

# CAPITULO I

## FUNDAMENTACION TEORICA

### 1.1.Resumen “programa PEC”

Según, EMPRESA ELECTRICA COTOPAXI S.A., Programa “PEC”. Latacunga, septiembre 2014 [citado 13 noviembre 2015]. “En Agosto de 2014 se da inicio a un programa denominado: PEC – “Programa de Cocción Eficiente”, que está dirigido a sustituir el uso del GLP en el sector residencial (hogares ecuatorianos), sin incluir los sectores; industrial, comercial o artesanal, todo esto ante la necesidad de optar por un consumo más eficiente de energía y considerando lo propuesto en el cambio de matriz energética del Plan Nacional del Buen Vivir, la finalidad es utilizar electricidad para la cocción de alimentos y el calentamiento de agua, empleando energía generada localmente mediante fuentes mayoritariamente limpias y renovables.

El Programa de Cocción Eficiente (PEC), actualmente busca introducir cerca de 3 millones de cocinas eléctricas de inducción en igual número de hogares desde agosto de 2014, hasta julio de 2016, Además se pretende también sustituir los calefones a gas por sistemas eléctricos eficientes de calentamiento de agua.”

A lo referente, se añade que el programa PEC se sustenta en el aprovechamiento de la energía eléctrica de las redes de distribución, tiene como base la nueva matriz energética que va en desarrollo en el territorio nacional, de esta forma el uso residencial del gas cambia por el uso de energía eléctrica limpia en cocinas de inducción, motivo por el cual el presente trabajo de investigación busca analizar una parte de la calidad de la energía eléctrica al utilizar dichos artefactos.

## **1.2. Principios de funcionamiento de la cocina de inducción**

El funcionamiento de la cocina de inducción se basa fundamentalmente en varios principios o leyes en conjunto con efectos que se detallan a continuación, en conjunto con dispositivos electrónicos de potencia los cuales ejecutan o realizan diversas funciones para poner en operación el electrodoméstico.

### **1.2.1. Ley de Joule**

Según, Ruiz V, Francisco, “Enciclopedia CEAC – Electrotecnia General”, 1983 [citado 14 noviembre 2015], “El efecto térmico de la corriente eléctrica de un conductor puramente óhmico, toda la energía disponible se transforma en calor por efecto joule.”

Es decir, la cantidad de calor desprendida por unidad de tiempo en una resistencia es proporcional a dicha resistencia y al cuadrado de la intensidad de la intensidad de corriente que la atraviesa, ecuación [1]

$$W = R * I^2 * t \quad \text{Ecuación [1]}$$

Donde:

W: La energía calorífica recibida por la resistencia

R: El valor óhmico de dicha resistencia

I: La intensidad de corriente eléctrica que la atraviesa

t: El tiempo de duración de paso de esta corriente

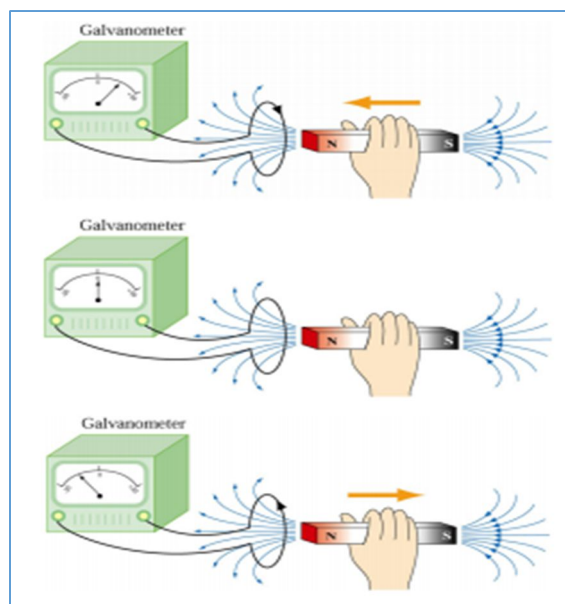
### **1.2.2. Ley de Lenz**

Según, HERMOSA. Antonio, Principios de Electricidad y Electrónica II, “Los efectos sobre inducción electromagnética obedecen a la denominada “Ley de Lenz”, que, resumidamente, dice: “La fuerza electromotriz inducida se opone siempre a la causa que la origina”.

### 1.2.3. Ley de Faraday

Según, MIT, “LEY DE INDUCCION DE FARADAY”. [en línea]. 2004 [citado 15 diciembre 2015]. Ley de Faraday, disponible en: <http://web.mit.edu/viz/EM/visualizations/coursenotes/modules/guide10.pdf>, “La imposición de un campo eléctrico en un conductor da lugar a una corriente que a su vez genera un campo magnético. Mediante la variación de un campo magnético con el tiempo, un campo eléctrico puede ser generado y esto se conoce como inducción electromagnética representado en el gráfico 1.”

GRÁFICO 1 - INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA



Fuente: <http://web.mit.edu/viz/EM/visualizations/coursenotes/modules/guide10.pdf>

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi_m}{dt} \quad \text{Ecuación [2]}$$

Dónde:

E: Es la fuerza electromotriz inducida

N: Es el número de espiras del inductor

$\Phi_m$ : Es el flujo de campo magnético

#### **1.2.4. Ley de Ampere**

Según, MIT, “FUENTES DE CAMPOS MAGNETICOS”. [en línea]. 2004 [citado 15 diciembre 2015]. Ley de Ampere, pág. 13. Disponible en: <http://web.mit.edu/8.02t/www/materials/StudyGuide/guide09.pdf> “Al pasar corriente alterna por un inductor se genera un campo magnético como lo establece la ley de Ampere”, su ecuación es:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = Ni \quad \text{Ecuación [3]}$$

Dónde:

H: Es la intensidad de campo magnético

L: Es la longitud del circuito

N: Es el número de espiras del inductor

I: Es la corriente que atraviesa el inductor

#### **1.3.Principio de la inducción**

Según, CARTUCHE José, “LA COCINA DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA”. [en línea]. 2009 [citado 20 noviembre 2015]. Informe de Investigación de la Física, pág. 16. Disponible en web: <https://es.scribd.com/doc/237447711/La-Cocina-de-Induccion-Electromagnetica>, “El calentamiento por inducción es un método para obtener calor

continuo y rápido en las que haya que alterar las propiedades de los metales u otros materiales conductores de la electricidad.

Este calentamiento en el caso de las cocinas de inducción está regulado solo para elevar su temperatura y no deformarlo. El proceso utiliza las corrientes eléctricas inducidas en el material para producir calor.

El elemento principal para el calentamiento de un metal por un conductor es la alta frecuencia con la que viajan las cargas eléctricas en un conductor.”

Se argumenta en principio para que exista la inducción de calor, se deben cumplir las leyes detalladas en este trabajo, en cuanto estas leyes universales originan los efectos en los conductores por los cuales circulan corrientes eléctricas adaptadas a diferentes frecuencias, dichos efectos son necesarios para el calentamiento por inducción.

#### **1.4.Funcionamiento de la cocina de inducción**

Según, CARTUCHE José, “La cocina de inducción Electromagnética. Disponible en WEB: <https://es.scribd.com/doc/237447711/La-Cocina-de-Induccion-Electromagnetica>”, “Las cocinas de inducción funcionan solo con corriente alterna, pero debe ser 220V, necesitan ese nivel de voltaje para crear el campo electromagnético.”

El funcionamiento interno de estas cocinas sigue un procedimiento coordinado:

1. La corriente alterna de 220V viaja por el conductor hasta llegar a los circuitos electrónicos.
2. Los circuitos electrónicos de potencia por medio de inductores aumenta la frecuencia de 60 Hz a más de 85 Hz. Estos circuitos están conectados a los comandos táctiles para regular el calor y el tiempo de cocción, y después

mandan la corriente modificada a las bobinas inductoras.

3. Las bobinas al paso de la corriente crean: un campo variable y el desprendimiento de calor por las altas frecuencias producido por los alambres de cobre; y la fluctuación, cambio de dirección, y distribución uniforme del campo regulado por las barras de hierro que se transforman en electroimanes.
4. El campo magnético induce corrientes parasitas en el recipiente. Las corrientes parasitas fluyen a través de la resistencia eléctrica de la olla ordenándose en una sola dirección de fluido para producir energía en los electrones, la cual se desprenden en forma de calor y calientan los alimentos. Este proceso tiene menos perdidas de energía, el material se agita magnéticamente, y la velocidad con la que se produce la energía es en solo unos segundos.
5. La corriente retorna por los circuitos al ventilador para mantener la temperatura ambiente dentro de la cocina, y evitar el calentamiento de los circuitos.

De esta forma se obtiene el calentamiento del recipiente mediante la inducción obtenida por los diferentes elementos eléctricos y electrónicos de potencia, distribuidos de forma única para proporcionarnos la cocción de alimentos al colocar un recipiente de cocción.

Cabe destacar estos procesos están controlados automáticamente por un método electrónico de control de tal forma que la energía utilizada sea la adecuada para obtener una eficiencia única comparable y destacable de otras opciones convencionales de cocinas para el hogar, la base para el proyecto PEC. (Postulantes)

### **1.5. Normas de calidad de la cocina de inducción**

El ministerio de Electricidad y Energía Renovable ha gestionado, trabajado y participado con diversas instituciones como el INEN para promover el uso de equipos eficientes.

En este ámbito se destaca brevemente las normas adoptadas para la introducción de las cocinas de inducción en base a lo presentado por el INEN, se tiene por lo tanto la siguiente normativa obligatoria:

### ***1.5.1. RTE INEN 101 “Aparatos electrodomésticos para cocción por inducción”***

Según, Ministerio de Industrias y Productividad. [en línea]. Quito, junio 2013 [citado 20 noviembre2015], pág. 6. Disponible en WEB: <http://www.industrias.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/04/Artefactos-Cocci%C3%B3n-Inducci%C3%B3n-RTE-INEN-101-Res-14-153.pdf>,

Este reglamento técnico establece los requisitos mínimos que deben cumplir los artefactos electrodomésticos para cocción por inducción, destinados al calentamiento y cocción de alimentos, con el propósito de prevenir riesgos para la salud, la vida y la seguridad de las personas, y prevenir las practicas que puedan inducir a error o crear confusión a los usuarios en su manejo, operación y funcionamiento.

En cuanto a los artefactos de cocción por inducción para uso doméstico, establece la diferencia de potencial eléctrica nominal entre 180 V hasta 250 V.

Los valores de eficiencia energética para los artefactos electrodomésticos para cocción por inducción deben ser los establecido en la tabla 1.

**TABLA 1 - CLASIFICACIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA POR UNIDAD DE CALENTAMIENTO**

| Clase de eficiencia energética  | Eficiencia energética de la cocina, % | Eficiencia energética de cada zona (quemador), % | Consumo de energía en modo de espera, W |
|---|---------------------------------------|--|---|
| A   | $\geq 85$ (1)                         | $\geq 80$ (1)                                    | $\leq 1$                                |
| (1) Este valor corresponde al cálculo de la media de todas las unidades. Todas las zonas o quemadores deben cumplir con un mínimo del 80% de eficiencia energética. |                                       |  |   |

Fuente: (INEN 101)

La potencia máxima instantánea demandada de la red por los artefactos electrodomésticos para cocción por inducción en ningún momento podrá superar el equivalente a los 7200W.

La Distorsión Armónica Total (THD) no podrá superar el 3% con respecto a la fundamental para la diferencia de potencial eléctrica y 5% para la corriente en operación normal del equipo.

### 1.6. Calidad del servicio eléctrico

Según, PINDADO Rafael, “La calidad del servicio eléctrico en redes públicas de baja y media tensión, [citado enero de 2016]”, “La creciente utilización de sistemas electrónicos para el control del flujo de potencia y el acondicionamiento de la misma, así como el empleo de cargas no lineales contribuyen a la polución del entorno eléctrico por aumento de los índices de armónicos de voltaje e intensidad.

No existe una definición propia de Calidad de Potencia. El termino anglosajón “power quality” se equipara indistintamente a Calidad de potencia, Calidad de Energía o Calidad de Suministro y engloba un conjunto de requisitos y exigencias de carácter muy subjetivo.

Así según el IEEE, un problema de calidad de potencia es debido a cualquier variación en el servicio de potencia eléctrica que dé lugar a funcionamiento defectuoso o fallo en el



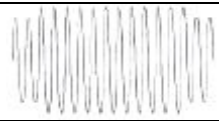
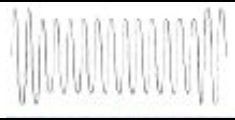
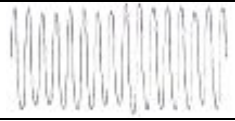
equipamiento del usuario, tal como: reducción de voltaje, sobrevoltajes, transitorios, distorsión armónica y ruido eléctrico.”



En esta instancia la calidad del servicio eléctrico que se requiere en la red de distribución o de suministro de potencia por el creciente aumento de demanda en aparatos electrónicos y/o sistemas electrónicos, se ve afectada por diversas perturbaciones como detallaba el autor; en funcionamientos defectuosos o fallos en equipamientos.

Para el Programa PEC, principalmente en la introducción de las cocinas de inducción y calefones eléctricos, las instancias de calidad de servicio eléctrico en las redes de Distribución y Subtransmisión, son un punto muy importante a tratar para mantener los niveles óptimos de calidad de energía para poder ejecutarlo al 100%.

Como es de conocimiento en calidad de energía, estas perturbaciones están clasificadas en la tabla 2 y representan aspectos importantes que se toman en cuenta para futuras proyecciones de los sistemas de distribución.

**TABLA 2 – TIPO DE PERTURBACIONES ELÉCTRICAS**

| <b>Nombre</b>                   | <b>Definición</b>   | <b>Gráfico</b>  |
|---------------------------------|---|---|
| Hueco de voltaje                | $90\% U_n > U > 1\% U_n$<br>$10\text{ms} < \Delta t \leq 1 \text{ min}$   |  |
| Corte de voltaje (interrupción) | Corte breve:<br>$U < 1\% U_n, \Delta t \leq 1 \text{ min}$<br>Corte largo:<br>$U < 1\% U_n, \Delta t > 1 \text{ min}$ |  |
| Sobrevoltaje                    | $U > 110\% U_n$   |  |
| Subvoltaje                      | $U < 90\% U_n$<br>$\Delta t > 1 \text{ min}$  |  |
| Fluctuaciones de voltaje        | $90\% U_n < U < 110\% U_n$  |  |

|                           |  |   |
|---------------------------|--|---|
| Impulso                   | $\Delta t < \text{algunos milisegundos}$   |  |
| Armónicos                 | $F(\text{armónicos}) = n * F(\text{fundamental})$<br>, n=entero<br>$F(\text{fundamental}) = 60\text{Hz}$ |  |
| Desequilibrios de voltaje | $ U_r  \neq  U_s  \neq  U_t $  |   |
| Variación de frecuencia   | $f = 60 \text{ Hz}$  |   |

Elaborado: Por los Postulantes

### **1.6.1. Norma EN 50160**

La norma EN 50160, es una política europea que abarca los requerimientos de calidad de energía eléctrica, la cual define niveles específicos para voltaje y corriente.

Los límites para el voltaje armónico, bajo esta regulación están en relación de porcentaje, en base a la forma de onda fundamental, a continuación se muestra la tabla.3.

TABLA 3 - LÍMITES DE VOLTAJES ARMÓNICOS PARA SISTEMAS DE BV Y MV

| Armonicos Impares |                      |                |                      | Armonicos pares |                      |
|-------------------|----------------------|----------------|----------------------|-----------------|----------------------|
| No multiplos de 3 |                      | Multiplos de 3 |                      |                 |                      |
| Orden h           | Voltaje armonico (%) | Orden h        | Voltaje armonico (%) | Orden h         | Voltaje armonico (%) |
| 5                 | 6                    | 3              | 5                    | 2               | 2                    |
| 7                 | 5                    | 9              | 1,5                  | 4               | 1                    |
| 11                | 3,5                  | 15             | 0,3                  | 6-24            | 0,5                  |
| 13                | 3                    | 21             | 0,2                  |                 |                      |
| 17                | 2                    |                |                      |                 |                      |
| 19                | 1,5                  |                |                      |                 |                      |
| 23                | 1,5                  |                |                      |                 |                      |
| 25                | 1,5                  |                |                      |                 |                      |

Fuente: Norma EN 50160

### 1.6.2. Norma IEEE 519-1992

Según, Norma IEEE 519-1992, [citado en enero 2016], “La filosofía detrás de esta norma busca limitar la inyección armónicos de los clientes individuales de manera que no creen voltajes inaceptables de distorsión bajo las características normales del sistema y limitar la distorsión armónica total del voltaje proporcionado por el proveedor.

Los límites de distorsión de voltaje y corriente deben usarse como valores de diseño de los sistemas eléctricos para “el peor de los casos” en condiciones de operación normales que duran más que 1 hora. Para períodos más cortos, como los arranques, los límites pueden ser excedidos en un 50%.

Los límites de corriente y voltaje armónicos para este estándar son analizados en el (PCC). Este es el punto dónde otros clientes comparten la misma red o donde pueden conectarse nuevos clientes en el futuro.

La norma busca un acercamiento justo de asignación de cuota de límite de armónicos para cada cliente, además asigna límites de la inyección de corriente basados en el tamaño de la carga con respecto al tamaño del sistema de potencia, el mismo que está definido por su capacidad de cortocircuito.

La base para limitar las inyecciones armónicas de los clientes individuales es evitar niveles inaceptables de distorsiones de voltaje.

Por eso los límites de corriente se establecen de tal manera que las inyecciones armónicas totales para cada cliente individual no excedan la distorsión de voltaje máxima mostrada en la tabla 4”.

Se añade sobre la norma IEEE 519 la cual es un estándar aplicable a nivel internacional para los sistemas eléctricos de potencia y distribución, consigo se tiene una guía de evaluación con límites de distorsión armónica en las redes y de igual manera armónicos, para aquello establece tablas de límites para voltaje y corriente en diferentes niveles de voltaje, además es base para las regulaciones que se ejercen actualmente en las empresas distribuidoras.

**TABLA 4 - BASE PARA LOS LÍMITES DE CORRIENTES ARMÓNICAS**

| <b>Relación de cortocircuito en el PCC</b> | <b>Voltaje máximo individual de frecuencia armónica (%)</b> | <b>Caso supuesto</b>                 |
|--|---|--------------------------------------|
| 10   | 2,5 – 3,0   | Sistema dedicado                     |
| 20   | 2,0 – 2,5   | 1 – 2 grandes clientes               |
| 50   | 1,0 – 1,5   | Pocos clientes relativamente grandes |
| 100  | 0,5 – 1,0   | 5 – 20 clientes medianos             |
| 1000                                       | 0,05 – 0,10   | Muchos clientes pequeños             |

Fuente: Norma IEEE 519 – 1992, Tabla 10.1

La tabla 4 muestra los límites de corrientes armónicas para varios tipos de sistemas. En cargas más pequeñas (valores con relación de cortocircuito típicamente más grandes) es permitido un porcentaje mayor de corrientes armónicas que en las cargas más grandes con valores menores de relación de cortocircuito.

Las cargas más grandes deben ser sometidas a límites más estrictos de distorsión dado que ocupan una porción más grande de la capacidad de carga del sistema. Los límites de corriente toman en cuenta la diversidad de corrientes armónicas de las cuales algunas armónicas tienden a cancelarse mientras que otras se suman.

Los límites de corrientes armónicas en el PCC son establecidos para limitar voltajes individuales de distorsión y distorsiones totales de voltaje THDv para los valores mostrados en la Tabla 5. Puesto que de la distorsión de voltaje depende la impedancia del sistema, la clave de controlar la distorsión de voltaje es controlar la impedancia.

Dos condiciones principales que producen una impedancia alta son cuando el sistema es demasiado débil para alimentar la carga adecuadamente o cuando el sistema está en resonancia, el último es el más común. Por consiguiente, si se mantiene el voltaje de distorsión en valores reducidos, se puede asegurar que el sistema se mantiene fuera de resonancia.

**TABLA 5 - LÍMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE VOLTAJE EN PORCENTAJE DE VOLTAJE NOMINAL DE FRECUENCIA FUNDAMENTAL**

| <b>Voltaje nominal en el PCC, Vn (kV)</b> | <b>Voltaje de distorsión armónica individual (%)</b> | <b>Voltaje de distorsión armónica total THD Vn (%)</b> |
|---|--|--|
| Vn<69                                     | 3,0  | 5,0  |
| 69<Vn<161                                 | 1,5  | 2,5  |
| Vn>161                                    | 1,0  | 1,5  |

Fuente: Norma IEEE 519-1992, tabla 11.1

La norma IEEE 519-1992 representa un consenso general de pautas y prácticas recomendadas por los distribuidores y sus clientes en un esfuerzo por minimizar y controlar el impacto de armónicos generados por cargas no lineales.

### **1.6.3. Regulación ARCONEL 004/01**

En el Ecuador se cuenta con la regulación ARCONEL 004/01 emitida por la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL) en la que se indican los índices y límites de calidad de energía que deben ser cumplidos por las empresas de distribución de

energía eléctrica, sin embargo varios puntos de dicha regulación pueden ser aplicados desde el punto de vista del consumidor.

La regulación ARCONEL 004/01 no contempla específicamente aplicaciones para el estudio o análisis de calidad en los sistemas eléctricos de consumidores pero es posible aplicarla considerando ciertas modificaciones y límites dependiendo del caso en donde se vaya a aplicar. Con respecto a los límites de distorsión armónica esta regulación solo contempla los límites de distorsión de voltaje.

## **1.7. Tipos de cargas**

Según el autor HERRERA, Juan Carlos (1997, pág. 8), en su obra Determinación de la potencia de transformadores para alimentar cargas no lineales “Los motores de inducción bajo carga, la iluminación incandescente, las cargas de calefacción son lineales por naturaleza. Esto quiere decir, la impedancia de cargas es esencialmente constante prescindiendo del voltaje aplicado. Para alimentación alterna, la corriente se incrementa proporcionalmente con el incremento de voltaje y decrece proporcionalmente con la disminución del mismo.”

El autor quiere indicar que existen diferentes tipos de cargas, las cuales pueden ser resistivas, capacitivas o inductivas, es así como la corriente que circula por cada tipo de carga sufre aumento o reducción a lo largo del circuito eléctrico.

### **1.7.1. Lineales**

“En un circuito puramente resistivo con un factor de potencia unidad la corriente está en fase con el voltaje. En un circuito predominantemente inductivo, con un factor de potencia menor que la unidad, (típicamente entre 0.8 y 0.95) la corriente está en retraso en algún ángulo de fase con el respecto al voltaje. En un circuito predominantemente capacitivo, con un factor de potencia mayor que la unidad, la corriente está en adelante en algún ángulo de fase con respecto al voltaje.

Para cualquiera de los tres casos expuestos, se tiene que la magnitud de la corriente es proporcional a la magnitud del voltaje, teniendo en cuenta que para un voltaje sinusoidal, se tiene una corriente sinusoidal, estas son las principales características de las cargas lineales”

Se debe considerar los desfases que sufre la corriente eléctrica por el factor de potencia, y a la vez que la forma de onda de la corriente depende de la forma de onda del voltaje, esta es la base de la carga lineal.

### **1.7.2. No Lineales**

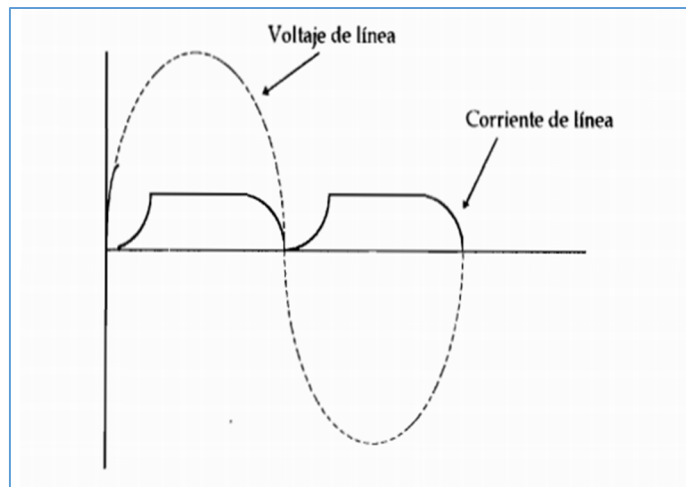
Según, Francisco de la Rosa, “HARMONICS AND POWER SYSTEMS”. 2006 [citado 18 febrero 2010]. Fundamentals of Harmonic Distortion and Power Quality Indices in Electric Power Systems, pág. 4. Las cargas no lineales son cargas en el que la forma de onda de corriente no se parece al forma de onda aplicada voltaje debido a una serie de razones. Se puede concebir cargas no lineales como aquellos en los que La ley de Ohm no puede describir la relación entre voltaje y corriente.

Entre las más comunes cargas no lineales en sistemas de potencia son todos los tipos de dispositivos como los que se encuentran la rectificación en convertidores de potencia, fuentes de alimentación, unidades de alimentación ininterrumpida (UPS), y dispositivos de arco, como hornos eléctricos y lámparas fluorescentes.

Según, Francisco de la Rosa, “HARMONICS AND POWER SYSTEMS”. 2006 [citado 18 febrero 2010]. Fundamentals of Harmonic Distortion and Power Quality Indices in Electric Power Systems, pág. 7 “Una carga no lineal es la que produce forma de ondas diferente a las sinusoidales, son aquellas en donde además de la componente fundamental de corriente, contienen otras las cuales son múltiplos enteros de la componente fundamental, estos múltiplos de la componente, se les llama armónicos.”

La generación de cargas no lineales se debe a componentes electrónicos utilizados en varios dispositivos, utilizados en los hogares, comercios e industria.

