



REPÚBLICA DEL ECUADOR

**Escuela Politécnica Nacional**

"SCIENTIA HOMINIS SALUS"

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

***Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.***

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**IMPACTO DE LAS CORRIENTES ARMÓNICAS DE LAS COCINAS  
DE INDUCCIÓN EN LOS TRANSFORMADORES DE  
DISTRIBUCIÓN**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

**CARLOS ANDRÉS TALAVERA VILLAMARÍN**  
carlos.talavera@epn.edu.ec

**DIRECTOR: Dr. GABRIEL BENJAMÍN SALAZAR YÉPEZ**  
gabriel.salazar@epn.edu.ec

**Quito, julio 2017**

## DECLARACIÓN

Yo, Carlos Andrés Talavera Villamarín, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

**Carlos Andrés Talavera Villamarín**

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Carlos Andrés Talavera Villamarín, bajo mi supervisión.

---

**Dr. Gabriel Salazar**  
**DIRECTOR DEL PROYECTO**

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por sus regalos y bendiciones a lo largo de mi vida.

A mi familia, y a Pauly, por el apoyo, la paciencia y la confianza depositada en mí y que hicieron posible culminar esta etapa de mi vida.

Al Ing. Mentor Poveda, que, gracias a su guía, tiempo y conocimientos, se logró realizar este trabajo de titulación.

A todo el personal de la Empresa Eléctrica Quito que supo brindarme un poco de su tiempo, para resolver inquietudes y proporcionarme la información necesaria requerida para este proyecto.

Al personal de la Unidad de Negocio Eficiencia Energética de la Empresa Eléctrica Pública Estratégica Corporación Nacional de Electricidad CNEL EP, por su amabilidad al facilitarme las cocinas de inducción utilizadas para las pruebas de laboratorio.

A mi director de tesis, Dr. Gabriel Salazar, por la ayuda que me brindó para poder culminar este proyecto, junto al personal de los laboratorios de Máquinas Eléctricas y Alto Voltaje de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional, por proporcionarme los equipos de medida y el espacio de trabajo que se requirieron.

A los compañeros y amigos de carrera por la amistad y ayuda brindada a lo largo del trayecto universitario.

## **DEDICATORIA**

Este trabajo se lo dedico a mis padres, Carlos Talavera y Narciza Villamarín; a mi hermana Diana Talavera, y a mi sobrinito Carlitos David.

## CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	ii
CERTIFICACIÓN.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
DEDICATORIA.....	v
CONTENIDO.....	vi
RESUMEN.....	x
PRESENTACIÓN.....	xi
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	1
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	1
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	1
1.3 ALCANCE.....	2
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	2
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1 ARMÓNICOS.....	3
2.1.1 GENERALIDADES.....	3
2.1.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS ARMÓNICOS.....	4
2.1.2.1 Valor eficaz RMS.....	4
2.1.2.2 Factor de cresta (CF).....	4
2.1.2.3 Voltaje armónico relativo ( $v_h$ ).....	4
2.1.2.4 Corriente armónica relativa ( $i_h$ ).....	5
2.1.2.5 Distorsión armónica total de voltaje ( $THD_V$ ).....	5
2.1.2.6 Distorsión armónica total de corriente ( $THD_I$ ).....	5
2.1.2.7 Distorsión total de demanda (TDD).....	6
2.1.3 FUENTES DE ARMÓNICOS.....	6
2.1.4 MEDICIÓN DE ARMÓNICOS.....	7
2.1.5 EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS.....	9
2.1.5.1 Efectos en los transformadores.....	10
2.1.6 MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS.....	11
2.2 TRANSFORMADORES.....	12

2.2.1 GENERALIDADES.....	12
2.2.2 TRANSFORMADOR TRIFÁSICO.....	12
2.2.2.1 Conexiones.....	13
2.2.2.1.1 Conexión Y - $\Delta$ .....	13
2.2.2.1.2 Conexión $\Delta$ - Y.....	13
2.2.2.1.3 Conexión $\Delta$ - $\Delta$ .....	14
2.2.2.1.4 Conexión Y-Y.....	14
CAPÍTULO 3. CORRIENTES ARMÓNICAS PRODUCIDAS POR LAS COCINAS DE INDUCCIÓN.....	16
3.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN....	16
3.1.1 INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.....	16
3.1.2 TRANSFERENCIA DE CALOR.....	17
3.1.3 EFECTO PIEL.....	18
3.2 COCINA DE INDUCCIÓN.....	20
3.2.1 ELEMENTOS DE LA COCINA DE INDUCCIÓN.....	20
3.2.2 ARMÓNICOS EN COCINAS DE INDUCCIÓN.....	22
3.3 PRUEBAS DE LABORATORIO.....	23
3.3.1 EQUIPOS A UTILIZAR.....	23
3.3.1.1 Cocinas de inducción.....	23
3.3.1.1.1 Haier HCI-402.....	23
3.3.1.1.2 Midea MC-IF4016B2S-A1.....	24
3.3.1.2 Equipos de medida.....	25
3.3.1.2.1 Fluke 1735.....	25
3.3.1.2.2 Dranetz PowerExplorer® PX5-XFAST.....	26
3.3.2 DETERMINACIÓN DE LAS PRUEBAS.....	27
3.3.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	28
3.4 ANÁLISIS DE LOS REGISTROS DE CARGA DE TRANSFORMADORES DE LA EMPRESA ELÉCTRICA QUITO.....	34
3.4.1 EQUIPOS UTILIZADOS.....	34
3.4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	35
3.4.2.1 Análisis de registros transformador trifásico.....	37
3.4.2.2 Análisis de registros transformador monofásico.....	42

CAPÍTULO 4: INFLUENCIA DE LAS CORRIENTES ARMÓNICAS SEGÚN LA CONEXIÓN DEL TRANSFORMADOR.....	48
4.1 INTRODUCCIÓN.....	48
4.2 CONEXIONES DEL TRANSFORMADOR.....	49
4.2.1 TRANSFORMADOR TRIFÁSICO.....	49
4.2.1.1 Conexión Y – $\Delta$ .....	49
4.2.1.2 Conexión $\Delta$ – Y.....	50
4.2.1.3 Conexión Y – Y.....	50
4.2.1.4 Conexión $\Delta$ – $\Delta$ .....	51
4.3 PÉRDIDAS.....	51
4.3.1 PÉRDIDAS POR EFECTO JOULE.....	51
4.3.2 PÉRDIDAS POR CORRIENTES DE FOUCAULT EN CONDICIONES NOMINALES.....	51
4.3.3 PÉRDIDAS POR CORRIENTES DE FOUCAULT EN CONDICIONES MEDIDAS.....	52
4.3.3.1 Factor armónico de pérdidas para corrientes de Foucault.....	52
4.3.4 OTRAS PÉRDIDAS PARÁSITAS.....	53
4.3.4.1 Factor armónico de otras pérdidas parásitas.....	54
4.4 TEMPERATURA SUPERIOR DEL ACEITE.....	54
4.5 TRANSFORMADOR TRIFÁSICO.....	55
4.5.1 CÁLCULO DE PÉRDIDAS A CONDICIONES NOMINALES.....	55
4.5.1.1 Cálculo de impedancias.....	55
4.5.1.2 Cálculo de corrientes.....	56
4.5.1.3 Cálculo de pérdidas.....	57
4.5.1.4 Corrección de temperatura para pérdidas de carga.....	57
4.5.1.5 Conversión de mediciones de resistencia.....	58
4.5.1.6 Temperatura de medición.....	59
4.5.2 EJEMPLO DE CÁLCULO PARA TRANSFORMADOR TRIFÁSICO.....	61
4.5.2.1 Datos del transformador.....	61
4.5.2.2 Cálculo de impedancias.....	62
4.5.2.3 Cálculo de corrientes.....	63
4.5.2.4 Cálculo de pérdidas.....	63
4.5.2.5 Cálculo de la temperatura superior del aceite.....	70

4.5.2.6 Impacto de cocinas de inducción.....	72
4.5.2.6.1 Cocina Haier.....	75
4.5.2.6.2 Cocina Midea.....	78
4.6 TRANSFORMADOR MONOFÁSICO.....	81
4.6.1 RESULTADOS PARA TRANSFORMADOR MONOFÁSICO.....	82
4.6.1.1 Datos del transformador.....	82
4.6.1.2 Resultados de pérdidas.....	82
4.6.1.3 Resultados de temperatura superior del aceite.....	85
4.6.1.4 Impacto de cocinas de inducción.....	85
CAPÍTULO 5: MÉTODOS DE MITIGACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS CORRIENTES ARMÓNICAS SOBRE LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN.....	89
5.1 COCINA DE INDUCCIÓN.....	89
5.1.1 FILTRO EMC.....	90
5.1.2 FILTRO DE ARMÓNICOS.....	90
5.1.3 MITIGACIÓN EN LAS COCINAS DE INDUCCIÓN.....	91
5.2 TRANSFORMADOR.....	91
5.2.1 CONDICIONES USUALES DE SERVICIO.....	91
5.2.2 CICLO DE CARGA DEL TRANSFORMADOR.....	93
5.2.3 ANÁLISIS DE TRANSFORMADORES.....	94
5.2.3.1 Transformador trifásico.....	94
5.2.3.2 Transformador monofásico.....	95
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	99
6.1 CONCLUSIONES.....	99
6.2 RECOMENDACIONES.....	100
REFERENCIAS.....	102
ANEXO 1: INFORMES DE PRUEBAS DE TRANSFORMADORES.....	104
ANEXO 2: REGISTROS DE CONSUMOS MENSUALES DE CLIENTES CON COCINA DE INDUCCIÓN.....	108

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación describe los efectos de las corrientes armónicas producidas por las cocinas de inducción en los transformadores de distribución, tomando como ejemplo a un transformador trifásico y un transformador monofásico. Estos transformadores actualmente tienen usuarios que ya tienen instalada y en funcionamiento a la cocina de inducción, y con las pruebas de laboratorio que se realizaron a dos cocinas de inducción, necesarias para determinar la magnitud y frecuencias de las corrientes armónicas producidas por el funcionamiento de las cocinas, y los respectivos registros de carga de cada transformador, se pudo determinar cuál es el impacto de estas corrientes en los transformadores.

