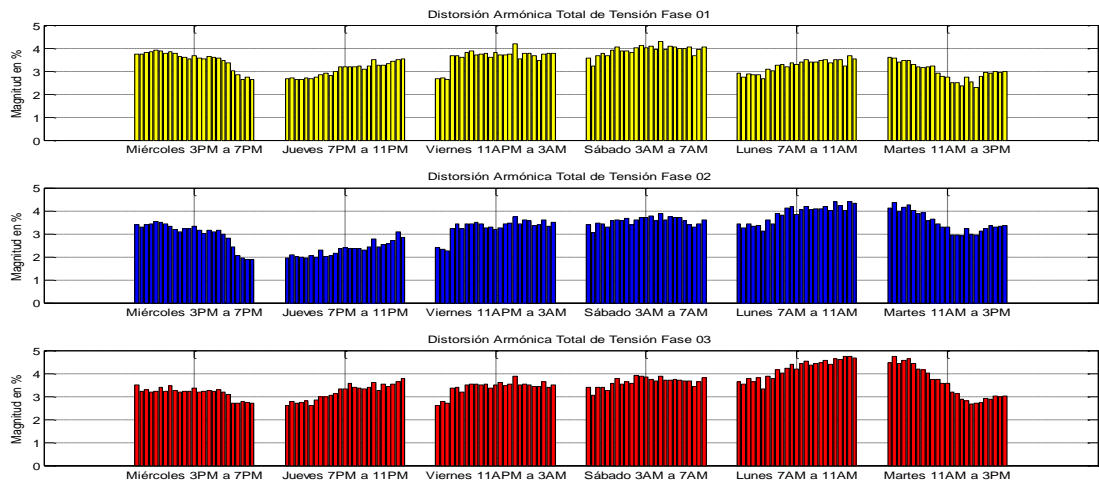
El contenido espectral para los transformadores T2769 y T2767 en cada una de sus fases (X, Y y Z) se ilustra en la figura 21 (a), (b), (c), (d), (e) y (f) para los días miércoles 12 de Julio d 2017 de 3:00 pm a 7:00 pm y miércoles 04 de Octubre de 2017 de 6:00 pm a 10:00 pm, respectivamente. Las gráficas del contenido espectral se obtienen por medio de la función FFT del Cassy Lab II. En ellas se observa desde el armónico fundamental de 60 Hz hasta el 16vo armónico de 960 Hz. Para mayor detalle sobre los contenidos espectrales ver Anexo J. El equipo Cassy Lab II permite visualizar los valores numéricos de tensión y frecuencia de cada una de las medidas, ver Anexo J. Amplitudes de los armónicos, analizando estos valores numéricos se puede determinar la amplitud en tensión de cada uno de los armónicos del espectro de frecuencias. Para mayor detalle sobre las amplitudes en tensión de los armónicos de la señal de BT ver Anexo k.

Analizando las amplitudes de tensión de los armónicos para los transformadores de estudio (ver Anexo K) se determina que los de mayor aporte al contenido espectral son el 3ro, 5to, y 7mo, como se ilustra en todas las gráficas del contenido espectral de la señal de B (ver Anexo J). A medida que la frecuencia de cada armónico aumenta, la amplitud debe disminuir; en los contenidos espectrales se observa específicamente que el 5to armónico tiene una mayor amplitud que el 3ro. La presencia de estos tres armónicos como los de mayor aporte al contenido espectral, según la teoría [44], se debe a un problema con las conexiones de la red de distribución, específicamente malas conexiones con las líneas de puesta a tierra en los medidores de tensión de los usuarios. Por estas malas conexiones de tierra se presenta un retorno de corriente parasita por la línea de neutro, afectando directamente la vida útil de los transformadores de distribución y la calidad de energía eléctrica suministrada por el operador de red, en este caso la CEO [10].

### **3.5 PASO 5: CALCULO Y ANÁLISIS DE LOS INDICADORES THDV Y DHV**

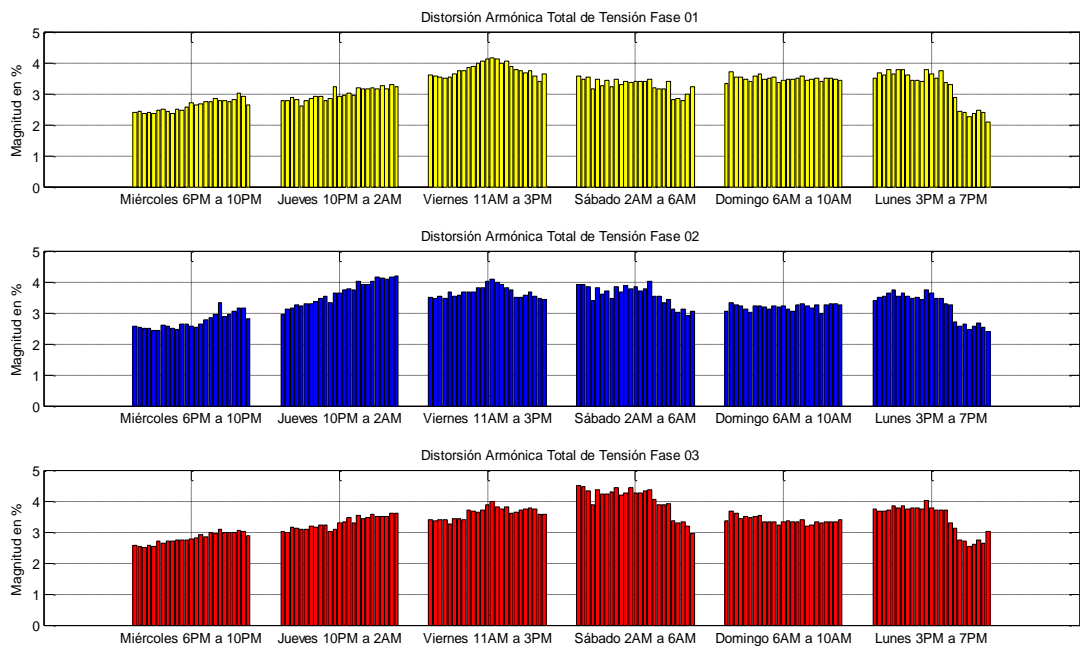
Los indicadores de THDv y Dv se determinan mediante el algoritmo desarrollado en MATLAB (ver Anexo F). En las figuras 22 y 23 se ilustra la evolución del THDv para cada uno de los transformadores de estudio en diferentes días de la semana y diferentes horas del día.

**Figura 22.** THDv (Distorsión Armónica Total de Tensión) Transformador T2769.



Fuente: Propia.

**Figura 23.** THDv (Distorsión Armónica Total de Tensión) Transformador T2767.



Fuente: Propia.

**Estrategia 1.** Utilizando el algoritmo desarrollado en MATLAB (ver Anexo F), se promedian los porcentajes de THDv para cada una de las fases (X, Y y Z)



de los transformadores de estudio (ver tablas 7 y 8), en los intervalos mencionados en la tabla 6, que son los mismos para cada fase (X, Y y Z). Se realiza la comparación entre los promedios de porcentaje de THDv y las figuras 22 y 23. De esta manera se determina el día y el intervalo de horas dónde existe menor contenido de THDv el cual hace referencia al ruido eléctrico presente en la red de distribución de BT.

**Tabla 7.** Promedio de porcentaje de DTHv para las fases (X, Y y Z) en diferentes días de la semana Transformador T2769.

DÍA	FASE 01 (%)	FASE 02 (%)	FASE 03 (%)	PROMEDIO
Miércoles	3.50	3.00	3.16	3.22
Jueves	3.05	2.32	3.19	2.85
Viernes	3.61	3.28	3.40	3.28
Sábado	3.91	3.55	3.62	3.45
Lunes	3.23	3.87	4.20	3.76
Martes	2.98	3.50	3.57	3.35
Promedio	3.38	3.25	3.52	

Fuente: Propia.

**Tabla 8.** Promedio de % DTHv para las fases (X, Y y Z) en diferentes días de la semana Transformador T2767.

DÍA	FASE 01 (%)	FASE 02 (%)	FASE 03 (%)	PROMEDIO
Miércoles	2.61	2.72	2.80	2.71
Jueves	2.99	3.65	3.30	3.31
Viernes	3.78	3.66	3.61	3.68
Sábado	3.28	3.57	4.03	3.62
Domingo	3.49	3.20	3.38	3.35
Lunes	3.21	3.21	3.43	3.28
Promedio	3.22	3.33	3.42	

Fuente: Propia.

**Estrategia 2:** Cada intervalo en la estrategia anterior corresponde a un bloque de cuatro horas, en cada hora se realizaron seis medidas, una cada 10 minutos. Se promedian esta seis medidas para obtener un THDv en cada hora, con el fin de realizar un análisis más detallado del THDv y determinar la hora en donde se presenta menor contenido de ruido eléctrico (ver tablas 9 y 10).

**Tabla 9.** Promedio de THDV por Hora para el transformador T2769.

HORA	FASE 01 (%)	FASE 02 (%)	FASE 03 (%)
3pm-4pm	3,8	3,4	3,3
4pm-5pm	2,6	2,0	2,7
5pm-6pm	3,1	2,8	3,0
6pm-7pm	3,6	3,3	3,3
7pm-8pm	2,8	3,3	3,6
8pm-9pm	3,4	4,1	4,5
9pm-10pm	3,6	3,2	3,2
10pm-11pm	2,9	2,1	3,0
11pm-12am	3,7	3,3	3,4
12am-1am	3,9	3,5	3,7
1am-2am	3,1	3,8	4,0
2am-3am	3,0	3,6	3,8
3am-4am	3,5	3,1	3,2
4am-5am	3,1	2,3	3,3
5am-6am	3,7	3,4	3,5
6am-7am	4,0	3,7	3,7
7am-8am	3,4	4,0	4,4
8am-9am	2,5	3,0	3,0
9am-10am	2,9	2,2	2,8
10am-11am	3,3	2,7	3,5
11am-12pm	3,7	3,4	3,4
12pm-1pm	3,9	3,5	3,6
1pm-2pm	3,4	4,2	4,6
2pm-3pm	2,8	3,2	2,8

Fuente: Propia.

**Tabla 10.** Promedio de THDV por Hora para el transformador T2767.

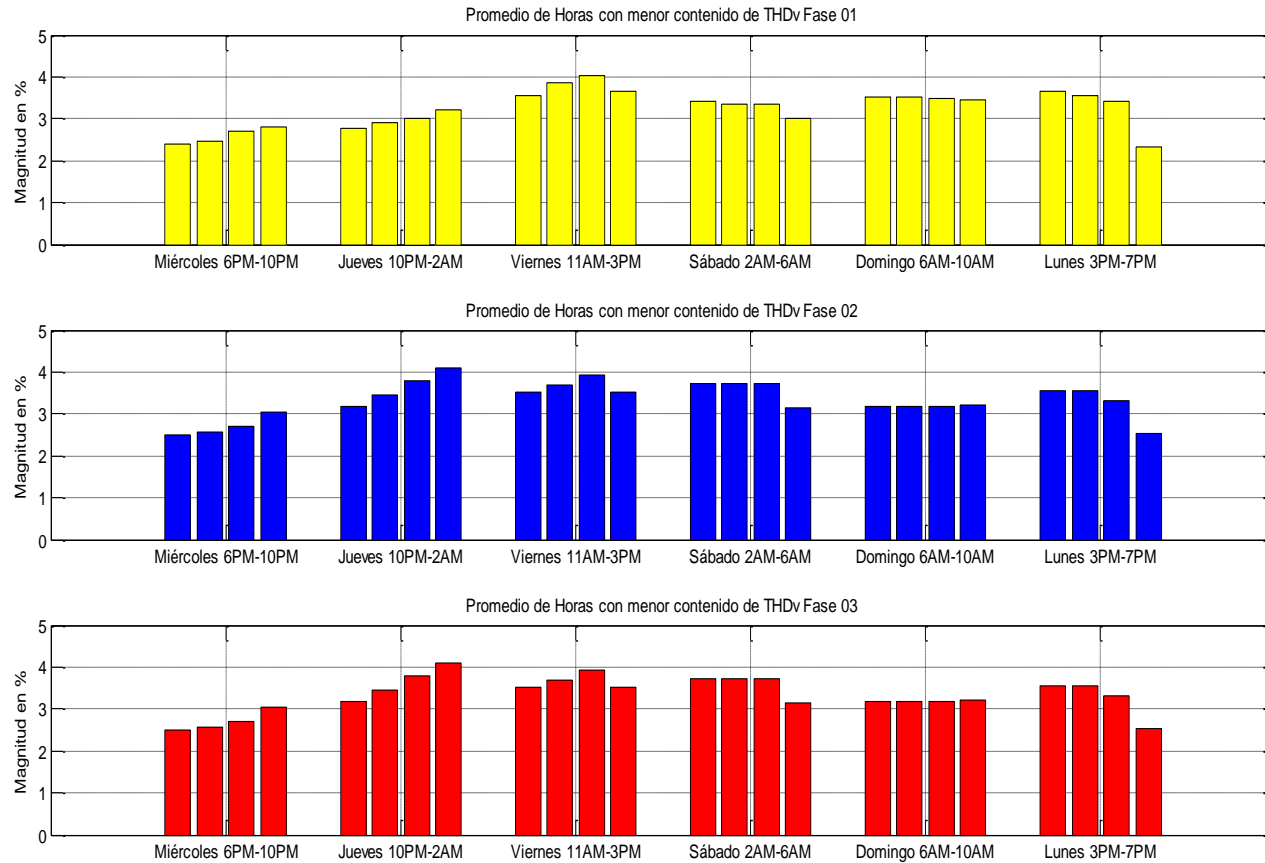
HORA	FASE 01 (%)	FASE 02 (%)	FASE 03 (%)
3pm-4pm	2,3	2,4	2,4
4pm-5pm	2,7	3,1	3,1
5pm-6pm	3,5	3,5	3,5
6pm-7pm	3,4	3,7	3,7
7pm-8pm	3,5	3,1	3,1
8pm-9pm	3,6	3,5	3,5
9pm-10pm	2,4	2,5	2,5
10pm-11pm	2,9	3,4	3,4
11pm-12am	3,8	3,6	3,6
12am-1am	3,3	3,7	3,7
1am-2am	3,5	3,1	3,1
2am-3am	3,5	3,5	3,5
3am-4am	2,7	2,7	2,7

4am-5am	3,0	3,8	3,8
5am-6am	4,0	3,9	3,9
6am-7am	3,3	3,7	3,7
7am-8am	3,4	3,1	3,1
8am-9am	3,4	3,3	3,3
9am-10am	2,8	3,0	3,0
10am-11am	3,2	4,0	4,0
11am-12pm	3,6	3,5	3,5
12pm-1pm	3,0	3,1	3,1
1pm-2pm	3,4	3,21	3,2
2pm-3pm	2,3	2,5	2,5

Fuente: Propia.