## GRÁFICO 2 - FORMA DE LA CORRIENTE EN UN SISTEMA NO LINEAL



Elaborado: Por los Postulantes

Una carga no lineal es una, en la cual la corriente de carga no es proporcional al voltaje instantáneo (grafico 2). El más grande efecto de las cargas no lineales es el crear considerable distorsión armónica en el sistema. Estas corrientes armónicas causan excesivo calentamiento en el núcleo de hierro magnético de los transformadores y motores.

Los armónicos de orden impar se suman en el neutro del sistema y algunas de las corrientes tipo pulso no se cancelan en el neutro, aun cuando las tres fases del sistema estén cuidadosamente balanceadas.

El resultado es la sobrecarga en los conductores neutros. También, muchas de estas cargas no lineales tienen un bajo factor de potencia, incrementando el costo de la utilización de la potencia cuando se llega a un factor de potencia penalizado.

En base a lo expuesto, se pueden rescatar las siguientes diferencias notables entre cargas lineales y no lineales en la tabla 6.

TABLA 6 – DIFERENCIA ENTRE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES

| CARGAS LINEALES   | CARGAS NO LINEALES   |
|---|--|
| La corriente de carga es completamente proporcional al voltaje.                 | La corriente de carga no es proporcional al voltaje.                             |
| Si el voltaje de alimentación es sinusoidal la corriente también es sinusoidal. | Aún con voltaje de alimentación sinusoidal la corriente puede no ser sinusoidal. |
| Las ondas de voltaje no se ven afectadas por las ondas de corriente.            | Las ondas de voltaje se distorsionan debido a las ondas de corriente             |

Elaborado: Por los Postulantes

El sobrecalentamiento de los conductores neutros, fallas en los transformadores, mal funcionamiento de los generadores y fundida de motores son algunos efectos de las cargas armónicas aun cuando estas pudieran estar aparentemente dentro del rango de capacidad de los equipos mencionados

### 1.8.Armónicas

El término “armónicos” o “harmonics”, se originó en el campo acústico, en donde se lo relaciona a la vibración producida por una columna de aire a una frecuencia que es múltiplo de la frecuencia base; en un sistema de alimentación de corriente alterna (CA), se define como una componente sinusoidal de una forma de onda periódica que tiene una frecuencia igual a un número entero multiplicado por la frecuencia fundamental del sistema

Los armónicos tanto de voltaje como de corriente pueden ser concebidos como componentes sinusoidales de frecuencias múltiples de la frecuencia fundamental

$$f_h = (h)x(\text{frecuencia fundamental})$$

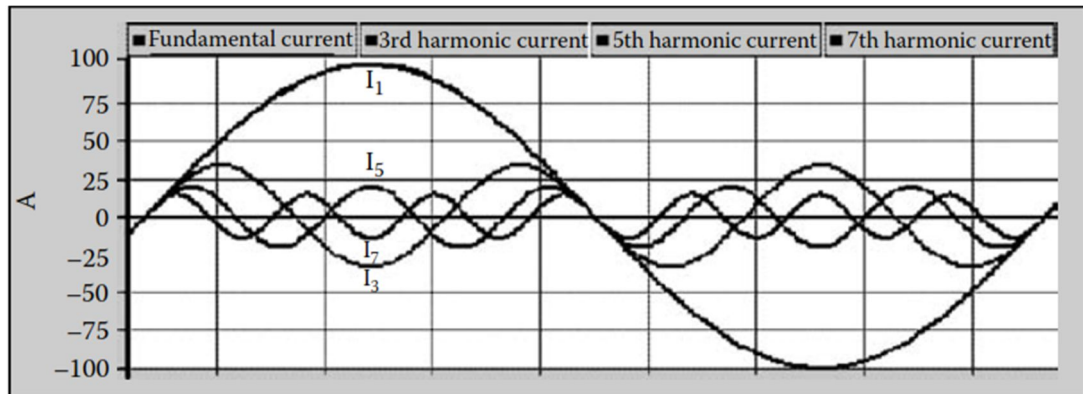
*Ecuación [4]*

Donde h es un número entero, por ejemplo el quinto armónico, producirá un componente armónico

$$f_h = 5 \times (60 \text{ Hz}) = 300 \text{ Hz} \quad \text{Ecuación [5]}$$

Se añade que la componente de la onda fundamental de nuestro sistema se ve afectada por subcomponentes múltiplos de la misma, cuya forma se puede apreciar en el gráfico 3.

GRÁFICO 3 - FORMA DE ONDA SINUSOIDAL Y ARMÓNICOS



Fuente: Harmonics and power systems, Francisco de la Rosa

### 1.9. Distorsión armónica

Según, FINK Donald. “MANUAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA”, décimo tercera edición, tomo 2. México, [citado 22 febrero 2016] p. 23-10. “La distorsión armónica es una forma de ruido eléctrico. Es la sobre posición de señales en múltiplos de la frecuencia fundamental de la potencia sobre la onda sinusoidal de la misma.”

Distorsión Armónica Total (THD) está definida como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las magnitudes de los componentes armónicos de la función dividida para la magnitud de la componente fundamental.

La componente fundamental es la frecuencia de interés y se asume como la mayor componente. En sistemas de potencia la frecuencia fundamental es la frecuencia del sistema de potencia.”

De acuerdo a los autores acerca de la definición de Distorsión armónica se tiene como la interferencia o ruido en la frecuencia fundamental formado por pequeñas componentes de la misma a distinta frecuencia.

Así:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum I_h^2}}{I_f} \quad \text{Ecuación [6]}$$

Dónde:

$I_h$  es la magnitud de cada componente armónica

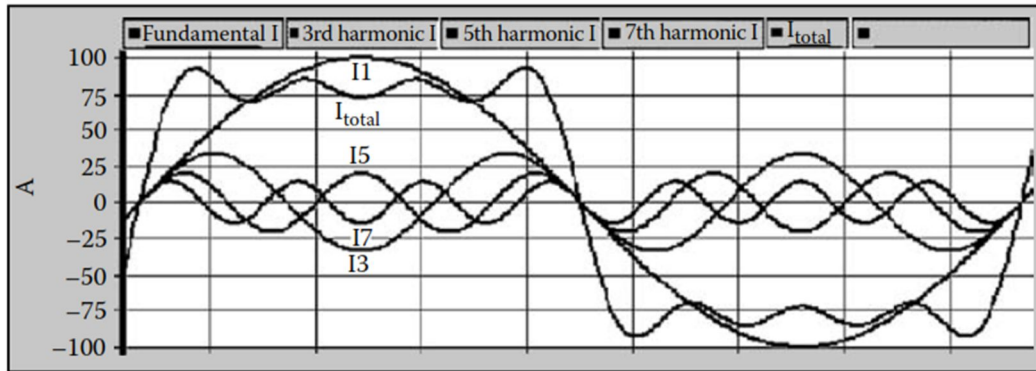
$h$  es el número de la armónica 2,3,4,...,n

$I_f$  es la magnitud de la componente fundamental cuando  $h=1$

La relación entre la magnitud de las componentes armónicas y el THD no es lineal y magnitudes de THD mayores al 100 % son posibles.

Acerca de la onda distorsionada de una carga no lineal por armónicos se obtiene una forma de onda resultante contaminada característica, la cual se representa en el grafico 4.

GRÁFICO 4 - FORMA DE ONDA DISTORSIONADA POR 3A, 5A Y 7MA ARMÓNICA



Fuente: Harmonics and Power Systems, Francisco de la Rosa

## 1.10. Indicadores esenciales de la distorsión armónica

Estos indicadores permiten identificar, evaluar y cuantificar la distorsión armónica de la función de onda tanto de voltaje y corriente y son:

- Factor de potencia
- Factor de cresta
- Potencia de distorsión
- Espectro de Frecuencia
- Tasa de distorsión armónica

De los indicadores expuestos anteriormente el que tiene más efecto en la red de distribución es la tasa de distorsión armónica

### 1.10.1. Tasa de distorsión armónica

Antes de analizar la manera en la que se evalúa la distorsión armónica en redes eléctricas se puede indicar mediante la representación matemática de una señal eléctrica en el dominio del tiempo

En este caso se toma como armónica a la frecuencia múltiplo de una frecuencia fundamental que opera en la red de distribución eléctrica (para este caso 60 Hz).

Si el voltaje y la corriente en una red eléctrica están definidos por:

$$v(t) = V \cdot \cos \omega_o \cdot t \quad \text{Ecuación [14]}$$

$$i(t) = I \cdot \cos \omega_o \cdot t \quad \text{Ecuación [15]}$$

Respectivamente, pero como en los sistemas eléctricos en estas señales podría darse la presencia de voltajes y corrientes armónicas, entonces el voltaje y la corriente se pueden representar por:

$$v(t) = \sum_{n=1}^k V_n \cos(n\omega_o t + \theta_n) \quad \text{Ecuación [16]}$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^k I_n \cos(n\omega_o t + \theta_n) \quad \text{Ecuación [17]}$$

Dónde:

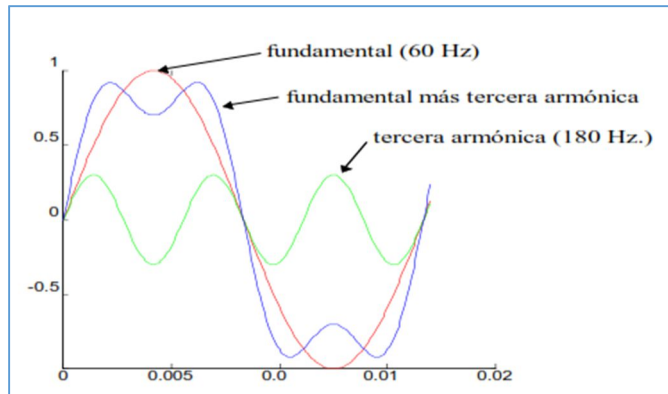
$V_n$  se le define como la armónica de voltaje de orden  $n$ , a

$I_n$  se le define como la armónica de corriente de orden  $n$  y a

$\theta_n$  se define como el ángulo en la armónica  $n$

Para un caso particular de afectación de la tercera armónica se tiene una forma resultante de onda la cual se representa en el gráfico 5.

GRÁFICO 5 - SEÑAL FUNDAMENTAL MÁS TERCERA ARMÓNICA



Fuente:<http://dSPACE.UPEL.edu.ec/bitstream/123456789/1875/4/03%20Análisis%20de%20armónicos%20y%20fp.pdf>

Los valores de distorsión están definidos en porcentaje (%) de cantidades eléctricas, estos valores son muy utilizados para conocer el grado de contaminación de las redes eléctricas.

### 1.11. Tipos de equipos que generan armónicos

Debido al incremento de la electrónica de potencia en equipos de uso residencial, industrial y comercial, el problema de las deformaciones de onda fundamental se incrementan, la ventaja en la actualidad es que se puede identificar las fuentes de corrientes armónicas, a fin de establecer mejores métodos para disminuir o eliminar el lugar en donde se producen.

A continuación se mencionan algunas fuentes generadoras de armónicos:

- Núcleos magnéticos en transformadores y máquinas rotativas las mismas que requieren la corriente del tercer armónico para excitar el hierro
- Hornos de arco de corriente alterna (CA), generan un espectro variable inestable
- Transformadores de potencia, generan un armónicos de orden par e impar

- Motor Asíncrono generan armónicos de orden impar
- Cicloconvertidores inyectan una gran cantidad de armónicos a la red

### **1.12. Problemas producidos por los armónicos**

Desde que se comenzó a tomar en cuenta la magnitud de los armónicos generados por la carga se han identificado los siguientes problemas relacionados con estos:

- Fallas en los bancos de capacitores debidos a ruptura dieléctrica o a sobrecarga de potencia reactiva.
- Interferencia con sistemas de control y sistemas de onda portadora que ocasionan operaciones en falso de los mecanismos que trabajan a control remoto tales como protecciones, control de carga y metrología.
- Excesivas pérdidas (y calentamiento) de máquinas de inducción y sincrónicas.
- Sobrevoltajes y excesivas corrientes en el sistema debido a resonancia de los voltajes o corrientes en la red.
- Ruptura dieléctrica de cables aislados resultado de los sobrevoltajes en la red.
- Interferencia con controladores de grandes motores y los sistemas de excitación de generadores.
- Las corrientes armónicas generadas por cargas no lineales no solamente causan calentamiento adicional en los componentes de un sistema de potencia, tales como transformadores y conductores, sino que al mismo tiempo causan distorsiones en el voltaje en virtud de que estas corrientes fluyen por las impedancias de estos equipos.

Todos estos efectos dependen de la fuente que genera los armónicos, de la localización de dicha fuente, factor de coincidencia, factor de utilización del equipo, tipos de conexión y de las facilidades que presente la red para la propagación de tales armónicos.

### **1.13. Efectos de la distorsión armónica**

### **1.13.1. Resonancia**

Según, Armónicos en las Redes Eléctricas, disponible en WEB: [https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/2/EL5203/1/material\\_docente/bajar?id\\_material=384495](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/2/EL5203/1/material_docente/bajar?id_material=384495)”

[citado febrero de 2016], “La utilización de dispositivos tanto capacitivos como inductivos en sistemas de distribución que estén contaminados de distorsión armónica provoca el fenómeno de la resonancia, teniendo como resultado valores extremadamente altos o bajos de impedancia. Estas variaciones en la impedancia modifican la corriente y el voltaje en el sistema de distribución”.

Argumentando sobre las variaciones debido a una gran contaminación armónica por dispositivos no lineales en las redes de distribución son de forma capacitiva o inductiva, genera inconvenientes como uno de ellos la resonancia hace variar las magnitudes en todo el sistema de distribución.

### **1.14. Calidad de energía**

En un sistema eléctrico ideal, el sistema debe proporcionar ciertas características de voltaje como son:

- Amplitud constante
- Frecuencia constante
- Forma de onda sinusoidal
- Simetría para el caso de red trifásica

Bajo estas condiciones, los equipos eléctricos conectados a la red, deberían presentar un comportamiento normal, y funcionar.

En la práctica, las redes eléctricas presentan alteraciones, las cuales alteran la calidad del servicio eléctrico entre ellas:

- Variaciones de frecuencia

- Variaciones de amplitud de voltaje
- Sobrevoltajes
- Asimetría entre fases
- Deformaciones de onda entre voltaje y corriente

### **1.15. Filtrado de armónicos**

Los filtros armónicos, son instalados en las terminales de AC de rectificadores, controladores de motores, fuentes de corriente continua, y otras cargas no lineales, para reducir la distorsión de voltajes y corrientes a límites aceptables en el punto de conexión.

Los filtros de armónicos se podrán clasificar en dos categorías fundamentales que son:

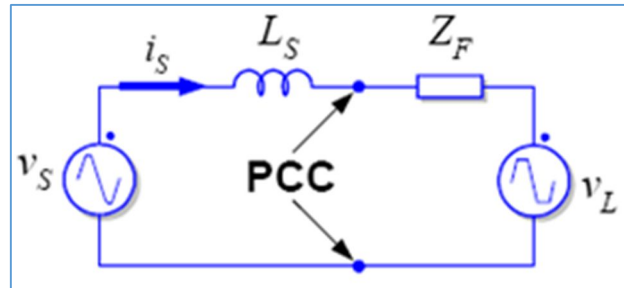
- Filtros Shunt: provee un camino alternativo de muy baja impedancia para las frecuencias armónicas, y consisten en una rama resonante serie compuesto por elementos RLC en conexión paralelo con el sistema de alimentación.
- Filtros Serie: por su parte impide la circulación de una frecuencia armónica, desde el elemento contaminante hacia alguna componente de la planta o parte del sistema de potencia, mediante la presencia de una gran impedancia serie a la frecuencia especificada. Estos equipos constan de un inductor y condensador en paralelo que se coloca en serie a la parte de la red que desea proteger.

#### ***1.15.1. Filtro Pasivos***

##### ***1.15.1.1. Filtro pasivo serie***

El gráfico N°6, muestra la topología de filtrado básica en un filtro serie, la cual es ideal para cargas no lineales que tienden a mantener el voltaje constante, en su punto de conexión a la red.

GRÁFICO 6 - TOPOLOGÍA DE UN FILTRO PASIVO SERIE

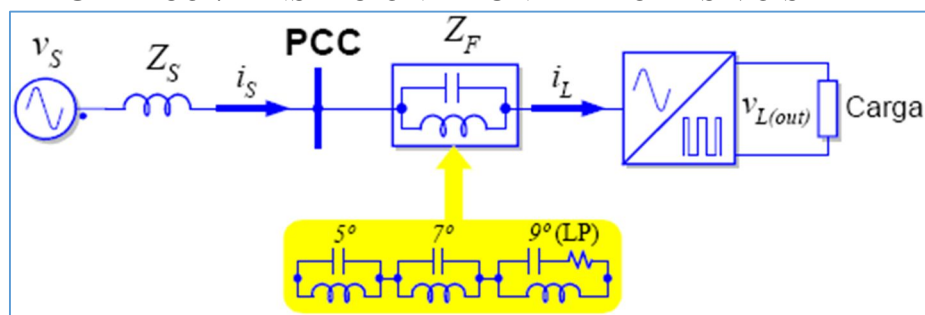


Fuente: Matlab

Los filtros pasivos pueden presentar diferentes estructuras y su misión es ofrecer una elevada impedancia a la circulación de armónicos de corriente, dependiendo del nivel, para el caso de componentes armónicas como 5ª, 7ª y la 9ª, mejorar la forma de onda de voltaje en el punto de análisis.

El gráfico N° 7 muestra la configuración en el punto de acoplamiento común del filtro pasivo.

GRÁFICO 7 - INSERCIÓN DE UN FILTRO PASIVO SERIE

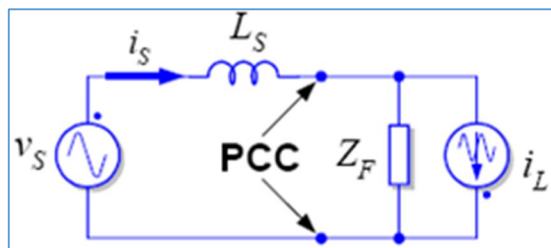


Fuente: Matlab

### 1.15.1.2. Filtro Pasivo Paralelo:

Cuando la carga no lineal tiende a imponer la corriente solicitada a la res, el uso de un filtro paralelo se considera la mejor opción posible. El gráfico N° 8 muestra la configuración a conectar

GRÁFICO 8 - TOPOLOGÍA DE UN FILTRO PASIVO PARALELO



Fuente: Matlab

Una correcta sintonización del filtro paralelo permite que los armónicos seleccionados circulen en su mayoría a través de este. La inserción del filtro paralelo disminuye la impedancia a las frecuencias seleccionadas, con lo que es posible mejorar la forma de onda de voltaje en el punto de acoplamiento común

### 1.15.1.3. Filtro Simple Sintonizado

El filtro sintonizado simple es utilizado para eliminar una armónica determinada; este es uno de los más simples y consiste en un banco de condensadores conectado en serie con un inductor. La impedancia para el filtro sintonizado simple, se encuentra mediante la siguiente expresión:

$$Z = R_f + j \left( \omega * L_F - \frac{1}{\omega * C_F} \right) \quad \text{Ecuación [18]}$$

Este filtro, se sintoniza con la frecuencia armónica a cual desea eliminar, lo que significa que para esta frecuencia, la reactancia inductiva y capacitiva son iguales y se anulan entre sí, causando una reducción en la impedancia del filtro que llega a su mínimo valor.

El factor de calidad para este filtro es alto va desde los 30 hasta los 60.

#### **1.15.1.4. Filtro pasa altos de segundo orden**

Es el filtro de uso más frecuente, son utilizados para eliminar un gran rango de frecuencias, se emplean cuando las armónicas no poseen frecuencias fijas como es el caso de los cicloconvertidores, la impedancia del filtro vienen dada por la ecuación:

$$Z = \frac{1}{j\omega C_F} + \left( \frac{1}{R_F} - \frac{1}{j\omega L_F} \right)^{-1} \quad \text{Ecuación [19]}$$

Este filtro de igual manera que el filtro sintonizado simple, se sintoniza a una frecuencia en particular, este filtro presenta una baja impedancia. Lo que significa que absorbe corrientes armónicas de frecuencia de sintonía en adelante.

#### **1.16. Metodología de cálculo para el filtro sintonizado simple**

Para determinar la capacidad del filtro se debe conocer parámetros previos como son el voltaje de alimentación del circuito, frecuencia nominal a la que opera, factor de potencia inicial y factor de potencia deseado.

A partir del factor de potencia inicial, se debe calcular el ángulo de desfase de la corriente frente al voltaje mediante la siguiente expresión:

$$\theta = \arccos(fp) * \left( \frac{180}{\pi} \right) \quad \text{Ecuación [20]}$$

Donde

$\theta$ : es el ángulo de desfase entre la corriente y el voltaje

Fp: factor de potencia

A continuación se obtiene la  $\tan \theta$ , a través de la relación

$$\tan \theta = \text{acos}(fp) \quad \text{Ecuación [21]}$$

La potencia aparente se determina en base a la potencia activa del transformador.

$$S = P * fp \quad \text{Ecuación [22]}$$

Donde

S: potencia aparente del sistema

P: potencia activa del sistema

Aparte se determina la potencia reactiva para los dos escenarios, el primero cuando se estudia el caso actual del sistema, se lo puede llamar caso inicial, y el segundo cuando se establece el factor de potencia deseado para la red eléctrica, el cual debe permanecer sobre los límites emitidos por cada país o región, para asegurar un correcto funcionamiento de equipos y red eléctrica, para el caso ecuatoriano el factor de potencia se debe encontrar sobre 0,92

$$Q = P * \tan(\theta) \quad \text{Ecuación [22]}$$

Dónde:

Q: potencia reactiva del sistema

A continuación se determina la potencia reactiva a compensar aplicando el filtro sintonizado simple, mediante la siguiente expresión

$$Q_c = (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) * P \quad \text{Ecuación [23]}$$

Dónde:

$Q_c$ : Potencia reactiva a compensar en el sistema

Para el dimensionamiento del filtro se determina la reactancia efectiva mediante la siguiente relación

$$X_{eff} = \frac{V^2}{Q_c} \quad \text{Ecuación [24]}$$

Dónde:

$X_{eff}$ : Reactancia efectiva del sistema

V: voltaje del sistema

$Q_c$ : Potencia reactiva a compensar en el sistema

A continuación se determina la reactancia capacitiva del sistema con la expresión:

$$X_c = \frac{h^2}{h^2-1} * X_{eff} \quad \text{Ecuación [25]}$$

Dónde:

$X_c$ : Reactancia capacitiva del sistema

h: componente armónica a compensar una vez realizado los cálculos previos

Se puede determinar el tamaño del capacitor a instalar gracias a la siguiente relación:

$$C = \frac{1}{2 * \pi * f * X_c} \quad \text{Ecuación [26]}$$

Dónde:

C: Reactancia capacitiva del sistema

Ahora se establece la capacidad del reactor inductivo ya que estos componentes ayudan a corregir la distorsión armónica, se determina aplicando la ecuación:

$$X_L = \frac{X_C}{h^2} \quad \text{Ecuación [27]}$$

Dónde:

$X_C$ : reactor inductivo

Con el resultado determinado anteriormente se determina la capacidad del inductor, con la ecuación:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad \text{Ecuación [28]}$$

Una vez realizado los cálculos previos, se determina el conjunto de elementos por los cuales está formado el filtro para compensar una componente armónica en específico.

**TABLA 7 - VENTAJAS Y DESVENTAJAS ENTRE LAS CONFIGURACIONES DE FILTROS**

| <b>Configuraciones</b> | <b>Ventajas</b>   | <b>Desventajas</b>  |
|------------------------|---|---|
| Sintonizado Simple     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Proporciona una máxima atenuación para una armónica individual.</li> <li>• A frecuencia fundamental puede proporcionar la potencia reactiva requerida en la red.</li> <li>• Tiene bajas pérdidas, las cuales asociadas a la resistencia del inductor y la resistencia del filtro</li> <li>• Se evita la amplificación</li> </ul>                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vulnerable a la desintonía debido a tolerancias de elementos con la temperatura y/o variaciones de frecuencia fundamental.</li> <li>• Interactúan con la red originando una resonancia paralela al igual que un banco de condensadores. Se debe tener precauciones en el diseño de la batería sobre todo en la entrada y salida de escalones.</li> </ul>           |
| Pasa Altos de 2° Orden | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Atenúan un amplio espectro de armónicas de acuerdo a la elección del valor de la resistencia, sin la necesidad de subdivisión en ramas paralelas.</li> <li>• Es muy robusto frente a de sintonías comparado con el filtro sintonizado simple.</li> <li>• Se evita la amplificación.</li> <li>• Amortigua el espectro de orden superior.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Origina una frecuencia de resonancia paralela al interactuar con la red.</li> <li>• Las pérdidas en la resistencia y en el inductor son generalmente altas.</li> <li>• Para alcanzar un nivel similar de filtrado (de una armónica específica), que el sintonizado simple, el filtro pasa altos necesita ser diseñado para una mayor potencia reactiva.</li> </ul> |

Elaborado: Por los Postulantes

## CAPITULO II

### PRESENTACION, INTERPRETACION Y ANALISIS DE RESULTADOS

#### 2.1.Aspectos generales de la zona de análisis

Como aspecto principal la zona de análisis cuenta con usuarios tipo residenciales que accedieron al Programa PEC, para la utilización de cocinas de inducción, accediendo al cambio de medidor 220 V y Circuito Express.

La zona de análisis en cuestión está situada en el sector centro del Cantón Salcedo, denominado barrio “LA FLORIDA”, perteneciente a la concesión de la ELEPCO S.A., con un numero definido de usuarios residenciales tomados de la base de datos de la empresa, es la zona de estudio del presente trabajo.