Se investigó en fuentes bibliográficas existentes en la Escuela Politécnica Nacional y publicaciones internacionales más actuales, para elaborar la teoría necesaria acerca de las cocinas de inducción, armónicos y transformadores, para luego desarrollar la metodología necesaria para realizar los cálculos de los ejemplos propuestos.

Cabe resaltar que el procedimiento que describe los efectos en los transformadores, se lo puede aplicar para cualquier tipo de conexión de transformador trifásico, así como para cualquier transformador monofásico, la metodología planteada no se limita a los ejemplos propuestos, al igual que se puede usar cualquier tipo de registros de armónicos.

## **PRESENTACIÓN**

El Programa Eficiente de Cocción (PEC) de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ) receipta las solicitudes de los usuarios que desean hacer el cambio de la cocina de gas licuado de petróleo (GLP), por la cocina de inducción, que mes a mes incrementan en número, ya que los usuarios cada vez optan más por este tipo de cocina. Desde que se implementó el PEC, hasta octubre del 2016, cerca de 100000 usuarios en el área de concesión de la EEQ han optado por este cambio, y cada mes se recibe más solicitudes.

Dado que la cocina de inducción es un equipo que utiliza dispositivos electrónicos de potencia, que trabajan a altas frecuencias, es necesario saber si las corrientes armónicas que se generarán debido a estas altas frecuencias, tendrán repercusión en los transformadores de distribución, que es el objetivo de este trabajo de titulación, que cuenta con seis capítulos para tratar sobre este tema, los cuales se describen a continuación:

### **CAPÍTULO 1: Generalidades.**

Se da una explicación general del desarrollo del estudio técnico.

### **CAPÍTULO 2: Marco Teórico.**

Se muestran los conceptos teóricos necesarios sobre armónicos y transformadores para el desarrollo del estudio.

### **CAPÍTULO 3: Corrientes armónicas producidas por las cocinas de inducción.**

En el tercer capítulo se describe el funcionamiento de la cocina de inducción, seguido de los resultados de las pruebas de laboratorio y de los registros de carga de los transformadores propuestos.

**CAPÍTULO 4: Influencia de las corrientes armónicas según la conexión del transformador.**

En el cuarto capítulo, se plantean los efectos de las corrientes armónicas en el transformador y la metodología para el cálculo de los mismos, y se muestran los resultados correspondientes de los ejemplos propuestos.

**CAPÍTULO 5: Métodos de mitigación de las corrientes armónicas sobre los transformadores de distribución.**

El capítulo cinco, recopila los análisis de las etapas anteriores, se justifican y proponen opciones para mitigar los efectos de la contaminación armónica, debido a la implementación de las cocinas de inducción, si fuera el caso.

**CAPÍTULO 6: Conclusiones y recomendaciones.**

Finalmente, las conclusiones y recomendaciones son expuestas en el capítulo seis, seguido de las referencias bibliográficas y anexos.

# **CAPÍTULO 1. GENERALIDADES**

## **1.1 INTRODUCCIÓN**

Los equipos electrónicos, en especial los que trabajan con la electrónica de potencia, como son las nuevas cocinas de inducción, producen este tipo de contaminación hacia el sistema, como son las corrientes armónicas, por lo que es necesario un estudio de su comportamiento y cuáles serán sus efectos. El presente proyecto describirá los efectos que producirán las corrientes armónicas al conectar las nuevas cocinas de inducción en los transformadores de distribución, ya que éstos son los elementos más importantes para el sistema eléctrico. En la actualidad, debido a que el gobierno impulsa el Programa de Cocción Eficiente con electricidad en sustitución del gas licuado de petróleo, es necesario un estudio de esta naturaleza, ya que se debe analizar los efectos que producirán las nuevas cocinas de inducción si van a aumentar considerablemente en número.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar un estudio acerca de las corrientes armónicas que se producen al usar masivamente las cocinas de inducción y los efectos que producirían las mismas en los transformadores de distribución.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Describir las causas y consecuencias de la existencia de las armónicas en los transformadores de distribución, sobre la base de los registros existentes en la Empresa Eléctrica Quito y las pruebas específicas que se realicen en este trabajo.

- Realizar una evaluación de las conexiones de los transformadores que influyen en los efectos sobre los transformadores por la presencia de corrientes armónicas.
- Proponer una metodología para aliviar el efecto de las corrientes armónicas producidas por las cocinas de inducción en los transformadores de distribución.

### **1.3 ALCANCE**

Describir los efectos que producirán las corrientes armónicas en los transformadores de distribución, tanto trifásicos como monofásicos, a través de pruebas de laboratorio y de análisis de los registros de carga disponibles en la Empresa Eléctrica Quito.

### **1.4 JUSTIFICACIÓN**

Este estudio se lo realiza debido al cambio que sufrirá el país en los próximos años, al introducir las cocinas de inducción en vez de las cocinas de gas licuado de petróleo, por lo que es importante saber cuáles son los efectos que producirán al conectarse a la red eléctrica. Están en curso otros estudios sobre los patrones de uso y las demandas que incidirán en las redes; está pendiente analizar el efecto de las corrientes armónicas, motivo de estudio de éste Trabajo de Titulación.

La mitigación de los efectos de las corrientes armónicas evita que los equipos de la red de distribución tengan pérdidas mayores o se sobrecalienten, al igual que permitiría reducir caídas de voltaje y flickers, por lo que beneficia tanto a las empresas eléctricas distribuidoras del país, así como a sus usuarios.

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 ARMÓNICOS

#### 2.1.1 GENERALIDADES

Los armónicos son señales de voltaje o corriente cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental (50 - 60 Hz).

Se producen por equipos o cargas con funcionamiento voltaje-corriente no lineal, donde la corriente no es proporcional al voltaje aplicado.

Estas cargas no lineales, consideradas como fuentes de corrientes armónicas, provocan circulación de corrientes deformadas en la red, como se indica en la figura 2.1.

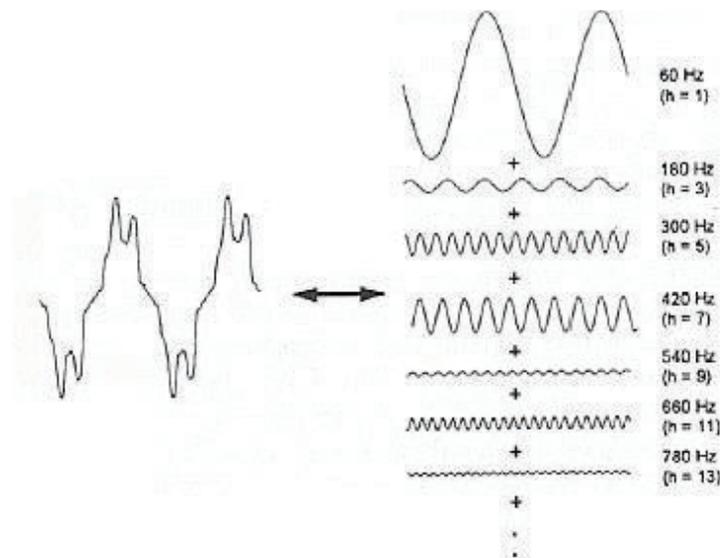


Figura 2.1 Armónicos [1]

La distorsión de voltaje es el resultado de la circulación de corrientes deformadas a través de la impedancia serie del sistema generando en el punto de conexión un voltaje distorsionado.

## 2.1.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS ARMÓNICOS

### 2.1.2.1 Valor eficaz RMS

Es el valor de la corriente continua equivalente que produciría la misma cantidad de calor en una carga resistiva determinada.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt} \quad (2.1)$$

Donde:

$V_{RMS}$  = valor eficaz

$T$  = período de la onda

$v(t)$  = magnitud de la onda en función del tiempo

### 2.1.2.2 Factor de cresta (CF)

Factor que mide la deformación de la onda relacionando el valor pico y el valor eficaz.

$$CF = \frac{V_{pico}}{V_{rms}} \quad (2.2)$$

Donde:

$CF$  = factor de cresta

$V_{pico}$  = valor pico

$V_{RMS}$  = valor eficaz

### 2.1.2.3 Voltaje armónico relativo ( $v_h$ )

Porcentaje del valor eficaz del armónico de voltaje de orden  $h$  respecto del valor eficaz del voltaje fundamental.

$$v_h = \frac{V_h}{V_1} \% \quad (2.3)$$

Donde:

$v_h$  = voltaje armónico relativo

$V_h$  = armónico de voltaje de orden h [V]

$V_1$  = voltaje fundamental [V]

$h$  = orden del armónico

#### 2.1.2.4 Corriente armónica relativa ( $i_h$ )

Porcentaje del valor eficaz del armónico de corriente de orden h respecto del valor eficaz de la corriente fundamental.

$$i_h = \frac{I_h}{I_1} \% \quad (2.4)$$

Donde:

$i_h$  = corriente armónica relativa

$I_h$  = armónico de corriente de orden h [A]

$I_1$  = corriente fundamental [A]

#### 2.1.2.5 Distorsión armónica total de voltaje ( $THD_V$ )

Proporciona una medida porcentual del contenido armónico respecto de la fundamental.

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \% \quad (2.5)$$

Donde:

$THD_V$  = distorsión armónica total de voltaje

$V_h$  = armónico de voltaje de orden h [V]

$V_1$  = voltaje fundamental [V]

#### 2.1.2.6 Distorsión armónica total de corriente ( $THD_I$ )

Solo expresa el % de armónicos respecto de la fundamental, pero no relaciona la distorsión de la onda de voltaje en el punto de medición a causa de la circulación

de una corriente deformada.

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \% \quad (2.6)$$

Donde:

$THD_I$  = corriente armónica relativa

$I_h$  = armónico de corriente de orden h [A]

$I_1$  = corriente fundamental [A]

### 2.1.2.7 Distorsión total de demanda (TDD)

Indica el porcentaje de contenido armónico de corriente respecto a un valor fijo de corriente (tal como la corriente de demanda máxima).

$$TDD = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}{I_L^2}} \% \quad (2.7)$$

Donde:

$TDD$  = distorsión total de demanda

$I_h$  = armónico de corriente de orden h [A]

$I_L$  = corriente demanda máxima [A]

### 2.1.3 FUENTES DE ARMÓNICOS

Se pueden originar en la propia red de suministro y en las cargas conectadas a la red.