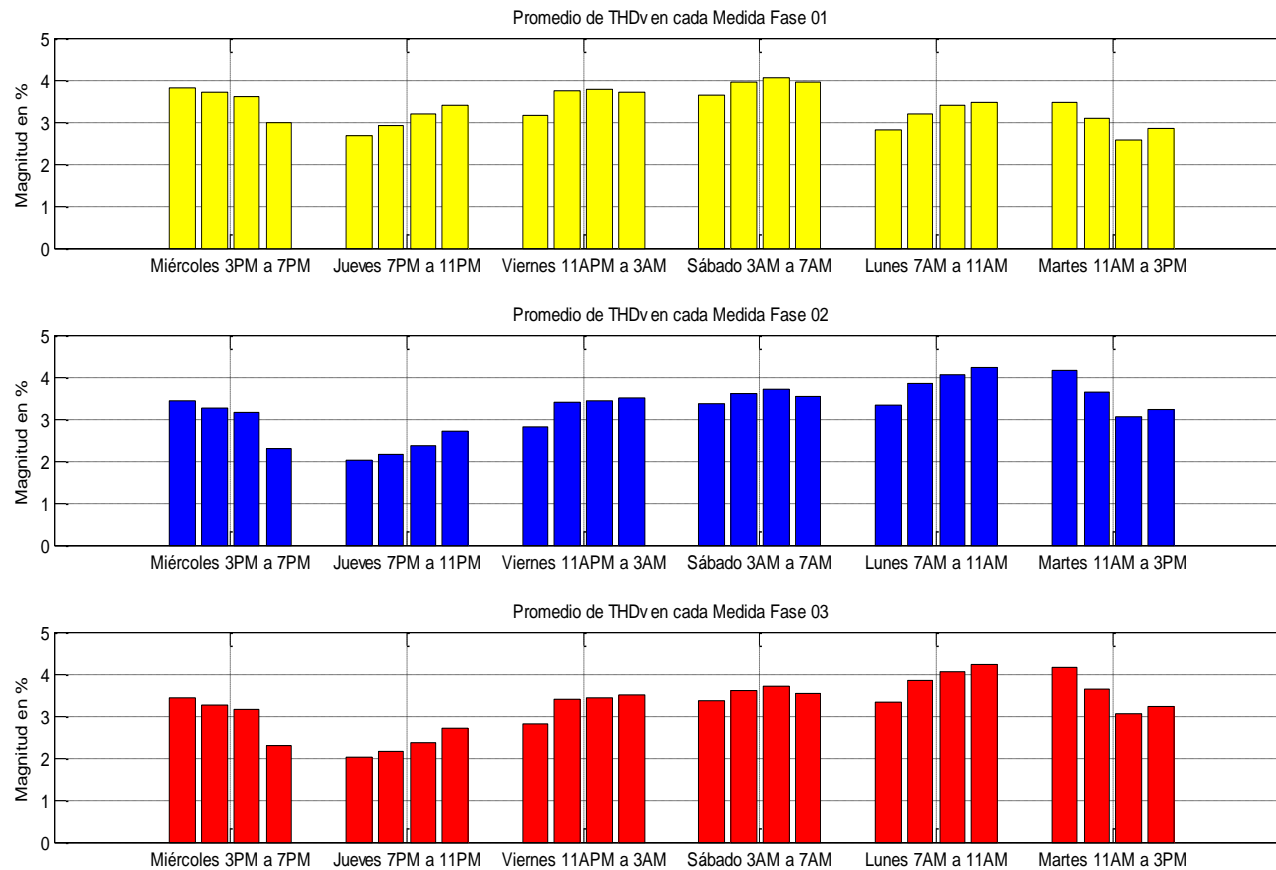
Con los promedio de THDv para cada fase y para las diferentes horas en los transformadores de estudio, se realiza la gráfica por fases y hora (ver figuras 24 y 25).

**Figura 24.** Promedio de % de THDv para cada hora del transformador T2767.



Fuente: Propia.

**Figura 25.** Promedio de % de THDv para cada hora del transformador T2769.



Fuente: Propia.

Se determina el día y la fase menos contaminada de los transformadores en estudio, como se muestra en las tablas 11 y 12.

**Tabla 11.** Menor % THDv para el Transformador T2769.

<b>T2769</b>	<b>FASE X</b>	<b>FASE Y</b>	<b>FASE Z</b>
<b>Día</b>	<b>Jueves</b>	<b>Jueves</b>	<b>Jueves</b>
<b>Hora</b>	7:00pm -11:00pm	7:00pm – 11:00pm	7:00 pm – 11:00 pm
<b>Promedio % THDv</b>	3.05	2.32	3.19

Fuente: Propia.

**Tabla 12.** Menor % THDv para el Transformador T2767.

<b>T2767</b>	<b>FASE X</b>	<b>FASE Y</b>	<b>FASE Z</b>
<b>Día</b>	<b>Miércoles</b>	<b>Miércoles</b>	<b>Miércoles</b>
<b>Hora</b>	6:00 pm -10:00 pm	6:00 pm -10:00 pm	6:00 pm -10:00 pm
<b>Promedio % THDv</b>	2.61	2.72	2.80

Fuente: Propia.

Analizando el promedio de menor contenido de THDv (tabla 11), que se encuentra presente en el intervalo de 7:00pm -11:00 pm el día Jueves 13 de Julio de 2017, para las tres fases del trafo T2769 con un porcentaje de THDv promedio entre 2.32<3.19 %. En la tabla 12 se observa que el día Miércoles 04 de Octubre de 2017 es el día ideal para enviar información por la red de BT en el intervalo de 6:00pm – 10:00 pm, debido al bajo contenido de THDv presente en las tres fases con un porcentaje de THDv promedio entre 2.61 <2.80 %. Con los promedio de THDv por horas, se determina el sub intervalo con menor contenido de THDv para los transformadores de estudio (ver tablas 13 y 14)

**Tabla 13.** Menor porcentaje de THDv por horas para el transformado T2767.

<b>T2767</b>	<b>FASE X</b>	<b>FASE Y</b>	<b>FASE Z</b>
<b>Día</b>	<b>Lunes</b>	<b>Lunes</b>	<b>Lunes</b>
<b>Hora</b>	3:00 pm -4:00 pm	3:00 pm -4:00 pm	3:00 pm -4:00 pm
<b>Promedio % THDv por Hora</b>	2,3	2,4	2,4

Fuente: Propia.

**Tabla 14.** Menor % de THDv por horas para el transformado T2769.

T2767	FASE X	FASE Y	FASE Z
Día	Martes	Jueves	Jueves
Hora	1:00 am -2:00 am	7:00 pm -8:00 pm	7:00 pm -8:00 pm
Promedio % THDv por Hora	2,5	2,0	2,7

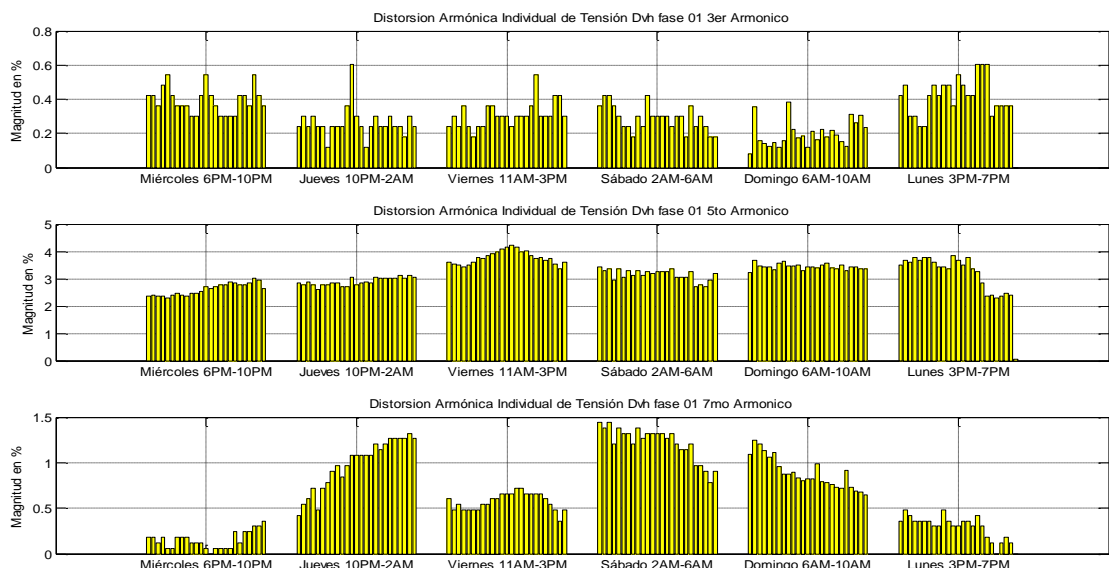
Fuente: Propia.

Analizando los subintervalos de la tabla 13 y 14, se determina la hora con menor contenido de THDv para las tres fases de los transformadores de estudio. En los intervalos de una hora donde se presenta menor contenido de THDv, son ideales para enviar información por la red de BT.

### 3.6 DISTORSIÓN ARMÓNICA INDIVIDUAL DE TENSIÓN (Dhv)

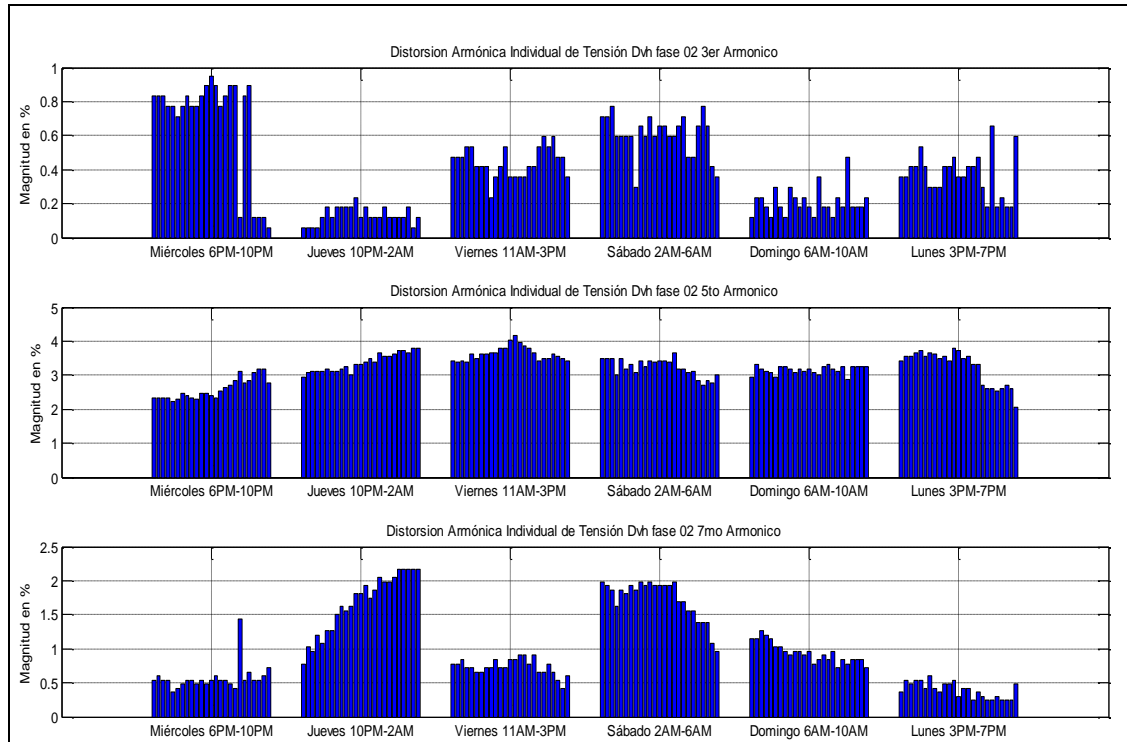
Con las amplitudes de los armónicos de mayor aporte al contenido espectral en los transformadores T2769 y T2767 (ver Anexo J) se implementa la formula (2) en el algoritmo de MATLAB, obteniendo la Dhv para cada una de las fases. (ver figuras 26 – 31).