##### 2.1.1. Ubicación geográfica

GRÁFICO 9 - DELIMITACIÓN DEL BARRIO LA FLORIDA

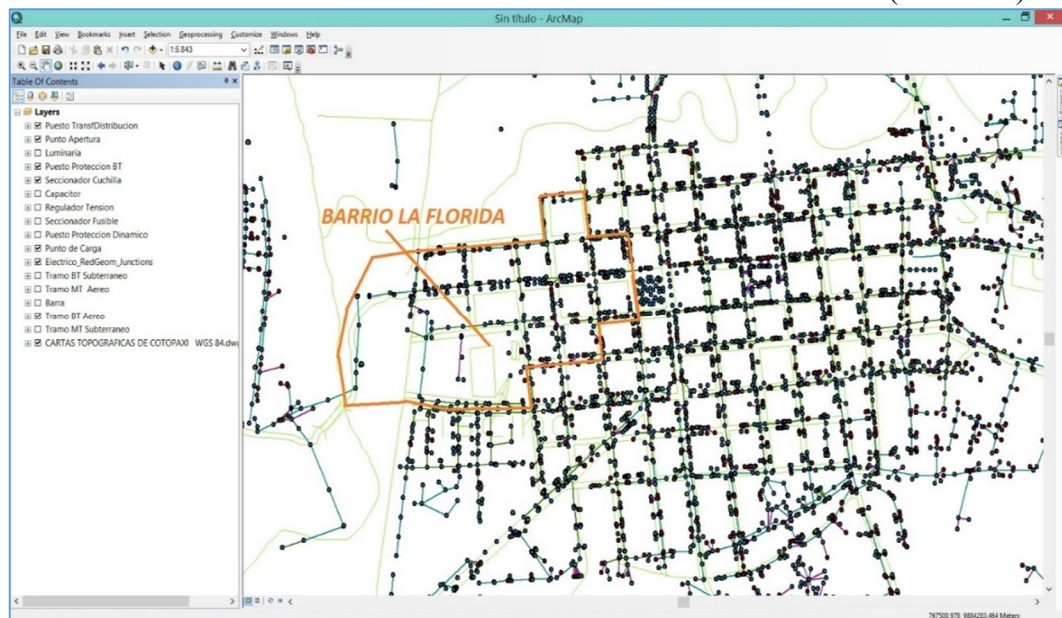


Fuente: Departamento de Planificación GAD Salcedo

En el gráfico N° 9 se puede apreciar el barrio la florida, zona de análisis para el presente trabajo de grado, se observa el gráfico detallado con el nombre de las calles del sector, así también como las plazas y parques.

Para el gráfico N° 10 se toma como referencia el diagrama que se obtiene del software computacional ARCGIS, de la base de datos de la Empresa Eléctrica Cotopaxi, dentro se encuentra los parámetros eléctricos representados por puntos, parámetros como son postes, transformadores de distribución, medidores de energía, tramos de media y baja tensión entre otros.

GRÁFICO 10 - DELIMITACIÓN DEL BARRIO LA FLORIDA (ARCGIS)



Fuente: Base de datos, ARCGIS

### 2.1.2. Datos del alimentador Salcedo salida 1

Por motivos de confiabilidad del sistema eléctrico, cada empresa distribuidora, divide su sistema en varios alimentadores según la ubicación geográfica de las subestaciones de energía.

Para el caso de estudio, el alimentador que contiene el sector es el proveniente de la subestación Salcedo, perteneciente a ELEPCO S.A., la salida N°1 llamado alimentador Industrial Sur

### **2.1.3. Datos de los transformadores de distribución**

A continuación se detalla, el estado de cada uno de los transformadores de distribución que se encuentran instalados en el barrio La Florida, se debe considerar que cada transformador está conectado a un número determinado de usuarios.

**TABLA 8 - DATOS DE TRANSFORMADOR UBICADOS EN EL BARRIO LA FLORIDA**

| PROVINCIA    | CANTON  | ALIMENTADOR    | NIVEL DE VOLTAJE | TIPO       | MONTAJE | N° TRAF0 | CODIGO  | POTENCIA (KVA) | USUARIOS |
|--------------|---------|----------------|------------------|------------|---------|----------|---------|----------------|----------|
| COTOPAXI     | SALCEDO | SALCEDO CENTRO | 13.8 kV.         | MONOFASICO | POSTE   | 4155     | 1C25T   | 25             | 1        |
|              |         |                | 13.8 kV.         | TRIFASICO  | POSTE   | 7516     | 3C100T  | 100            | 79       |
|              |         |                | 13.8 kV.         | MONOFASICO | POSTE   | 7989     | 1C37.5T | 37,5           | 1        |
|              |         |                | 13.8 kV.         | MONOFASICO | POSTE   | 7923     | 1C50T   | 50             | 1        |
|              |         |                | 13.8 kV.         | MONOFASICO | POSTE   | 4301     | 1C10T   | 10             | 1        |
|              |         |                | 13.8 kV.         | TRIFASICO  | POSTE   | 8284     | 3C30T   | 30             | 49       |
|              |         |                | 13.8 kV.         | TRIFASICO  | POSTE   | 5117     | 3C75T   | 75             | 114      |
| <b>TOTAL</b> |         |                |                  |            |         |          |         | <b>247</b>     |          |

Elaborado: Por los Postulantes

Como se observa en la tabla N°8 varios transformadores corresponde a 1 solo usuario, estos abastecen cargas privadas por lo que para este caso de estudio se omite el análisis de los mismos.

### **2.1.4. Datos de medidores con cocinas de inducción.**

De la tabla N°7 se aprecia que 3 transformadores cuentan con usuarios residenciales, el Transformador N°5117 con 114 usuarios; ningún usuario se acogió al programa PEC por lo cual no se lo considero para el presente análisis.

A continuación se muestra la tabla de usuarios que se acogieron al programa PEC, dentro del barrio la Florida, de los cuales se realizó el análisis de la distorsión armónica de voltaje.

La tabla N° 9 muestra los sitios en donde se ubicaron los elementos de medida analizadores de carga durante el periodo explicado en la metodología, así como ubicación georreferenciada específica

TABLA 9 - MEDIDORES DE ANÁLISIS

| ITEM | MEDIDOR | ZONA   | N° TRAF0 | VOLTAJE | N° POSTE | X      | Y       |
|------|---------|--------|----------|---------|----------|--------|---------|
| 1    | 186520  | URBANA | 8284     | 220 V   | 127225   | 767978 | 9884696 |
| 2    | 184969  | URBANA | 8284     | 220 V   | 127225   | 767978 | 9884696 |
| 3    | 175403  | URBANA | 8284     | 220 V   | 127237   | 768070 | 9884644 |
| 4    | 179510  | URBANA | 8284     | 220 V   | 127238   | 768074 | 9884612 |
| 5    | 173227  | URBANA | 7516     | 220 V   | 131150   | 768027 | 9884417 |
| 6    | 159319  | URBANA | 7516     | 220 V   | 127234   | 768077 | 9884471 |

Elaborado: Por los Postulantes

La tabla N°9, explica además a que transformador de distribución se encuentra conectado cada medidor de energía, así como el número de poste respectivo.

## **2.2.Diseño metodológico**

### ***2.2.1. Método de investigación***

#### ***2.2.1.1.Método Inductivo – Deductivo***

El método inductivo – deductivo Se lo utilizo para la compilación de datos de las mediciones tomadas con los analizadores de redes, para posterior plantear la propuesta más apropiada para dar una solución puntual a la investigación.

#### ***2.2.1.2.Método Analítico Sintético***

Aplicando este método se realizó el levantamiento de información e identificación del número de transformadores con problemas de distorsión armónica de voltaje que compone el sistema de distribución en el barrio la Florida para lo cual el estudio se enfocó en el transformador más crítico.

### ***2.2.2. Tipos de Investigación***

#### ***2.2.2.1.Investigación Bibliográfica***

Se utiliza para anotar datos completos de los libros que se utilizan en nuestra investigación como fuente principal de conceptos e información y para fundamentar los conocimientos adquiridos, conjuntamente se señala la aplicación de la regulación Arconel 004/01 enfoque a calidad de energía eléctrica.

#### ***2.2.2.2.Investigación de campo***

Se necesitó de este tipo de investigación porque interviene el investigador en el lugar de los hechos, es decir donde se encuentra el objeto que vamos a investigar como lo es la calidad de energía para luego proceder con la propuesta de solución y así dar mayor énfasis a la investigación.

### ***2.2.2.3. Investigación Experimental***

Se aplicó esta investigación, en los diferentes medidores de carga en los diferentes puntos de la red, de esta manera se determinó el comportamiento de las cocinas de inducción, además se ubicó los equipos a las salidas de dos transformadores para la adquisición de datos.

### ***2.2.3. Técnicas de Investigación***

#### ***2.2.3.1. La Observación***

Esta técnica se aplicó de forma directa en el sistema de distribución de bajo voltaje, así como en los medidores de energía, postes, en general a los diferentes componentes que comprenden la red eléctrica en el barrio La Florida.

### **2.3. Metodología de análisis**

Según la "Regulación del ARCONEL– N° 004/01, "CALIDAD DEL SERVICIO ELECTRICO DE DISTRIBUCION", Pág. 8, "Las mediciones de los armónicos se registran durante un periodo no inferior a 7 días continuos, en intervalos de medición de 10 minutos"

Los equipos que se detallan a continuación tienen la característica programada de realizar el registro en base a la norma internacional en el lapso estipulado de 10 minutos en todas las mediciones durante el ciclo de estudio.

Una vez que se obtiene los datos en bloque del software del analizador de red se procede a pasar a Excel en el cual permite la adquisición de datos de cualquier día del periodo de análisis para así ir seleccionando los parámetros eléctricos en función de mínimos, promedios y máximos para determinar con claridad el comportamiento de los equipos involucrados en el sector de análisis de la investigación.

#### **2.4. Esquema representativo del sector a analizar**

A continuación se detalla un esquema, el cual muestra los componentes de la red eléctrica presente en el Barrio la Florida, para luego facilitar la interpretación tanto de la adquisición de datos como de resultados.

*Ver Anexo 2*

El diagrama unifilar eléctrico muestra el equivalente del sistema eléctrico de distribución de el sector de análisis es decir el barrio residencial La Florida, perteneciente al cantón Salcedo.

#### **2.5. Adquisición de datos**

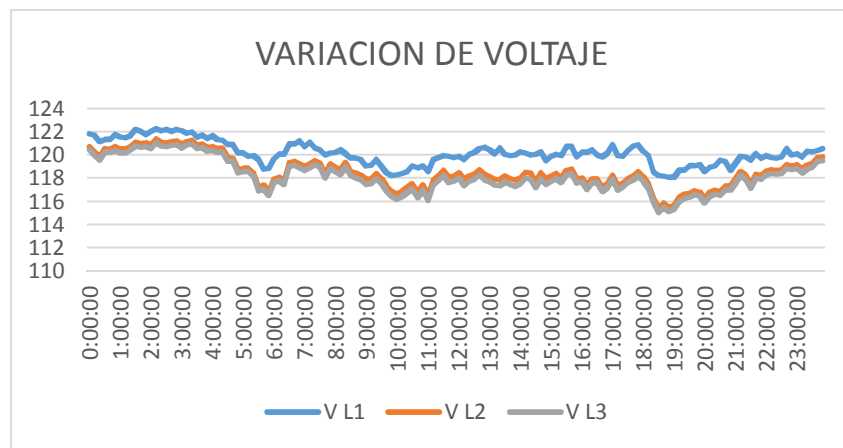
Según el esquema detallado anteriormente, el análisis se procede de la siguiente manera:

- Toma de datos de cocina de inducción
- Toma de datos de medidor de energía, sin cocina de inducción
- Toma de datos de transformador, con cocinas de inducción
- Toma de datos de medidor de energía con cocina de inducción

### 2.5.1. Medición en el transformador de distribución N° 7516

El Analizador de red considerado para este análisis fue ubicado en el transformador de distribución N° 7516 de la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi S.A. , en el periodo de estudio comprendido entre los días desde el 28 de enero de 2016 hasta el 4 de febrero de 2016, posterior se detalla los parámetros eléctricos registrados para el mismo.

GRÁFICO 11 – VARIACIÓN DIARIA DE VOLTAJE TRANSFORMADOR N°7516



Elaborado: Por los Postulantes

En el gráfico N° 11, se puede observar el comportamiento del voltaje para el transformador trifásico de uso residencial, analizado en un día hábil.

TABLA 10 - NIVELES DE VOLTAJE Y CORRIENTE EN EL TRANSFORMADOR N°7516

| Limite   | Voltaje |        |        | Corriente |        |        |       |
|----------|---------|--------|--------|-----------|--------|--------|-------|
|          | L1      | L2     | L3     | L1        | L2     | L3     | N     |
|          | (V)     |        |        | i(A)      |        |        |       |
| Mínimo   | 123,02  | 122,50 | 124,85 | 58,40     | 88,10  | 45,30  | 22,77 |
| Promedio | 128,11  | 127,35 | 129,29 | 114,18    | 176,10 | 96,44  | 54,60 |
| Máximo   | 132,86  | 131,91 | 133,70 | 203,20    | 327,40 | 192,40 | 95,02 |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 10 se aprecia un resumen de los límites de voltajes y corrientes a nivel del

transformador del barrio en sus diferentes líneas tomados durante el periodo de análisis de 7 días, el cual muestra características importantes de análisis.

TABLA 11 - INDICADORES DE POTENCIA EN TRASFORMADOR N°7516

| Limite   | Potencia Real |          |          | TOTAL    | Potencia Reactiva |          |         | TOTAL    |
|----------|---------------|----------|----------|----------|-------------------|----------|---------|----------|
|          | L1            | L2       | L3       |          | L1                | L2       | L3      |          |
|          | P (W)         |          |          |          | Q (VAr)           |          |         |          |
| Mínimo   | 6801,99       | 8585,80  | 5037,78  | 22228,98 | 2724,72           | 5919,89  | 98,01   | 11055,68 |
| Promedio | 13258,30      | 20282,76 | 11845,26 | 45388,59 | 5246,82           | 8178,44  | 2822,69 | 16250,01 |
| Máximo   | 24169,60      | 39675,00 | 24130,40 | 77330,97 | 8566,19           | 11878,98 | 7174,43 | 25541,76 |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 11 se muestra un resumen de las potencias a nivel del transformador, tanto la Potencia Activa como la Potencia Reactiva para sus 3 fases durante el periodo de análisis antes establecido por la norma, estos indicadores muestran el uso del transformador para establecer el porcentaje de su potencia nominal que se está utilizando.

TABLA 12 - ÍNDICES DE ENERGÍA EN TRANSFORMADOR N°7516

| Limite   | Energía |         |         | TOTAL    | Factor de Potencia |      |      | TOTAL |
|----------|---------|---------|---------|----------|--------------------|------|------|-------|
|          | L1      | L2      | L3      |          | L1                 | L2   | L3   |       |
|          | (Wh)    |         |         |          |                    |      |      |       |
| Mínimo   | 1133,66 | 1430,97 | 839,63  | 3708,10  | 0,82               | 0,72 | 0,82 | 0,83  |
| Promedio | 2209,72 | 3380,46 | 1974,21 | 7564,66  | 0,91               | 0,90 | 0,95 | 0,91  |
| Máximo   | 4028,27 | 6612,50 | 4021,73 | 12885,23 | 0,97               | 0,97 | 1,00 | 0,97  |

Elaborado: Por los Postulantes

La tabla 12 indica el resumen de valores de energía suministrada por el transformador en el barrio, así como también los índices de Factor de potencia, como se aprecia, el transformador tiene problemas de bajo factor de potencia.

**TABLA 13 - INDICADOR DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE VOLTAJE EN TRANSFORMADOR N°7516**

| Limite   | THDv |      |      |
|----------|------|------|------|
|          | L1   | L2   | L3   |
|          | (%)  |      |      |
| Mínimo   | 0,78 | 0,75 | 0,56 |
| Promedio | 1,72 | 1,80 | 1,44 |
| Máximo   | 2,76 | 2,89 | 2,57 |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 13 se presenta los indicadores de THD de voltaje por cada línea en lo cual muestra niveles aceptables según la regulación utilizada (Arconel 004/01).

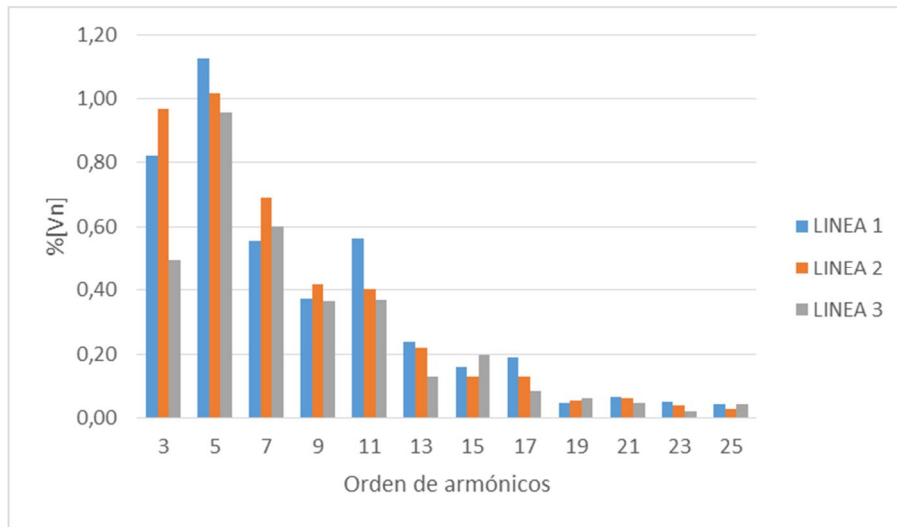
**TABLA 14 - VALORES DE ARMÓNICOS DE VOLTAJE EN TRANSFORMADOR N°7516**

| N° | Armónicos de Voltaje |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|    | L1                   |      |      | L2   |      |      | L3   |      |      |
|    | Min                  | Prom | Max  | Min  | Prom | Max  | Min  | Prom | Max  |
| 3  | 0,26                 | 0,82 | 1,52 | 0,36 | 0,97 | 1,90 | 0,00 | 0,50 | 1,20 |
| 5  | 0,36                 | 1,13 | 2,16 | 0,31 | 1,02 | 1,94 | 0,15 | 0,96 | 1,83 |
| 7  | 0,05                 | 0,56 | 1,40 | 0,05 | 0,69 | 2,16 | 0,00 | 0,60 | 1,81 |
| 9  | 0,05                 | 0,37 | 0,66 | 0,00 | 0,42 | 0,86 | 0,11 | 0,36 | 0,67 |
| 11 | 0,20                 | 0,56 | 1,18 | 0,05 | 0,40 | 0,87 | 0,00 | 0,37 | 0,87 |
| 13 | 0,00                 | 0,24 | 0,46 | 0,00 | 0,22 | 0,65 | 0,00 | 0,13 | 0,46 |
| 15 | 0,05                 | 0,16 | 0,31 | 0,05 | 0,13 | 0,26 | 0,05 | 0,20 | 0,42 |
| 17 | 0,05                 | 0,19 | 0,42 | 0,05 | 0,13 | 0,36 | 0,05 | 0,09 | 0,26 |
| 19 | 0,00                 | 0,05 | 0,20 | 0,00 | 0,05 | 0,20 | 0,00 | 0,06 | 0,21 |
| 21 | 0,00                 | 0,06 | 0,26 | 0,00 | 0,06 | 0,20 | 0,00 | 0,05 | 0,15 |
| 23 | 0,00                 | 0,05 | 0,20 | 0,00 | 0,04 | 0,20 | 0,00 | 0,02 | 0,11 |
| 25 | 0,00                 | 0,04 | 0,26 | 0,00 | 0,03 | 0,15 | 0,00 | 0,04 | 0,21 |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 13 se detalla las magnitudes de los armónicos impares involucrados en el estudio para cada una de las líneas teniendo algunos casos considerables que afectan a la red eléctrica.

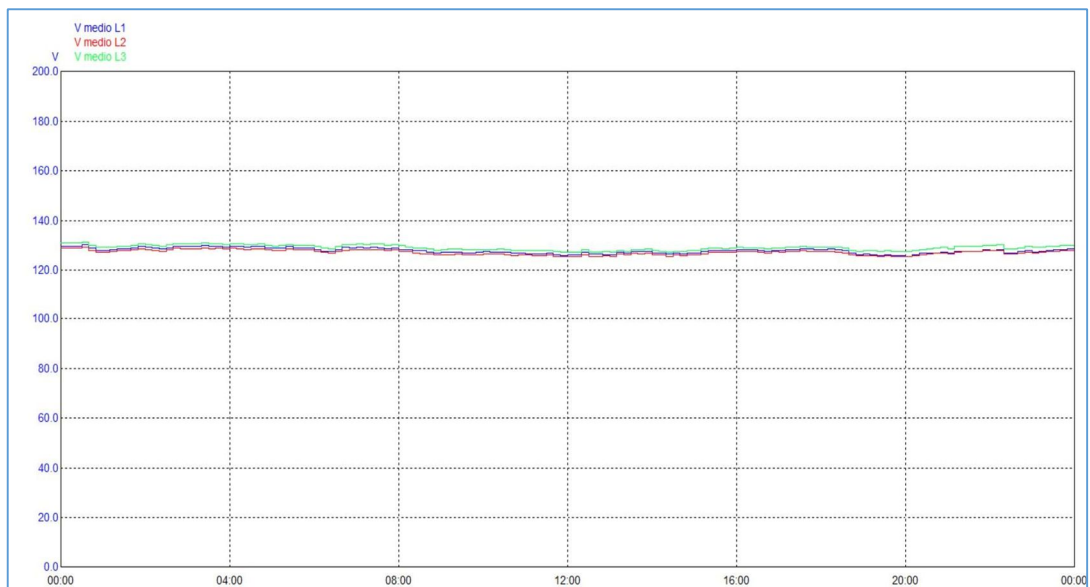
GRÁFICO 12 - ARMÓNICOS DE VOLTAJE EN TRANSFORMADOR N°7516



Elaborado: Por los Postulantes

En el gráfico 12 muestra el espectro armónico en el transformador, como se puede apreciar, el quinto armónico y el onceavo son los responsables de deformación en la forma de onda fundamental

GRÁFICO 13 – DIAGRAMA NIVEL TIEMPO EN TRANSFORMADOR N°7516



Fuente: Codam Plus

En el gráfico 13 se aprecia el voltaje en el tiempo para 1 día hábil de estudio, y se aprecia que no tiene variaciones excesivas por lo tanto el transformador se encuentra operando en niveles óptimos de calidad de energía.

### 2.5.2. Medidor de energía N° 159319

El medidor de energía para este caso es el número 159319, de características medidor bifásico, conectado al circuito secundario del transformador N° 7516 además el usuario no posee cocina de inducción; por lo tanto este medidor es considerado como muestra base para los futuros análisis.

TABLA 15 - NIVELES DE VOLTAJE EN MEDIDOR N°159319

| Limite   | Voltaje |        | Corriente |       |       |
|----------|---------|--------|-----------|-------|-------|
|          | L1      | L2     | L1        | L2    | N     |
|          | (V)     |        | i(A)      |       |       |
| Mínimo   | 119,53  | 123,15 | 0,00      | 0,00  | 0,00  |
| Promedio | 126,83  | 128,51 | 0,00      | 0,75  | 0,76  |
| Máximo   | 131,05  | 133,96 | 0,21      | 22,30 | 22,40 |

Elaborado: Por los Postulantes

La tabla 15 muestra niveles de voltaje en un medidor que no utiliza la cocina de inducción para sus 2 líneas en los límites establecidos, se aprecia el desbalance de corriente entre las dos fases.

TABLA 16 - INDICADORES DE POTENCIA EN MEDIDOR N°159319

| Limite   | Potencia Activa |         | TOTAL   | Potencia Reactiva |         | TOTAL   |
|----------|-----------------|---------|---------|-------------------|---------|---------|
|          | L1              | L2      |         | L1                | L2      |         |
|          | P (W)           |         |         | Q (VAr)           |         |         |
| Mínimo   | 0,00            | 0,00    | 0,00    | 0,00              | 0,00    | 0,00    |
| Promedio | 0,02            | 48,49   | 48,30   | 0,00              | 45,89   | 45,90   |
| Máximo   | 4,84            | 2603,77 | 2603,77 | 1,45              | 2134,51 | 2135,96 |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 16 se indican los valores de las potencias involucradas en el medidor de energía, el cual se representa en sus límites.

**TABLA 17 - ÍNDICES DE ENERGÍA EN MEDIDOR N°159319**

| Limite   | Energía |        | TOTAL  | Factor de Potencia |      | TOTAL |
|----------|---------|--------|--------|--------------------|------|-------|
|          | L1      | L2     |        | L1                 | L2   |       |
|          | (Wh)    |        |        |                    |      |       |
| Mínimo   | 0,00    | 0,00   | 0,00   | 0,00               | 0,00 | 0,00  |
| Promedio | 0,00    | 8,08   | 8,09   | 1,00               | 0,62 | 0,62  |
| Máximo   | 0,81    | 433,96 | 433,96 | 1,00               | 1,00 | 1,00  |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 17 indica los índices de energía en el medidor se puede notar un bajo consumo de energía lo que demuestra que en este medidor no se utiliza energía adicional para cocción, además tiene un bajo factor de potencia

**TABLA 18 - INDICADOR DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE VOLTAJE EN MEDIDOR N°159319**

| Limite   | THDv |      |
|----------|------|------|
|          | L1   | L2   |
|          | (%)  |      |
| Mínimo   | 1,28 | 0,53 |
| Promedio | 1,99 | 1,38 |
| Máximo   | 3,37 | 2,57 |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 18 se indica el resumen de THD de voltaje, para este caso se efectuó su medición correspondiente con sus límites para cada línea.