- Generados por la propia red. Se generan por los propios equipos electromecánicos existentes en la generación, transmisión o distribución. Poseen bajo nivel de distorsión, haciéndolos despreciables.
- Generados por cargas. Son los principales generadores de armónicos, entre ellas se tiene cargas de tipo monofásico y cargas de tipo trifásico.

- Cargas monofásicas, por ejemplo:
  - Fuentes de alimentación de funcionamiento conmutado (SMPS), que corresponden a los equipos electrónicos modernos, y gran parte de estos dispositivos utilizan rectificadores no controlados (diodos).
  - Estabilizadores electrónicos de dispositivos de iluminación fluorescente, como son las lámparas de descarga gaseosa.
  - Pequeñas unidades de Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (SAI o UPS).
  
- Cargas trifásicas, por ejemplo:
  - Motores de velocidad variable.
  - Grandes unidades de UPS.

#### 2.1.4 MEDICIÓN DE ARMÓNICOS

Las mediciones de corrientes y voltajes armónicos son esenciales para la segura distribución de la energía eléctrica, sirven para monitorear los valores existentes de armónicos y chequear los niveles admisibles o recomendados, además de diagnosticar y arreglar las situaciones en las que la actuación de los equipos sea inaceptable para la empresa distribuidora o al usuario.

Para la medición de ondas armónicas se pueden usar los siguientes equipos:

- Osciloscopio. La gráfica de la forma de onda en el osciloscopio proporciona una información cuantitativa acerca del grado y tipo de distorsión.

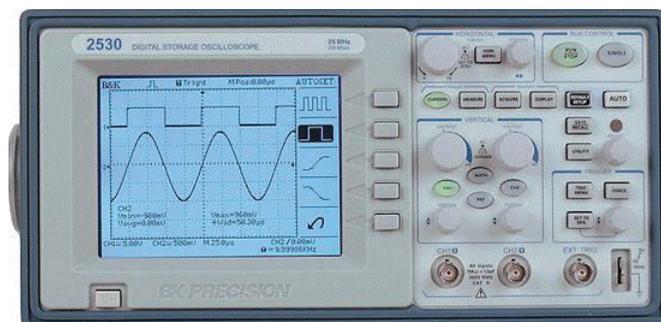


Figura 2.2. Osciloscopio [2]

- Analizadores de espectro. Muestran la distribución de potencia de una señal en función de la frecuencia. Se explora un rango seguro de frecuencias y todos los componentes, armónicos e interarmónicos de la señal analizada se muestran.



Figura 2.3 Analizador de espectro [3]

- Analizadores de distorsión. Indican directamente la distorsión armónica total (THD).



Figura 2.5 Analizador de distorsión [4]

- Analizadores armónicos. Miden la amplitud de una función periódica, proporcionan el espectro lineal de la señal observada. La salida puede ser registrada, o puede ser monitoreada por medidores analógicos o digitales.



Figura 2.4 Analizador armónico [5]

- Equipos de medición de armónicos digitales. El análisis digital puede ser utilizado con dos técnicas básicas:
  - Por medición de un filtro digital. En el sistema para una medición particular, el rango de frecuencias será el conjunto de mediciones contenidas en los filtros digitales para dicho rango. También, el ancho de banda varía para optimizar la captura de pequeños armónicos cuando se está en presencia de una fundamental muy grande.
  - Técnica de la Transformada de Fourier Rápida. Estos métodos en tiempo real son muy rápidos, ya que realizan un análisis del espectro permitiendo la evaluación de un gran número de funciones. La conversión analógica-digital multicanal y los mini o microcomputadores son usados para la adquisición de datos en tiempo real.

### **2.1.5 EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS**

Las corrientes armónicas ocasionan problemas tanto en el sistema de suministro de energía como dentro de la instalación.

- Problemas causados por las corrientes armónicas:
  - Sobrecarga de los conductores neutros.
  - Sobrecalentamiento de los transformadores.
  - Disparos intempestivos de los interruptores automáticos.
  - Sobrecarga de los condensadores de corrección del factor de potencia.
  - Efecto superficial.
- Problemas causados por voltajes armónicos:
  - Distorsión del voltaje.
  - Sobrecarga en motores de inducción.
  - Ruido de paso por cero.

### 2.1.5.1 Efectos en los transformadores

Las corrientes armónicas causan un incremento de las pérdidas en el cobre y aumento de flujos dispersos, y los voltajes armónicos causan un incremento de las pérdidas en el hierro. El efecto total es un incremento en el calentamiento del transformador, y, en consecuencia, una vida útil del equipo más corta.

Los estándares IEEE Std C57.12.90-2006 “IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers” y el IEEE Std C57.12.91-2001 “IEEE Standard Test Code for Dry-Type Distribution and Power Transformers”, categorizan las pérdidas del transformador como pérdidas sin carga, (pérdidas de excitación); pérdidas de carga (pérdidas de impedancia); y las pérdidas totales (la suma de las pérdidas con carga y las pérdidas sin carga). Las pérdidas de carga se subdividen en  $I^2R$  (pérdidas por efecto Joule) y pérdidas parásitas. Las pérdidas parásitas se pueden definir como la pérdida debida al flujo electromagnético parásito en los devanados, núcleo, abrazaderas del núcleo, blindajes magnéticos, cercado o paredes del tanque, etc. Por lo tanto, las pérdidas parásitas se subdividen en pérdidas parásitas en los devanados y en pérdidas parásitas en componentes distintos de los devanados ( $P_{OSL}$ ). Las pérdidas parásitas en los devanados incluyen pérdidas por corrientes de Foucault en los ramales conductores de los devanados, y pérdidas debido a corrientes que circulan entre los ramales o los circuitos paralelos de los devanados. Éstas últimas pérdidas pueden considerarse que constituyen las pérdidas en los devanados por corrientes de Foucault ( $P_{EC}$ ).

Las pérdidas de carga totales pueden ser enunciadas como:

$$P_{LL} = P + P_{TSL} = P + P_{EC} + P_{OSL} \quad (2.8)$$

Donde:

$P_{LL}$  = pérdidas de carga [W]

$P$  = pérdidas por efecto Joule,  $I^2R$  [W]

$P_{TSL}$  = total pérdidas parásitas [W]

$P_{EC}$  = pérdidas en devanados por corrientes de Foucault [W]

$P_{OSL}$  = otras pérdidas parásitas [W]

Y las pérdidas totales en el transformador son:

$$P_T = P_{NL} + P_{LL} \quad (2.9)$$

Donde:

$P_T$  = pérdidas totales en el transformador [W]

$P_{NL}$  = pérdidas sin carga (vacío) [W]

La temperatura también aumentará en las partes estructurales por las corrientes de Foucault, de nuevo, aproximadamente, con el cuadrado de la corriente de carga y el cuadrado de la frecuencia.

Para transformadores llenos de líquido, la temperatura superior del aceite, se incrementará tanto como las pérdidas con carga se incrementen con la presencia de carga con armónicos. Cualquier incremento en las otras pérdidas parásitas afectará primordialmente a la temperatura superior del aceite.

Otro efecto está relacionado con los armónicos triple-N (corrientes en las que están presentes armónicos de un orden múltiplo de tres). Cuando estos se reflejan en un bobinado en triángulo están todos en fase, así que las corrientes armónicas triple-N circulan por este bobinado, son absorbidas eficazmente en el bobinado y no se propagan aguas arriba a la línea de suministro, de modo que los transformadores con bobinado en triángulo son útiles como transformadores de aislamiento. Sin embargo, los armónicos que no son triple-N sí pasan el transformador. Deberá tenerse en cuenta la corriente de estos armónicos que circulan por el transformador a la hora de dimensionarlo.

### 2.1.6 MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS

La distorsión armónica de voltaje se puede reducir mediante la disminución de las corrientes armónicas y la disminución de las impedancias involucradas. Entre las soluciones a problemas de armónicos se puede citar:

- Filtros, para desviar armónicos de corriente fuera del sistema o bloquear corrientes que ingresan desde el sistema.
- Utilización de transformadores estándar desclasificados.
- Empleo de transformadores de Factor K, especialmente diseñados para tolerar armónicos.
- Aumento de la sección del conductor del neutro.
- Transformadores con arrollamiento en triángulo.
- Transformadores con desplazamientos de fases en distintos alimentadores.
- Transformadores o reactores derivadores de corriente de secuencia cero.
- Inductancias de choque o aislamiento.
- Rectificadores de mayor cantidad de pulsos.

## **2.2 TRANSFORMADORES**

### **2.2.1 GENERALIDADES**

Es una máquina eléctrica estática, que funciona con corriente alterna, conformada por dos arrollamientos, primario y secundario, que transforma la energía eléctrica con unas magnitudes de voltaje y corriente determinadas a otras con valores, en general, diferentes.

Son de gran importancia ya que gracias a ellos es posible la realización práctica y económica del transporte de la energía eléctrica a grandes distancias, por lo que las pérdidas de energía en el transformador constituyen un porcentaje importante del total de pérdidas de un sistema.

### **2.2.2 TRANSFORMADOR TRIFÁSICO**

Casi todos los principales sistemas de generación y distribución del mundo actual, son sistemas trifásicos de corriente alterna. Se usan diferentes tipos de conexiones para las diferentes etapas de generación y distribución, de acuerdo a los requerimientos de la carga.

### 2.2.2.1 Conexiones

Un transformador trifásico consta de tres transformadores, separados o combinados sobre un núcleo. Los primarios y secundarios de todo transformador trifásico pueden ser conectados independientemente en estrella (Y) o en delta ( $\Delta$ ), dando como resultado las siguientes conexiones posibles:

#### 2.2.2.1.1 Conexión Y- $\Delta$

Se utiliza para disminuir un voltaje alto hasta lograr un voltaje medio bajo. Por seguridad se añade un conductor neutro con conexión a tierra en el lado de alto voltaje. El voltaje primario de línea se relaciona con el voltaje primario de fase por  $V_{LP} = \sqrt{3}V_{\phi P}$ , mientras que en el secundario los voltajes de línea y fase son los mismos  $V_{LS} = V_{\phi S}$ .