**Figura 26.** Dhv fase 01. Transformador T2769.



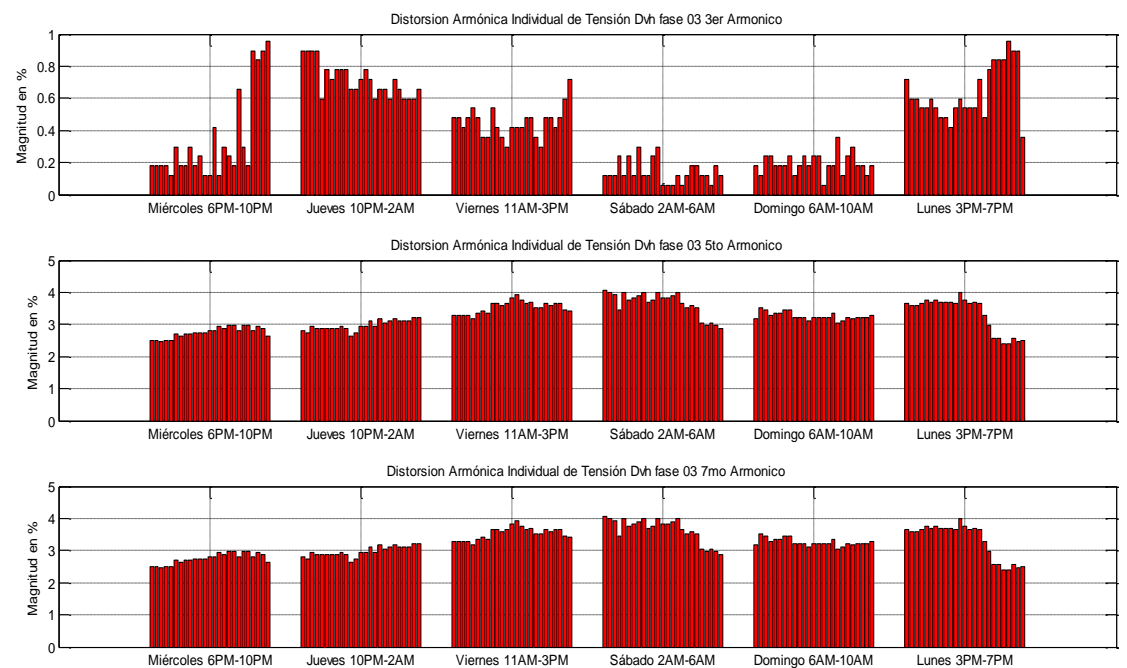
Fuente: Propia.

**Figura 27.** Dhv (Distorsión Armónicos Individual de Tensión), Fase 02. Transformador T2769.



Fuente: Propia.

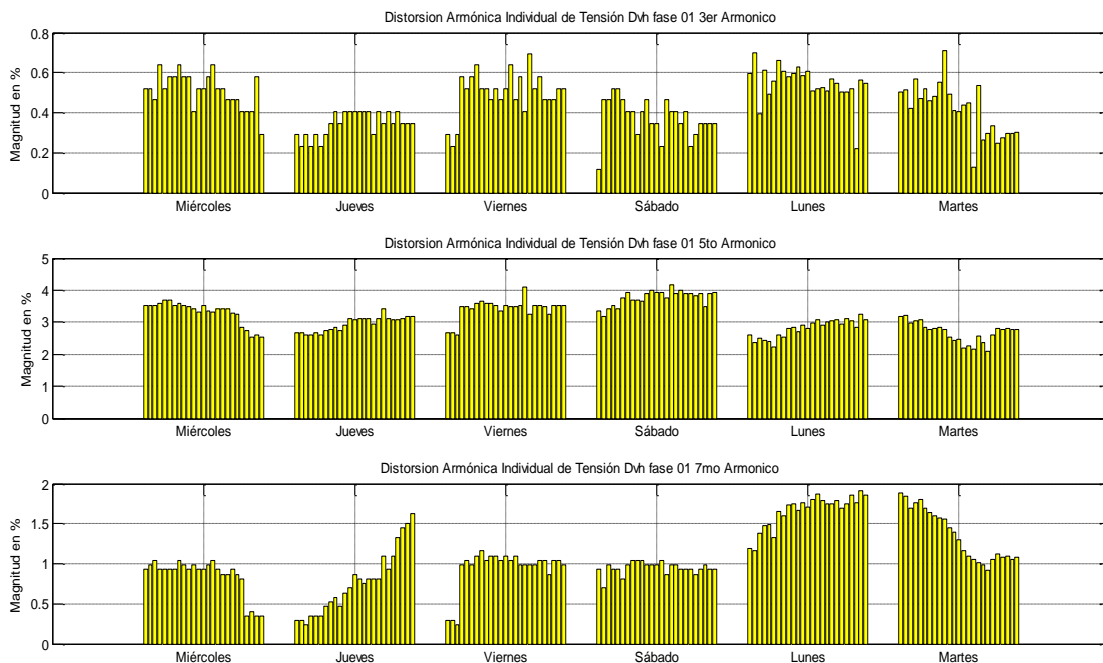
**Figura 28.** Dhv (Distorsión Armónicos Individual de Tensión), Fase 03. Transformador T2769.



Fuente: Propia.

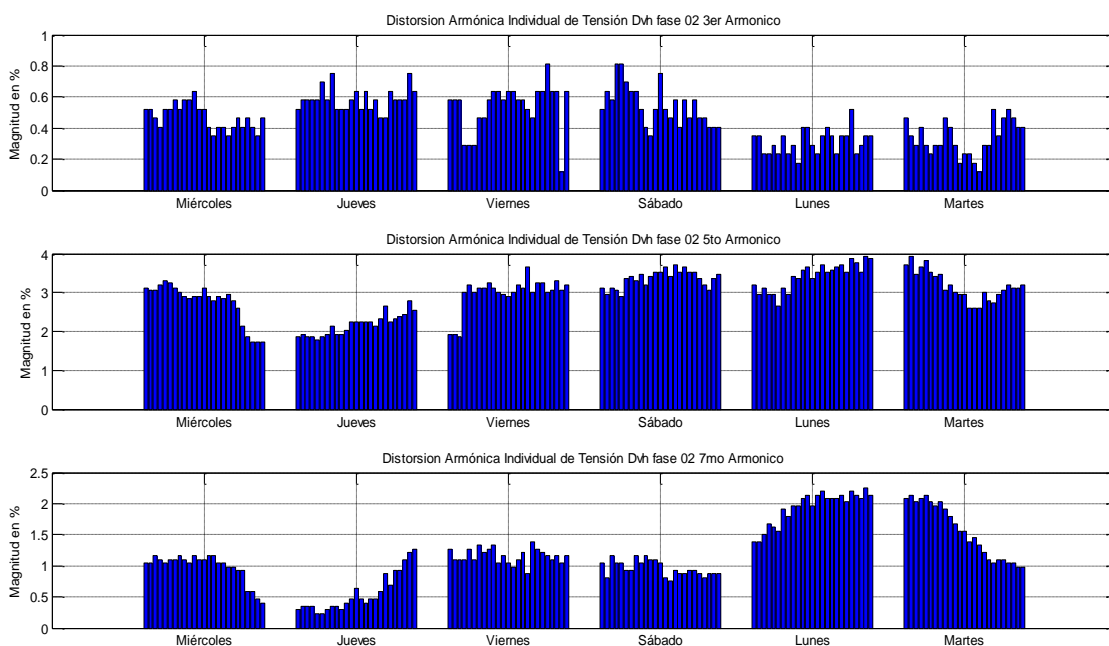


**Figura 29.** Dhv (Distorsión Armónicas Individual de Tensión), Fase 01. Transformador T2767.



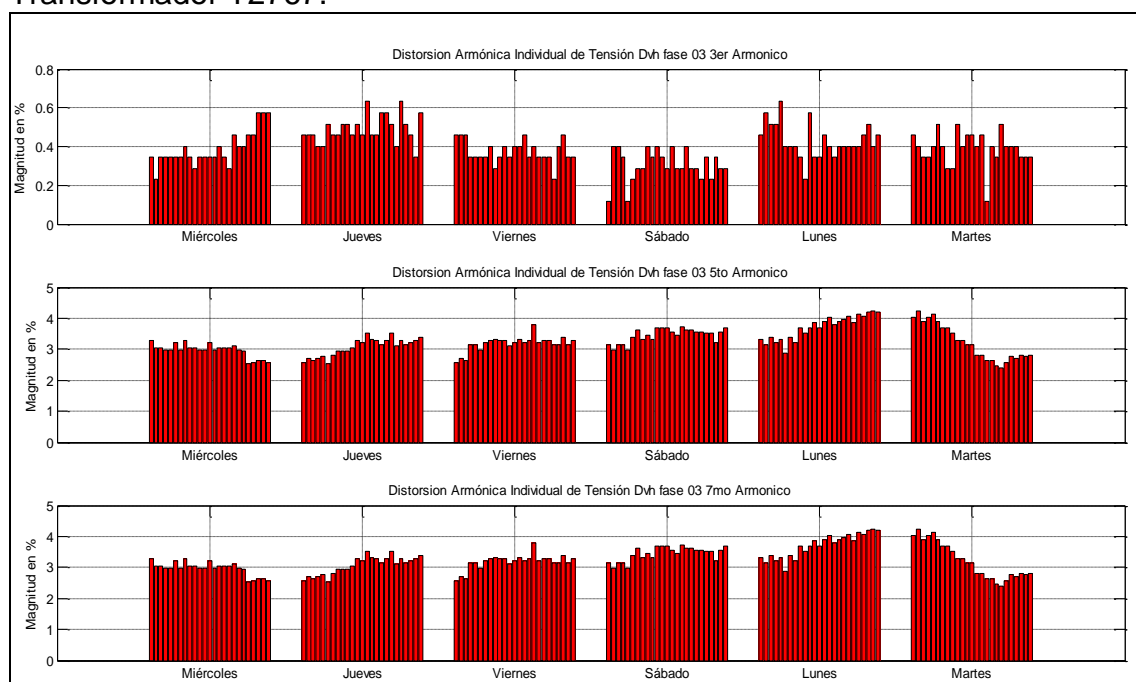
Fuente: Propia.

**Figura 30.** Dhv (Distorsión Armónicas Individual de Tensión), Fase 02. Transformador T2767.



Fuente: Propia.

**Figura 31.** Dhv (Distorsión Armónicas Individual de Tensión), Fase 03. Transformador T2767.



Fuente: Propia.

Los transformadores de estudio se encuentran ubicados en diferentes lugares, como se menciona en el Anexo E, con diferentes tipos de usuarios conectados a ellos. En las figuras 26 – 31 se observa los armónicos de tensión de la señal de BT con mayor aporte al contenido espectral y su correspondiente amplitud en porcentaje de voltios para el indicador de Dhv. Se presenta la THDv y la Dhv, en porcentajes para cada una de las fases y cada uno de los transformadores de estudio, ver tablas 15 y 16.

**Tabla 15.** Mediciones tomadas de THDv y Dhv Transformador T2769.

FASE	X	Y	Z
THDv%	3.38	3.25	3.52
H3%	0.44	0.46	0.39
H5%	3.11	2.93	3.22
H7%	0.97	1.07	1.03
H13%	0.30	0.30	0.25

Fuente: Propia.

**Tabla 16.** Mediciones tomadas de THDv y Dhv Transformador T2767.

<b>FASE</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
THDv%	3.23	3.36	3.42
H3%	0.28	0.41	0.36
H5%	3.09	3.08	3.15
H7%	0.74	1.09	1.11
H13%	0.13	0.20	0.21

Fuente: Propia.

En los resultados obtenidos (tablas 15 y 16) se observan los mayores porcentajes de THDv. Se deben tener en cuenta los armónicos con mayor aporte al contenido espectral y con mayor amplitud en los indicadores de tensión para mitigarlos mediante un filtro RLC. En este caso en particular, los armónicos de mayor aporte son el 5<sup>to</sup> y 7<sup>mo</sup> con frecuencias de 300 Hz y 420 Hz.

## 4 FILTRO RLC PASIVO SINTONIZADO

### 4.1 CALCULO DE ELEMENTOS DEL FILTRO PASIVO SINTONIZADO

Para eliminar la quinta y séptima armónica en los transformadores T2769 y T2767 se determinan los valores de los elementos inductivos y capacitivos del filtro sintonizado LC, para que de esta manera entre en resonancia a la frecuencia de 300 Hz y 420 Hz respectivamente. En el cálculo de los elementos del filtro se debe tener en cuenta los siguientes lineamientos:

- Una impedancia alta para la frecuencia fundamental (60 Hz) y así evitar un paso de corriente elevado a través de la rama del filtro.
- Resistencia interna de la bobina baja.

Se construyen dos filtros con diferentes valores de capacitores e inductores que cumplen los lineamientos propuestos anteriormente, con el fin de analizar cual tiene un mejor comportamiento ya que las resistencias internas de las bobinas son diferentes como se muestra en la tabla 17.