**TABLA 19 - VALORES DE ARMÓNICOS DE VOLTAJE EN MEDIDOR N°159319**

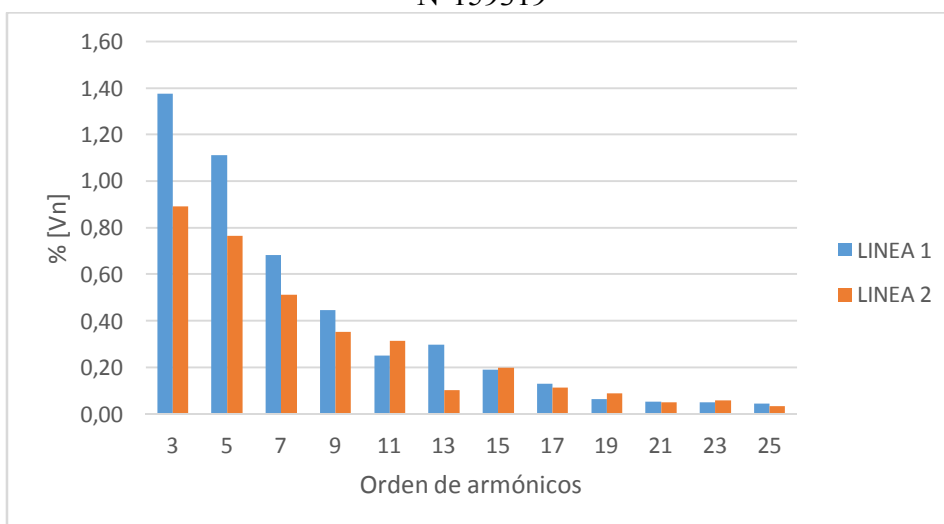
| N° | Armónicos de Voltaje |      |      |      |      |      |
|----|----------------------|------|------|------|------|------|
|    | L1                   |      |      | L2   |      |      |
|    | Min                  | Prom | Max  | Min  | Prom | Max  |
| 3  | 0,48                 | 1,38 | 3,07 | 0,16 | 0,89 | 2,19 |
| 5  | 0,37                 | 1,11 | 1,87 | 0,16 | 0,76 | 1,40 |
| 7  | 0,16                 | 0,68 | 1,58 | 0,05 | 0,51 | 1,06 |
| 9  | 0,05                 | 0,45 | 0,85 | 0,00 | 0,35 | 0,91 |
| 11 | 0,00                 | 0,25 | 0,53 | 0,05 | 0,31 | 0,60 |
| 13 | 0,05                 | 0,30 | 0,64 | 0,00 | 0,10 | 0,37 |
| 15 | 0,05                 | 0,19 | 0,43 | 0,05 | 0,20 | 0,54 |
| 17 | 0,05                 | 0,13 | 0,27 | 0,05 | 0,11 | 0,27 |
| 19 | 0,00                 | 0,06 | 0,21 | 0,00 | 0,09 | 0,33 |
| 21 | 0,00                 | 0,05 | 0,21 | 0,00 | 0,05 | 0,27 |
| 23 | 0,00                 | 0,05 | 0,16 | 0,00 | 0,06 | 0,17 |
| 25 | 0,00                 | 0,05 | 0,21 | 0,00 | 0,03 | 0,11 |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 19 se detalla para armónicos de voltaje en este caso del medidor de energía, se tiene valores límites de armónicos impares por cada línea.

En base al análisis de tablas realizado, se observa que el usuario, no presenta problemas ocasionados por armónicos de voltaje además se encuentran dentro de los límites establecidos.

GRÁFICO 14 - ESPECTRO ARMONICO EN EL MEDIDOR DE ENERGIA N°159319



Elaborado: Por los Postulantes

En el grafico N° 14, se aprecia el espectro armónico en medidor de energía, donde se aprecia que el armónico de orden 3, es el que más afecta a la red.

### 2.5.3. Medidor de energía N°173227

TABLA 20 - NIVELES DE VOLTAJE EN MEDIDOR N°173227

| Limite   | Voltaje |        | Corriente |       |       |
|----------|---------|--------|-----------|-------|-------|
|          | L1      | L2     | L1        | L2    | N     |
|          | (V)     |        | i(A)      |       |       |
| Mínimo   | 113,09  | 107,51 | 0,55      | 0,55  | 0,00  |
| Promedio | 117,60  | 117,27 | 0,78      | 1,49  | 1,18  |
| Máximo   | 120,98  | 121,51 | 6,96      | 16,18 | 15,89 |

Elaborado: Por los Postulantes

La tabla 20 muestra niveles de voltaje en un medidor que si utiliza la cocina de inducción, para sus 2 líneas en los límites establecidos.

TABLA 21 - INDICADORES DE POTENCIA EN MEDIDOR N°173227

| Limite   | Potencia Activa |         | TOTAL   | Potencia Reactiva |        | TOTAL  |
|----------|-----------------|---------|---------|-------------------|--------|--------|
|          | L1              | L2      |         | L1                | L2     |        |
|          | P (W)           |         |         | Q (VAr)           |        |        |
| Mínimo   | 0,00            | 1,93    | 0,00    | 52,95             | 0,00   | 0,00   |
| Promedio | 23,51           | 119,55  | 140,24  | 71,95             | 57,40  | 100,90 |
| Máximo   | 782,34          | 1317,12 | 1631,16 | 118,46            | 136,60 | 242,97 |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 21 se indican los valores de las potencias medidas en el contador de energía, el cual se representa en sus límites.

TABLA 22 - ÍNDICES DE ENERGÍA EN MEDIDOR N°173227

| Limite   | Energía |        | TOTAL  | Factor de Potencia |      | TOTAL |
|----------|---------|--------|--------|--------------------|------|-------|
|          | L1      | L2     |        | L1                 | L2   |       |
|          | (Wh)    |        |        |                    |      |       |
| Mínimo   | 0,00    | 0,28   | 0,08   | 0,00               | 0,02 | 0,00  |
| Promedio | 3,89    | 19,93  | 23,42  | 0,10               | 0,65 | 0,45  |
| Máximo   | 130,39  | 219,52 | 271,82 | 0,98               | 0,99 | 0,99  |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 22 para índices de energía en el medidor se puede notar un bajo consumo de energía.

TABLA 23 - INDICADOR DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE VOLTAJE EN MEDIDOR N°173227

| Limite   | THDv |      |
|----------|------|------|
|          | L1   | L2   |
|          | (%)  |      |
| Mínimo   | 1,17 | 1,33 |
| Promedio | 1,79 | 2,11 |
| Máximo   | 3,70 | 4,48 |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 23 se indica el resumen de distorsión armónica de voltaje para el caso del medidor efectuado su análisis correspondiente.

TABLA 24 - VALORES DE ARMÓNICOS DE VOLTAJE EN MEDIDOR N°173227

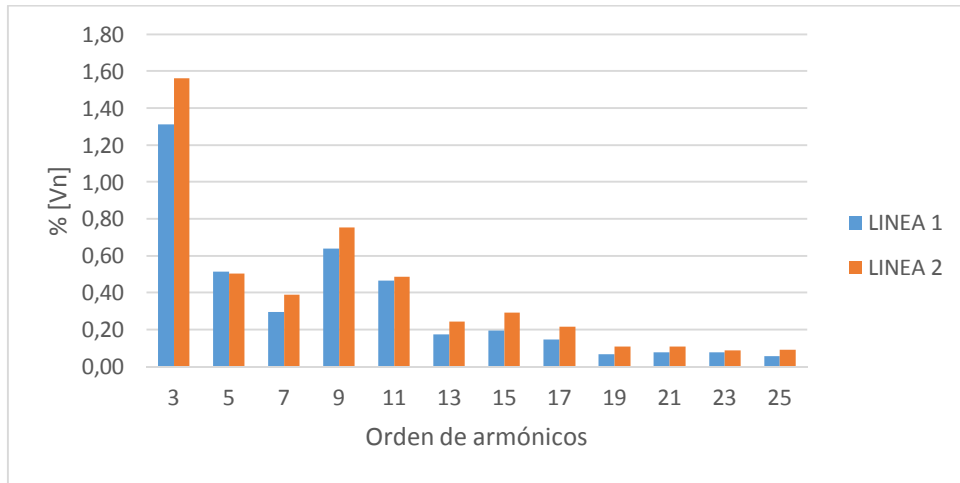
| N° | Armónicos de Voltaje |      |      |      |      |      |
|----|----------------------|------|------|------|------|------|
|    | L1                   |      |      | L2   |      |      |
|    | Min                  | Prom | Max  | Min  | Prom | Max  |
| 3  | 0,78                 | 1,31 | 2,89 | 0,78 | 1,56 | 3,94 |
| 5  | 0,05                 | 0,51 | 1,50 | 0,05 | 0,51 | 1,24 |
| 7  | 0,05                 | 0,30 | 1,24 | 0,05 | 0,39 | 1,04 |
| 9  | 0,33                 | 0,64 | 1,08 | 0,35 | 0,76 | 1,19 |
| 11 | 0,14                 | 0,47 | 0,89 | 0,10 | 0,49 | 1,06 |
| 13 | 0,00                 | 0,18 | 0,49 | 0,00 | 0,24 | 0,54 |
| 15 | 0,05                 | 0,19 | 0,43 | 0,05 | 0,29 | 0,64 |
| 17 | 0,05                 | 0,15 | 0,39 | 0,05 | 0,22 | 0,44 |
| 19 | 0,00                 | 0,07 | 0,24 | 0,00 | 0,11 | 0,45 |
| 21 | 0,00                 | 0,08 | 0,29 | 0,00 | 0,11 | 0,35 |
| 23 | 0,00                 | 0,08 | 0,25 | 0,00 | 0,09 | 0,34 |
| 25 | 0,00                 | 0,06 | 0,25 | 0,00 | 0,09 | 0,34 |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 24 para armónicos de voltaje en este caso del medidor de energía, se visualiza los valores límites de armónicos impares por cada línea.

Según lo analizado, los dos usuarios que se acogieron al programa PEC y están conectados al transformador N°7516, no utilizan la cocina de inducción como elemento de cocción de alimentos a diario, ni semanalmente, la deformación de la forma de onda apreciada en el grafico N°11, no obedece a la cocina de inducción.

GRÁFICO 15 - ESPECTRO ARMONICO EN MEDIDOR DE ENERGIA  
N°173227



Elaborado: Por los Postulantes

En el grafico N° 15, se puede apreciar el espectro armónico para el medidor de energía, como se muestra el armónico de orden 9, contamina la red eléctrica de bajo voltaje

#### 2.5.4. Transformador de distribución N°8284

El transformador utilizado para este caso de estudio es de característica trifásico, como se muestra en la tabla N° 8, además tiene conectados 49 usuarios; de los cuales, 4 usuarios se acogen al programa PEC, y mantienen la cocina de inducción funcionando.

TABLA 25 - NIVELES DE VOLTAJE EN TRANSFORMADOR N°8284

| Limite   | Voltaje |        |        | Corriente |        |        |       |
|----------|---------|--------|--------|-----------|--------|--------|-------|
|          | L1      | L2     | L3     | L1        | L2     | L3     | N     |
|          | (V)     |        |        | i(A)      |        |        |       |
| Mínimo   | 117,43  | 115,31 | 116,37 | 31,89     | 41,74  | 36,82  | 5,06  |
| Promedio | 120,45  | 119,10 | 119,77 | 163,13    | 88,49  | 125,81 | 16,30 |
| Máximo   | 123,00  | 122,33 | 122,67 | 202,50    | 191,22 | 196,86 | 20,35 |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 25 se aprecia un resumen de los límites de voltajes y corrientes a nivel del segundo transformador del barrio en sus diferentes líneas tomadas durante el periodo de análisis de 7 días dispuesto por la regulación.

**TABLA 26 - INDICADORES DE POTENCIA EN TRANSFORMADOR N°8284**

| Limite   | Potencia Activa |          |          | TOTAL    | Potencia Reactiva |         |         | TOTAL    |
|----------|-----------------|----------|----------|----------|-------------------|---------|---------|----------|
|          | L1              | L2       | L3       |          | L1                | L2      | L3      |          |
|          | P (W)           |          |          |          | Q (VAr)           |         |         |          |
| Mínimo   | 1,96            | 4078,25  | 4308,20  | 9,80     | 2,94              | 1,96    | 2,76    | 6,86     |
| Promedio | 4692,45         | 9181,85  | 5089,26  | 8883,26  | 2936,06           | 1704,66 | 1845,25 | 2960,17  |
| Máximo   | 16509,03        | 21544,86 | 20899,62 | 33845,28 | 9222,87           | 4543,81 | 5080,95 | 10467,61 |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 26 se aprecia las potencias a nivel del transformador para sus 3 líneas tomados durante el periodo de análisis de 7 días, pese a que en el sector están ubicados 4 usuarios con cocinas, la capacidad del transformador excede en 10%.

**TABLA 27 - ÍNDICES DE ENERGÍA EN TRANSFORMADOR N°8284**

| Limite   | Energía |         |         | TOTAL   | Factor de Potencia |      |      | TOTAL |
|----------|---------|---------|---------|---------|--------------------|------|------|-------|
|          | L1      | L2      | L3      |         | L1                 | L2   | L3   |       |
|          | (Wh)    |         |         |         |                    |      |      |       |
| Mínimo   | 0,33    | 679,71  | 720,12  | 1,63    | 0,75               | 0,84 | 0,90 | 0,75  |
| Promedio | 782,07  | 1530,31 | 1203,60 | 1480,54 | 0,88               | 0,90 | 0,92 | 0,89  |
| Máximo   | 2751,51 | 3590,81 | 3304,88 | 5640,88 | 0,93               | 0,91 | 0,94 | 0,95  |

Elaborado: Por los Postulantes

La tabla 27 indica el resumen de valores de energía suministrada por el transformador del barrio, de igual manera en el periodo de estudio señalado, además se puede observar los factores de potencia del transformador de igual manera con su valor total y para cada línea.

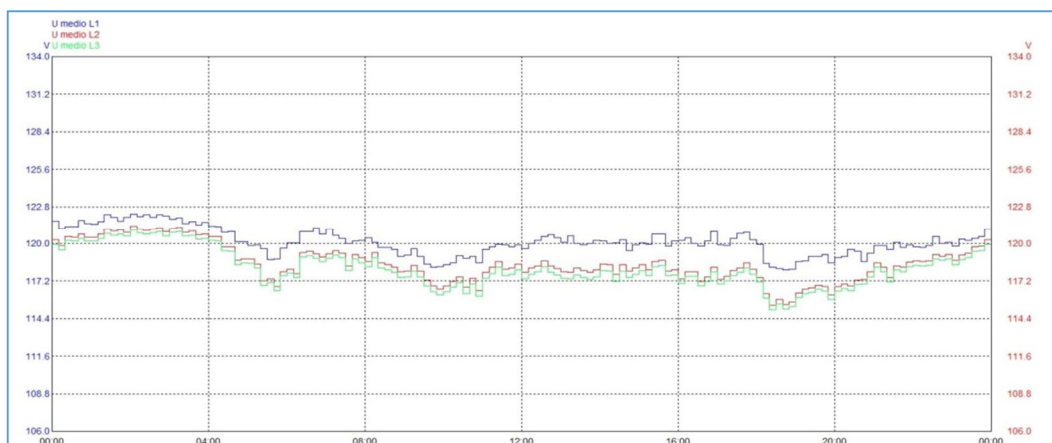
**TABLA 28 - INDICADOR DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE VOLTAJE EN TRANSFORMADOR N°8284**

| Limite   | THDv  |       |       |
|----------|-------|-------|-------|
|          | L1    | L2    | L3    |
|          | (%)   |       |       |
| Mínimo   | 5,45  | 4,56  | 5,01  |
| Promedio | 18,38 | 16,89 | 17,63 |
| Máximo   | 36,09 | 36,21 | 36,15 |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 28 se presenta los indicadores de distorsión armónica de voltaje por cada línea en niveles que sobrepasan los límites de la regulación planteada por la norma IEEE 519-1992.

GRÁFICO 16 - CURVA DE NIVEL TIEMPO EN EL TRANSFORMADOR N°8284



Fuente: Codam plus

En el gráfico N° 16 se muestra la curva de nivel del transformador N° 8284, en comparación con el gráfico N° 11, se aprecia la deformación continua del voltaje a través del tiempo, este gráfico se obtuvo como muestra de un día normal de trabajo.

### 2.5.5. Medidor de energía N° 175403

El medidor de energía conectado al transformador N° 8284, este usuario utiliza cocina de inducción, sus parámetros se muestra a continuación.

TABLA 29 - NIVELES DE VOLTAJE EN MEDIDOR N°175403

| Limite   | Voltaje |        | Corriente |      |      |
|----------|---------|--------|-----------|------|------|
|          | L1      | L2     | L1        | L2   | N    |
|          | (V)     |        | i(A)      |      |      |
| Mínimo   | 121,73  | 109,79 | 0,00      | 0,00 | 0,00 |
| Promedio | 129,61  | 124,00 | 0,47      | 0,00 | 0,02 |
| Máximo   | 139,74  | 129,79 | 6,45      | 0,29 | 0,32 |

Elaborado: Por los Postulantes

La tabla 29 muestra niveles de voltaje en un medidor que si utiliza la cocina de inducción, para sus 2 líneas en los límites establecidos, se puede apreciar que el usuario no utiliza la cocina de inducción.

TABLA 30 - INDICADORES DE POTENCIA EN MEDIDOR N°175403

| Limite   | Potencia Activa |       | TOTAL  | Potencia Reactiva |       | TOTAL |
|----------|-----------------|-------|--------|-------------------|-------|-------|
|          | L1              | L2    |        | L1                | L2    |       |
|          | P (W)           |       |        | Q (VAr)           |       |       |
| Mínimo   | 0,00            | 0,00  | 0,00   | 0,00              | 0,00  | 0,00  |
| Promedio | 33,94           | 0,10  | 33,87  | 33,00             | 0,36  | 33,10 |
| Máximo   | 402,05          | 15,96 | 401,81 | 64,82             | 34,81 | 64,82 |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 30 se indican los valores de las diferentes potencias en el medidor de energía, se puede apreciar que la potencia circula por una sola línea, esto hace mención a que el usuario no utiliza la cocina de inducción.

TABLA 31 - ÍNDICES DE ENERGÍA EN MEDIDOR N°175403

| Limite   | Energía |      | TOTAL  | Factor de Potencia |      | TOTAL |
|----------|---------|------|--------|--------------------|------|-------|
|          | L1      | L2   |        | L1                 | L2   |       |
|          | (Wh)    |      |        |                    |      |       |
| Mínimo   | 0,00    | 0,00 | 0,00   | 0,85               | 0,00 | 0,86  |
| Promedio | 56,56   | 0,02 | 56,72  | 0,89               | 0,99 | 0,88  |
| Máximo   | 670,08  | 2,66 | 670,08 | 0,94               | 1,00 | 1,00  |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 31 para índices de energía en el medidor se puede notar un bajo consumo de energía lo que demuestra que no utiliza energía adicional para cocción.

TABLA 32 - INDICADOR DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE VOLTAJE EN MEDIDOR N°175403

| Limite   | THDv |      |
|----------|------|------|
|          | L1   | L2   |
|          | (%)  |      |
| Mínimo   | 1,29 | 0,78 |
| Promedio | 2,07 | 1,99 |
| Máximo   | 3,66 | 3,84 |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 32 se indica el resumen de THD de voltaje, para el caso del medidor con sus límites correspondientes.

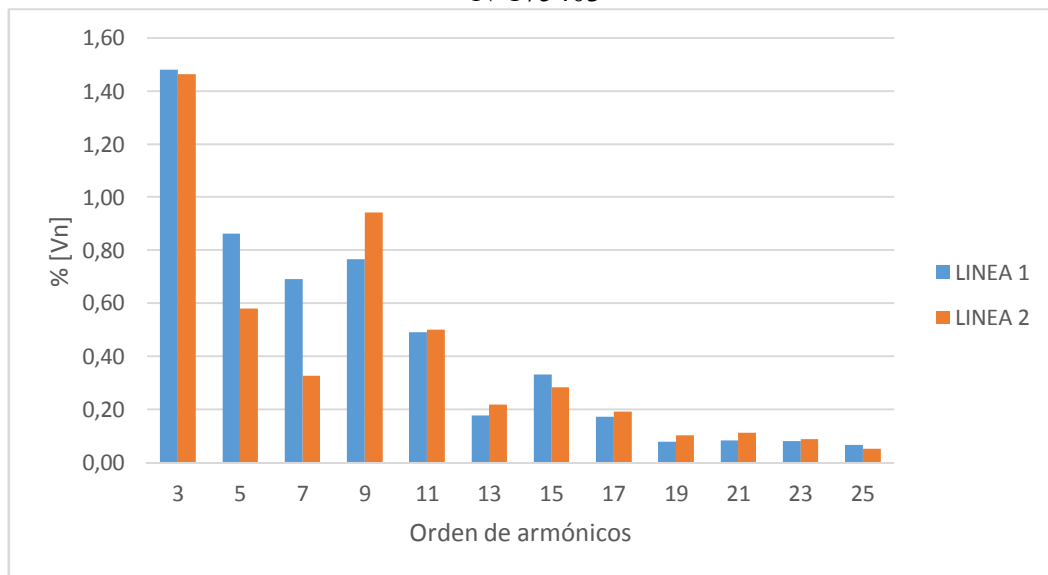
TABLA 33 - VALORES DE ARMÓNICOS DE VOLTAJE EN MEDIDOR N°175403

| N° | Armónicos de Voltaje |      |      |      |      |      |
|----|----------------------|------|------|------|------|------|
|    | L1                   |      |      | L2   |      |      |
|    | Min                  | Prom | Max  | Min  | Prom | Max  |
| 3  | 0,33                 | 1,48 | 3,31 | 0,31 | 1,46 | 3,18 |
| 5  | 0,16                 | 0,86 | 1,69 | 0,05 | 0,58 | 1,33 |
| 7  | 0,11                 | 0,69 | 1,61 | 0,05 | 0,33 | 0,79 |
| 9  | 0,22                 | 0,77 | 1,34 | 0,36 | 0,94 | 1,88 |
| 11 | 0,05                 | 0,49 | 0,91 | 0,10 | 0,50 | 1,02 |
| 13 | 0,00                 | 0,18 | 0,48 | 0,00 | 0,22 | 0,68 |
| 15 | 0,05                 | 0,33 | 0,81 | 0,05 | 0,29 | 0,89 |
| 17 | 0,05                 | 0,17 | 0,38 | 0,05 | 0,19 | 0,47 |
| 19 | 0,00                 | 0,08 | 0,38 | 0,00 | 0,10 | 0,32 |
| 21 | 0,00                 | 0,08 | 0,22 | 0,00 | 0,11 | 0,31 |
| 23 | 0,00                 | 0,08 | 0,22 | 0,00 | 0,09 | 0,26 |
| 25 | 0,00                 | 0,07 | 0,33 | 0,00 | 0,05 | 0,21 |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 33 para armónicos de voltaje en este caso del medidor de energía, los valores límites de armónicos impares por cada línea.

GRÁFICO 17 – ESPECTRO ARMONICO DE VOLTAJE EN EL MEDIDOR N°175403



Elaborado: Por los Postulantes

En el gráfico N° 17, se aprecia que el armónico de orden 9, contamina a la red con un alto aporte.

A continuación se mostrara mediciones para usuarios que tienen cocinas de inducción de diferentes tipos que depende de la potencia activa que consume la cocina, se constató que los usuarios que disponen de este electrodoméstico, lo utilizan a diferentes horarios, el transformador de distribución tiene un aumento en el tap.

#### ***2.5.6. Medidor de energía N° 184969***

A continuación se detallan en tablas, los valores más representativos tomados del analizador de carga para el medidor indicado, tomados desde el día 28 de enero hasta el 6 de febrero del año 2016

TABLA 34 - NIVELES DE VOLTAJE EN EL MEDIDOR N°184969

| Limite   | Voltaje |        | Corriente |       |      |
|----------|---------|--------|-----------|-------|------|
|          | L1      | L2     | L1        | L2    | N    |
|          | (V)     |        | i(A)      |       |      |
| Mínimo   | 121,22  | 119,10 | 0,98      | 0,78  | 0,19 |
| Promedio | 124,22  | 121,60 | 22,05     | 9,87  | 1,59 |
| Máximo   | 127,22  | 124,10 | 32,43     | 12,63 | 3,18 |

Elaborado: Por los Postulantes

La tabla 34 muestra niveles de voltaje en un medidor que utiliza la cocina de inducción para sus 2 líneas en los límites establecidos.

TABLA 35 - INDICADORES DE POTENCIA EN EL MEDIDOR N°184969

| Limite   | Potencia Activa |         | TOTAL   | Potencia Reactiva |        | TOTAL  |
|----------|-----------------|---------|---------|-------------------|--------|--------|
|          | L1              | L2      |         | L1                | L2     |        |
|          | P (W)           |         |         | Q (VAr)           |        |        |
| Mínimo   | 127,69          | 96,53   | 132,04  | 0,00              | 0,00   | 0,00   |
| Promedio | 801,80          | 490,50  | 988,35  | 181,99            | 123,46 | 188,15 |
| Máximo   | 4215,78         | 1667,40 | 5845,75 | 844,81            | 280,83 | 863,37 |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 35 se indican los valores de las potencias involucradas en el medidor de energía, se aprecia un alto consumo de potencia reactiva para este caso.

TABLA 36 – ÍNDICES DE ENERGÍA EN EL MEDIDOR N°184969

| Limite   | Energía |        | TOTAL   | Factor de Potencia |      | TOTAL |
|----------|---------|--------|---------|--------------------|------|-------|
|          | L1      | L2     |         | L1                 | L2   |       |
|          | (Wh)    |        |         |                    |      |       |
| Mínimo   | 3,66    | 1,26   | 6,77    | 0,75               | 0,79 | 0,75  |
| Promedio | 2040,23 | 441,59 | 2433,12 | 0,88               | 0,80 | 0,85  |
| Máximo   | 4040,61 | 862,09 | 4904,74 | 0,92               | 0,94 | 0,91  |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 36 para índices de energía en el medidor se puede apreciar un alto consumo de energía, el cual se debe al uso de la cocina de inducción.