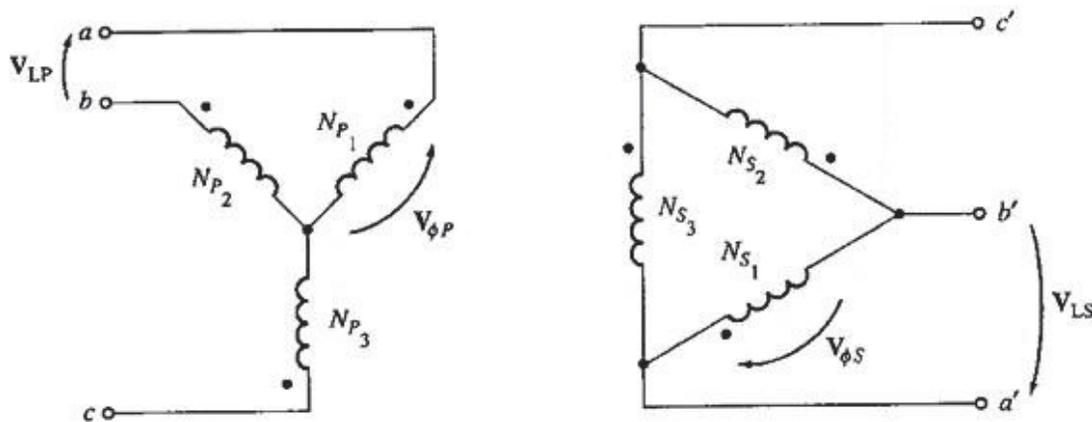


Figura 2.6 Conexión Y- $\Delta$  [6]

#### 2.2.2.1.2 Conexión $\Delta$ -Y

Se utiliza de modo inverso que la conexión anterior, es decir, para aumentar el voltaje, en el caso de centrales de generación. En las redes de distribución se utilizan para reducción del voltaje. El voltaje primario de línea es igual al voltaje primario de fase  $V_{LP} = V_{\phi P}$ , mientras que los voltajes secundarios están relacionados por  $V_{LS} = \sqrt{3}V_{\phi S}$ .

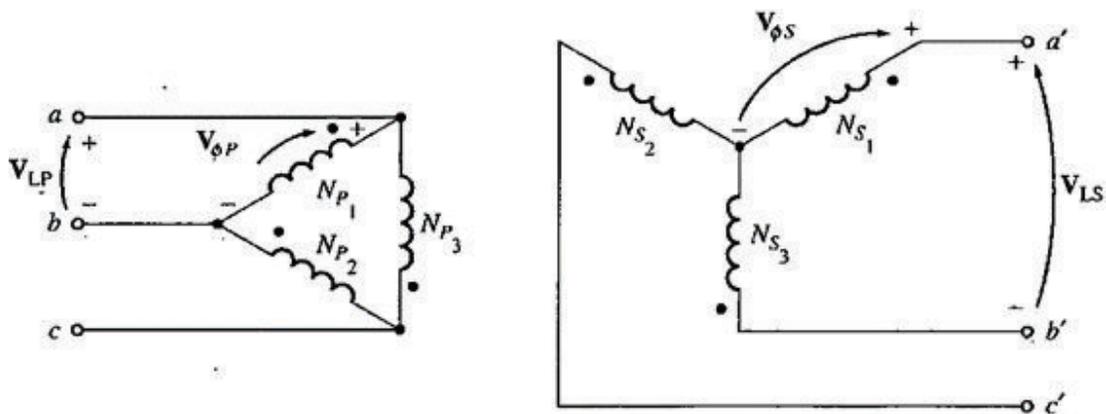


Figura 2.7 Conexión  $\Delta$ -Y [6]

#### 2.2.2.1.3 Conexión $\Delta$ - $\Delta$

En esta conexión los voltajes primarios y secundarios se relacionan de la siguiente manera,  $V_{LP} = V_{\phi P}$  y  $V_{LS} = V_{\phi S}$ . Presenta la ventaja de poder eliminar un transformador para reparación o mantenimiento, mientras que los restantes continúan funcionando con capacidad reducida a 58%, esta conexión toma el nombre de conexión delta abierta o conexión en V.

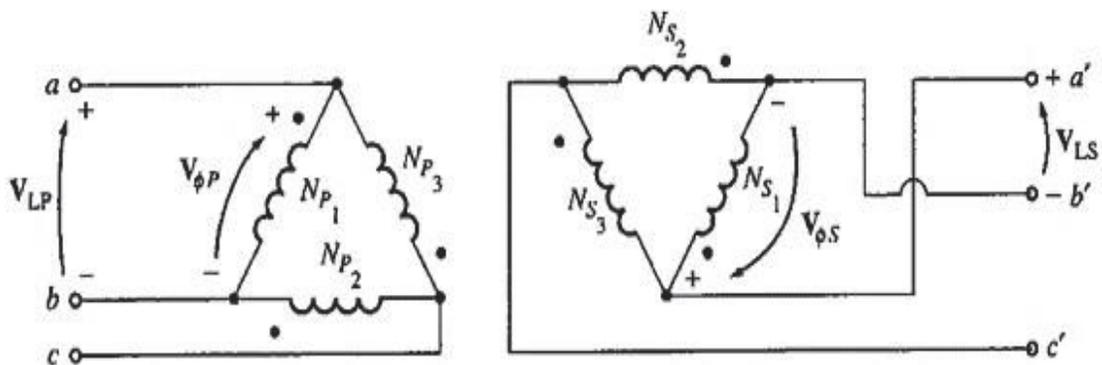


Figura 2.8 Conexión  $\Delta$ - $\Delta$  [6]

#### 2.2.2.1.4 Conexión Y-Y

Se emplea en muy pocas ocasiones, ya que presenta dificultades con los fenómenos de las corrientes de excitación, particularmente cuando no se dispone del neutro en la alimentación. El voltaje primario de cada fase del transformador

es  $V_{\phi p} = \frac{V_{LP}}{\sqrt{3}}$ . El voltaje de fase en el secundario está relacionado con el voltaje de línea en el secundario por  $V_{LS} = \sqrt{3}V_{\phi s}$ .

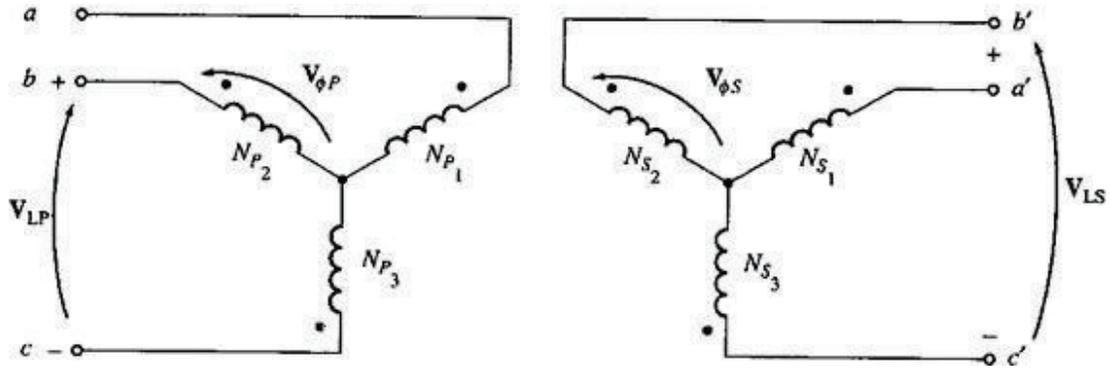


Figura 2.9 Conexión Y-Y [6]

## CAPÍTULO 3. CORRIENTES ARMÓNICAS PRODUCIDAS POR LAS COCINAS DE INDUCCIÓN

### 3.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN

El calentamiento por inducción se basa en tres principios básicos: inducción electromagnética, el efecto piel y la transferencia de calor.

#### 3.1.1 INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Cuando la corriente alterna circula en una bobina, un campo magnético se forma alrededor de la misma, calculado según la ley de Ampere como:

$$Ni = \int Hdl = Hl \quad (3.1)$$

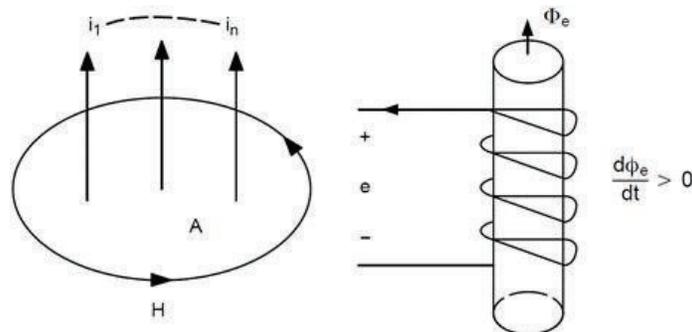
Donde:

$N$  = número de espiras

$i$  = corriente que circula por el conductor [A]

$l$  = longitud del circuito [m]

$H$  = intensidad de campo magnético [A/m]



**Figura 3.1** Principio de inducción [7]

Un objeto puesto en el campo magnético produce un cambio en la velocidad del movimiento magnético. La densidad del campo magnético disminuye cuando el

objeto se acerca al centro de la superficie. De acuerdo con la ley de Faraday en toda sustancia conductora que se encuentra dentro de un campo magnético variable, se producirá una fuerza electromotriz dada por:

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (3.2)$$

Donde:

$\varepsilon$  = f.e.m. inducida [V]

$N$  = número de espiras

$\phi$  = flujo del campo magnético [Wb]

Como resultado, la energía eléctrica causada por la corriente inducida y la corriente parásita se convierte en energía térmica, según la ley de Joule, como se muestra en la ecuación:

$$P = \frac{\varepsilon^2}{R} \quad (3.3)$$

Donde:

$P$  = potencia disipada [W]

$\varepsilon$  = f.e.m inducida [V]

$R$  = resistencia [ $\Omega$ ]

La resistencia se determina por la resistividad ( $\rho$ ) y la permeabilidad ( $\mu$ ) del objeto conductor. La corriente es determinada por la intensidad del campo magnético. La energía térmica se encuentra en una relación inversa con la profundidad del elemento que recibe la corriente inducida.