**Tabla 17.** Mediciones de THDv y Dhv Transformador T2767.

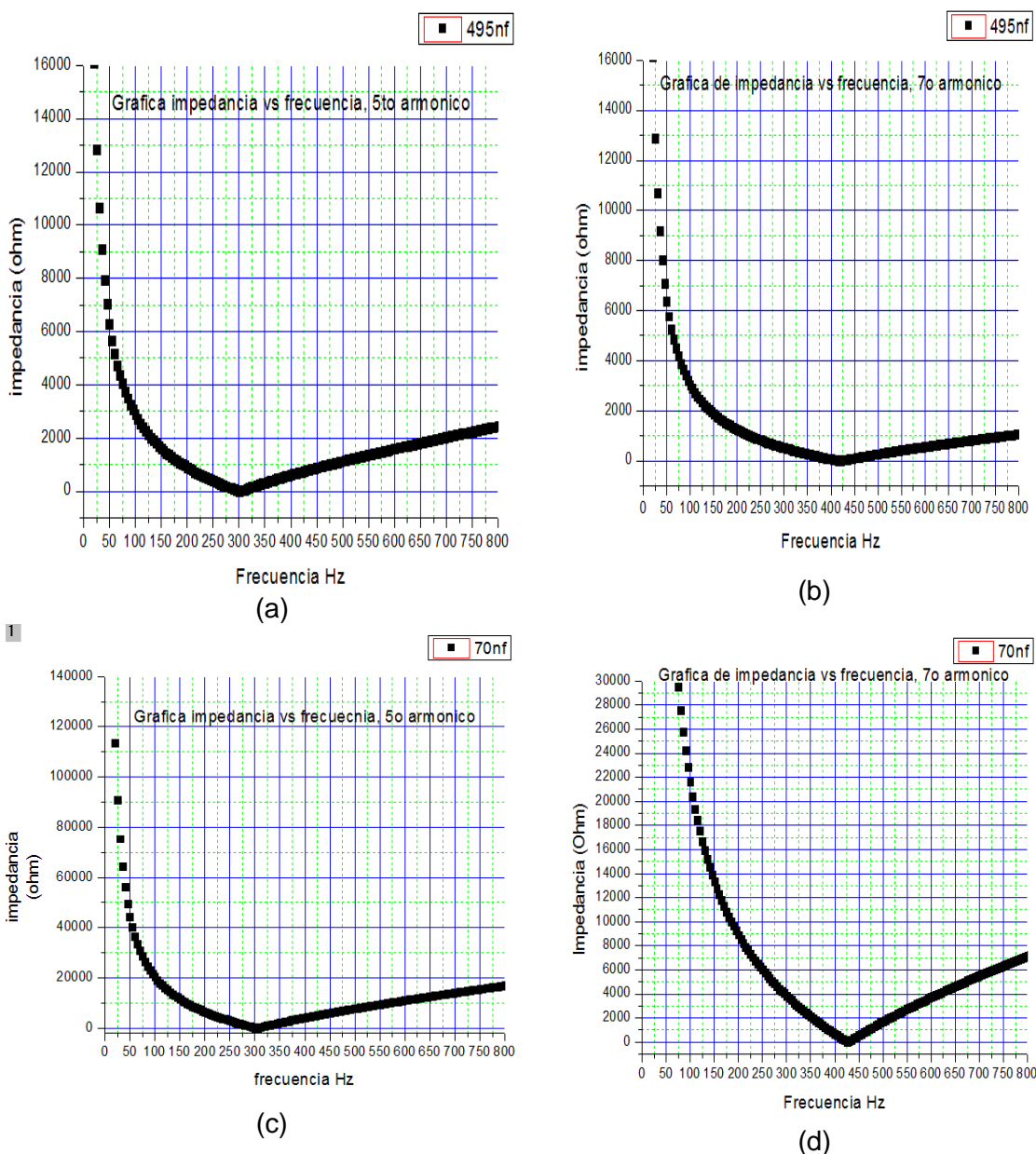
5 <sup>to</sup> ARMÓNICO DE 300HZ			7 <sup>mo</sup> ARMÓNICO DE 420 HZ		
Elemento	Filtro 1	Filtro 2	Elemento	Filtro 1	Filtro 2
L (H)	0.568	3.95	L (mH)	294	2.0
C (nF)	495	70	C (μF)	495	70
R (Ω)	0.029	217	R (Ω)	0.019	109.5

Fuente: Propia.

### 4.2 SINTONIZACIÓN DEL FILTRO

Se utiliza un generador de onda para realizar pruebas con los filtros diseñados. Se somete el filtro a un voltaje  $20 V_{pp}$  y se realiza un barrido de frecuencia entre 10 Hz y 500 Hz, midiendo la corriente en la rama del filtro hasta encontrar el valor más alto de corriente para así afinar los valores de inductancia o capacitancia. Como resultado de esta prueba se pudo comprobar el correcto funcionamiento de los filtros: este procedimiento preliminar se realiza tanto para el 5<sup>to</sup> como el 7<sup>mo</sup> armónico. A continuación se presenta una gráfica de respuesta en impedancia vs frecuencia para los diferentes valores de capacitores e inductores (ver figura 32).

**Figura 32.** Gráficas de impedancia vs frecuencia para (a) 5to armónico, capacitancia 495nf, (b) 7o armónico, capacitancia 495nf, (c) 5to armónico, capacitancia 70nf y (d) 7o armónico, capacitancia 70nf.



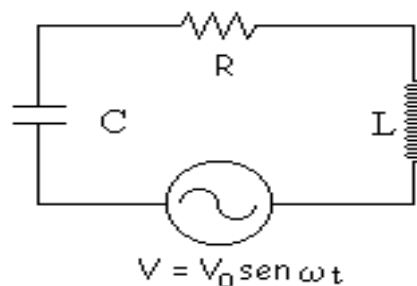
### 4.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA VALIDAR EL FILTRO PASIVO SINTONIZADO

Se plantea un diseño experimental que permita realizar pruebas y mediciones al diseño del filtro pasivo-sintonizado, del tal forma que se valide su funcionamiento. Se propone un diseño experimental de tres etapas. En la primera etapa se simula la red eléctrica conectada al filtro pasivo sintonizado usando un generador de señales, en la segunda se sustituye el generador por

la red eléctrica, y en la tercera etapa se construye un generador de onda con el integrado xr 2206cp. Se hacen mediciones de corriente, voltaje, amplitud de armónicos usando un osciloscopio DS1052E y el Cassy Lab II. Este diseño se organiza en una serie de tres etapas metódicas.

- Se hace el montaje del circuito de la figura 33, con un valor de capacitor de 70 nF, inductancia de 3.95 H conectados en serie, se realiza también para los valores de capacitor de 495 nF e inductor de 0.568 mH, donde se realizan medidas de corriente, voltaje y amplitud de los armónicos a frecuencias de 60, 300, 420 Hz, antes y después de los filtros, para cada uno de los sistemas propuestos se utiliza el generador de onda RIGOL DG1022

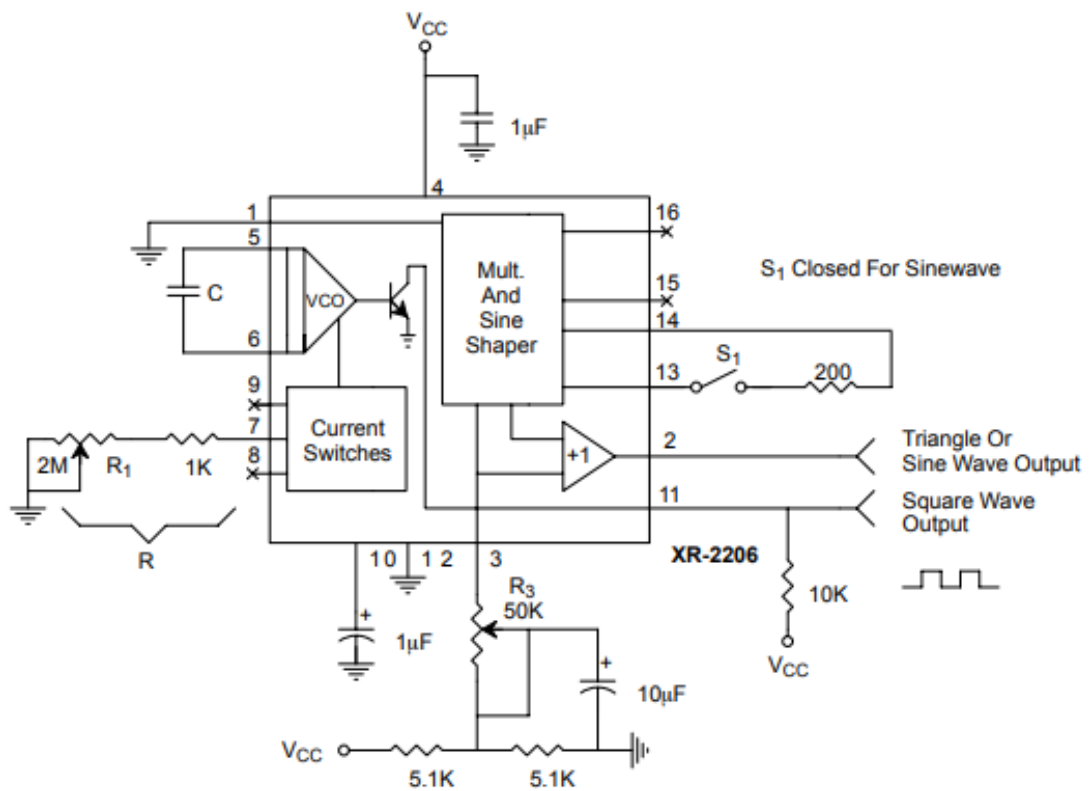
**Figura 33.** Filtro RLC pasivo.



Fuente: [11].

- Se sustituye el generador de onda de la figura 33, por la red eléctrica, se realizan medidas de corriente, voltaje y amplitud de los armónicos a frecuencias de 60, 300, 420 Hz antes y después de los filtros, para cada uno de los sistemas propuestos. En la realización de esta etapa no se observan cambios notables después de la implementación del filtro esto se debe a la alta potencia de la red eléctrica y no se logra obtener una baja impedancia en las frecuencias a mitigar, ya que solo depende de la resistencia interna de la bobina, por tal razón se procede a la etapa 3.
- Utilizando el integrado xr 2206cp (ver figura 34) se construye un generador de señales independiente de la red eléctrica, configurado a una frecuencia de 60hz y una amplitud de 3.72 Vpp. En el cual se realizan las medidas anteriormente descritas, antes y después de los filtros en donde sí se logran observar cambios significativos en las medidas.

**Figura 34.** Configuración integrado xr 2206 cp.

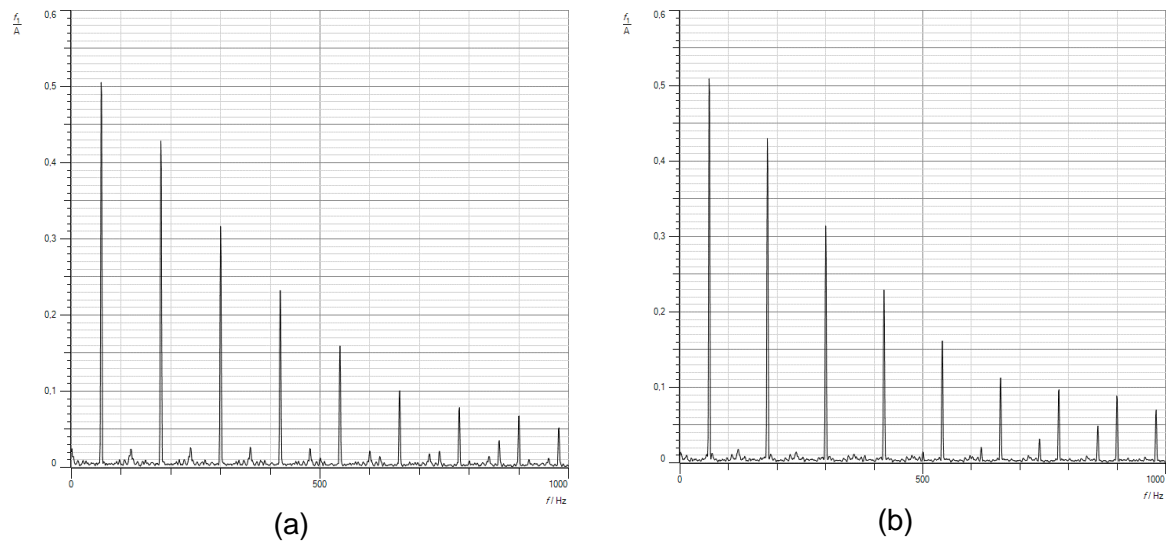


Fuente: [12]

#### 4.4 RESULTADOS OBTENIDOS

Del equipo Cassy Lab II se extraen las formas de onda en tensión y la descomposición armónica de tensión. Las medidas se realizan antes y después de la implementación el filtro RLC sintonizado. Se observa en la figura 35 (a) y (b) que tanto para las pruebas realizadas en la red eléctrica y el generador de ondas, no hay variaciones en las amplitudes de los armónicos de interés.