TABLA 37 – INDICADOR DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE VOLTAJE EN MEDIDOR N°184969

| Limite   | THDv |      |
|----------|------|------|
|          | L1   | L2   |
|          | (%)  |      |
| Mínimo   | 1,60 | 1,78 |
| Promedio | 3,51 | 3,33 |
| Máximo   | 5,88 | 5,51 |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 37 se indica el resumen de THD de voltaje para el caso del medidor se encuentra por debajo de los límites establecidos en la Regulación del Arconel (004/01).

TABLA 38 – VALORES DE ARMÓNICOS DE VOLTAJE EN MEDIDOR N°184969

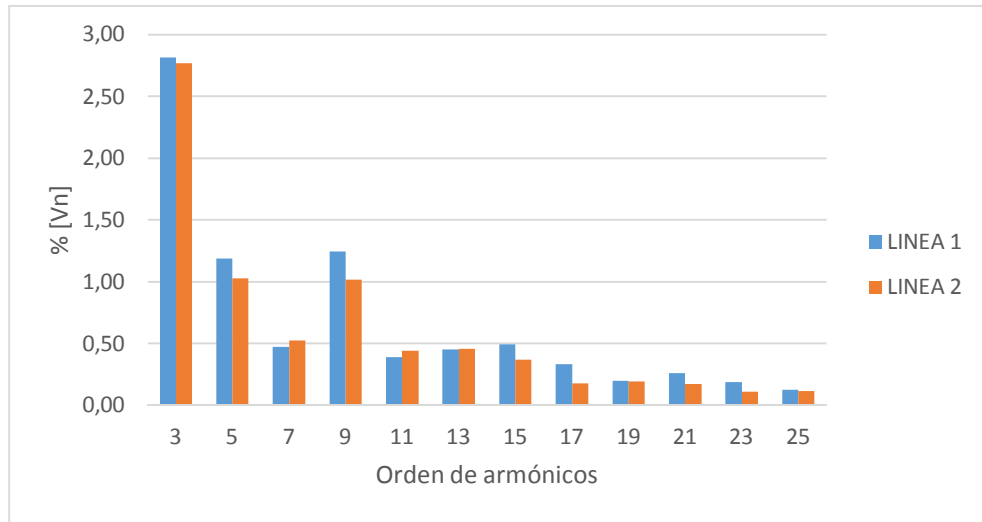
| N° | Armónicos de Voltaje |      |      |      |      |      |
|----|----------------------|------|------|------|------|------|
|    | L1                   |      |      | L2   |      |      |
|    | Min                  | Prom | Max  | Min  | Prom | Max  |
| 3  | 1,05                 | 2,82 | 5,12 | 1,25 | 2,77 | 5,01 |
| 5  | 0,31                 | 1,19 | 1,99 | 0,24 | 1,03 | 1,81 |
| 7  | 0,07                 | 0,48 | 1,16 | 0,10 | 0,52 | 1,43 |
| 9  | 0,67                 | 1,25 | 1,89 | 0,64 | 1,02 | 1,45 |
| 11 | 0,06                 | 0,39 | 0,74 | 0,05 | 0,44 | 0,84 |
| 13 | 0,13                 | 0,45 | 0,86 | 0,08 | 0,46 | 0,79 |
| 15 | 0,16                 | 0,49 | 0,88 | 0,13 | 0,37 | 0,65 |
| 17 | 0,07                 | 0,33 | 0,73 | 0,04 | 0,18 | 0,39 |
| 19 | 0,03                 | 0,20 | 0,48 | 0,04 | 0,20 | 0,40 |
| 21 | 0,08                 | 0,26 | 0,49 | 0,03 | 0,17 | 0,38 |
| 23 | 0,02                 | 0,19 | 0,46 | 0,02 | 0,11 | 0,40 |
| 25 | 0,03                 | 0,13 | 0,37 | 0,02 | 0,12 | 0,29 |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 38 para armónicos de voltaje en este caso del medidor de energía, se tiene los valores límites de armónicos impares por cada línea según establece, tanto la norma del IEE519 como la regulación del ARCONEL N°004/01, se puede observar que los valores por distorsión armónica, para este caso están dentro de los límites establecidos

Se debe considerar que los datos aquí mostrados son para un usuario que tiene cocina de inducción, y está conectado al transformador N°8284.

**GRÁFICO 18 - ESPECTRO ARMÓNICO DE VOLTAJE EN MEDIDOR DE ENERGÍA N°184969**



Elaborado: Por los Postulantes

En el grafico N° 18 se puede apreciar que las componentes quinta y novena armónicas, tienen un mayor efecto en la red eléctrica

### 2.5.7. Medidor de energía N° 179510

**TABLA 39 - NIVELES DE VOLTAJE EN MEDIDOR N°179510**

| Limite   | Voltaje |        | Corriente |        |        |
|----------|---------|--------|-----------|--------|--------|
|          | L1      | L2     | L1        | L2     | N      |
|          | (V)     |        | i(A)      |        |        |
| Mínimo   | 115,18  | 121,49 | 0,650     | 0,400  | 0,064  |
| Promedio | 120,77  | 122,35 | 13,662    | 10,090 | 13,357 |
| Máximo   | 128,03  | 123,95 | 25,080    | 18,440 | 21,427 |

Elaborado: Por los Postulantes

La tabla 39 muestra niveles de voltaje en un medidor que utiliza la cocina de inducción, esto se puede apreciar en la corriente que circula por ambas fases, el neutro tiene una alta circulación de corriente.

TABLA 40 - INDICADORES DE POTENCIA EN MEDIDOR N°179510

| Limite   | Potencia Activa |        | TOTAL   | Potencia Reactiva |         | TOTAL   |
|----------|-----------------|--------|---------|-------------------|---------|---------|
|          | L1              | L2     |         | L1                | L2      |         |
|          | P (W)           |        |         | Q (VAr)           |         |         |
| Mínimo   | 68,17           | 73,62  | 143,21  | 16,42             | 17,73   | 34,49   |
| Promedio | 460,43          | 497,26 | 967,27  | 265,24            | 286,45  | 557,21  |
| Máximo   | 636,44          | 687,35 | 1337,03 | 981,33            | 1059,84 | 2061,58 |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 40 se indican los valores de las potencias involucradas en el medidor de energía, se observa un alta componente de potencia reactiva.

TABLA 41 - ÍNDICES DE ENERGÍA EN MEDIDOR N°179510

| Limite   | Energía |         | TOTAL    | Factor de Potencia |      | TOTAL |
|----------|---------|---------|----------|--------------------|------|-------|
|          | L1      | L2      |          | L1                 | L2   |       |
|          | (Wh)    |         |          |                    |      |       |
| Mínimo   | 437,58  | 432,39  | 869,97   | 0,80               | 0,77 | 0,78  |
| Promedio | 3391,22 | 3351,01 | 6742,23  | 0,84               | 0,82 | 0,86  |
| Máximo   | 6074,66 | 6002,62 | 12077,28 | 0,90               | 0,89 | 0,89  |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 41 para índices de energía en el medidor se puede notar un alto consumo de energía repartida entre las dos fases, lo que demuestra que utiliza la cocina de inducción, el bajo factor de potencia es un problema que se debe resolver.

TABLA 42 - INDICADOR DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE VOLTAJE EN MEDIDOR N°179510

| Limite   | THDv |      |
|----------|------|------|
|          | L1   | L2   |
|          | (%)  |      |
| Mínimo   | 1,57 | 1,81 |
| Promedio | 3,44 | 3,45 |
| Máximo   | 5,58 | 5,59 |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 42 se indica el resumen de THD de voltaje, para el caso del medidor efectuado su medición correspondiente.

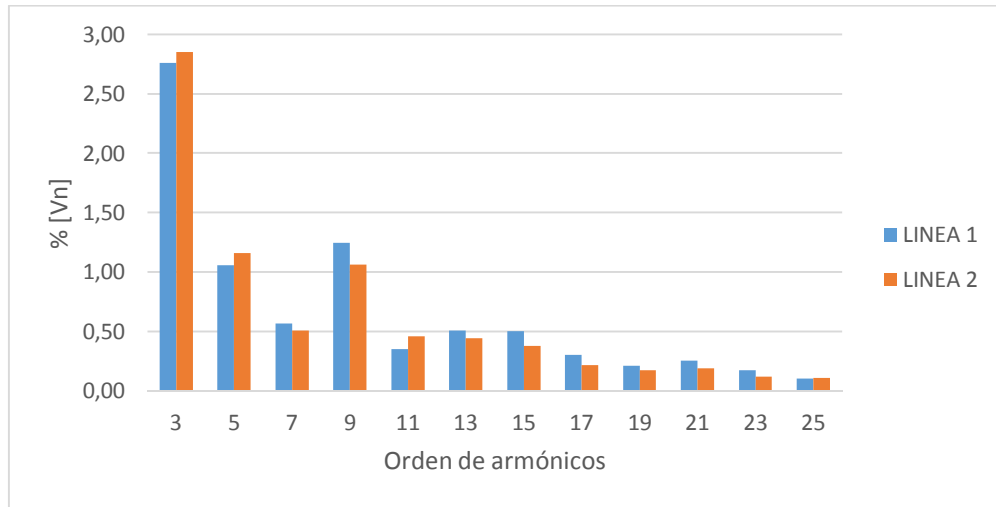
TABLA 43 - VALORES DE ARMÓNICOS DE VOLTAJE EN MEDIDOR N°179510

| N° | Armónicos de Voltaje |      |      |      |      |      |
|----|----------------------|------|------|------|------|------|
|    | L1                   |      |      | L2   |      |      |
|    | Min                  | Prom | Max  | Min  | Prom | Max  |
| 3  | 1,03                 | 2,76 | 4,93 | 1,26 | 2,85 | 5,06 |
| 5  | 0,19                 | 1,06 | 1,74 | 0,31 | 1,16 | 1,94 |
| 7  | 0,08                 | 0,57 | 1,35 | 0,08 | 0,51 | 1,32 |
| 9  | 0,66                 | 1,25 | 1,89 | 0,65 | 1,07 | 1,60 |
| 11 | 0,04                 | 0,35 | 0,78 | 0,05 | 0,46 | 0,87 |
| 13 | 0,09                 | 0,51 | 0,99 | 0,07 | 0,45 | 0,79 |
| 15 | 0,24                 | 0,50 | 0,86 | 0,13 | 0,38 | 0,64 |
| 17 | 0,07                 | 0,31 | 0,71 | 0,05 | 0,22 | 0,40 |
| 19 | 0,03                 | 0,21 | 0,44 | 0,04 | 0,17 | 0,35 |
| 21 | 0,08                 | 0,26 | 0,46 | 0,04 | 0,19 | 0,42 |
| 23 | 0,04                 | 0,18 | 0,35 | 0,02 | 0,12 | 0,35 |
| 25 | 0,02                 | 0,11 | 0,32 | 0,02 | 0,11 | 0,26 |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 43 se muestra valores de armónicos de voltaje en este caso del medidor de energía, se aprecia los valores límites de armónicos impares por cada línea.

GRÁFICO 19 - ESPECTRO ARMÓNICO EN EL MEDIDOR DE ENERGÍA N°179510



Elaborado: Por los Postulantes

En el gráfico N°19 se muestra, el espectro armónico, para el medidor de energía, las componentes quinta y novena tienen un fuerte impacto en la red eléctrica.

### 2.5.8. Medidor de energía N° 186520

TABLA 44 - NIVELES DE VOLTAJE EN MEDIDOR N°186520

| Limite   | Voltaje |        | Corriente |       |       |
|----------|---------|--------|-----------|-------|-------|
|          | L1      | L2     | L1        | L2    | N     |
|          | (V)     |        | i(A)      |       |       |
| Mínimo   | 106,35  | 103,20 | 3,50      | 0,00  | 0,00  |
| Promedio | 119,72  | 114,65 | 9,51      | 12,39 | 10,11 |
| Máximo   | 125,02  | 120,65 | 24,47     | 18,16 | 25,63 |

Elaborado: Por los Postulantes

La tabla 44 muestra niveles de voltaje en un medidor que si utiliza la cocina de inducción, para sus 2 líneas en los límites establecidos, se aprecia una alta corriente en el neutro.

TABLA 45 - INDICADORES DE POTENCIA EN MEDIDOR N°186520

| Limite   | Potencia Activa |         | TOTAL   | Potencia Reactiva |        | TOTAL  |
|----------|-----------------|---------|---------|-------------------|--------|--------|
|          | L1              | L2      |         | L1                | L2     |        |
|          | P (W)           |         |         | Q (VAr)           |        |        |
| Mínimo   | 145,10          | 113,57  | 145,10  | 0,00              | 0,00   | 0,00   |
| Promedio | 911,13          | 577,06  | 1086,10 | 199,98            | 140,29 | 202,31 |
| Máximo   | 4790,66         | 1961,65 | 6423,90 | 928,36            | 319,13 | 928,36 |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 45 se indican los valores de las potencias involucradas en el medidor de energía, el cual se representa en sus límites tienen un alto aporte de potencia reactiva.

TABLA 46 - ÍNDICES DE ENERGÍA EN MEDIDOR N°186520

| Limite   | Energía |         | TOTAL    | Factor de Potencia |      | TOTAL |
|----------|---------|---------|----------|--------------------|------|-------|
|          | L1      | L2      |          | L1                 | L2   |       |
|          | (Wh)    |         |          |                    |      |       |
| Mínimo   | 36,95   | 39,03   | 71,32    | 0,75               | 0,78 | 0,75  |
| Promedio | 4269,79 | 4472,45 | 8206,54  | 0,82               | 0,84 | 0,78  |
| Máximo   | 7950,12 | 8330,72 | 15283,12 | 0,96               | 0,97 | 0,96  |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 46 para índices de energía en el medidor se puede notar un consumo de energía bajo.

TABLA 47 - INDICADOR DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE VOLTAJE EN MEDIDOR N°186520

| Limite   | THDv |      |
|----------|------|------|
|          | L1   | L2   |
|          | (%)  |      |
| Mínimo   | 3,00 | 2,55 |
| Promedio | 4,19 | 4,25 |
| Máximo   | 7,34 | 7,89 |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 47 se indica el resumen de THD de voltaje, para el caso del medidor efectuado su medición correspondiente.

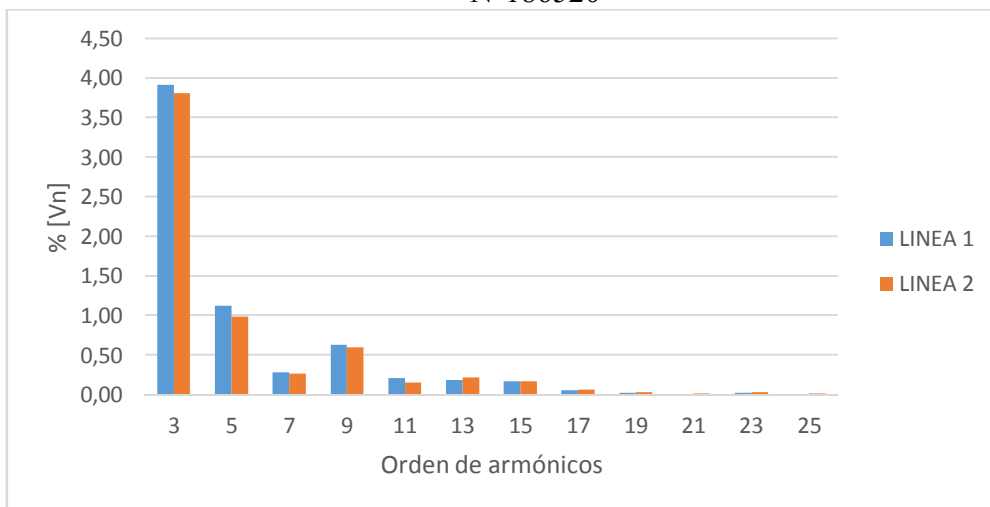
TABLA 48 - VALORES DE ARMÓNICOS DE VOLTAJE EN MEDIDOR N°186520

| N° | Armónicos de Voltaje |      |      |      |      |      |
|----|----------------------|------|------|------|------|------|
|    | L1                   |      |      | L2   |      |      |
|    | Min                  | Prom | Max  | Min  | Prom | Max  |
| 3  | 2,73                 | 3,91 | 7,03 | 2,23 | 3,81 | 7,14 |
| 5  | 0,47                 | 1,12 | 1,96 | 0,22 | 0,99 | 1,82 |
| 7  | 0,05                 | 0,28 | 0,70 | 0,04 | 0,27 | 0,76 |
| 9  | 0,27                 | 0,63 | 0,93 | 0,31 | 0,60 | 0,91 |
| 11 | 0,00                 | 0,21 | 0,40 | 0,00 | 0,16 | 0,40 |
| 13 | 0,00                 | 0,18 | 0,41 | 0,00 | 0,22 | 0,43 |
| 15 | 0,04                 | 0,17 | 0,40 | 0,05 | 0,17 | 0,35 |
| 17 | 0,04                 | 0,06 | 0,10 | 0,04 | 0,06 | 0,23 |
| 19 | 0,00                 | 0,02 | 0,14 | 0,00 | 0,03 | 0,10 |
| 21 | 0,00                 | 0,01 | 0,10 | 0,00 | 0,01 | 0,10 |
| 23 | 0,00                 | 0,02 | 0,10 | 0,00 | 0,03 | 0,10 |
| 25 | 0,00                 | 0,01 | 0,05 | 0,00 | 0,02 | 0,05 |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 48 para armónicos de voltaje en este caso del medidor de energía, se tiene los valores límites de armónicos impares por cada línea.

GRÁFICO 20 - ESPECTRO ARMONICO EN EL MEDIDOR DE ENERGIA N°186520



Elaborado: Por los Postulantes

El grafico N° 20, muestra el aspecto armónico en el medidor de energía N° 186520, como en casos anteriores es un comportamiento constante de la quinta y novena componente armónica

Los gráficos N° 18, N° 19, N° 20 muestran cual componente armónica es la que afecta más a la red eléctrica, se determina que la armónica de orden 5, es la ocasionada por las cocinas de inducción

### 2.5.9. Medidor en cocina de inducción de 4 hornillas

La presente medición se tomó solo en la cocina de inducción de 4 hornillas conectadas al medidor de energía N° 186520, para posteriormente mostrar el aporte armónico de la cocina al medidor.

TABLA 49 - NIVELES DE VOLTAJE EN COCINA DE INDUCCIÓN

| Limite   | Voltaje |        | Corriente |       |      |
|----------|---------|--------|-----------|-------|------|
|          | L1      | L2     | L1        | L2    | N    |
|          | (V)     |        | i(A)      |       |      |
| Mínimo   | 113,33  | 110,59 | 0,86      | 0,86  | 0,00 |
| Promedio | 117,99  | 117,66 | 1,26      | 1,27  | 0,00 |
| Máximo   | 122,44  | 121,26 | 10,73     | 10,80 | 0,01 |

Elaborado: Por los Postulantes

La tabla 49 muestra niveles de voltaje en una cocina de inducción de 4 hornillas de 4000 W de potencia, en los límites establecidos.

TABLA 50 - INDICADORES DE POTENCIA EN COCINA DE INDUCCIÓN

| Limite   | Potencia Real |         | TOTAL   | Potencia Reactiva |        | TOTAL   |
|----------|---------------|---------|---------|-------------------|--------|---------|
|          | L1            | L2      |         | L1                | L2     |         |
|          | P (W)         |         |         | Q (VAr)           |        |         |
| Mínimo   | 0,29          | 0,38    | 0,09    | 98,67             | 95,51  | 196,72  |
| Promedio | 45,06         | 44,85   | 89,90   | 126,59            | 127,01 | 253,60  |
| Máximo   | 1209,67       | 1214,90 | 2424,57 | 610,25            | 612,58 | 1222,87 |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 50 se indican los valores de las potencias involucradas en el funcionamiento de la cocina de inducción, lo cual se representa en sus límites.

TABLA 51 - ÍNDICES DE ENERGÍA EN COCINA DE INDUCCIÓN

| Limite   | Energía |         | TOTAL    | Factor de Potencia |      | TOTAL |
|----------|---------|---------|----------|--------------------|------|-------|
|          | L1      | L2      |          | L1                 | L2   |       |
|          | (Wh)    |         |          |                    |      |       |
| Mínimo   | 30,79   | 31,23   | 62,02    | 0,88               | 0,89 | 0,88  |
| Promedio | 3558,16 | 3577,96 | 7136,12  | 0,91               | 0,90 | 0,91  |
| Máximo   | 6625,10 | 6664,57 | 13289,67 | 0,96               | 0,97 | 0,96  |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 51 para índices de energía en el medidor se puede notar un alto consumo de energía lo que demuestra que si utiliza energía para cocción.

TABLA 52 - INDICADOR DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE VOLTAJE PRODUCIDA POR LA COCINA DE INDUCCIÓN

| Limite   | THDv |      |
|----------|------|------|
|          | L1   | L2   |
|          | (%)  |      |
| Mínimo   | 1,12 | 1,26 |
| Promedio | 1,76 | 2,12 |
| Máximo   | 3,65 | 4,44 |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 52 se indica el resumen de THD de voltaje para el caso de la cocina de inducción efectuada su medición correspondiente.

TABLA 53 - VALORES DE ARMÓNICOS PRODUCIDOS POR LA COCINA DE INDUCCIÓN

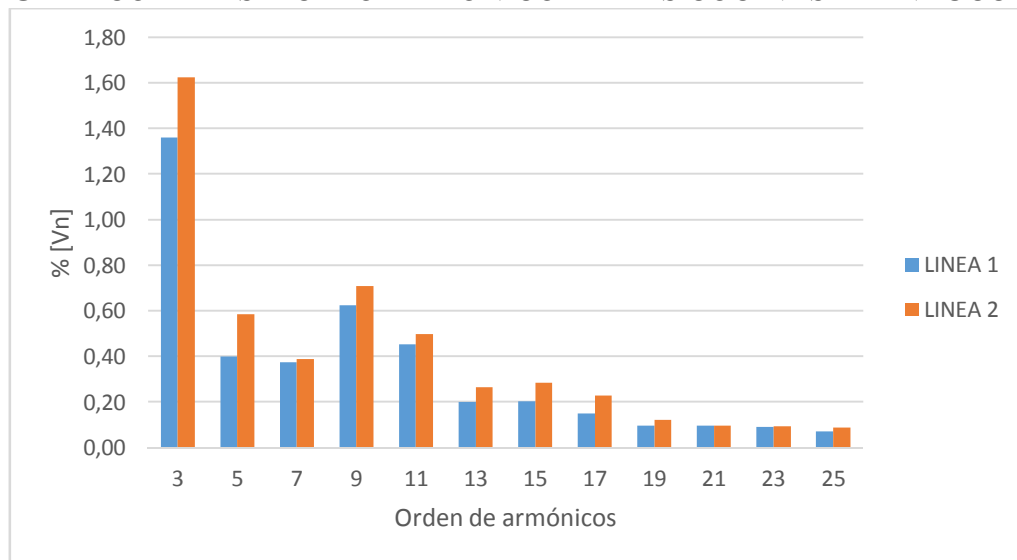
| N° | Armónicos de Voltaje |      |      |      |      |      |
|----|----------------------|------|------|------|------|------|
|    | L1                   |      |      | L2   |      |      |
|    | Min                  | Prom | Max  | Min  | Prom | Max  |
| 3  | 0,68                 | 1,36 | 3,10 | 0,81 | 1,63 | 4,02 |
| 5  | 0,09                 | 0,40 | 1,44 | 0,11 | 0,58 | 1,40 |
| 7  | 0,06                 | 0,37 | 1,22 | 0,07 | 0,39 | 1,26 |
| 9  | 0,34                 | 0,62 | 1,04 | 0,34 | 0,71 | 1,31 |
| 11 | 0,15                 | 0,45 | 0,72 | 0,19 | 0,50 | 0,99 |
| 13 | 0,04                 | 0,20 | 0,51 | 0,04 | 0,26 | 0,59 |
| 15 | 0,04                 | 0,20 | 0,47 | 0,05 | 0,28 | 0,55 |
| 17 | 0,03                 | 0,15 | 0,40 | 0,04 | 0,23 | 0,47 |
| 19 | 0,02                 | 0,10 | 0,27 | 0,02 | 0,12 | 0,39 |
| 21 | 0,01                 | 0,10 | 0,30 | 0,01 | 0,10 | 0,32 |
| 23 | 0,01                 | 0,09 | 0,30 | 0,01 | 0,09 | 0,32 |
| 25 | 0,01                 | 0,07 | 0,21 | 0,01 | 0,09 | 0,32 |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla 53 para armónicos de voltaje en este caso de la cocina de inducción, se tiene los valores límites de armónicos impares por cada línea.

Las tablas aquí mostradas, se toman de los diferentes datos extraídos de los analizadores de carga, adquiridos de medidores y transformadores en intervalos de diez minutos como lo señala la regulación del ARCONEL 004/01.

GRÁFICO 21 - ESPECTRO ARMÓNICO DE LAS COCINAS DE INDUCCIÓN



Elaborado: Por los Postulantes

Al realizar la comparación de los gráficos se aprecia los armónicos más representativos para los usuarios con cocinas de inducción, cabe recalcar que los armónicos tripten es decir los de orden 3 y sus múltiplos, no se los debe considerar para el análisis.

## 2.6. Estudio de resultados

Para estimar el comportamiento producido por las cocinas de inducción en el barrio La Florida, se toma en consideración las tablas expuestas anteriormente. Primero se compara los valores por distorsión armónica en los diferentes contadores de energía del sector residencial de la zona en estudio.