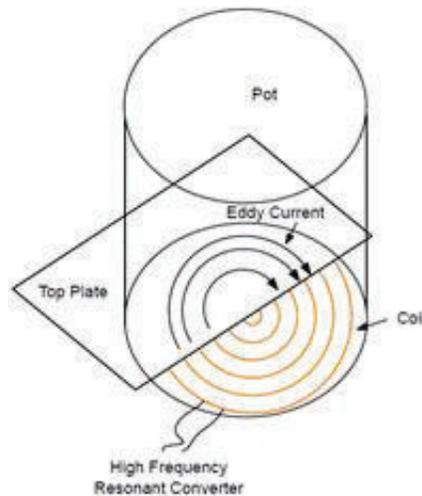
### 3.1.2 TRANSFERENCIA DE CALOR

El fenómeno mencionado anteriormente conduce a la generación de corrientes no deseadas en el conductor colocado cerca (las llamadas corrientes de Foucault, como se muestra en la Figura 3.2). Estas corrientes inducidas en el conductor generan calor. La cantidad de calor generado en el conductor obedece a la ley de calentamiento Joule, también conocido como calentamiento óhmico, que es el

proceso por el cual el paso de una corriente eléctrica a través de un conductor se disipa en forma de energía y libera calor. Este efecto es también conocido como primera ley de Joule:

$$Q = P = R * i^2 = V * i \quad (3.4)$$

Donde  $Q$  y  $P$  [W] representan la potencia convertida de la energía eléctrica a energía térmica,  $I$  [A] es la corriente que pasa por el conductor (en este caso la corriente de Foucault),  $V$  [V] es la caída de voltaje en el elemento y  $R$  [ $\Omega$ ] es la resistencia equivalente del conductor (en el caso de calentamiento por inducción es la resistencia de la capa de fondo del recipiente). La ecuación muestra que la cantidad del calor liberado es proporcional al cuadrado de la corriente.



**Figura 3.2** Corrientes de Foucault generadas en la parte inferior del recipiente [7]

### 3.1.3 EFECTO PIEL

La corriente alterna tiene la particularidad de concentrarse en la parte externa del conductor, debido a que la corriente principal en el interior del conductor genera un campo magnético variable, que origina unas corrientes de inducción que poseen el mismo sentido en la parte externa y contrario en la interna, como resultado de esto, la corriente en el centro del conductor se cancela y se refuerza en los bordes, el flujo neto de corriente solo se produce en la superficie del conductor. Esto se conoce como el "efecto piel (skin)" o "efecto Kelvin."

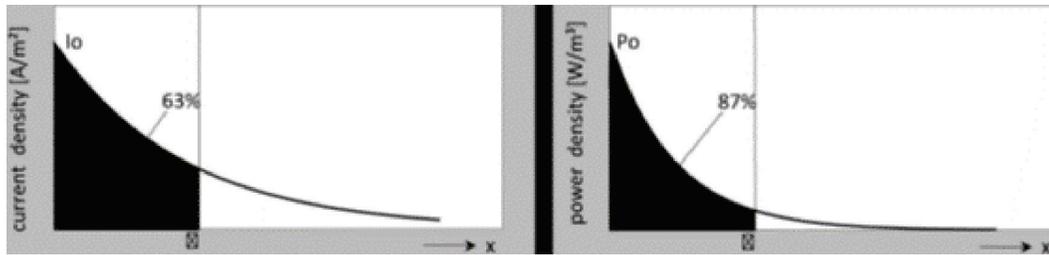


Figura 3.3 Profundidad de penetración [8]

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0 \mu_r}} \quad (3.5)$$

Donde:

$\delta$  = profundidad de penetración [mm]

$\rho$  = resistividad del conductor [ $\Omega\text{m}$ ]

$f$  = frecuencia de la corriente que fluye a través del objeto [Hz]

$\mu_0$  = permeabilidad magnética relativa [H/m]

$\mu_r$  = permeabilidad magnética del vacío

De la expresión anterior se puede inferir que cuanto más grande sea la frecuencia de las corrientes en el conductor, más se concentrarán estas en su superficie. Este principio uno de los más importantes que rige el calentamiento por inducción.

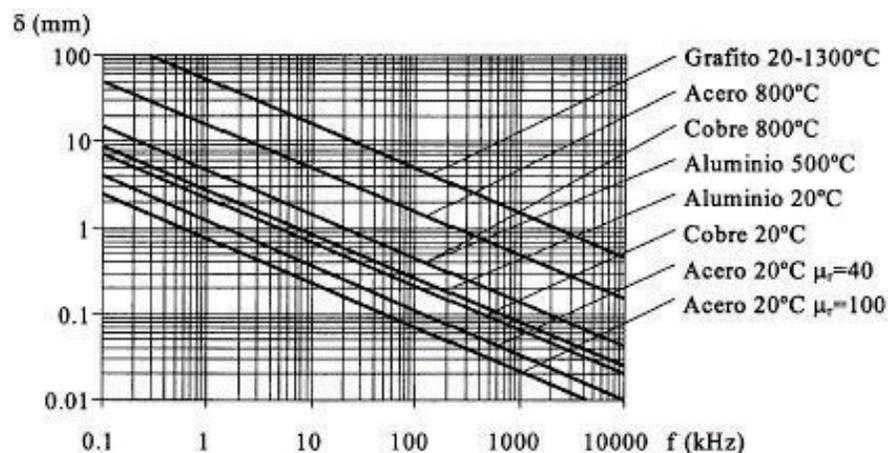
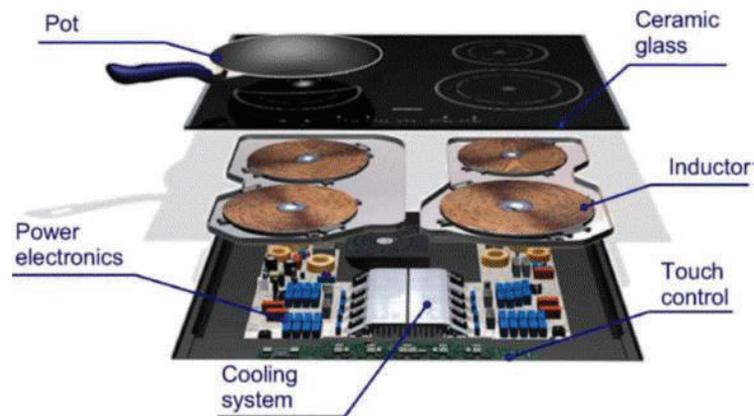


Figura 3.4 Profundidad de penetración en función de la frecuencia para diversos materiales [9]

En la figura 3.4. se observa que las corrientes inducidas, o corrientes de Foucault se concentran en la superficie del elemento sujeto al campo magnético.

## 3.2 COCINA DE INDUCCIÓN

La cocina de inducción (figura 3.5), es un tipo de cocina de vitro-cerámica, cuyo elemento principal, ubicado debajo de la zona de cocción, es una bobina plana de cobre y con forma de espiral, por la que se hace pasar una corriente eléctrica de frecuencia variable (20 – 100 kHz), la misma que genera una densidad de flujo magnético alterno, con igual frecuencia con la que varía la corriente en la bobina.



**Figura 3.5** Esquema de los principales bloques de una cocina de inducción [10]

### 3.2.1 ELEMENTOS DE LA COCINA DE INDUCCIÓN

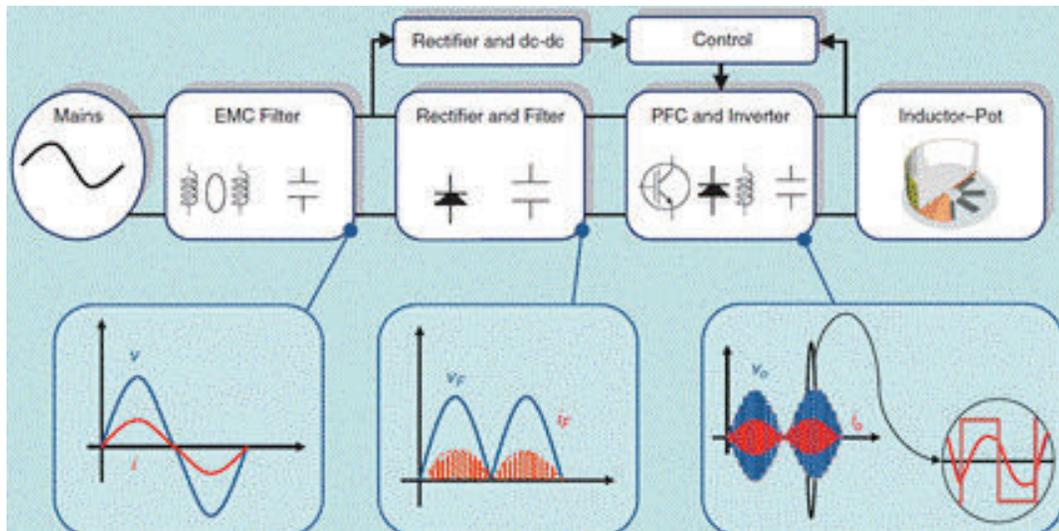
- Fuente de alimentación. Se conecta directamente a la red eléctrica de bajo voltaje, siempre que se cumpla con el voltaje y frecuencia especificados por el fabricante, en nuestro país 220 voltios y 60 Hz.
- Filtros y protecciones. Los filtros de interferencia electromagnética (EMI) o filtros de compatibilidad electromagnética (EMC), restringen el ingreso a la red eléctrica de la energía electromagnética potencialmente generada en el circuito de potencia del inversor, ante las altas frecuencias de la señal. En algunos diseños de cocinas de inducción de baja gama, se obvia esta protección.
- Rectificación y filtrado. El bloque de rectificación proporciona voltaje y corriente continuos a partir de la corriente alterna, a los elementos activos y pasivos de

los bloques siguientes usando un arreglo de diodos, además de un filtro capaz de absorber corrientes armónicas en la entrada del inversor de alta frecuencia.