**Figura 35.** (a) Espectro sin filtro con el generador de onda y (b) espectro con filtro con el generador de onda.



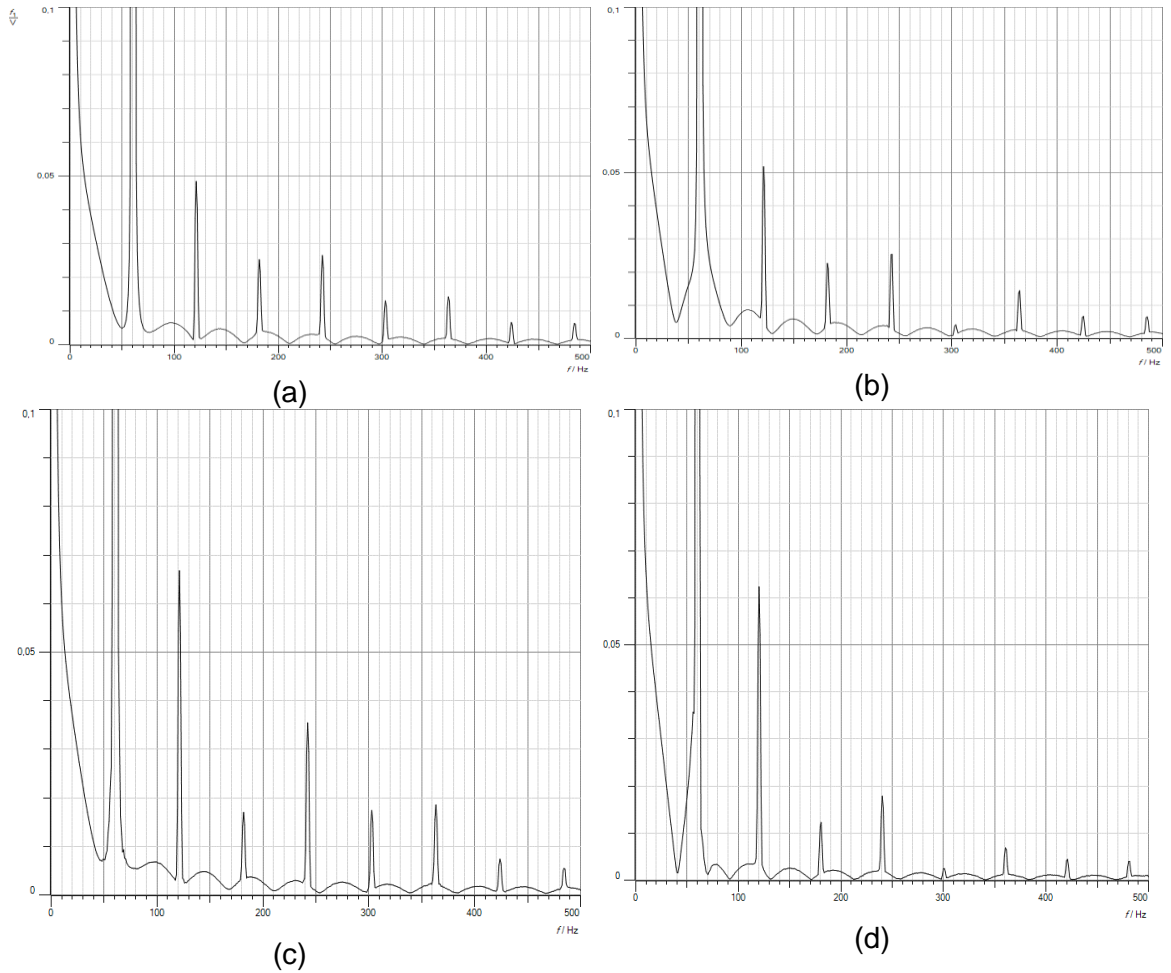
Fuente: Propia.

Como se observa, en los dos casos se podría explicar este fenómeno por la alta potencia que tiene la red eléctrica, ya que en valores cercanos al de la frecuencia de resonancia se necesita una muy baja impedancia, lo cual no se logró obtener por la resistencia interna de la bobina.

El objetivo de construir un generador de señales, con una batería como fuente de alimentación de baja potencia, es tener una señal libre del ruido eléctrico que pueda generarse por las cargas conectadas a la red de distribución. A continuación se muestran las gráficas de los espectros obtenidos para cada configuración antes y después de la implementación de los filtros. En las figuras 36 (a),(b),(c),(d) se muestran los espectros para mitigar la frecuencia de 300 Hz con las dos configuraciones de capacitancia e inductancia, en las figuras 37 (a),(b),(c) y (d) se muestran los espectros para la frecuencia de 420 Hz para cada configuración antes y después de la implantación del filtro.

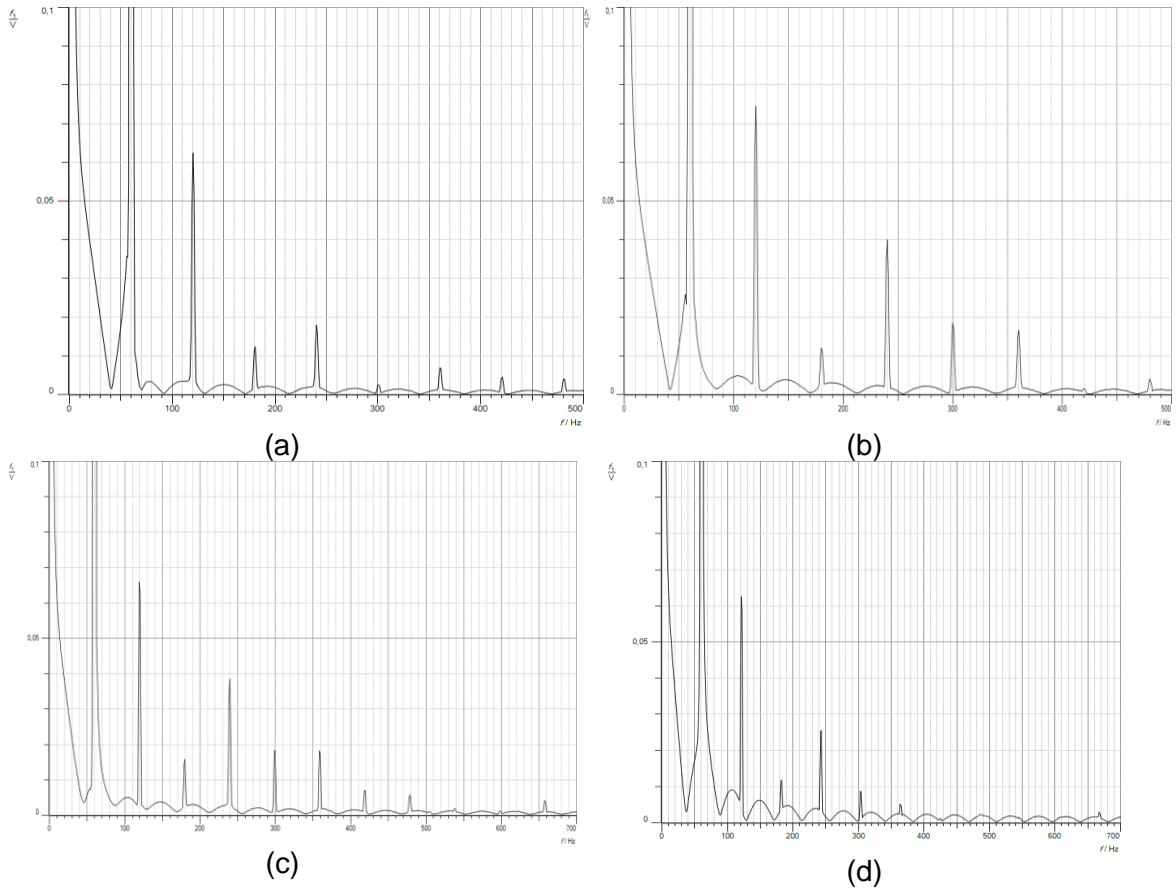


**Figura 36.** Espectro sin filtro para frecuencia de 300 Hz, capacitancia 70nf, (b) Espectro con filtro para frecuencia de 300 Hz, capacitancia 70nf, (c) Espectro sin filtro para frecuencia de 300 Hz, capacitancia 495nf y (d) Espectro con filtro para frecuencia de 300 Hz, capacitancia 495nf.



Fuente: Propia.

**Figura 37.** (a) espectro sin filtro para frecuencia de 420 Hz, capacitancia 70nf, (b) espectro con filtro para frecuencia de 420 Hz, capacitancia 70nf , (c) espectro sin filtro para frecuencia de 420 Hz, capacitancia 495nf y (d) espectro con filtro para frecuencia de 420 Hz, capacitancia 495nf..

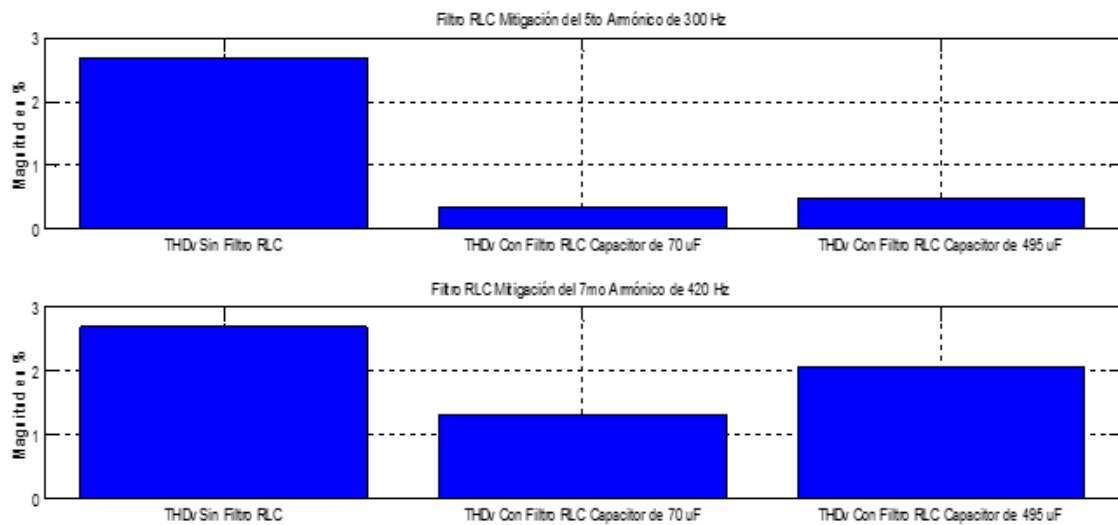


Fuente: Propia.

Implementando los filtros a la señal independiente, se observa una disminución de la amplitud de tensión de los armónicos en las frecuencias de estudio 300 Hz y 420 Hz. Teniendo en cuenta que el integrado XR2206 CP tiene una potencia máxima de salida de 750mW, se reafirma la hipótesis anterior, ya que este no puede mantener un voltaje constante en la amplitud de los armónicos a mitigar.

Utilizando el algoritmo en MATLAB, se obtiene el porcentaje de THDv antes y después de la implementación de los filtros (figura 38).

**Figura 38.** Porcentaje de THDV antes y después de la implementación del filtro para 300 y 420 Hz.



Fuente: Propia.

La disminución del porcentaje THDV implementando el filtro 1 es de 2.6% para la configuración de 300 Hz y de 1.5% para la configuración de 420 Hz (ver tabla 18). Esto corresponde a un 92.86% y 53.57% de reducción en la amplitud respectivamente. En la tabla 18 se observan los resultados para el filtro 2, en donde para la configuración de 300 Hz hay una disminución de 2.4% y para la configuración de 420 Hz hay una disminución de 0.8%, correspondientes a un % de filtrado de 85.7% y 28.57%.

**Tabla 18.** Resultados antes y después de la implementación del filtro.

	300 HZ SIN FILTRO		300 HZ CON FILTRO		420 HZ SIN FILTRO		420 Hz CON FILTRO	
			Filtro 1	Filtro 2			Filtro 1	Filtro 2
<b>Capacitor(nf)</b>			70	495			70	495
<b>Amplitud (V)</b>	0.0115	0.0174	0.0041	0.0006	0.0064	0.0071	0.0005	0.0011
<b>Vpp (V)</b>	3.76	3.92	3.76	3.80	3.72	3.88	3.72	3.86
<b>Vrms (V)</b>	1.30	1.36	1.30	1.32	1.28	1.34	1.28	1.31
<b>Corriente µA</b>			36	256			35	250

Fuente: Propia.

**Tabla 19.** Porcentaje THDv para armónico de 300 Hz y 420Hz

	<b>Sin filtro 1</b>	<b>Con filtro 1</b>
% THDv 5to armónico	2.8 %	0.2%
% THDv 7º armonico	2.8%	1.3%
	<b>Sin filtro 2</b>	<b>Con filtro 2</b>
% THDv 5to armónico	2.8%	0.4%
% THDv 7º armonico	2.8%	2%

Fuente: Propia.

En la tabla 17 se observan los valores de corriente que pasa por la rama de los filtros al ser implementados para la frecuencia de 300 Hz; con el filtro 1 se obtiene una corriente de 36  $\mu$ A y con el filtro 2 de 256  $\mu$ A. Para la frecuencia de 420 Hz con el filtro 1 se obtiene una corriente de 35  $\mu$ A y con el filtro 2 se obtiene una corriente de 250  $\mu$ A. De lo anterior se deduce que el filtro 1 tiene mejor comportamiento ya que al implantar el filtro el porcentaje THDv es menor, tiene menor consumo de corriente para las dos frecuencias que se desean mitigar y tiene mayor factor de calidad que el filtro 2.