TABLA 54 - COMPARACIÓN DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE VOLTAJE EN MEDIDORES DE ENERGÍA

|          | 175403 |      | 184969 |      | 179510 |      | 186520 |      |
|----------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|
| Limite   | THDv   |      | THDv   |      | THDv   |      | THDv   |      |
|          | L1     | L2   | L1     | L2   | L1     | L2   | L1     | L2   |
|          | (%)    |      | (%)    |      | (%)    |      | (%)    |      |
| Mínimo   | 1,29   | 0,78 | 1,60   | 1,78 | 1,57   | 1,81 | 3,00   | 2,55 |
| Promedio | 2,07   | 1,99 | 3,51   | 3,33 | 3,44   | 3,45 | 4,19   | 4,25 |
| Máximo   | 3,66   | 3,84 | 5,88   | 5,51 | 5,58   | 5,59 | 7,34   | 7,89 |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla N° 54 se puede apreciar el caso más crítico de distorsión armónica, el cual se aprecia en el medidor N°186520, a continuación se realiza una comparación del aporte armónico de la cocina de inducción con el contador de energía al cual pertenece.

**TABLA 55 - COMPARACIÓN DE DISTORSIÓN ARMÓNICA PRODUCIDA POR LA COCINA DE INDUCCIÓN VS CONTADOR DE ENERGÍA**

|          | COCINA |      | MEDIDOR |      | APORTE |        |
|----------|--------|------|---------|------|--------|--------|
| Limite   | THDv   |      | THDv    |      |        |        |
|          | L1     | L2   | L1      | L2   | L1     | L2     |
|          | (%)    |      | (%)     |      | (%)    |        |
| Mínimo   | 1,12   | 1,26 | 3,00    | 2,55 | 37,2   | 49,216 |
| Promedio | 1,76   | 2,12 | 4,19    | 4,25 | 42,065 | 49,762 |
| Máximo   | 3,65   | 4,44 | 7,34    | 7,89 | 49,741 | 56,21  |

Elaborado: Por los Postulantes

En la tabla N° 55, se realiza la comparación, para determinar cuál es el aporte de distorsión armónica de voltaje al medidor de energía, como se puede apreciar, llega casi al 50%, lo que significa que en una residencia sin mucha contaminación armónica, este aporte puede ser el más representativo de contaminación armónica

Una vez estimado el comportamiento, más crítico que puede ocasionar la distorsión armónica de voltaje producida por las cocinas de inducción en el medidor de energía, se realiza la comparación de este medidor con el medidor base el cual no posee cocina de inducción.

TABLA 56 – COMPARACION ENTRE MEDIDOR CON COCINA DE INDUCCIÓN VS MEDIDOR SIN COCINA

| Limite   | SIN COCINA |      | CON COCINA |      | INCREMENTO |        |
|----------|------------|------|------------|------|------------|--------|
|          | THDv       |      | THDv       |      | L1         | L2     |
|          | L1         | L2   | L1         | L2   |            |        |
|          | (%)        |      | (%)        |      | (%)        |        |
| Mínimo   | 1,29       | 0,78 | 3,00       | 2,55 | 232,56     | 326,92 |
| Promedio | 2,07       | 1,99 | 4,19       | 4,25 | 202,17     | 213,91 |
| Máximo   | 3,66       | 3,84 | 7,34       | 7,89 | 200,55     | 205,47 |

Elaborado: Por los Postulantes

Una vez realizado el análisis, se puede apreciar el incremento en la tabla N°56, tan solo la cocina de inducción contamina alrededor de 200% a cada medidor. Ahora se analiza, el incremento de potencia ocasionado por las cocinas de inducción y su efecto sobre el transformador de distribución

TABLA 57 - POTENCIA PROMEDIO POR USUARIO DE COCINA DE INDUCCION

|          | 184969          |                   | 179510          |                   | 186520          |                   | PROMEDIO        |                   |
|----------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|
|          | Potencia Activa | Potencia Reactiva | Potencia Activa | Potencia Reactiva | Potencia Activa | Potencia Reactiva | Potencia Activa | Potencia Reactiva |
| Mínimo   | 132,04          | 0,00              | 143,21          | 34,49             | 145,10          | 0,00              | <b>140,12</b>   | <b>11,50</b>      |
| Promedio | 988,35          | 57,21             | 967,27          | 557,21            | 1086,10         | 202,31            | <b>1013,90</b>  | <b>272,24</b>     |
| Máximo   | 5845,75         | 852,99            | 1337,03         | 2061,58           | 6423,90         | 928,36            | <b>4535,56</b>  | <b>1280,98</b>    |

Elaborado: Por los Postulantes

De la tabla N° 57, se puede apreciar el consumo promedio para los usuarios del sector residencial que utilizan la cocina de inducción, por lo que se estima que en un escenario donde el 10 % de los usuarios del transformador se acogen al programa PEC, el transformador sufre un incremento en su distorsión armónica de voltaje.

## **CAPITULO III**

### **APLICACIÓN DE METODOLOGIA DE CÁLCULO PARA LA SELECCIÓN DE FILTRO COMO PROPUESTA PARA MITIGACION DE DISTORSION ARMONICA DE VOLTAJE**

#### **3.1. Desarrollo de la propuesta**

##### ***3.1.1. Tema***

“ANÁLISIS DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA PRODUCIDA POR CARGAS NO LINEALES ORIGINADA POR LA INCORPORACIÓN MASIVA DE COCINAS DE INDUCCIÓN, EN EL BARRIO LA FLORIDA DEL CANTÓN SALCEDO, PERTENECIENTE A LA CONCESIÓN DE ELEPCO S.A. EN EL AÑO 2016”

##### ***3.1.2. Presentación***

En el presente capitulo, se detalla una propuesta para mejorar la calidad del servicio eléctrico en el barrio La Florida, mediante la comparación de resultados realizados en diferentes puntos de la red de distribución se logró establecer un comportamiento de la

distorsión armónica existente ocasionada por las cocinas de inducción, con esto se estima la incidencia de la contaminación armónica en el transformador de distribución N° 8284, posteriormente se determina la ubicación de un filtro para mitigar estos efectos.

Para realizar el diseño del filtro, se analizó la tabla N°56 adquirida en el capítulo anterior, mediante la comparación de resultados, se estima que con el número de usuarios actual y en base a las mediciones, se establece que las condiciones actuales del sistema, el transformador N° 7516 de 100 KVA, está dentro de los límites establecidos por la regulación del ARCONEL N° 004/01, a diferencia del transformador N° 8284 donde la distorsión armónica superará el valor límite establecido por la regulación ecuatoriana.

A continuación se detalla un análisis técnico para los elementos que intervienen con la contaminación armónica dentro de la zona residencial analizada.

### ***3.1.3. Justificación de la propuesta***

Actualmente la inclusión de las cocinas de inducción supone un aumento en la utilización de las redes eléctricas para lo cual se debe mantener la calidad de servicio eléctrico, esto requiere de costos adicionales en estudios de calidad de energía, en la infraestructura eléctrica de la empresa distribuidora, en este caso en ELEPCO SA, es por ello que se realiza diversos análisis en campo de los transformadores, líneas y medidores, porque es importante conocer los niveles de las magnitudes eléctricas donde el usuario final conecta sus equipos de consumo.

La calidad del servicio eléctrico hoy en día es un punto importante a mantener en niveles que no afecten de ninguna manera a la empresa distribuidora y al usuario final,

lo cual requiere planificación previa así como estimaciones a futuro para cumplir con los estándares de calidad.

Los resultados obtenidos de este análisis competen en establecer un comportamiento de la contaminación armónica en los equipos de transformación y al mismo tiempo plantear maniobras de solución de ser necesario.

El presente proyecto a realizarse es asistido por la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi S.A., la cual aporta con la información y equipamiento para el correcto enfoque del análisis del sistema eléctrico del barrio la florida del cantón Salcedo en dependencia de la utilización de cocinas de inducción.

## **3.2. Objetivos**

### ***3.2.1. Objetivo general***

Plantear una propuesta para mitigación de los efectos producidos por la distorsión armónica de voltaje provocada por las cocinas de inducción, en la red de distribución para el barrio La Florida del cantón Salcedo

### ***3.2.2. Objetivos específicos***

- Determinar los puntos a intervenir en el sector de análisis, en base a las mediciones adquiridas de los analizadores de carga, ubicado en los medidores de energía y transformador de distribución.
- Simular en el programa computacional MATLAB, el escenario más crítico con los parámetros reales, tomados de los equipos de medición para analizar la propuesta.

- Comprobar la propuesta planteada favorable para conseguir los parámetros establecidos por la norma ecuatoriana de calidad de energía eléctrica mediante cálculos previos.

### **3.3. Análisis de factibilidad**

El presente trabajo de investigación, consiste en analizar la distorsión armónica ocasionada por la inclusión de las cocinas de inducción, en el sistema de distribución de bajo voltaje en especial en el transformador de distribución N°8284, para realizar el cálculo a través de la cual se puede seleccionar el tipo de filtro con el cual se puede mitigar la contaminación armónica

#### **3.3.1. Factibilidad Técnica**

Mediante la gentil colaboración de la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi S.A., para el desarrollo del análisis de la distorsión armónica en el área seleccionada del cantón Salcedo, así como también la facilitación de los equipos de medición e información útil para esta propuesta investigativa.

A continuación se menciona algunas ventajas al efectuar la propuesta presentada de implementar un filtro en el transformador de distribución N° 8284, el efecto de la contaminación armónica se reduce y se consigue mejorar el factor de potencia en el transformador afectado lo cual lleva a mejorar el índice de calidad de energía en el sector.

- Un sistema de filtrado y compensación para el transformador mantendrá el

sistema de distribución dentro de los índices de calidad que norma el ARCONEL con la Regulación 004/01.

- Mejora los índices de confiabilidad del servicio eléctrico en bajo voltaje en bornes del transformador.
- Al disminuir la distorsión armónica de voltaje se disminuye la potencia armónica, consiguiendo reducción de pérdidas técnicas en los circuitos secundarios del alimentador

### ***3.3.2. Factibilidad económica***

#### ***3.3.2.1. Presupuesto de la compensación***

En la tabla N°58 se detalla los costos referenciales para la implementación del filtro como propuesta para la mitigación de la distorsión armónica de voltaje en la red del Transformador N° 8284.

Este planteamiento se realiza con base a los datos disponibles por el cálculo y la respectiva simulación en el caso 3, el costo de la propuesta de filtro y materiales estandarizados en el mercado varía en dependencia de distribuidores.

TABLA 58 - COSTOS DE MATERIALES

| LISTA DE MATERIALES PARA EL FILTRO |          |          |  |                      |                    |
|------------------------------------|----------|----------|--|----------------------|--------------------|
| ITEM                               | UNIDADES | CANTIDAD | DESCRIPCION  | COSTO UNITARIO (USD) | COSTOS TOTALES     |
| 1                                  | c/u      | 3        | Condensador Trifásico Variable 7,5kVar - 220V  | 50,00                | 150,00             |
| 2                                  | c/u      | 3        | Barras de conexión   | 15,00                | 45,00              |
| 3                                  | c/u      | 3        | Inductor Trifásico 0,32mH - 220V   | 10,00                | 30,00              |
| 4                                  | c/u      | 1        | Gabinete de 50*50*25 cm  | 25,00                | 25,00              |
| 5                                  | c/u      | 3        | Contactador 30A - 220V   | 80,00                | 240,00             |
| 6                                  | c/u      | 1        | Regulador de energía reactiva  | 500,00               | 500,00             |
| 7                                  | m        | 10       | Conductor de cobre # 8 AWG   | 4,00                 | 40,00              |
| 8                                  | c/u      | 1        | Rioldin de 1000 mm   | 3,00                 | 3,00               |
| 9                                  | c/u      | 30       | Terminales tipo U # 8  | 0,50                 | 15,00              |
| 10                                 | c/u      | 2        | Cruceta de acero galvanizado, uni versal, perfil "L" 75 x 75 x 6 mm (3 x 3 x 1/4") y 2 000 mm                        | 41,06                | 82,12              |
| 11                                 | c/u      | 2        | Perno "U" de acero galvanizado, 2 tuercas, arandelas: 2 planas y 2 presión 16 x 175 mm (5/8 x 7"), ancho dentro la U | 2,88                 | 5,76               |
| 12                                 | c/u      | 20       | Precinto plástico de 300 mm  | 0,15                 | 3,00               |
| <b>TOTAL COSTO MATERIALES</b>      |          |          |  |                      | <b>\$ 1.138,88</b> |

Elaborado: Por los Postulantes

Al disponer de los materiales para el montaje del filtro, se realiza el presupuesto para la instalación por parte de un técnico y esta se detalla en la tabla N° 59.

TABLA 59 - COSTO DE INSTALACION

| COSTOS DE LA INSTALACION       |                              |                      |                  |
|--------------------------------|------------------------------|----------------------|------------------|
| ITEM                           | DESCRIPCION                  | COSTO UNITARIO (USD) | COSTOS TOTALES   |
| 1                              | Montaje del Filtro - Técnico | 250,00               | 250,00           |
| 2                              | Auxiliar del Técnico         | 100,00               | 100,00           |
| 3                              | Imprevistos                  | 100,00               | 100,00           |
| <b>TOTAL COSTO INSTALACION</b> |                              |                      | <b>\$ 450,00</b> |

Elaborado: Por los Postulantes

El costo total de inversión para la propuesta de implementación del filtro se detalla en base al costo de materiales y trabajo de instalación, se detalla en la tabla N°60.

TABLA 60 - COSTO FINAL DE LA PROPUESTA

| COSTOS DE LA PROPUESTA       |                         |                      |                    |
|------------------------------|-------------------------|----------------------|--------------------|
| ITEM                         | DESCRIPCION             | COSTO UNITARIO (USD) | COSTOS TOTALES     |
| 1                            | Costo de Materiales     | 450,00               | 450,00             |
| 2                            | Costo de la Instalación | 1138,88              | 1138,88            |
| <b>TOTAL COSTO PROPUESTA</b> |                         |                      | <b>\$ 1.588,88</b> |

Elaborado: Por los Postulantes

### 3.4. Desarrollo de la propuesta

#### 3.4.1. Propuesta: Diseño de filtro para disminuir armónicos

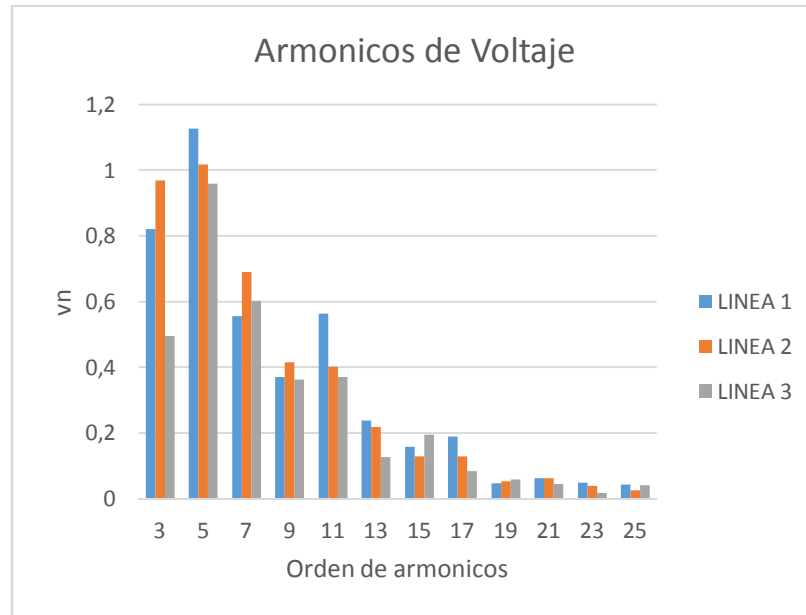
Un filtro de armónicos puede entenderse como un dispositivo que presenta una severa variación de su impedancia en función de la frecuencia. Lógicamente, la inserción de estos dispositivos en el sistema de potencia modifica la respuesta de frecuencia, por tal motivo se puede alterar el camino de circulación de los armónicos de corriente.

En base a los diferentes tipos de filtros expuestos en el capítulo 1, en comparación con el diagrama N° 22 de espectro armónico para el transformador N°8284, se aprecia que la componente armónica de orden 5, es la que afecta al sistema eléctrico de distribución; por tal motivo se escoge el diseño de un filtro sintonizado simple, para mitigar el efecto de la quinta armónica.

##### 3.4.1.1. Cálculo de filtro sintonizado simple

Para disminuir la distorsión armónica presente en el transformador de distribución N° 8284, se considera los valores de la tabla N° 28 y el gráfico N°22 de espectro armónico. A continuación se detalla el cálculo para el dimensionamiento del filtro a utilizar.

GRÁFICO 22 - DIAGRAMA DE ESPECTRO ARMONICO EN TRANSFORMADOR N°8284



Elaborado: Por los Postulantes

Primero se debe conocer el voltaje con el que trabaja el sistema, para este estudio en bajo voltaje es de 220 Voltios.

$$V_{ff} = 220 V$$

De la tabla N° 26 se conoce el valor de la máxima potencia activa total en el transformador

$$P = 33845 W$$

Además se debe obtener el valor del factor de potencia tanto el actual como el factor de potencia esperado de la tabla N° 26

$$fp_1 = 0,88$$

$$fp_2 = 0,95$$

Posteriormente se determina el ángulo con el que está desfasada la corriente con respecto al voltaje para el caso inicial, mediante la ecuación N° 20

Aplicando al caso de estudio se obtiene

$$\theta_1 = 41,41^\circ$$

$$\theta_2 = 18,19^\circ$$

Para determinar la potencia reactiva que se necesita compensar primero se determina la  $\tan \theta$ , aplicando la ecuación N° 21, para ambos casos, para el caso actual  $\text{fp}=0,88$  y para el caso deseado  $\text{fp}=0,95$

$$\tan \theta_1 = 0,882$$

$$\tan \theta_2 = 0,329$$

La potencia aparente se determina en base a la ecuación N° 22, descrita en el capítulo 1

$$S = 25383,75 \text{ VA}$$

A continuación se determina la potencia reactiva tanto para el caso original como para el caso esperado aplicando la ecuación N° 22 y se obtiene

$$Q_1 = 29848,5 \text{ Var}$$

$$Q_2 = 11124 \text{ Var}$$

Para determinar la potencia reactiva que se necesita compensar posteriormente se determina, siguiendo la ecuación

$$\tan \theta_1 - \tan \theta_2 = 0,553$$

Ahora se calcula la potencia reactiva aplicando la ecuación N° 23

$$Q_c = 18724 \text{ Var}$$

A continuación se determina la capacidad de el filtro necesario para compensar la potencia reactiva

En base al histograma realizado en el grafico N° 22, se observa que la componente armónica que afecta a este sistema es de quinto orden, luego se determina el valor de  $X_{eff}$ , con la siguiente ecuación N° 24

$$X_{eff} = 2,58 \Omega$$

En base a la ecuación N° 25 se determina la reactancia capacitiva, para el caso se obtiene como resultado

$$X_C = 2,71 \Omega$$

A continuación se calcula el tamaño del capacitor gracias a la ecuación N° 26

$$C = 979,73 \mu F$$

Con el valor del capacitor a instalar se debe calcular los reactores que se ubicaran junto con el filtro para corregir la distorsión armónica

Mediante la ecuación N° 27 se determina la capacidad del reactor inductivo, obteniéndose como resultado

$$X_L = 0,123 \Omega$$

A continuación se determina la capacidad del inductor mediante la ecuación N° 28, de donde se obtiene como resultado:

$$L = 0,3251 \text{ mH}$$

Finalmente el filtro estará formado por un banco de capacitores trifásico de 18724 Var, conectado en estrella con el transformador, con reactores de 0,123  $\Omega$  (0,3251 mH) por fase.

De acuerdo a la capacidad nominal encontrada para el filtro, se propone, conectar un filtro de capacidad superior a la encontrada en los cálculos, por motivos de que este análisis esta realizado hasta el mes de marzo del año 2016.

Con referencia en el sector analizado, varias residencia, se encuentran en espera de la cocina de inducción, por tal motivo los cálculos aquí descritos mitigan la contaminación armónica en el transformador de distribución N° 8284, hasta cierto nivel, debido al comportamiento variado de las armónicas, no se puede simular la contaminación para un futuro mediato.

El filtro sintonizado simple se ubicara según lo detallado en la tabla N° 61

TABLA 61 - UBICACION DEL FILTRO SINTONIZADO SIMPLE

| N° Poste | Coordenada X | Coordenada Y |
|----------|--------------|--------------|
| 127236   | 768005       | 9884651      |

Elaborado: Por los Postulantes

### 3.5. Simulación de escenarios en el programa computacional MATLAB

Una vez que se determina la dimensión del filtro a utilizar para mitigar el efecto armónico en la red eléctrica de distribución, se utiliza el programa computacional Matlab para comprobar los análisis realizados.

Mediante el software computacional Matlab versión 2014a, utilizando la librería de simulación “*Simulink*”, se realizó una simulación de 3 casos de estudio con la finalidad de facilitar el análisis y comprobar los parámetros eléctricos que se obtienen de las mediciones con los analizadores y determinar la distorsión armónica de voltaje y de esta manera aplicar una solución.

#### 3.5.1. *Simulación de la distorsión armónica de voltaje en el transformador de distribución N° 8284*

Antes de ejecutar la simulación primero se establecen los parámetros con los cuales se realizara la simulación en la herramienta Simulink, se detallan en la tabla N° 62

TABLA 62 - DATOS DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCION N° 8284

|  |               |
|--|---------------|
| Marca                                      | ECUATRANS     |
| Número de serie                            | 847009        |
| Voltaje en el primario del transformador   | 13800 V       |
| Voltaje en el secundario del transformador | 220 V / 110 V |
| Frecuencia del sistema                     | 60 HZ         |
| Potencia del transformador                 | 30 KVA        |

Elaborado: Por los Postulantes

### 3.5.1.1. Caso 1 – Simulación del transformador con cargas lineales

En este caso 1 contempla la simulación del sistema de distribución delimitado al transformador de distribución trifásico N°8284 con su carga en operación tal que no supera los límites de calidad establecidos por el ARCONEL de distorsión armónica de voltaje, esto se realizó con la ayuda de bloques de la librería “*SimPowerSystems*” de forma que se acerca al comportamiento real de los equipos del área de estudio.

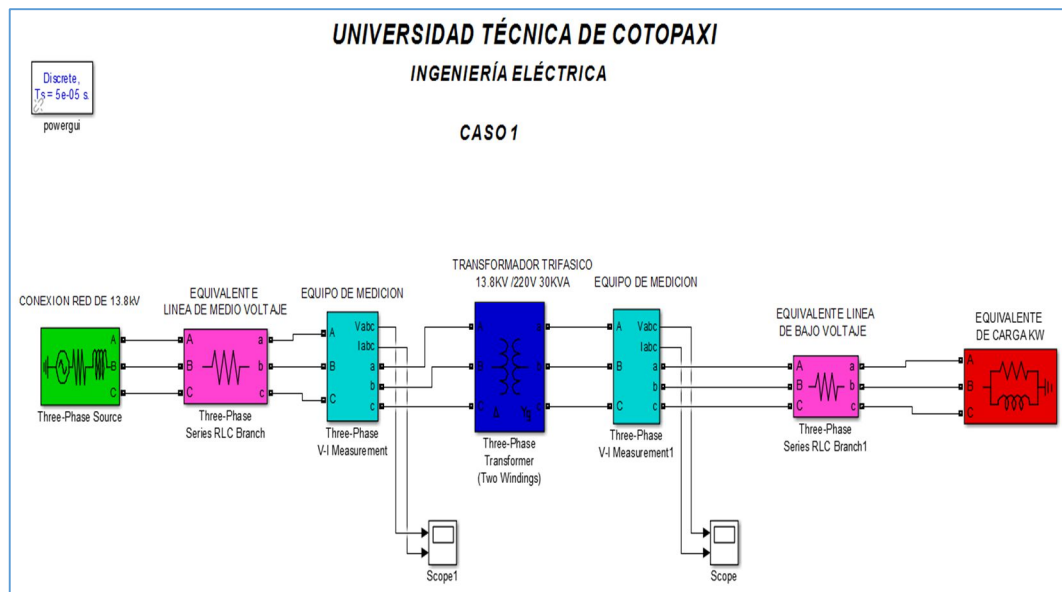
Se realiza inicialmente la ubicación del bloque a cargo de controlar la simulación, llamado “*powergui*” con el cual se puede seleccionar parámetros de la misma, controlar tiempo de simulación y obtener datos y graficos de comportamiento, consecuentemente se ubica en serie el bloque de alimentación denominado “*Three-Phase Source*” el cual será el equivalente de conexión a la red, de voltaje nominal 13,8kV.

A continuación se ubica un bloque equivalente que simula el conductor trifásico de medio voltaje “*Three-Phase Series RLC Branch*” que conducirá la corriente hasta el bloque de transformador N° 8284 “*Three-Phase Transformer*”, donde se transforma de 13,8kV a 220V, entre los bloques se ubica un bloque “*Three-Phase V-I Measurement*” que permite tomar mediciones y ubicarlas a un “*osciloscopio* y posterior a un *display*”.

Se ubica posteriormente en serie el equivalente de red de bajo voltaje con un bloque equivalente de carga “*Three-Phase Load RLC*”, y se representa en el gráfico en el **caso 1**

de estudio se procede a simular la carga que está conectada al transformador con valores ideales de la carga sin el uso de cocinas de inducción, es decir, sin fuentes de distorsión armónica de voltaje.