- Control. El bloque de control permite monitorear los parámetros del sistema de calentamiento (temperatura, tiempos de calentamiento, etc.), y a través de una pantalla digital, con escalas numéricas, regular la potencia deseada. Adicionalmente, el bloque de control se encarga de generar los pulsos de disparo del conmutador electrónico.
- Sistema de refrigeración. El inductor y demás componentes (condensadores, elementos de potencia, etc.) necesitan disipar potencias grandes, para esto el elemento refrigerante utilizado suele ser agua, aunque hay aplicaciones en las que basta utilizar ventiladores.
- Inversor de alta frecuencia. Esta etapa genera una onda de voltaje o corriente alterna, de determinada magnitud y frecuencia, a partir de una fuente de energía de corriente continua. Su funcionamiento se basa en la conversión de corriente continua a corriente alterna, utilizando conmutadores rápidos como los denominados IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Como se vio en la sección 3.1.3 (Efecto piel), la mayor parte del calor producido (alrededor del 80%) en la pieza se concentra en la parte exterior (superficie), ya que las corrientes inducidas (corrientes de Foucault) que fluyen sobre la pieza es más intensa en la superficie, por lo que, a mayor frecuencia de operación, menor es la profundidad de penetración. Generalmente se emplean inversores resonantes conformados por un resistor, un capacitor y un inductor conectados en serie o en paralelo.
- Bobina. Es la responsable directa de la generación del campo electromagnético en las proximidades del material a calentar, campo que luego se transformará en calentamiento para la cocción, potencia activa.
- Carga o elemento a calentar. Si un objeto tiene propiedades conductoras (hierro, materiales ferromagnéticos), energía térmica adicional se genera

debido a la histéresis magnética. La cantidad de energía térmica creada por la histéresis está en proporción con el tamaño del lazo de histéresis que, a su vez, es dependiente del material.

La cocina de inducción funciona gracias a la operación conjunta de estos elementos, resultando el siguiente diagrama de bloques y formas de onda:



**Figura 3.6** Diagrama de bloques de conversión de energía de una placa de inducción [11]

### 3.2.2 ARMÓNICOS EN COCINAS DE INDUCCIÓN

Las cocinas de inducción generan un campo magnético a altas frecuencias, que se encuentran en el orden de los kilohercios (kHz), el cual calienta un recipiente de hierro o acero inoxidable a través de inducción magnética. La frecuencia exacta utilizada puede variar dependiendo del tamaño del recipiente o elemento utilizado, para que la cocina funcione de manera más eficiente, por lo que los armónicos de corriente generados por estas frecuencias también serán variables.

En el numeral siguiente se muestran los armónicos de corriente que se generan por estas frecuencias en dos cocinas de inducción de dos marcas diferentes que se encuentran actualmente de venta en el país, utilizando varias combinaciones de quemadores, con dos analizadores de calidad de energía y analizando los valores más críticos, para posteriormente realizar el análisis de sus efectos.

### 3.3 PRUEBAS DE LABORATORIO

Las pruebas se realizaron con el fin de obtener el contenido de distorsión armónica de cocinas de inducción, y compararlo con los límites establecidos que menciona el Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización (INEN), y a su vez determinar cuánto es el aporte de distorsión armónica que tendrán en los transformadores, para compararlo con el existente obtenido de las mediciones de los registros de carga de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ).

Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional, a dos cocinas de inducción dadas a préstamo por parte de la Unidad de Negocio Eficiencia Energética (UN EFE) de la Empresa Eléctrica Pública Estratégica Corporación Nacional de Electricidad CNEL EP.

#### 3.3.1 EQUIPOS A UTILIZAR

##### 3.3.1.1 Cocinas de inducción

###### 3.3.1.1.1 *Haier HCI-402*



**Figura 3.7** Cocina inducción Haier HCI-402

Especificaciones técnicas:

- Potencia nominal: 4000 W, disposición de quemadores como se muestra en la figura 3.7:

Quemador C: 1000 W

Quemador D: 1500 W

Quemador A: 2200 W

Quemador B: 1800 W

- Voltaje: 220 V
- Frecuencia: 60 Hz
- Peso neto: 9,5 kg
- Eficiencia energética:  $\geq 85\%$
- Consumo de energía en modo de espera:  $\leq 1$  W
- Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 101 Artefactos Electrodomésticos para Cocción por Inducción.

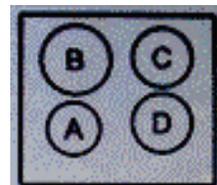
### 3.3.1.1.2 Midea MC-IF4016B2S-A1



**Figura 3.8** Cocina inducción Midea MC-IF4016B2S-A1

Especificaciones técnicas:

- Peso neto: 12 kg
- Potencia nominal: 4000 W  
A: 1200W, B:1800W, C:1200W, D:1800W
- Voltaje - Frecuencia: AC 220 V – 60 Hz



- Consumo de energía anual estimado: 640 kWh
- Eficiencia energética (%):  $\geq 85$
- Consumo de energía en modo de espera (W):  $\leq 0,5$

### 3.3.1.2 Equipos de medida

Para la medición de armónicos en las cocinas de inducción, se utilizaron dos equipos de medida que son descritos a continuación:

#### 3.3.1.2.1 Fluke 1735



**Figura 3.9** Registrador de calidad de potencia modelo 1735 [12]

Es un registrador de potencia, que puede realizar estudios de voltaje, corriente y potencia. El registrador es también una herramienta de investigación de calidad de la potencia de finalidad general que revela la calidad del suministro en cualquier punto de una red de distribución.

En el modo registro de armónicos, se registran los siguientes valores por fase:

- Voltajes (V) y
- Corrientes (I)
- THD V
- THD I
- Valores de armónicos desiguales de 1-25 para V e I
- Frecuencia

Especificaciones técnicas de medición:

- Velocidad de muestreo: 10,24 kHz
- Error de variación de frecuencia:  $\pm 2\%$  v.m. +  $2*(\%$  desviación máxima de frecuencia)
- Longitud del intervalo: 1, 2, 5, 10, 30 s, 1, 5, 10, 15 minutos
- Resolución: 20 ms para valores RMS

### 3.3.1.2.2 Dranetz PowerExplorer® PX5-XFAST



Figura 3.10 Dranetz PowerExplorer® PX5 [13]

Es un medidor/monitor portátil de ocho canales. Puede monitorear, grabar y mostrar datos en cuatro canales de voltaje y cuatro canales de corriente simultáneamente.

Las capacidades de medición del Power Xplorer incluyen captura de transitorios de baja-media-alta frecuencia, forma de onda, duración de RMS y muestreo adaptativo de alta velocidad, así como medidas de potencia para caracterizar claramente armónicos de voltaje y corriente, sistemas no-sinusoidal y desequilibrados.

- Parámetros de medición
  - (4) entradas diferenciales, 1-600 VRMS, AC/DC, 0.1% rdg + 0.05% FS, 256 muestras/ciclo, 16 bit ADC

- (4) entradas con CTs 0.1-6000 ARMS CT-dependiente, AC/DC, 0.1%rdg + CTs, 256 muestras/ciclo, 16 bit ADC
- 1 MHz muestreo de alta velocidad, 14 bit ADC, 1% FS
- Rango frecuencia 10 MHz, Resolución 15-20 Hz, 45-65 Hz, o 350-450 Hz
  
- Disparadores de calidad de energía
  - Análisis ciclo por ciclo
  - 256 muestras/ciclo; 1/2 ciclo RMS pasos (1)
  - Parámetros armónicos
  
- Distorsión/Potencia/Energía
  - Armónicos/Interarmónicos por IEC 1000-4-7
  - THD/Espectro armónico (V, I, W) hasta 63
  - TID /Espectro interarmónico (V, I) hasta 63

### 3.3.2 DETERMINACIÓN DE LAS PRUEBAS

Se realizaron pruebas a ambas cocinas de inducción con demandas de 15 minutos, con los dos instrumentos de medida simultáneamente, y en todas las combinaciones de quemadores disponibles, usando uno, dos, tres y los cuatro quemadores. En las figuras 3.11 y 3.12 se muestra un ejemplo de medición para cada cocina.

- Haier





Figura 3.11 Ejemplo de medición, cocina Haier con un quemador

- Midea



Figura 3.12 Ejemplo de medición, cocina Midea con 4 quemadores

### 3.3.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el análisis de las corrientes armónicas, de todas las mediciones realizadas, se escogieron los valores más críticos, es decir, los valores de corriente y armónicos que más contenido armónico aportarán, para todas las combinaciones de quemadores de las cocinas y con ambos instrumentos de medida.

Los resultados se muestran en las tablas 3.1 y 3.2.

**Tabla 3.1** Armónicos cocina Haier

15 MIN		DRANETZ				FLUKE			
QUEMADOR		A	A Y B	A, B Y D	A, B, C Y D	A	A Y B	A, B Y D	A, B, C Y D
<b>CORRIENTE [A]</b>		5,7761	9,4840	13,687	15,669	5,9391	10,029	13,178	15,293
<b>[A]</b>	<b>H02</b>	0,0677	0,1794	0,0299	0,0172				
	<b>H03</b>	0,2109	0,3356	0,4064	0,4396	0,2104	0,3276	0,3743	0,4123
	<b>H04</b>	0,0336	0,0904	0,0154	0,0107				
	<b>H05</b>	0,2855	0,4448	0,6183	0,7237	0,2704	0,4324	0,5694	0,6635
	<b>H06</b>	0,0226	0,0613	0,0125	0,0125				
	<b>H07</b>	0,1472	0,2456	0,3228	0,3995	0,1352	0,2305	0,2616	0,3446
	<b>H08</b>	0,0174	0,0437	0,0095	0,0076				
	<b>H09</b>	0,0353	0,0476	0,0471	0,0541	0,0233	0,0133	0,0169	0,0192
	<b>H10</b>	0,0142	0,0357	0,0105	0,0079				
	<b>H11</b>	0,0735	0,1214	0,1736	0,2136	0,0689	0,1126	0,1382	0,194
	<b>H12</b>	0,0109	0,0299	0,0092	0,0061				
	<b>H13</b>	0,0617	0,0779	0,0974	0,1195	0,0511	0,0651	0,068	0,0774
	<b>H14</b>	0,0104	0,0257	0,0080	0,0083				
	<b>H15</b>	0,0555	0,1131	0,1531	0,1943	0,0278	0,0702	0,0943	0,1535
	<b>H16</b>	0,0090	0,0218	0,0066	0,0069				
	<b>H17</b>	0,0630	0,1293	0,2122	0,2057	0,0286	0,0716	0,1154	0,1434
	<b>H18</b>	0,0082	0,0212	0,0075	0,0072				
	<b>H19</b>	0,1438	0,2049	0,2704	0,3274	0,1188	0,1766	0,2076	0,277
	<b>H20</b>	0,0070	0,0188	0,0077	0,0100				
	<b>H21</b>	0,0475	0,0760	0,0998	0,1103	0,04	0,0568	0,0666	0,0842
	<b>H22</b>	0,0064	0,0179	0,0056	0,0064				
	<b>H23</b>	0,0591	0,0813	0,0827	0,0805	0,0367	0,0455	0,0372	0,0467
	<b>H24</b>	0,0061	0,0151	0,0086	0,0058				
	<b>H25</b>	0,0224	0,0238	0,0626	0,0483	0,0032	0,0009	0,0119	0,0101