Al reducir el % TDV en el 5to y 7mo armónico y al deducir las franjas horarias con menor aporte al contenido espectral para cada transformador se realiza el análisis de correlación que tiene como objetivo indicar si existe alguna relación entre dos variables, es decir la relación entre los espectros, la incidencia de las horas y la ubicación de los transformadores.

#### **4.5 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN DEL CONTENIDO ESPECTRAL EN LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN DE CEO (COMPAÑÍA ENERGÉTICA DE OCCIDENTE)**

Se realiza el análisis de correlación sobre el contenido espectral obtenido de los transformadores T2767 y T2769, en diferentes días y horas de la semana mencionados anteriormente en la tabla 6. Aclarando que con la información recolectada solo se pueden relacionar el comportamiento de la red a diferentes horas del día, y no el comportamiento de diferentes días de la semana ya que no se cuenta con datos consecutivos de al menos un mes.

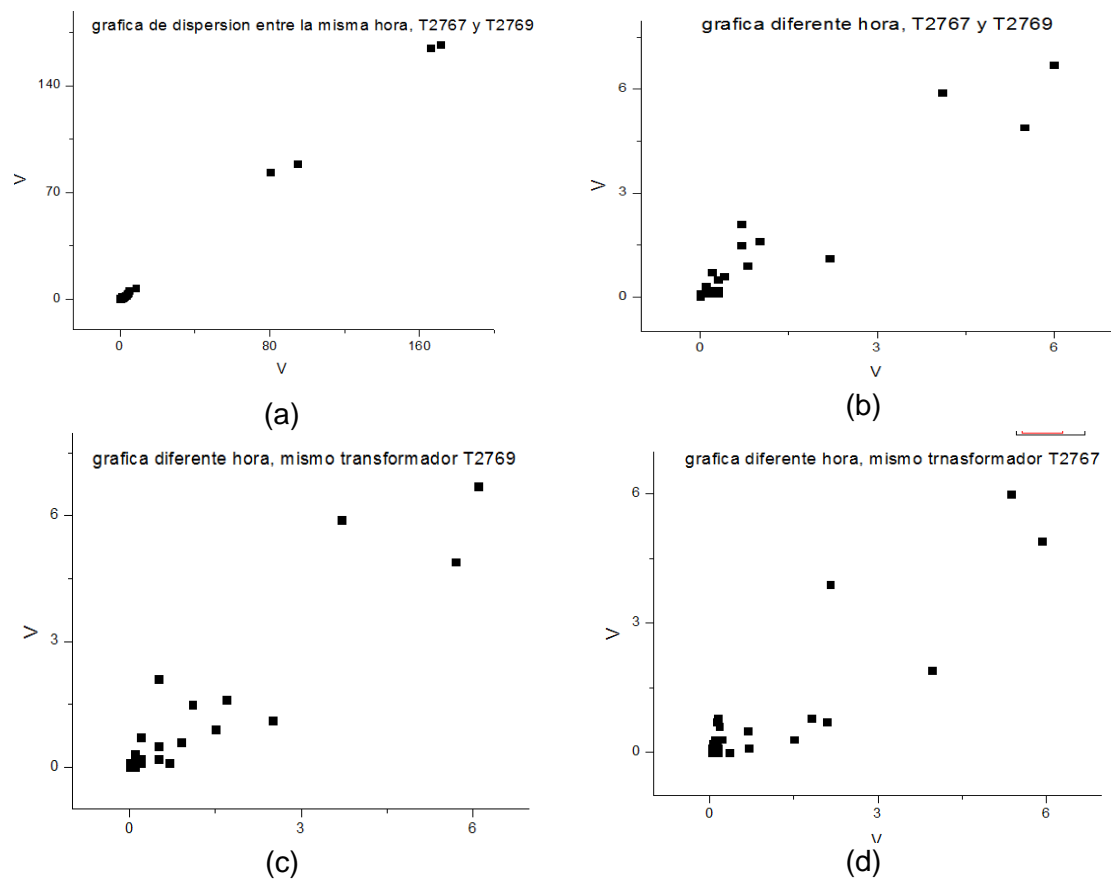
Se busca encontrar la relación entre los armónicos más representativos, la incidencia de las horas del día y la ubicación de los transformadores. Para esto se aplica el método de correlación de Pearson entre:

- Datos obtenidos en las mismas horas del día y en los diferentes transformadores (ver tabla 20).
- Datos obtenidos en diferentes horas del día y en diferentes transformadores.(Ver tabla 21)

- Datos obtenidos en diferentes horas del día en el mismo transformador T2769.(ver tabla 22)
- Datos obtenidos en diferentes horas del día en el mismo transformador T2767.(ver tabla 23)

Recordando que el coeficiente de Pearson se calcula para variables con una relación lineal, se procede a realizar un gráfico de dispersión para cada método propuesto (figura 39).

**Figura 39.** (a) Grafica de dispersión entre la misma hora , T2767 y T2769, (b) grafica de dispersión entre diferente hora , T2767 y T2769, (c) grafica de dispersión entre diferente hora, mismo transformador T2769. y (d) grafica de dispersión entre diferente hora , mismo transformador T2769.



Fuente: Propia.

Para realizar el cálculo del coeficiente para los datos que corresponden a horas distintas, se plantean cuatro bloques de seis horas cada uno, de la siguiente manera:

- Bloque uno: 12 AM - 6 AM
- Bloque dos: 6 AM – 12 PM

- Bloque tres: 12 PM – 6 PM
- Bloque cuatro: 6 PM – 12 AM

Se realiza el cálculo del coeficiente para todas las posibles combinaciones entre los bloques anteriores.

**Tabla 20.** Coeficientes de correlación de Pearson, para la misma hora del día entre los transformadores T2767 y T2769.

HORA	R FASE X	R FASE Y	R FASE Z
7:00 Pm	0.9995956	0.99961027	0.99964258
8:00 Pm	0.99834966	0.99837209	0.99836529
9:00 Pm	0.999953653	0.999969	0.99996135
10:00 Pm	0.99907798	0.99913278	0.99911162
11:00 Pm	0.99985546	0.9999328	0.99994583
12:00 Am	0.99872581	0.99870377	0.99871371
1:00 Am	0.99972847	0.99972372	0.99969301
2:00 Am	0.99990518	0.99991154	0.99988876
3:00 Am	0.99997437	0.999959	0.99997276
4:00 Am	0.99956244	0.99953934	0.9995394
5:00 Am	0.99981273	0.99983518	0.9998335
6:00 Am	0.99838126	0.99842053	0.99835999
7:00 Am	0.99988662	0.99987476	0.9998655
8:00 Am	0.99988189	0.99988852	0.99988873
9:00 Am	0.99994747	0.99994414	0.99994829
10:00 Am	0.99994185	0.99993359	0.9999609
11:00 Am	0.99984047	0.99986999	0.99985867
12:00 Pm	0.99969751	0.99967463	0.99972558
1:00Pm	0.99992428	0.99992027	0.99992924
2:00 Pm	0.99837023	0.99834143	0.99838146
3:00 Pm	0.99821597	0.99829551	0.99828521
4:00 Pm	0.99941341	0.99940743	0.91916381
5:00 Pm	0.99844663	0.99843484	0.99840441
6:00 Pm	0.99992499	0.99995344	0.99996608

Fuente: Propia.

**Tabla 21.** Coeficiente de correlación de Pearson para Diferente hora del día y diferente transformador.

HORA	R FASE X	R FASE Y	R FASE Z
4:00Am-7:00Pm	0.97316534	0.97826281	0.98466853
11:00Am-3:00Pm	0.9590315	0.95834688	0.95295594
5:00Am-4:00Pm	0.97885792	0.97538907	0.92877259
10:00Am-7:00Pm	0.96210339	0.95232615	0.98917537

2:00Am-11:00 Am	0.96206193	0.95874859	0.9666494
3:00Pm-11:00Pm	0.92676232	0.93946716	0.96433148

Fuente: Propia.

**Tabla 22.** Coeficiente de correlación de Pearson para Diferente hora mismo trafo 2769.

HORA	R FASE X	R FASE Y	R FASE Z
11:00Am-3:00pm	0.93672494	0.92868473	0.93161476
10:00Am-3:00Am	0.82676602	0.8537837	0.89871446
4:00Pm-7:00Pm	0.9870815	0.98904302	0.9421178
5:00Am.6:00Pm	0.95386754	0.97419495	0.96864413
2:00Am-7:00Pm	0.9482835	0.93781931	0.90668968
9:00Am-10:00Pm	0.92415355	0.91649122	0.92173322

Fuente: Propia.

**Tabla 23.** Coeficiente de correlación de Pearson para diferente hora del día mismo trafo T2767.

HORA	R FASE X	R FASE Y	R FASE Z
11:00Am-3:00Pm	0.95239258	0.96209054	0.96474811
1:00Am-7:00Pm	0.96471897	0.95570999	0.96157522
8:00Pm -3:00Pm	0.90085241	0.91774162	0.91990935
2:00 AM -4:00Pm	0.94918628	0.90792019	0.94588486
7:00Am-11:00Am	0.964191791	0.960633951	0.974900683
9:00Am-11:00Pm	0.99601409	0.98851673	0.98062255

Fuente: Propia.

De las gráficas de dispersión (figura 39) se observa una relación lineal positiva condición necesaria para calcular el coeficiente de Pearson. De acuerdo a los datos obtenidos anteriormente, se observa que éstos tienen una fuerte correlación, ya que los valores son cercanos a 1. Se puede interpretar que la primera cifra significativa (9) se debe a que se está analizando una señal con las mismas características eléctricas, es decir, una amplitud de 120V, frecuencia de 60Hz. Por lo tanto se observa un espectro con gran coincidencia en la aparición y amplitud de los armónicos en los dos transformadores. Por esta razón para notar la variación para las diferentes muestras se analiza a partir de la segunda cifra significativa.

En la tabla 21 se observan los coeficientes de Pearson con un valor alto de 0.99, estos coeficientes tienen un valor más alto que los de las tablas 19, 20,21, esto se debe a que los coeficientes de correlación más altos se encuentran cuando se analizan las mismas horas en diferentes transformadores, por esta razón se concluye la dependencia de la hora sin importar el lugar donde se encuentren ubicados los transformadores ni del día.

En la tabla 19 se observa una disminución en la segunda cifra significativa del coeficiente, esto se debe a que se están relacionando diferentes horas del día y en diferentes transformadores. Teniendo en cuenta que la amplitud de los armónicos en el espectro es diferente, este cambio en los coeficientes de correlación son de esperarse, probablemente se deba a un cambio de uso de la red relacionado con la hora. En la tabla 20 y 21 se ilustra el mismo comportamiento, de esto se puede inferir que el máximo valor de correlación se obtiene comparando los espectros de cada transformador a la misma hora y es independiente del lugar de ubicación de los transformadores.

Se realizara una comparación teniendo en cuenta las medidas tomadas en la **Intervención Piloto AFSAA** (para mayor detalle ver Anexo I, y medidas realizadas con el equipo Cassy Lab II en las fechas mencionadas anteriormente en la tabla 6. El piloto de la tecnología SAA inició con la instalación de los nuevos dispositivos de usuario PLC\_TU (Firmware actualizado), en el circuito correspondiente al trafo T2767, el cual está soportado sobre una red abierta de 37 usuarios, donde el usuario más alejado del trafo se ubica a 100 metros.

Inicialmente se realizaron ocho medidas (encuestas) comprendidas entre los días 04 y 12 de febrero de 2016, en la tabla 13, se muestra un porcentaje el cual corresponde al número de veces que contestaron los PLC\_TU con amarre "01" (Amarre actual) frente al número de días encuestados, 8 días.

**Tabla 24.** Porcentaje de respuesta Amarre "01" (Amarre actual) a encuestas realizadas entre día 04 de febrero y 12 de febrero de 2016.