GRÁFICO 23 - SISTEMA ELECTRICO DE DISTRIBUCION SIMULADO EN SIMULINK CASO 1

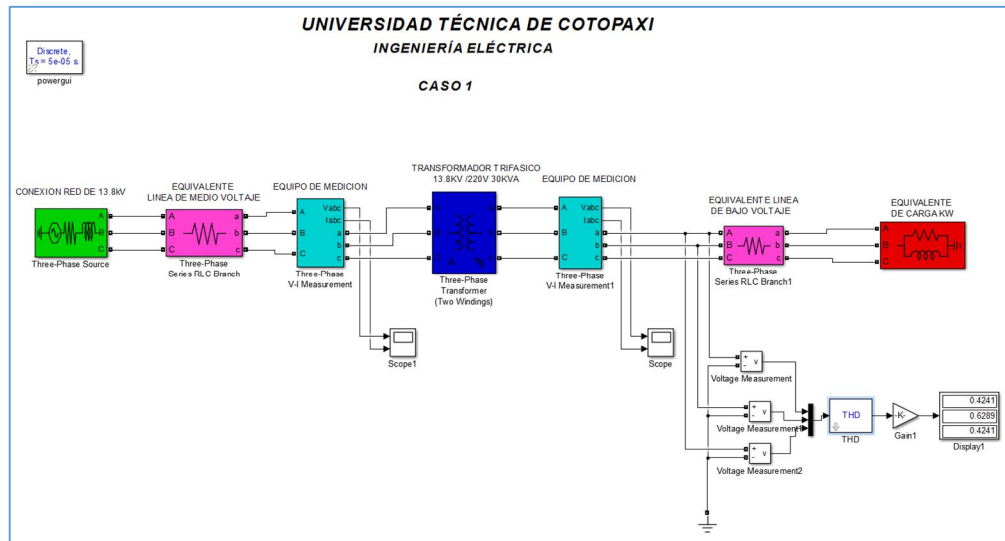


Elaborado: Por los Postulantes

A esta simulación se adiciona 3 bloques de medida denominados "Voltage Measurement" en el lado de bajo voltaje para cada línea en serie con un bloque que calcula el THD existente en el sistema por cada línea, a este se le incorpora en serie un bloque "Gain" de valor 100 que multiplica este valor por la salida del bloque anterior para obtener el porcentaje de THD de voltaje del sistema.

El caso 1 se lo representa en el gráfico N° 23, que muestra valores para el estudio del transformador sin la inclusión de cocinas de inducción en el sistema.

## GRÁFICO 24 - SIMULACION DE CASO 1 CON MEDICION DE DISTORSION ARMONICA DE VOLTAJE

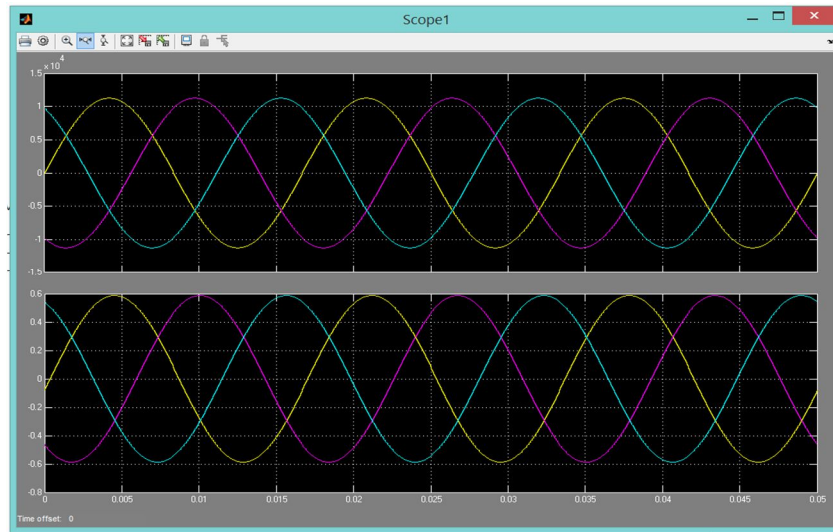


Elaborado: Por los Postulantes

El gráfico N° 24, se aprecia que la distorsión armónica de voltaje se monitorea en el lado de baja voltaje en el transformador

Los gráficos que se muestran a continuación representan los parámetros eléctricos de voltaje y corriente observados por el osciloscopio del sistema simulado sin distorsión de ninguna clase.

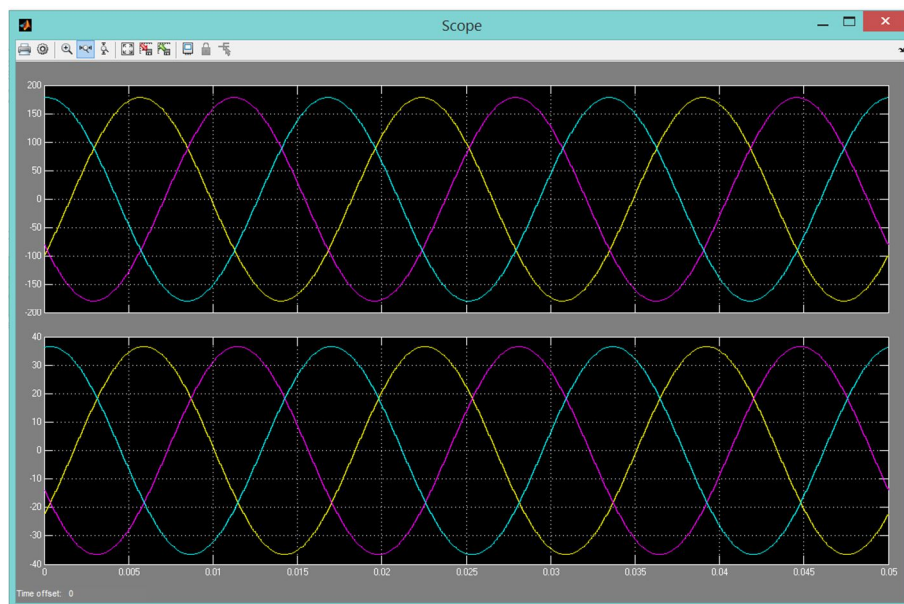
GRÁFICO 25 - FORMA DE ONDA DE VOLTAJE Y CORRIENTE EN EL LADO DE MEDIO VOLTAJE



Elaborado: Por los Postulantes

En el gráfico N°25, se puede apreciar 2 parámetros, en la parte superior el voltaje de entrada al sistema es de 13,8 kV que ingresa al transformador y en la parte inferior la corriente, en ambas se puede observar que no poseen distorsión en la forma de onda, durante el tiempo analizado  $t = 0,05s$

GRÁFICO 26 - FORMA DE ONDA DE VOLTAJE Y CORRIENTE EN EL LADO SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR N°8284

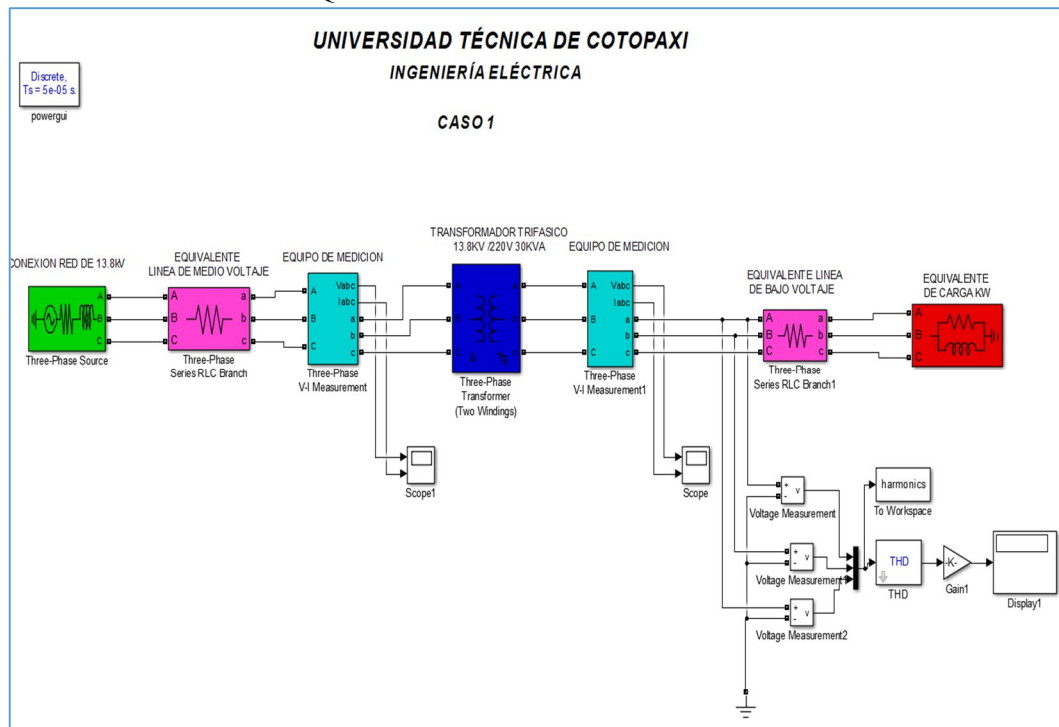


Elaborado: Por los Postulantes

En el gráfico N° 26, se puede apreciar de igual forma 2 parámetros, en la parte superior el voltaje de salida del transformador y en la parte inferior la corriente que consume el sistema, en ambas formas de onda se puede observar que no poseen distorsión en el tiempo analizado  $t = 0,05s$ .

Una herramienta útil de Simulink la cual se denomina *FFT Analysis* permite observar a través de una interface múltiple las magnitudes de onda sinusoidal, armónicos y THD de voltaje con solo ubicarle a la salida de un bloque de medida denominado *To Workspace*.

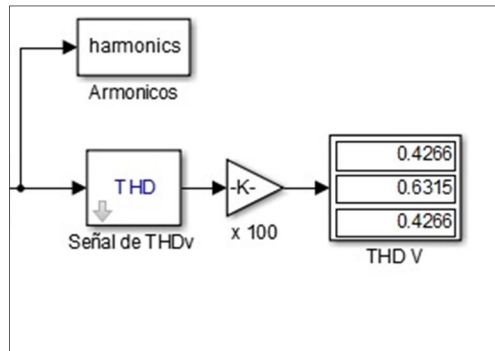
GRÁFICO 27 - EQUIVALENTE ELECTRICO DE DISTRIBUCION



Elaborado: Por los Postulantes

El gráfico N° 27, muestra el bloque *to workspace* que analiza gracias a la herramienta *FFT Analysis Tool*, los diferentes

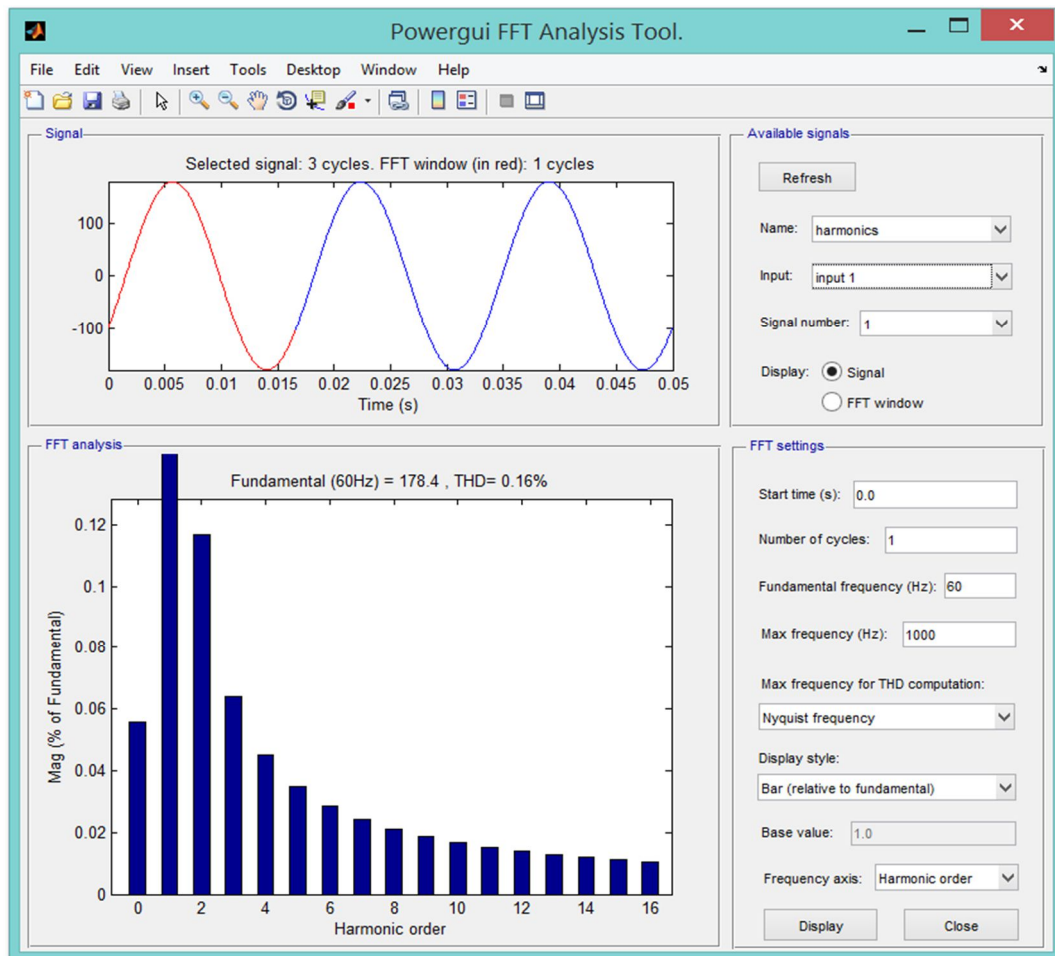
Gráfico 28 - VALORES DE DISTORSION ARMONICA EN CASO 1



Elaborado: Por los Postulantes

En el gráfico N° 28, se aprecia los valores de distorsión armónica de voltaje los cuales están dentro de los límites establecidos en la regulación existente

GRÁFICO 29 - HERRAMIENTA FFT ANALYSIS TOOL PARA EL CASO 1



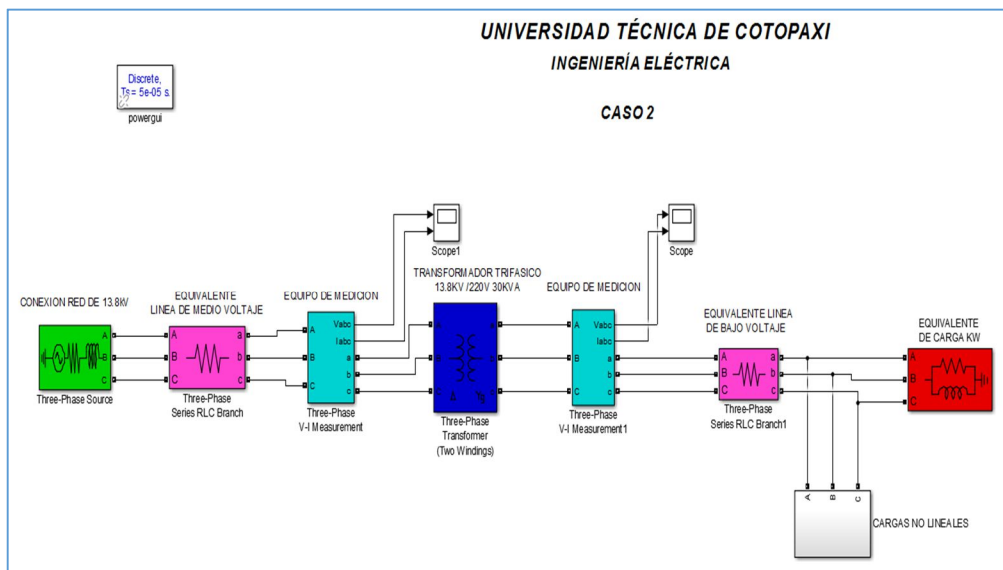
Elaborado: Por los Postulantes

En el gráfico N° 29, se puede apreciar que en el comportamiento del sistema simulado con cargas lineales tiene límites de THDv de 0,16% y el respectivo espectro armónico el cual no supera valores establecidos en normativa del ARCONEL.

### 3.5.1.2. Caso 2 – Simulación del transformador con cargas no lineales

En este caso se procede a simular el sistema original, esta vez con la inclusión de una carga no lineal en equivalente, que simula el uso de las cocinas de inducción dentro del sistema de estudio, para esto se toma los datos pertinentes de la tabla N° 56, de la que se obtienen los valores de potencia activa y reactiva para modelar el caso existente en el transformador de distribución N° 8284.

GRÁFICO 30 - EQUIVALENTE ELECTRICO DE DISTRIBUCION EN SIMULINK CON LA INCLUSION DE LA CARGA NO LINEAL



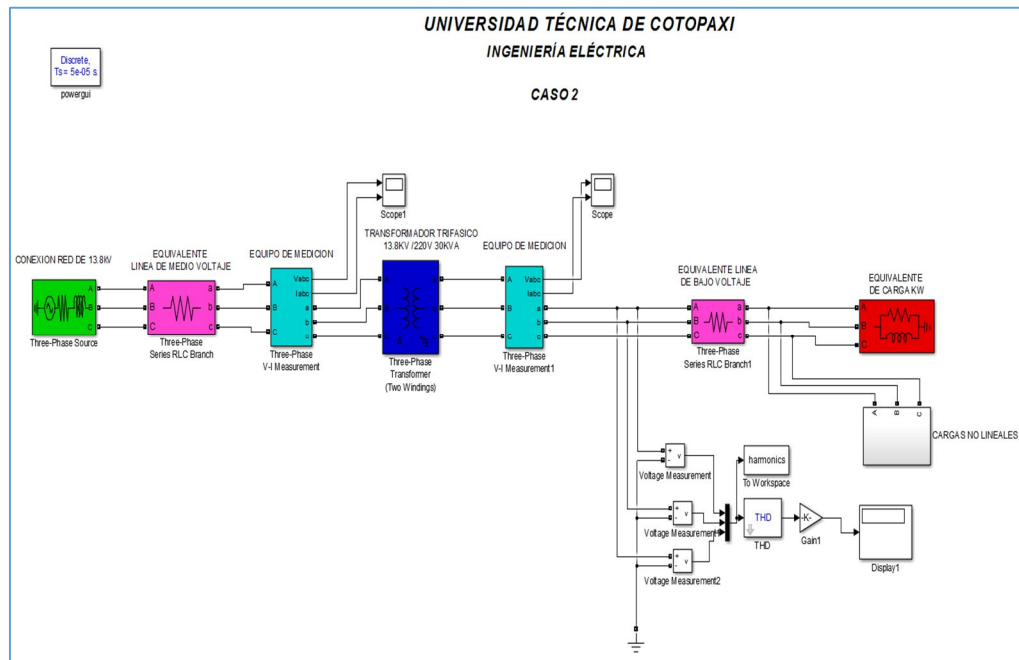
Elaborado: Por los Postulantes

En el gráfico N° 30, se puede apreciar lo planteado en el párrafo anterior y destacar que la simulación en este caso toma un rumbo más cercano a la realidad por ende se puede apreciar una aproximación a las condiciones reales de estudio.

De la misma forma se procede a incluir en la plantilla de simulación los bloques de análisis previamente mencionados para así obtener los datos respectivos para este caso y observar su comportamiento.

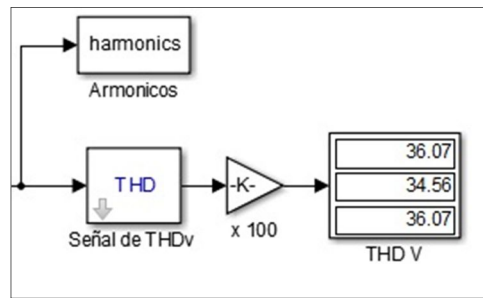
A continuación se corre el programa realizado en simulink para apreciar la distorsion armonica ocasionada resultado que se puede apreciar en el osciloscopio del gráfico N° 33 y el gráfico N° 34.

**GRÁFICO 31 - SIMULACION DEL CASO N° 2, CON LA MEDICION DE DISTORSION ARMONICA DE VOLTAJE EN EL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCION N° 8284**



Elaborado: Por los Postulantes

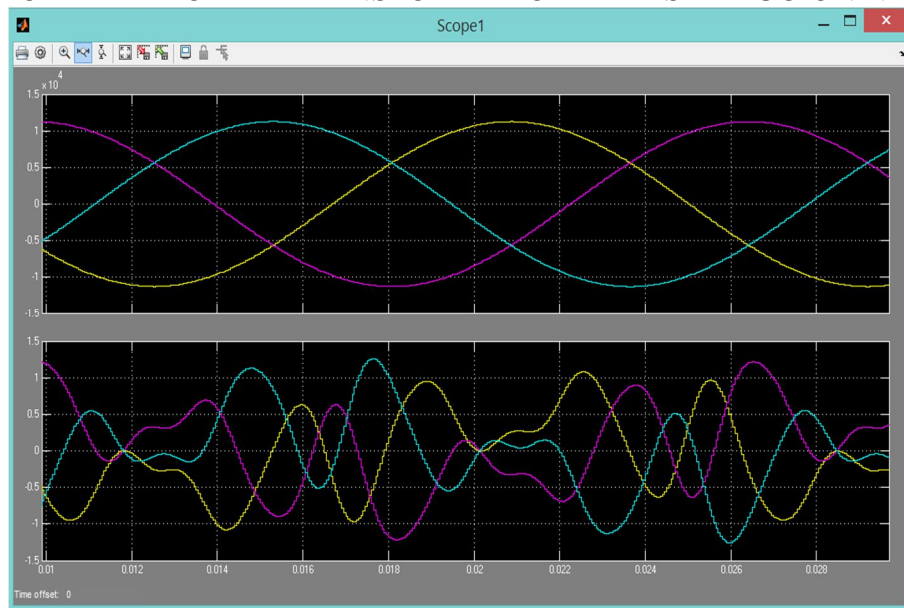
GRÁFICO 32 – VALORES DE DISTORSION ARMONICA DE VOLTAJE EN CASO 2



Elaborado: Por los Postulantes

De la simulación de este caso 2 se puede observar los gráficos N° 32 para la contaminación armónica en base a los parámetros eléctricos de voltaje y corriente afectados por las cargas no lineales, a través del osciloscopio del sistema simulado con una aparente distorsión causada por la carga no lineal, como se puede apreciar estos valores exceden los valores establecidos en la regulación del ARCONEL 004/01, sobre la calidad de energía en los sistemas eléctricos, estos valores se asemejan a los expuestos en la tabla N° 28.

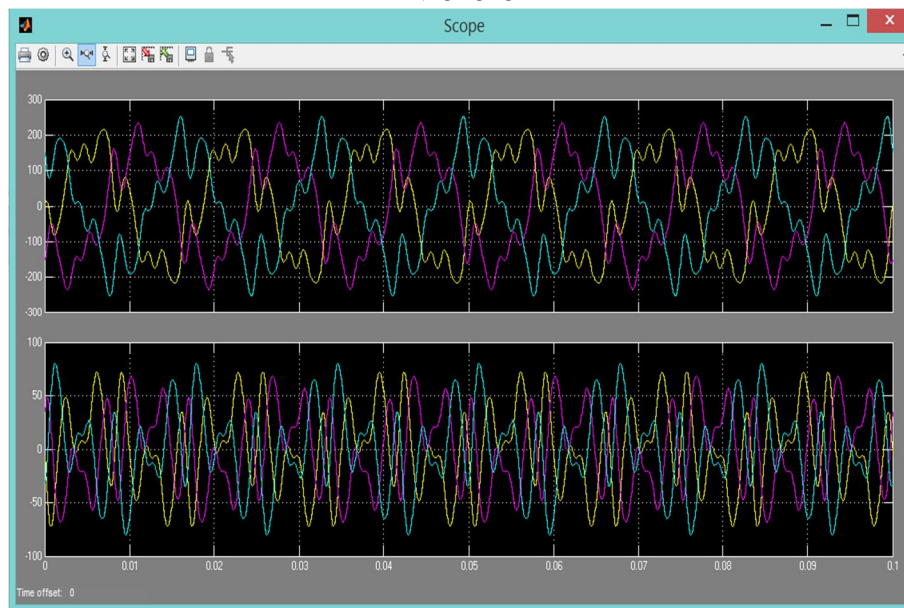
GRÁFICO 33 - FORMA DE ONDA DE VOLTAJE Y CORRIENTE EN EL LADO PRIMARIO DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN N° 8284



Elaborado: Por los Postulantes

En el gráfico N°33, se puede considerar en la parte del voltaje de entrada al sistema es de 13,8 kV y este no se ve afectado por la distorsión de voltaje en cambio en la parte de la corriente si se observa una distorsión.