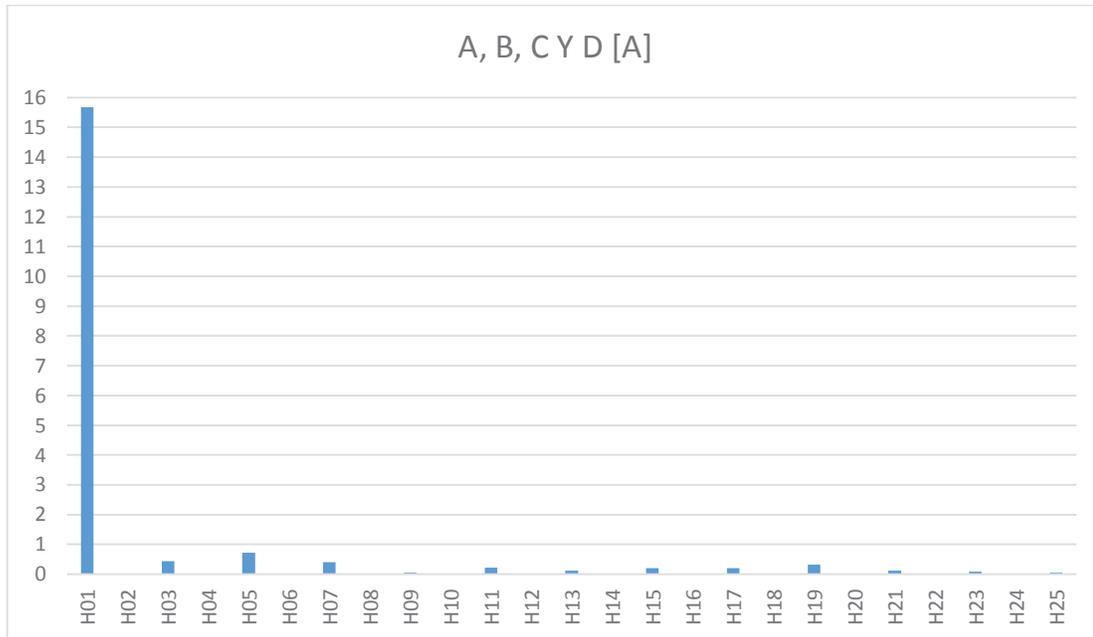


Figura 3.13 Armónicos cocina Haier a plena carga con instrumento Dranetz

Tabla 3.2 Armónicos cocina Midea

15 MIN		DRANETZ				FLUKE			
QUEMADOR		A	A y C	A, C y D	A, B, C y D	A	A y C	A, C y D	A, B, C y D
CORRIENTE [A]		3,6615	7,8032	10,120	11,534	3,9212	8,889	10,673	13,023
[A]	H02	0,0372	0,0583	0,0754	0,0734				
	H03	0,1469	0,2553	0,2599	0,2542	0,1864	0,325	0,3242	0,3356
	H04	0,0137	0,0205	0,0266	0,0250				
	H05	0,1672	0,3455	0,3334	0,3666	0,239	0,4515	0,3806	0,434
	H06	0,0111	0,0161	0,0206	0,0181				
	H07	0,1895	0,3340	0,3170	0,3318	0,2179	0,3817	0,398	0,4346
	H08	0,0083	0,0125	0,0138	0,0151				
	H09	0,0843	0,1449	0,1535	0,1729	0,127	0,1873	0,1811	0,2064
	H10	0,0085	0,0098	0,0149	0,0198				
	H11	0,1164	0,1892	0,2008	0,2224	0,1456	0,2322	0,2433	0,2876
	H12	0,0076	0,0093	0,0105	0,0143				
H13	0,0458	0,0668	0,0597	0,0574	0,0553	0,0832	0,0649	0,059	

15 MIN		DRANETZ				FLUKE			
QUEMADOR		A	A y C	A, C y D	A, B, C y D	A	A y C	A, C y D	A, B, C y D
	H14	0,0085	0,0098	0,0115	0,0107				
	H15	0,1274	0,2173	0,2045	0,1705	0,1622	0,2625	0,2524	0,2072
	H16	0,0076	0,0120	0,0094	0,0097				
	H17	0,0700	0,1889	0,1558	0,1459	0,089	0,1895	0,1657	0,1477
	H18	0,0132	0,0104	0,0131	0,0097				
	H19	0,1806	0,3143	0,2674	0,3072	0,218	0,3767	0,3339	0,4182
	H20	0,0155	0,0127	0,0147	0,0120				
	H21	0,0419	0,0800	0,0851	0,0886	0,0506	0,0902	0,0848	0,1027
	H22	0,0168	0,0174	0,0171	0,0152				
	H23	0,0882	0,1039	0,1054	0,1450	0,1091	0,1214	0,1397	0,1976
	H24	0,0106	0,0265	0,0166	0,0145				
	H25	0,0524	0,0547	0,0588	0,0548	0,0864	0,0766	0,0719	0,0524

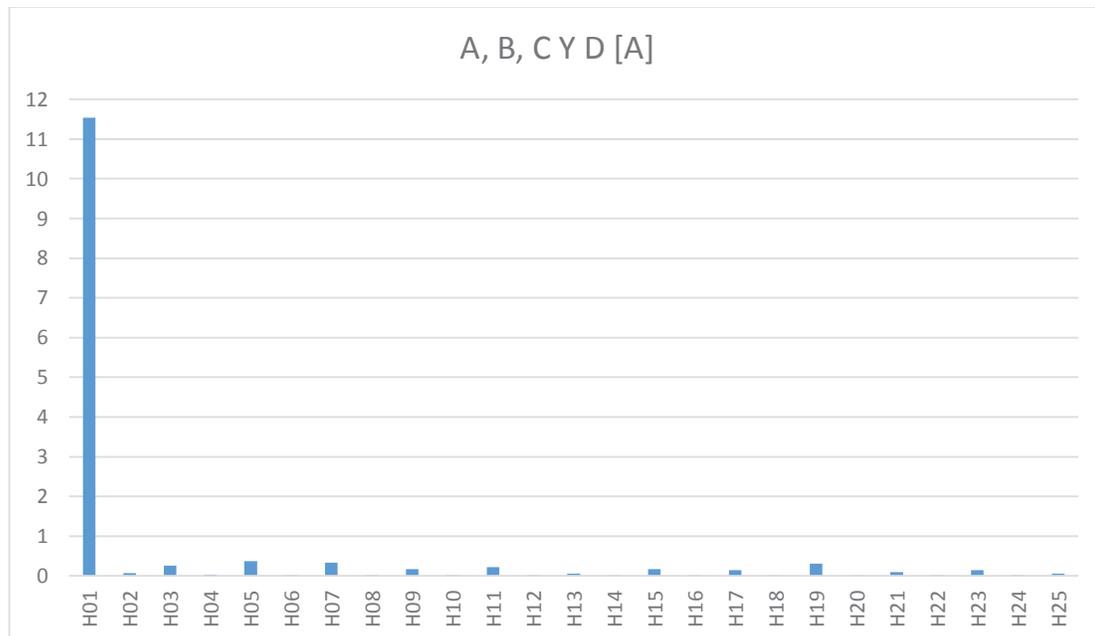


Figura 3.14 Armónicos cocina Midea a plena carga con instrumento Dranetz

En las figuras 3.13 y 3.14 se muestran el espectro de frecuencias en condición de plena carga, es decir, funcionando los 4 quemadores al mismo tiempo, ya que en

esta condición los valores tanto de armónicos como corriente de operación son más elevados que en los otros casos.

Los demás resultados de las mediciones se presentan en el Anexo Digital 1. Cabe destacar que las mediciones realizadas y mostradas en el anexo por el instrumento Fluke se presentan en porcentaje respecto de la fundamental, mientras que con el instrumento Dranetz se presentan en amperios.

De acuerdo al Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 101 “ARTEFACTOS ELECTRODOMÉSTICOS PARA COCCIÓN POR INDUCCIÓN”, en su parte 5, “Requisitos del Producto”, la distorsión armónica total (THD), no podrá superar el 5% con respecto a la fundamental para la corriente en operación normal del equipo.

Para comprobar esta disposición se utilizará la ecuación 2.6, y se analizará los resultados en cada una de las columnas de las tablas 3.1 y 3.2, es decir, en cada operación de cada quemador de cada cocina. Los resultados se muestran en las tablas 3.3 y 3.4.

**Tabla 3.3** THD<sub>i</sub> cocina Haier

15 MIN	DRANETZ				FLUKE			
QUEMADOR	A	A Y B	A, B Y D	A, B, C Y D	A	A Y B	A, B Y D	A, B, C Y D
THD <sub>i</sub> [%]	7,7293	7,6689	6,7664	6,8403	6,7817	6,3928	6,0137	6,2488

**Tabla 3.4** THD<sub>i</sub> cocina Midea

15 MIN	DRANETZ				FLUKE			
QUEMADOR	A	A Y B	A, B Y D	A, B, C Y D	A	A Y B	A, B Y D	A, B, C Y D
THD <sub>i</sub> [%]	11,492	9,6342	7,0882	6,5826	13,5766	10,228	8,055	7,3279

Los resultados indican que ninguna de las dos cocinas cumple con la disposición del INEN respecto al THD<sub>i</sub>, pero los valores son cercanos y, además, cuando se

efectúan mediciones relacionadas con armónicas en los sistemas eléctricos, es común encontrar niveles de  $THD_i$  altos en condiciones de baja carga, que no afectan la operación de los equipos, ya que la energía distorsionante que fluye es también baja. Esto se comprobará en el capítulo siguiente, cuando se usen estos valores para calcular los efectos en los transformadores.

Para la cocina Midea el  $THD_i$  es considerablemente mayor en relación a la cocina Haier, esto se da porque en la cocina Midea el selector numérico está relacionado con la temperatura, es decir, el consumo de potencia queda subordinado a la temperatura elegida, de manera que su funcionamiento es el mismo que cualquier aparato que utiliza un termostato, se enciende y se apaga intermitentemente, lo que provoca un cambio en la forma de onda mayor al de la cocina Haier que tiene un consumo continuo.