PLC_T U	MAC_PLC_TU	MAC_PLC_MMS	DÍAS -AMARRE- INTERVENCIÓN	PORCENTA JE %
64	FFFF030D16881802	01	1	12,5
12	FFFF030D16882220	01	2	25
57	FFFF030D16882311	01	1	12,5
27	FFFF030D168B070A	01	1	12,5
119	FFFF030D168B0F16	01	3	37,5
24	FFFF030D168B1408	01	0	0
93	FFFF030D168B1825	01	0	0



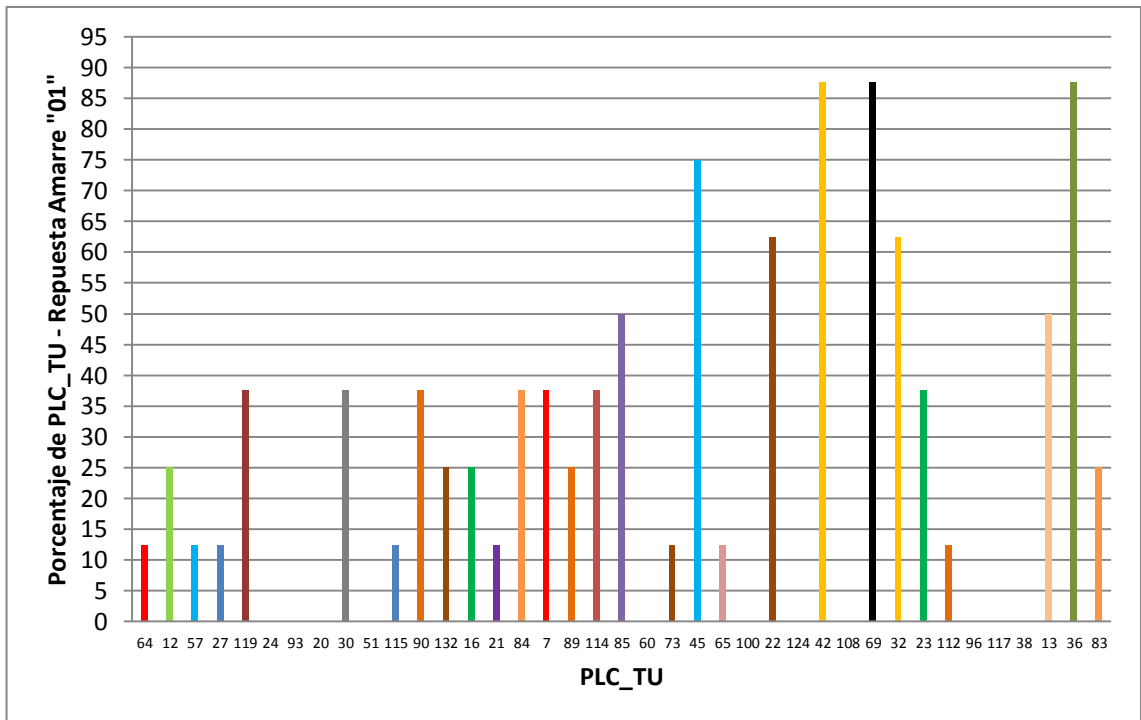
20	FFFF030D168B1B25	01	0	0
30	FFFF030D168B1D0D	01	3	37,5
51	FFFF030D168B2606	01	0	0
115	FFFF030D168B2819	01	1	12,5
90	FFFF030D168B2B10	01	3	37,5
132	FFFF030D168B341B	01	2	25
16	FFFF030D168B341D	01	2	25
21	FFFF030D168B3717	01	1	12,5
84	FFFF030D1697070D	01	3	37,5
7	FFFF030D1697070E	01	3	37,5
89	FFFF030D1697161A	01	2	25
114	FFFF8132DD152815	01	3	37,5
85	FFFF830D16881412	01	4	50
60	FFFF830D16881A0E	01	0	0
73	FFFF830D168B1706	01	1	12,5
45	FFFF830D168B1C25	01	6	75
65	FFFF830D168B1F1A	01	1	12,5
100	FFFF830D168B340B	01	0	0
22	FFFF830D168B350C	01	5	62,5
124	FFFF830D168B3518	01	0	0
42	FFFF830D168B360C	01	7	87,5
108	FFFF830D168B3611	01	0	0
69	FFFF830D168B3614	01	7	87,5
32	FFFF830D168B370E	01	5	62,5
23	FFFF830D168B3713	01	3	37,5
112	FFFF830D168B3719	01	1	12,5
96	FFFF830D168B371A	01	0	0
117	FFFF830D16970811	01	0	0
38	FFFF830D1697081B	01	0	0
13	FFFF830D16970908	01	4	50

36	FFFF830D16970A19	01	7	87,5
83	FFFF830D16973613	01	2	25

Fuente: Propia.

El porcentaje de respuesta de los PLC\_TU con Amarre "01" (Amarre actual) frente al número de días encuestados, 8 días (8 encuestas), comprendidos entre el día 04 de febrero y 12 de febrero de 2016, se presenta en la figura 41

**Figura 40.** Porcentaje de respuesta de cada PLC\_TU frente a encuestas entre el 04 de febrero y 12 de febrero de 2016.

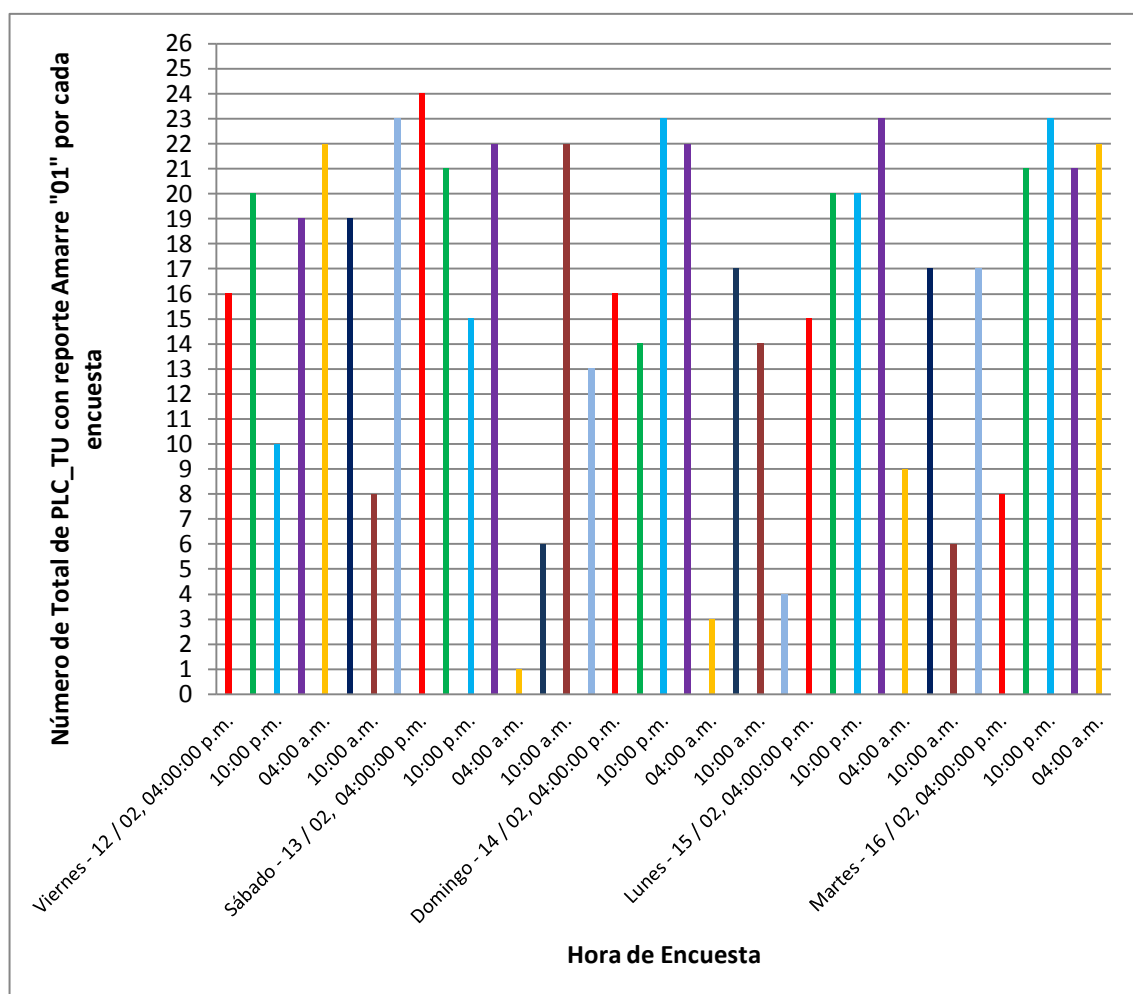


Fuente: Propia.

Con el objetivo de realizar un análisis del comportamiento del sistema SAA, de manera específica en el trafo T2767 durante los días comprendidos entre el 12 de febrero y 17 de febrero de 2016, se procede cambiar el tiempo de encuesta. Inicialmente se realiza una (1) encuesta cada 24 horas para el periodo mencionado, 12 de febrero y 17 de febrero de 2016, se modificó el intervalo de encuesta y se redujo a cada tres (3) horas. Según lo anterior, se presenta información entorno a una serie de encuestas desarrolladas, cada tres (3) horas, desde el viernes a las 4:00 pm (viernes 12 de febrero de 2016) hasta las 4:00 am del día miércoles 7 de Febrero de 2016.

El número total de PLC\_TU que respondieron con Amarre "01" (Amarre actual) a cada encuesta ejecutada a partir de las 04:00 pm del 12 de febrero hasta las 04:00 am del 17 de febrero de 2016 se presenta en la Figura 41.

**Figura 41.** Número total de PLC\_TU que responden a encuestas ejecutadas entre el 04 de febrero y 12 de febrero de 2016 con Amarre "01" (Amarre actual).



Fuente: Propia.

El número promedio de PLC\_TU que reportan Amarre "01" (Amarre actual) según hora de encuesta en el periodo comprendido entre las 04:00 pm del 12 de febrero hasta las 04:00 am del 17 de febrero de 2016 se presenta en la tabla 25.

**Tabla 25.** Número promedio de PLC\_TU que reportan Amarre “01” (Amarre actual) según hora de encuesta (periodo comprendido entre las 04:00 pm del 12 de febrero hasta las 04:00 am del 17 de febrero de 2016).

HORA DE ENCUESTA	NÚMERO PROMEDIO DE PLC_TU CON AMARRE “01” (AMARRE ACTUAL)
01:00 am	21
04:00 am	11
07:00 am	15
10:00 am	12
01:00 pm	14
04:00 pm	16
07:00 pm	19
10:00 pm	18

Fuente: Propia.

Se identifica en la tabla 25, que a la 01:00 am y a las 07:00 pm se encuentra el número mayor promedio de PLC\_TU con respuesta Amarre “01” (Amarre actual), el cual corresponde a 21 y 19 PLC\_TU, siguiéndole las 10:00 pm con 18 PLC\_TU. El intervalo de tiempo donde se presenta menor porcentaje de THDv tomado con el equipo Cassy Lab II para el transformador T2767 está comprendido entre las 06:00 pm y 10:00 pm como se observa en la tabla 12, teniendo en cuenta la hora con menor % THDv es de 3:00-4:00pm.

Entre menor sea el porcentaje de THDv en el transformador T2767, hay mayor probabilidad de obtener una buena comunicación del sistema SAA con los usuarios, como se puede observar en las tabla 25 que a las 07:00 pm y 10:00 pm se obtiene una buena respuesta al número de PLC\_TU con Amarre “01” (Amarre actual), coincidiendo con el horario de la tabla 24 con el intervalo de tiempo de 06:00 pm a 10:00 pm, donde se obtuvo menor porcentaje de THDv, esto es, un intervalo de tiempo donde se puede realizar comunicación PLC entre el sistema SAA y los usuarios estaría comprendido el día Jueves entre las 06:00 pm y las 10:00pm.

De misma forma que se obtuvo el menor porcentaje de contenido de THDv para el transformador T2767, se obtiene el mayor porcentaje de contenido de THDv, tabla 26.

**Tabla 26.** Mayor % de THDv para el transformador T2767.

<b>T2767</b>	<b>FASE 01</b>	<b>FASE 02</b>	<b>FASE 03</b>
<b>Hora</b>	5:00Am-6:00Am	5:00Am-6:00Am	5:00Am-6:00Am
<b>Amplitud (%)</b>	<b>4.0</b>	<b>3.9</b>	<b>3.9</b>
<b>Hora</b>	10:00am-11:00am	10:00am-11:00am	10:00am-11:00am
<b>Amplitud (%)</b>	<b>3.2</b>	<b>4.0</b>	<b>4.0</b>

Fuente: Propia.

Como se observa en la tabla 26, el mayor porcentaje de THDv es de 5:00Am-6:00Am y de 10:00am-11:00am Según la tabla 23, el menor número promedio de PLC\_TU con Amarre "01" (Amarre actual) se presenta a las 04:00 am y 10:00 am que corresponden a 11 y 12 PLC\_TU. Coincidiendo con los intervalos de mayor porcentaje de THDv mencionados anteriormente, es decir no se recomienda realizar comunicación PLC entre el sistema SAA y los usuarios en el horario de 4:00 am -6:00am y de 10:00 am a 11:00 am

## 5 CONCLUSIONES

Para atender la problemática del ruido eléctrico en los transformadores T2769 y T2767, y garantizar el funcionamiento adecuado de un sistema PLC se realizó un análisis detallado del espectro de las señales de BT en los transformadores de estudio donde se identifican los armónicos de tensión con mayor aporte al contenido espectral. Estos armónicos son el 5to y 7mo para ambos transformadores independientemente de las ubicaciones de cada uno de ellos.

Con las amplitudes de tensión del contenido espectral, se calcula el indicador de THDv (*Distorsión Armónica Total de Tensión*) para los transformadores de estudio. Concluyendo que los mismos operan cumpliendo la norma IEEE-519. La cual indica que el % de THDv para transformadores de distribución en BT (*Baja Tensión*) no debe ser superior al 5%. Con los indicadores de calidad energética THDv y Dhv se determina cuál de las tres fases X, Y y Z es la fase que presenta menor contenido de ruido eléctrico para los transformadores de estudio, para el transformador T2769 la fase con menor contenido de ruido eléctrico es la fase Y, y para el transformador T2767 la fase con menor contenido de ruido eléctrico es la fase X

Con los indicadores de calidad de energía eléctrica se determinan intervalos de 4 Horas donde el % de THDv asociado al ruido eléctrico es menor para ambos transformadores de estudio, para el transformador T2769 el intervalo se encuentra el día Jueves entre las 7:00 pm y las 11:00pm para las fases X, Y y Z con un porcentaje entre 2.32 y 3.19 %. De igual forma el intervalo de 4 Horas con menor contenido de % de THDv para el transformador T2767 se encuentra el día Miércoles entre las 6:00 pm y 10:00 pm para las tres fases X, Y y Z con un porcentaje entre 2.61 y 2.80 %

Existe un subintervalo de 1 hora donde el % de THDv es menor que el intervalo de 4 Horas, este subintervalo está comprendido entre 1:00 am y 2:00 am el día Martes para la fase X con un porcentaje de 2.5 % y entre 3:00 pm y 4:00 pm el día Jueves para las fases Y y Z con un porcentaje de 2.0 y 2.7 % respectivamente, para el transformador T2767 el subintervalo se encuentra en día Lunes entre 3:00 pm y 4:00 pm para las tres fases X, Y, y Z con un porcentaje entre 2.3 y 2.4 %.