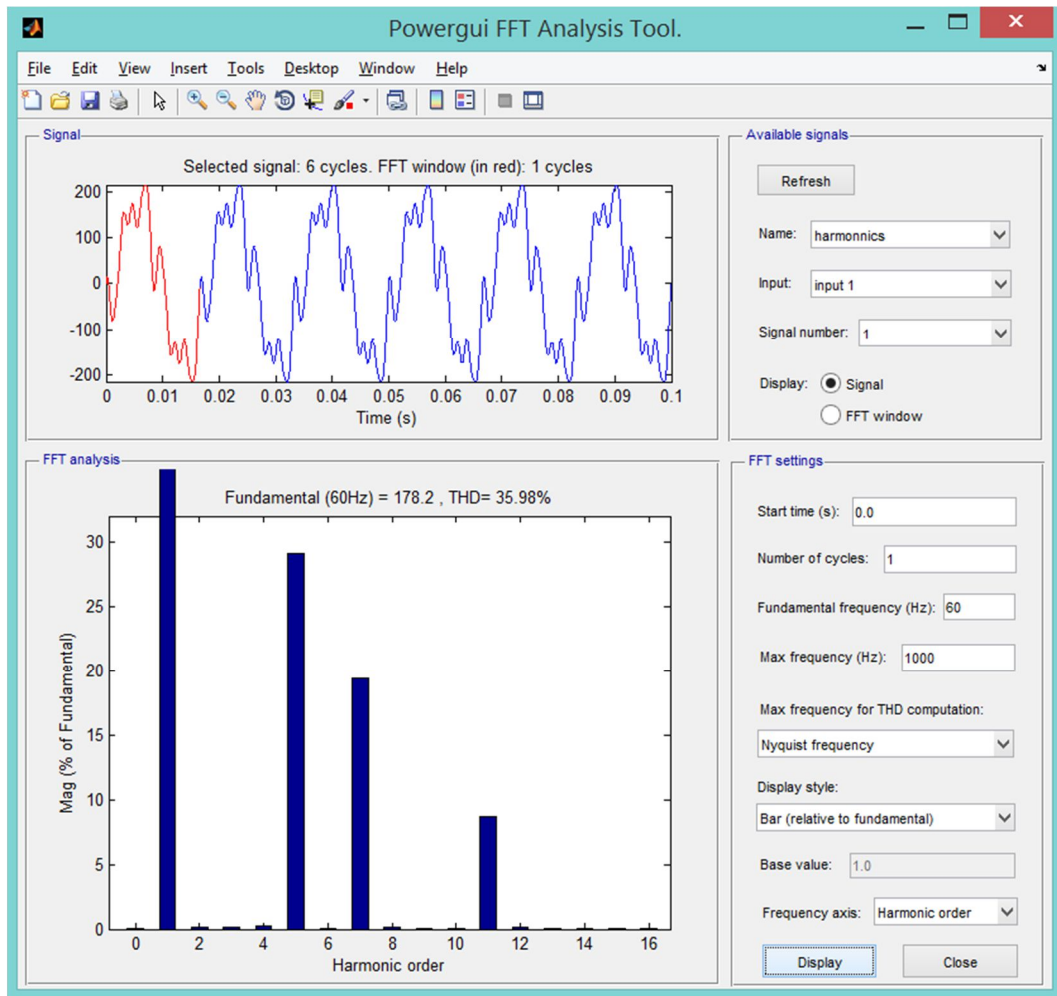
GRÁFICO 34 - FORMA DE ONDA DE VOLTAJE Y CORRIENTE EN EL LADO SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCION N°82845



Elaborado: Por los Postulantes

En el gráfico N°34, se muestra que en bajo voltaje el transformador se ve afectado por las cargas no lineales y de igual manera en la corriente que consume estas cargas el sistema de igual manera presenta una contaminación de su onda en mayor valor.

GRÁFICO 35 – HERRAMIENTA FFT ANALYSIS TOOL PARA EL CASO 2



Elaborado: Por los Postulantes

El gráfico N°35, se utiliza de igual manera la herramienta FFT Analysis Tools para obtener el gráfico de espectro armónico de este caso el sistema muestra una considerable contaminación ocasionada por la quinta armónica, las diferentes componentes armónicas afectan significativamente al transformador de distribución, esto ocasiona la deformación que sufre forma de onda de voltaje adquirida del lado secundario del transformador mostrada en la parte superior del gráfico.

### 3.5.1.3. Caso 3 – Simulación de transformador con filtro

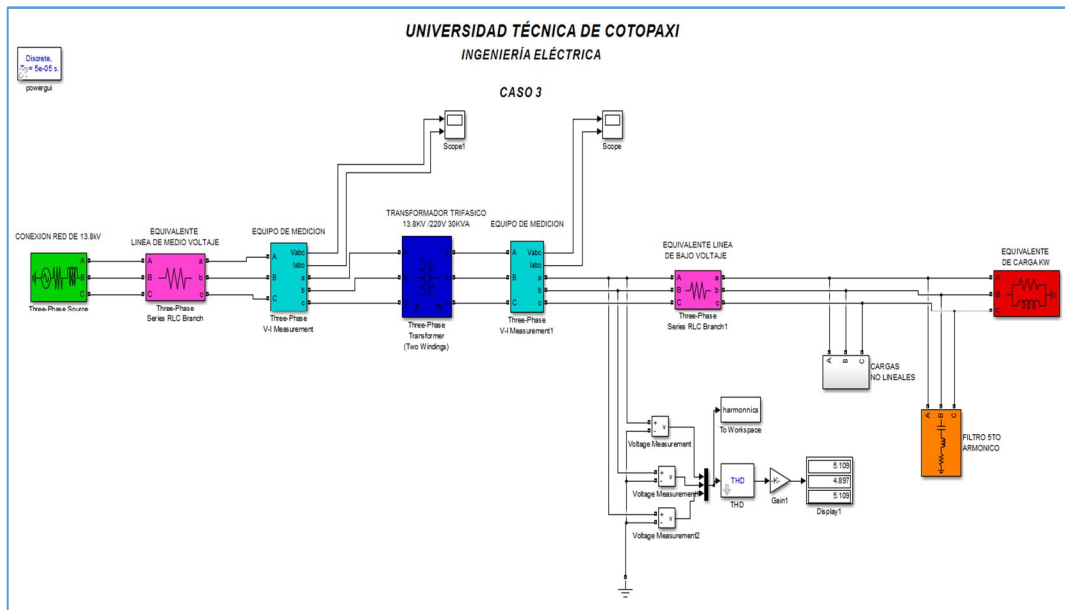
Para este caso, una vez apreciada la contaminación existente en la simulación del caso 2 que se muestra en el gráfico N° 32, representa valores fuera de los límites establecidos por la regulación ARCONEL 004/01.

Para este caso se presenta la propuesta para solucionar el inconveniente ocasionado por las cargas no lineales, Se prevé la instalación de un filtro sintonizado simple previamente calculado, el cual se lo incorpora en el lado secundario del transformador.

En base al diagrama de espectro armónico representado de los gráficos N°17, N° 18, N° 19 y N° 20 y a la simulación del caso 2 se establece que el armónico de orden 5 es el más propenso a contaminar la red eléctrica, los armónicos restantes de bajo valor no se los toma para el dimensionamiento del filtro.

La particularidad de que los armónicos múltiplos de 3 recirculan en la delta del transformador y no proceden hacia la cabecera del alimentador es una característica propia de los transformadores en conexión delta-estrella esto ayuda en la mitigación de los armónicos mencionados.

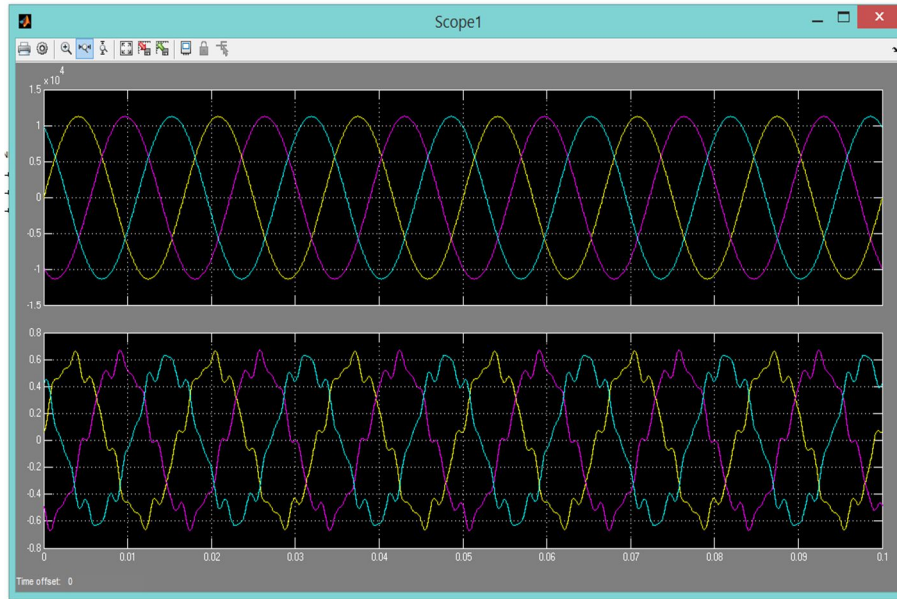
## GRÁFICO 36 - SISTEMA ELECTRICO DE DISTRIBUCION EN EL TRANSFORMADOR N° 8284, CON LA INCORPORACION DE FILTRO SINTONIZADO SIMPLE



Elaborado: Por los Postulantes

En el gráfico 36 se muestra el filtro dimensionado para este caso de contaminación armónica de voltaje que servirá para mitigar el 5to armónico considerado en el caso de estudio.

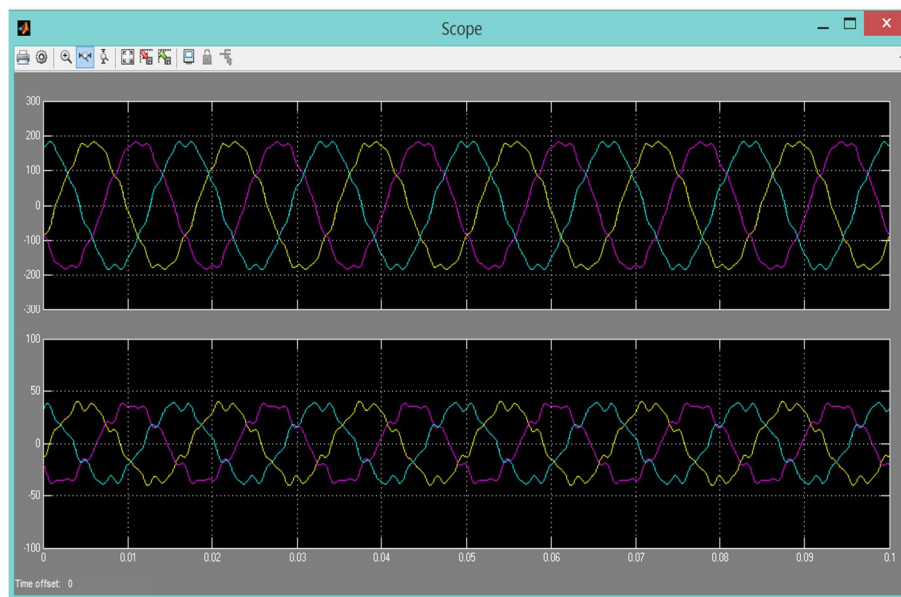
GRÁFICO 37 - FORMA DE ONDA DE VOLTAJE Y CORRIENTE EN EL LADO PRIMARIO DEL TRANSFORMADOR N° 8284



Elaborado: Por los Postulantes

En el gráfico N°37, se puede apreciar el voltaje de 13,8 Kv no se ve afectado por la distorsión de voltaje y de igual forma se aprecia la disminución en la parte de la corriente por la acción controlada del filtro.

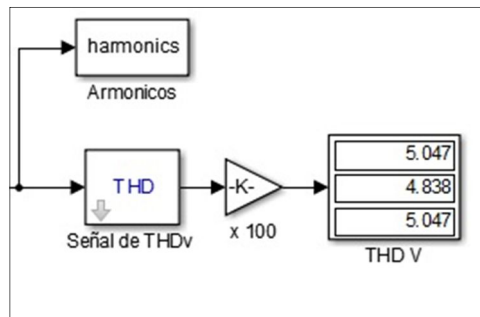
GRÁFICO 38 - FORMA DE ONDA DE VOLTAJE Y CORRIENTE EN EL LADO SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR N° 8284



Elaborado: Por los Postulantes

En el gráfico N° 38, se puede apreciar que en la parte superior el voltaje de salida del transformador se ve afectado por las cargas no lineales y en la parte inferior la corriente que consume el sistema de igual manera presenta una contaminación de su onda en mayor valor, pero en comparación con el caso N° 2, se aprecia una mejora considerable en la formas de onda

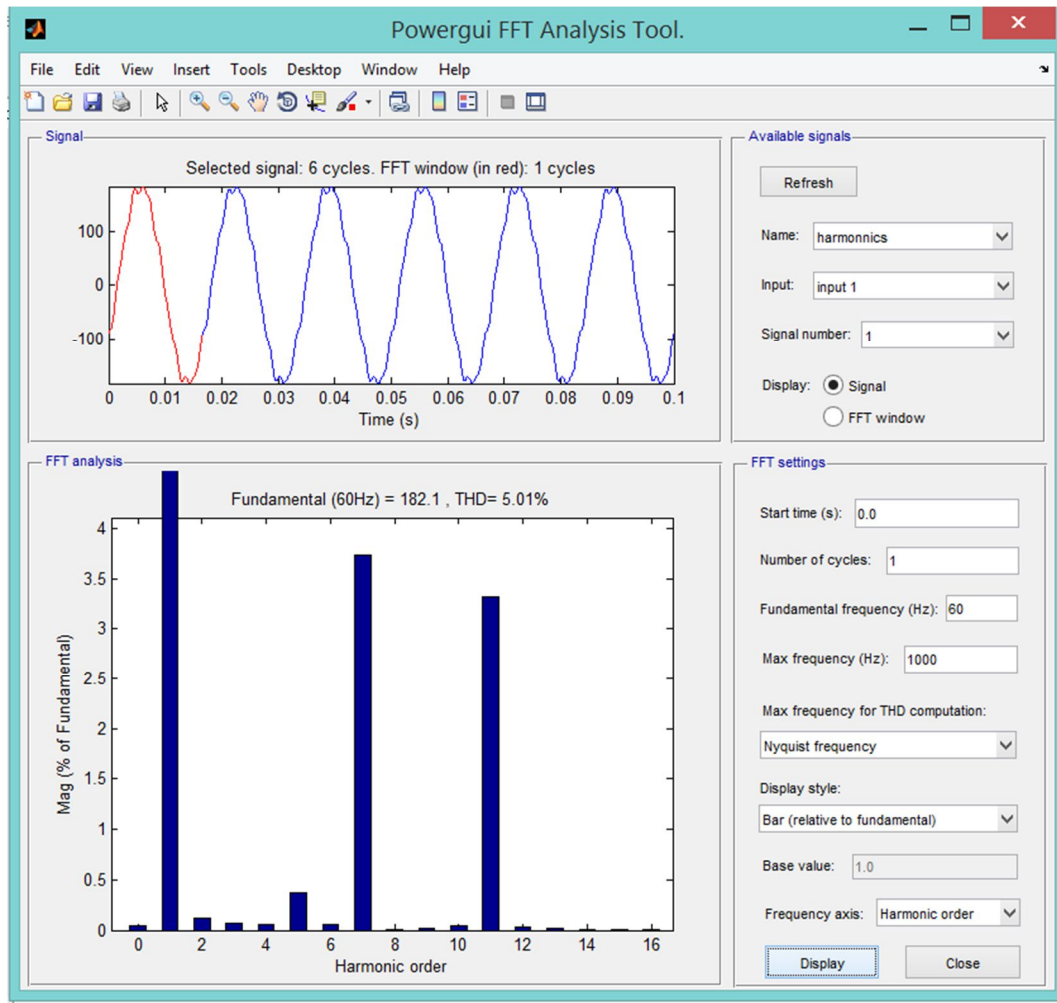
GRÁFICO 39 – VALORES DE DISTORSION ARMONICA DE VOLTAJA EN EL CASO 3



Elaborado: Por los Postulantes

En el gráfico N° 39 se puede apreciar la mejora en las mediciones de distorsión armónica de voltaje, comparada con la simulación del caso 2

GRÁFICO 40 - HERRAMIENTA FFT ANALYSIS PARA EL CASO 3



Elaborado: Por los Postulantes

En el gráfico N°40, la herramienta FFT Analysis muestra los espectros armónicos de este caso 3 del sistema con su contaminación ya reducida por acción del filtro así como ya se puede apreciar THDv se encuentra dentro de los límites emitidos en la regulación del ARCONEL.

### 3.6. Conclusiones

- Debido a la inclusión de cocinas de inducción en el sistema de distribución en el Barrio la Florida, se ha percibido un incremento de los índices de distorsión armónica de voltaje (3%) en los casos particulares de transformador de distribución y contadores de energía del sector.
- El impacto de la distorsión armónica causado por la cocina de inducción en el transformador N°7516 de 100 kVA se encuentra en dentro los límites permisibles el THD de voltaje (5%) de la regulación Arconel N°004/01, lo cual demuestra actualmente una media aceptación de estos electrodomésticos entre los usuarios del mismo.
- El transformador N°8284 de 30 kVA supera los valores límites de distorsión armónica de voltaje (30%) de la regulación Arconel N°004/01, según las mediciones realizadas con el analizador de redes y la comparación respectiva.
- De igual manera el medidor 186520 tiene el (7%) THD de voltaje tomada según mediciones realizadas lo cual demuestra que solo la cocina de inducción compromete un aumento en la distorsión de casi el 50%.
- El cálculo de un filtro de atenuación simple es una propuesta para el caso más crítico de distorsión armónica encontrado en el transformador de distribución N° 8284, se determina la capacidad del filtro en 18KVar.
- Luego de realizar las simulaciones se puede determinar que el diseño de el filtro sintonizado simple es la alternativa técnica más eficiente para mitigar los efectos de la distorsión armónica existente y se comprobó que se reduce del 35% al 5% aproximadamente, con la incorporación de este elemento de compensación



### 3.7. Recomendaciones

- La adquisición de datos en los analizadores de carga se debe realizar durante 7 días configurando el equipo a mediciones periódicas a intervalos de diez minutos como se establece en la norma.
- Se debe filtrar los datos descargados de los analizadores de carga basándose en comportamientos cercanos a parámetros establecidos por la empresa eléctrica mediante histogramas de frecuencia por horas y por intervalos de tiempo
- El presente análisis se determina en el estado actual del sistema, por tal motivo si se incrementa significativamente la carga no lineal (40%), se recomienda realizar una nueva simulación del sistema.
- El modelo de la simulación de la carga no lineal en la herramienta Simulink, está basado en el comportamiento ideal de la cocina de inducción, para futuros análisis es recomendable utilizar este modelo.
- Para la empresa distribuidora, se recomienda planificar la evaluación de las redes eléctricas actuales ante posibles incrementos en los índices de Distorsión armónica, para su posterior reducción.
- Verificar los índices de calidad de energía eléctrica en las cocinas de inducción fabricadas en el territorio nacional e incluso las de importación que compete a los límites de armónicos contemplado en las normas INEN 101.
- La disminución de la contaminación armónica es esencial para mantener una alta confiabilidad en el sistema, debido que un incremento en la distorsión armónica ocasiona pérdidas técnicas para la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi S.A.

### 3.8. Definición de términos básicos

#### A

**Armónicos:** Señales de Corriente o Voltaje que afectan la calidad de energía del sistema de alimentación y toda la red del mismo.

#### B

**Bifásico:** es un sistema que consiste en dos fases conectadas y un neutro, en el cual se pueden obtener voltajes desfasados entre si  $180^\circ$ .

#### C

**Carga lineal:** Una carga eléctrica que en operación de estado estable, presenta una impedancia de carga esencialmente constante a la fuente de poder durante todo el ciclo del voltaje aplicado.

**Carga no lineal:** Carga eléctrica que demanda corriente discontinuamente o cuya impedancia varía durante el ciclo de la forma de onda del voltaje alterno aplicado.

**Corriente:** Es aquella magnitud física que indica la cantidad de electricidad que recorre un conductor, durante una unidad de tiempo determinada.

#### F

**Frecuencia:** Es una magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico.

**I**

**Inducción electromagnética:** es el fenómeno que origina la producción de una fuerza electromotriz (fem) en un medio o cuerpo expuesto a un campo magnético variable, o bien en un medio móvil respecto a un campo magnético estático.

**M**

**Matriz energética:** se refiere a una representación cuantitativa de toda la energía disponible, en un determinado territorio, región, país, o continente para ser utilizada en los diversos procesos productivos.

**Monofásico:** se habla de monofásico cuando se dispone únicamente de un voltaje alterno. El circuito funciona con 2 hilos y la corriente que circula por ellos es siempre la misma.

**O**

**Onda sinusoidal:** se llama senoide a la curva que representa gráficamente la función seno, y es la forma de onda del voltaje y de la corriente eléctrica.

## **P**

**PEC:** Programa de Cocción Eficiente

**PNBV:** Plan Nacional del Buen Vivir.

## **S**

**SAI:** Sistemas de Alimentación Ininterrumpida

## **T**

**TCO<sub>2e</sub>:** Abreviatura para Tonelada de dióxido de carbono equivalente.

**THD:** Es la Tasa de Distorsión Armónica

**Trifásico:** Sistema de 3 voltajes desfasados 120 grados que se genera con un alternador que tiene 3 devanados a 120 grados un respecto del anterior.

## **U**

**UPS:** Sistema de Potencia Ininterrumpida

**V**

**Voltaje:** Es la diferencia de potencial que existen entre dos puntos que están en diferente nivel de potencial

### 3.9. Bibliografía

#### 3.9.1. Bibliografía citada

- ARCONEL. Calidad del servicio eléctrico de Distribución. REGULACION ARCONEL – 004/01. Quito. 23 de mayo de 2001.
- EMPRESA ELECTRICA COTOPAXI S.A. Programa “PEC”. Latacunga; Septiembre 2014. [citado noviembre 2015].
- EN 50160. Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución. NORMA Europea. 2001.
- G. W, Massey. Power Distribution Systems Design for Operation Under Nonsinusoidal Load Conditions. IEEE Transactions on Industry Applications.1995. vol. 31. NO. 3. pp. 513-519. May/June.
- DE LA ROSA, Francisco. Harmonics and Power Systems, vol. 2.
- HERMOSA, Antonio. Principios de electricidad y electrónica. Tomo 2. 1ra edición. Barcelona: MARCOMBO S.A. 1999. 224 p. ISBN: 8426712169
- HERRERA, Juan Carlos. Determinación de la potencia de transformadores para alimentar cargas no lineales. Director: Toapanta Oyos, Milton. Quito. EPN. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Jun 1997. 245 p.
- IEEE. Control de Armónicos. NORMA IEEE-519. First edition. Published by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA. April 12, 1993.
- IEEE. Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia. NORMA IEEE-519-2014. Septiembre 11, 2014.
- L. W, Pierce. Transformer Design and Application Consideration for Nonsinusoidal Load Currents. IEEE Transactions on Industry Applications.1996. vol. 32. NO. 3. pp. 633-645.
- La calidad del servicio eléctrico en redes públicas de baja y media tensión. PINDADO, Rafael. n° 1. Dialnet. 2002. ISSN: 0300-3787
- LLAMAS, A. TEJADA, A. Transformador Delta Estrella con Cargas No Lineales Monofásicas. Artículo de divulgación del Programa de Graduados en Ingeniería, Maestría en Ingeniería Eléctrica, ITESM, 1996.

- RUIZ, V, Francisco. Enciclopedia CEAC – Electrotecnia General. 1983. 896 p. ISBN: 8432960012

### **3.13.3. Bibliografía electrónica**

- A-Eberle GmbH y Co. KG. Analizador de redes PQbox-100. [Consulta enero de 2016]. Disponible en world wide web: [www.a-eberle.de](http://www.a-eberle.de)
- Armónicos en las redes eléctricas. [en línea]. Capítulo 2. [Consultado marzo de 2016]. Disponible en Word wide web: [https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/2/EL5203/1/material\\_docente/bajar?id\\_material=384495](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/2/EL5203/1/material_docente/bajar?id_material=384495)
- Bruel y Kjaer [en línea]. Factor de Cresta. 1985. [consultado 21 febrero 2016]. Disponible en world wide web: <http://dSPACE.Ups.edu.ec/bitstream/123456789/1875/4/03%20Analisis%20de%20armonicos%20y%20fp.pdf>
- CARTUCHE, José. La Cocina De Inducción Electromagnética. [en línea]. 2009 [citado 20 noviembre 2015]. Disponible en world wide web: <https://es.scribd.com/doc/237447711/La-Cocina-de-Induccion-Electromagnetica>
- Fluke. Analizadores de red de distribución eléctrica Memobox (LEM). [Consulta enero de 2016]. Disponible en world wide web: <http://www.fluke.com/fluke/eces/medidores-de-calidad-de-la-energia-electrica/logging-power-meters/memobox.htm?pid=56391>
- LLAMAS, A. TEJADA, A. Efectos de las armónicas en los sistemas eléctricos. [consultado marzo de 2016]. Disponible en Word wide web: <http://www.mty.itesm.mx/etie/deptos/ie/profesores/allamas/cursos/ueee/armo-nicas/07Efectarm.PDF>
- Ministerio de Industrias y Productividad. [en línea]. Quito: junio 2013 [citado 20 noviembre 2015]. Disponible en world wide web: <http://www.industrias.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/04/Artefactos-Cocci%C3%B3n-Inducci%C3%B3n-RTE-INEN-101-Res-14-153.pdf>
- MIT. Fuentes De Campos Magnéticos. [en línea]. 2004 [citado 15 diciembre

2015]. Ley de Ampere, pág. 13. Disponible en:  
<http://web.mit.edu/8.02t/www/materials/StudyGuide/guide09.pdf>

- MIT. Ley De Inducción De Faraday. [en línea]. 2004 [citado 15 diciembre 2015]. Disponible en World Wide Web:  
<http://web.mit.edu/viz/EM/visualizations/coursenotes/modules/guide10.pdf>
- Plan Nacional del Buen Vivir. [en línea]. Quito: junio 2013. [citado Noviembre 2015]. Disponible en World Wide Web:  
<http://www.buenvivir.gob.ec>
- SCHNEIDER, Electric. Detección y Filtrado de armónicos. [citado febrero de 2016]. Biblioteca Schneider. Área de Ingeniería técnica industrial de Zaragoza. Disponible en world wide web:  
[http://automata.cps.unizar.es/bibliotecaschneider/BT/Guia/5\\_Armonicos](http://automata.cps.unizar.es/bibliotecaschneider/BT/Guia/5_Armonicos)
- Yokogawa Meters and Instruments Corporation. Power analyzer cw240. [Consulta enero de 2016]. Disponible en world wide web:  
[www.yokogawa.com](http://www.yokogawa.com)