Para mitigar los armónicos de tensión con mayor aporte al contenido espectral 5to y 7mo, se construye un filtro pasivo RLC sintonizado constituido por dos ramas las cuales se sintonizaran a las frecuencias requeridas (300 Hz y 420 Hz), este filtro sintonizado está construido con elementos pasivos los cuales cumplen con los lineamientos que se plantearon para la mitigación de armónicos de tensión. Al implementar el filtro 1 el % de THDv para el 5to armónico de 300 Hz es de 2.6 % y para el 7mo armónico de 420 Hz es de 1.5 %, esto corresponde a un 92.86% y 53.57% de reducción en las amplitudes respectivamente. Para el filtro 2 la disminución del THDv es de 2.4 % para el 5to armónico y 0.8 % para el 7mo armónico, estas disminuciones corresponden a un 85.7% y 28.57% de reducción en las amplitudes respectivamente. Se puede concluir que la implementación del filtro 1 tiene mejores resultados para la mitigación de armónicos de tensión, específicamente el 5to y 7mo armónico.

El diseño y construcción del filtro fue exitoso, se observa que el comportamiento en la frecuencia de resonancia crea un camino de baja impedancia por donde circulan las corrientes generadoras de armónicos de tensión que fluyen hacia la red de distribución, garantizando que estas corriente no circularan por la línea de Neutro.

Los coeficientes de correlación obtenidos son altos debido a la gran coincidencia en la aparición y amplitud de los armónicos en los dos transformadores, ya que se analizan señales con las mismas características eléctricas.

El coeficiente de correlación lineal es alto cuando se analizan las mismas horas en diferentes transformadores, por esta razón se concluye la dependencia de la hora sin importar el lugar donde se encuentren ubicados los transformadores ni del día. Entre menor sea el porcentaje de THDv en los transformadores de estudio, hay mayor probabilidad de obtener una buena comunicación del sistema SAA con los usuarios.



## 6 RECOMENDACIONES

En la construcción de filtros pasivos se puede aumentar el factor de calidad reduciendo la resistencia interna del inductor, esto se podría hacer aumentando el calibre del conductor de la bobina.

Para la construcción de las bobinas utilizadas en el filtro pasivo RLC, se recomienda trabajar con núcleos ferromagnéticos nuevos o en dado caso se podrían diseñar las bobinas con núcleos toroidales, los cuales le dan más precisión al valor de la bobina en henrios y aumentan el factor de calidad en estas

Se recomienda que la ubicación del filtro pasivo RLC sea antes del barraje de los transformadores de estudio o directamente en el punto donde se encuentran ubicados los medidores de tensión de los usuarios con el fin de disminuir las pérdidas del sistema y evitar la inyección de componentes armónicas de corriente al sistema por parte de la carga.

Por el bajo costo de los elementos que conforman el filtro pasivo RLC, se recomienda a CEO realizar una inversión para la construcción e implementación de los filtros en la red de distribución de energía eléctrica.

## 7 BIBLIOGRAFIA

- [1] “Red de distribución eléctrica, Disponible en internet: [https://www.google.com.co/search?q=como+referenciar+una+imagen+con+mendeley&espv=2&biw=667&bih=635&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKewj-xIW6zurPAhWFQD4KHb3OBQwQ\\_AUIBygC&dpr=1#tbm=isch&q=red+dedistri](https://www.google.com.co/search?q=como+referenciar+una+imagen+con+mendeley&espv=2&biw=667&bih=635&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKewj-xIW6zurPAhWFQD4KHb3OBQwQ_AUIBygC&dpr=1#tbm=isch&q=red+dedistri),” [Consultado Septiembre 14, de 2016]. .
- [2] “Diseño De Redes De Distribución Eléctrica De Media Y Baja Tension Para La Normalización Del Barrio El Piñoncito De Campo De La Cruz,” 2012.
- [3] O. C. D. E. Aplicación, M. D. E. Red, and D. E. M. Tensión, “Arquitectura de redes y protecciones de media tensión.”
- [4] tomada de internet: R. de distribución Electrica, “[https://www.google.com.co/search?q=como+referenciar+una+imagen+con+mendeley&espv=2&biw=667&bih=635&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKewj-xIW6zurPAhWFQD4KHb3OBQwQ\\_AUIBygC&dpr=1#tbm=isch&q=red+dedistribucion+electronica&imgsrc=xiBpkihgUVHXgM%3A](https://www.google.com.co/search?q=como+referenciar+una+imagen+con+mendeley&espv=2&biw=667&bih=635&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKewj-xIW6zurPAhWFQD4KHb3OBQwQ_AUIBygC&dpr=1#tbm=isch&q=red+dedistribucion+electronica&imgsrc=xiBpkihgUVHXgM%3A),” [consultado septiembre 11, 2016].
- [5] E. D. S. S. . E. Essa, “Norma Para el Cálculo y Diseño de Sistemas de Distribución.,” p. 165, 2004.
- [6] M. L. T. Cossio et al., “Norma técnica de medición y acometidas,” *Uma ética para quantos?*, vol. XXXIII, no. 2, pp. 81–87, 2012.
- [7] tomada de internet: esquema de distribución Electrico, “[https://www.google.com.co/search?q=como+referenciar+una+imagen+con+mendeley&espv=2&biw=667&bih=635&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKewj-xIW6zurPAhWFQD4KHb3OBQwQ\\_AUIBygC&dpr=1#tbm=isch&q=red+dedistribucion+electronica&imgsrc=JazwuxccW42YhM%3A](https://www.google.com.co/search?q=como+referenciar+una+imagen+con+mendeley&espv=2&biw=667&bih=635&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKewj-xIW6zurPAhWFQD4KHb3OBQwQ_AUIBygC&dpr=1#tbm=isch&q=red+dedistribucion+electronica&imgsrc=JazwuxccW42YhM%3A),” [consultado agosto 15, 2016].
- [8] Viakon, “Sistemas y redes de distribución,” pp. 337–373.
- [9] S. Electric, *Guía de diseño de instalaciones eléctricas 2010*. 2010.
- [10] S. R. Castaño, *Redes de Distribución de Energía*. 2004.
- [11] R. Nacional, C. Biol, and A. Rojas, “Tabla de contenido,” *Guid. to Aquat. Invertebr. Up. Midwest*, 2011.

- [12] tomada del sistema de amarre automatico: topologias de redes, "Sistemas de amarre automatico," [consultado agosto 05, 2016].
- [13] R. D. E. Media and Y. B. Tension, "Cns-Nt-03 Redes De Media Y Baja Tension Cns-Nt-03," pp. 1–34, 2015.
- [14] S. De Distribución, "No Title."
- [15] A. General and T. D. E. Contenido, "Anexo general del retie resolución 9 0708 de agosto 30 de 2013 con sus ajustes," p. 127, 2013.
- [16] G. Comercial, "Electrificadora del meta s.a. e.s.p. gerencia comercial definiciones."
- [17] "Glosario cables.pdf." .
- [18] "Conductor forrado aleación de aluminio AAC en fases y AAAC en neutro, Disponible en internet en: <https://pilariznart.wordpress.com/2012/11/19/seguridad-el-tendido-electrico/>," [Consultado Agosto 21, de 2016]. .
- [19] Schneider Electric, "Eliminación de armónicos en instalaciones," pp. 1–21, 2015.
- [20] N. Técnica and C. Ntc, "Transformadores de."
- [21] "Transformador de distribución trifásico, Disponible en internet en: [http://es.123rf.com/photo\\_31901415\\_transformador-electrico-en-poste-electrico.html](http://es.123rf.com/photo_31901415_transformador-electrico-en-poste-electrico.html)," [Consultado Agosto 25, de 2016]. .
- [22] INSPT, "Powerline Communications ( PLC )," pp. 1–17, 2004.
- [23] R. Secci et al., "Parte V Tecnologia De," pp. 225–245, 2002.
- [24] I. J. Batres, "Consideraciones generales para la transmisión de datos a través de la red eléctrica (PLC)," 2006.
- [25] D. M. Echeverri and V. H. Madera, "Plc (Power Line Comunicación)," p. 59, 2008.
- [26] J. G. Guibout, C. G. Garino, and G. Sevilla, "2007 Argentinean Congress on Computer Science ( Congreso Argentino en Ciencias de la Computación - CACIC 2007 ) Comportamiento de la Tecnología PLC en la Red Eléctrica ( Power Line Communications in the Electric Network )," pp. 68–79, 2007.
- [27] UDLAP, "2 Power Line Communications PLC," Power, pp. 7–24.
- [28] L. R. Malagon and G. C. Montiel, "E plc," pp. 73–82, 2009.

- [29] “Sistema Indoor y Outdoor, Disponible en internet: <http://www2.udec.cl/~fcisternas/DreamHC/PLC/page8.html>,” [consultado septiembre 28, de 2016]]. .
- [30] “PLC ( Power Line Communications ) Objetivos,” pp. 1–47.
- [31] J. Á. Valle et al., “Transmisión de datos por la red eléctrica.”
- [32] J. Gago, “COMUNICACIONES PLC,” 2009.
- [33] P. Line, C. Technology, I. Society, and P. Programs, “La tecnología PLC en los Programas de Fomento de la Sociedad de la Información de Red . es Power Line Communication Technology in the Information Society Promotion Programs Managed by Red . es,” pp. 54–64, 2004.
- [34] T. Oscilatorio, M. En, C. Rojo, T. Impulsivo, M. En, and C. Rojo, “Transitorio oscilatorio (marcado en color rojo),” pp. 1–3.
- [35] N. Pavlidou, A. J. Han Vinck, J. Yazdani, and B. Honary, “Power line communications: State of the art and future trends,” IEEE Commun. Mag., vol. 41, no. 4, pp. 34–40, 2003.
- [36] U. En, “Uido en.”
- [37] “Espectro de densidad ruido síncrono, Disponible en internet: [https://www.google.com.co/search?q=espectro+de+densidad+de+ruido&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiuiuPm85vQAhVGWxoKHx8wCDUQ\\_AUICCGb&biw=1366&bih=662#imgsrc=pheJjofC3K919M%3A](https://www.google.com.co/search?q=espectro+de+densidad+de+ruido&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiuiuPm85vQAhVGWxoKHx8wCDUQ_AUICCGb&biw=1366&bih=662#imgsrc=pheJjofC3K919M%3A),” [Consultado Octubre 22, de 2016]]. .
- [38] M. T. Interno, L. Benegas, and T. Externo, ““ DE DATOS POR LA RED EL ECTRICA ( PLC ) EN BANDA,” 2006.
- [39] “Atenuación de una línea de baja tensión usada como canal de Comunicación, Disponible en internet: <https://www.google.com.co/search?q=Atenuaci%C3%B3n+de+una+l%C3%ADnea+de+baja+tensi%C3%B3n+usada+como+canal+de+Comunicaci%C3%B3n&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=>,” [Consultado Agosto 21, de 2016]]. .
- [40] “Tema 2 Análisis y representación de las señales,” pp. 16–57.
- [41] A. Lucía, “FFT : Transformada Rápida de Fourier,” pp. 2–4, 2013.
- [42] D. (Universidad T. D. P. Murillo, “Compensación de armónicos con un filtro activo de potencia,” 2010.
- [43] G. Ramon, “Análisis Wavelet Aplicado a la medida de Armonicos..” 2006.

- [44] S. Electric, "Capítulo M Detección y filtrado de armónicos."
- [45] D. M. Said and K. M. Nor, "Effects of harmonics on distribution transformers," 2008 Australas. Univ. Power Eng. Conf., no. PECon 08, pp. 1–5, 2008.
- [46] J. M. Gers, "Teoría y diseño de filtros de armónicos en sistemas eléctricos Theory and design of harmonic filters for electrical systems," vol. 2, no. 1, 2008.
- [47] "Análisis armónico.pdf." .
- [48] C. Studies, "IEEE Standard 519-2014," 2014.
- [49] "Harmonics in your electrical system," pp. 1–7.
- [50] J. D. Arcila, "Armónicos En Sistemas Eléctricos," Ieb S.a, pp. 1–26.
- [51] "CASSY Lab Manual del usuario (524 206) ®," no. 524 206.
- [52] D. M. Schneider et al., "Desarrollo de Filtro de Potencia Tipo ' C ' para Control de Parámetros de Calidad de Energía," 1842.
- [53] O. C. Sandoval, "Manual de Statistix - Capitulo 8: An{ál}isis de Correlaci{ó}n Simple, M{ú}ltiple, Parcial," pp. 91–119, 2011.
- [54] "Tema 1.-Correlación Lineal."
- [55] C.-C. Martinez-Vara de Rey, "Coeficiente De Correlación Lineal De Pearson," Univ. Sevilla, vol. 1, no. 1, pp. 1–20, 2002.