Otro parámetro a destacar es que el  $THD_i$  en la cocina Midea disminuye en cuanto más se aumenta la potencia de la cocina, es decir, a más quemadores en funcionamiento, el  $THD_i$  será menor, ya que cada quemador cuenta con su termostato, y a más quemadores encendidos la probabilidad de que los 4 se enciendan y apaguen al mismo tiempo es menor que la probabilidad de que funcionen a distintos tiempos, por lo que la forma de onda no decaerá totalmente, causando menos distorsión, y el caso de todos los quemadores funcionando es el que más se apega a la realidad, ya que se usan más quemadores que solo uno. En la cocina Haier el  $THD_i$  también disminuye mientras se aumenta la operación de los quemadores, este fenómeno que también aplica para la cocina Midea, se explicará en el capítulo 5.

Existe una pequeña diferencia en los valores de  $THD_i$  entre ambos instrumentos, y esto se debe principalmente a que los valores del analizador Dranetz PowerExplorer PX5 analizan valores de armónicos pares e impares, mientras que el Fluke 1735 solo analiza armónicos impares, y en la ecuación 2.6, que se utiliza para calcular el  $THD_i$ , se calculan con ambos valores, y a pesar de que los valores de armónicos pares son considerablemente bajos, esto establece una diferencia en los resultados finales.

### 3.4 ANÁLISIS DE LOS REGISTROS DE CARGA DE TRANSFORMADORES DE LA EMPRESA ELÉCTRICA QUITO

Las cocinas de inducción se han ido introduciendo poco a poco en nuestro país y en algunos domicilios ya se encuentra instalada y en funcionamiento. Se analizan los casos de dos transformadores, un trifásico y un monofásico, seleccionados porque ambos poseen un número relativamente alto de usuarios con cocinas de inducción ya instaladas, con referencia a lo que se observa en el sistema de distribución de la EEQ. Los transformadores fueron escogidos de acuerdo a los registros de consumos del Programa Eficiente de Cocción (PEC), escogiendo el lugar donde haya más usuarios con cocinas de inducción en sus domicilios, y a su vez, que dichos transformadores hayan pasado por el Laboratorio de Transformadores de la EEQ, ya que se necesitan los valores de impedancias y pérdidas para poder realizar los cálculos de efectos de armónicos en los transformadores, esto se analiza en el capítulo siguiente.

#### 3.4.1 EQUIPOS UTILIZADOS

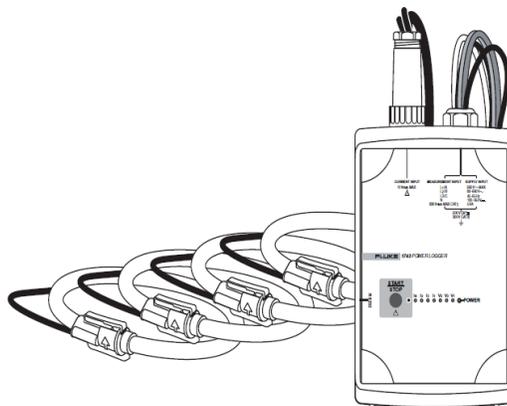


Figura 3.15 Registrador de calidad de potencia modelos 1744/1743 [14]

Para la medición de los armónicos en los transformadores, se utilizó el equipo registrador de calidad de potencia FLUKE 1744 (figura 3.15), que es un aparato de registro de la energía eléctrica.

Los parámetros a medir de este equipo son los siguientes:

- Voltaje eficaz de cada fase (media, mín, máx)
- Corriente eficaz de cada fase y neutro (media, mín, máx)
- Eventos de voltaje (caídas, subidas, interrupciones)
- Potencia (kW, kVA, kVAR, factor de potencia PF, tangente de potencia)
- Energía, energía total
- Flicker (Pst, Plt)
- THD del voltaje
- THD de la corriente
- FC de la corriente
- Armónicos de voltaje y corriente hasta el orden 50
- Interarmónicos de voltaje
- Voltaje de señalización de la red eléctrica
- Desequilibrio
- Frecuencia

Especificaciones técnicas de medida:

- Convertidor A/D: 16 bits, velocidad de muestreo: 10,24 kHz
- Filtro anti-aliasing: Filtro FIR,  $f_c = 4,9$  kHz
- Respuesta de frecuencia: Error < 1% de  $V_m$  para frecuencia de 40 a 2500 Hz
- Longitud del intervalo: 1, 3, 5, 10, 30 s, 1, 5, 10, 15, 60 minutos
- Tiempo medio para valores mínimos y máximos:  $\frac{1}{2}$ , 1 período de alimentación, 200 ms, 1, 3, 5 s
- Base de tiempos: Resolución: 10 ms (a 50 Hz), desviación: 2 s/día a 23°C; 74°F  $\pm$  2 K

### 3.4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se tomaron todas las medidas referentes a calidad de energía y se escogió el día de mayor demanda para calcular los efectos en el transformador, y para obtener los valores de armónicos de corriente se utilizará como referencia el estándar IEEE Std C57.91-1995, "IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed

Transformers”, el cual especifica que los transformadores usualmente operan en un ciclo de carga el cual se repite cada 24 horas, lo cual permite escoger solo un día para los cálculos. Para los dos transformadores se escogió el día donde se produce la mayor demanda.

Un transformador suministrando una carga fluctuante genera una pérdida fluctuante, cuyo efecto es casi el mismo que el de una carga constante intermedia para el mismo período de tiempo. Esto es debido a las características de almacenamiento de calor de los materiales en el transformador. Una carga constante que genera pérdidas totales iguales a una carga fluctuante es asumida como una carga equivalente desde el punto de vista de la temperatura. La carga equivalente para cualquier parte de un ciclo de carga diario puede expresarse por la ecuación 3.6.

$$\sqrt{\left[ \frac{L_1^2 t_1 + L_2^2 t_2 + L_3^2 t_3 + \dots + L_N^2 t_N}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_N} \right]} \quad (3.6)$$

Donde:

$L_1, L_2, \dots$  = varios pasos de carga en %, por unidad, o en los mismos kVA o corriente.

$N$  = número total de cargas consideradas

$t_1, t_2, \dots$  = respectiva duración de estas cargas [h]

La carga máxima equivalente para el ciclo de carga habitual es la carga RMS obtenida mediante la ecuación 3.6 para el período limitado sobre el cual la mayor parte del actual pico irregular parece existir. La duración estimada del pico tiene una influencia considerable sobre el valor pico RMS. Si la duración es sobre estimada, el valor RMS del pico puede ser considerablemente por debajo de la demanda del pico máximo. Para proteger contra el sobrecalentamiento debido a las breves sobrecargas más altas durante la sobrecarga del pico, el valor RMS para el período de carga pico debe no ser menos del 90% de la demanda máxima integrada de 1/2 hora.

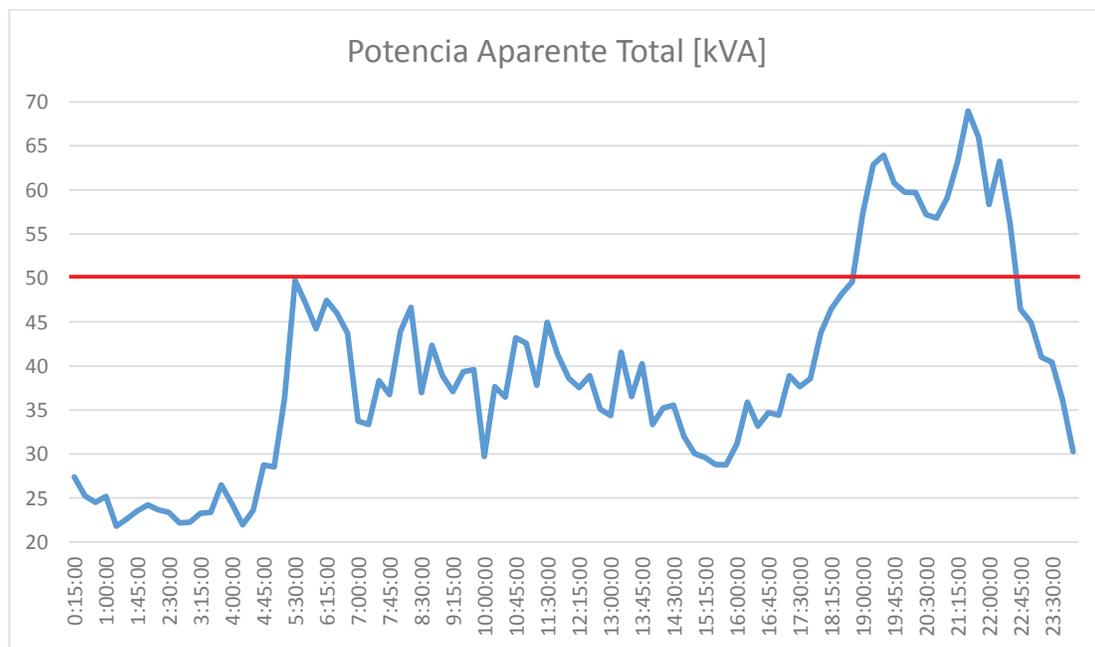
Experimentalmente se obtienen resultados muy satisfactorios teniendo en cuenta los períodos de 12 horas antes y después del pico y seleccionando el más grande

de los dos valores RMS así producido. Se sugieren intervalos de tiempo (t) de 1 h como una mayor simplificación de la ecuación, que para un período de 12 h se convierte en la ecuación 3.7.

$$0,29 \sqrt{[L_1^2 + L_2^2 + L_3^2 + \dots + L_N^2]} \quad (3.7)$$

### 3.4.2.1 Análisis de registros del transformador trifásico

Transformador trifásico DYN5, Nro. 38271, 50 kVA, ubicado en el sector Obrero Independiente, sur oriente de la ciudad de Quito, este transformador tiene 155 usuarios de los cuales 18 están inscritos en el PEC de la EEQ. Las mediciones se realizaron desde el 15 al 27 de diciembre de 2016. La gráfica de los kVA en demandas de 15 minutos, para el día de mayor demanda, que fue el 19 de diciembre, se muestra en la figura 3.16.



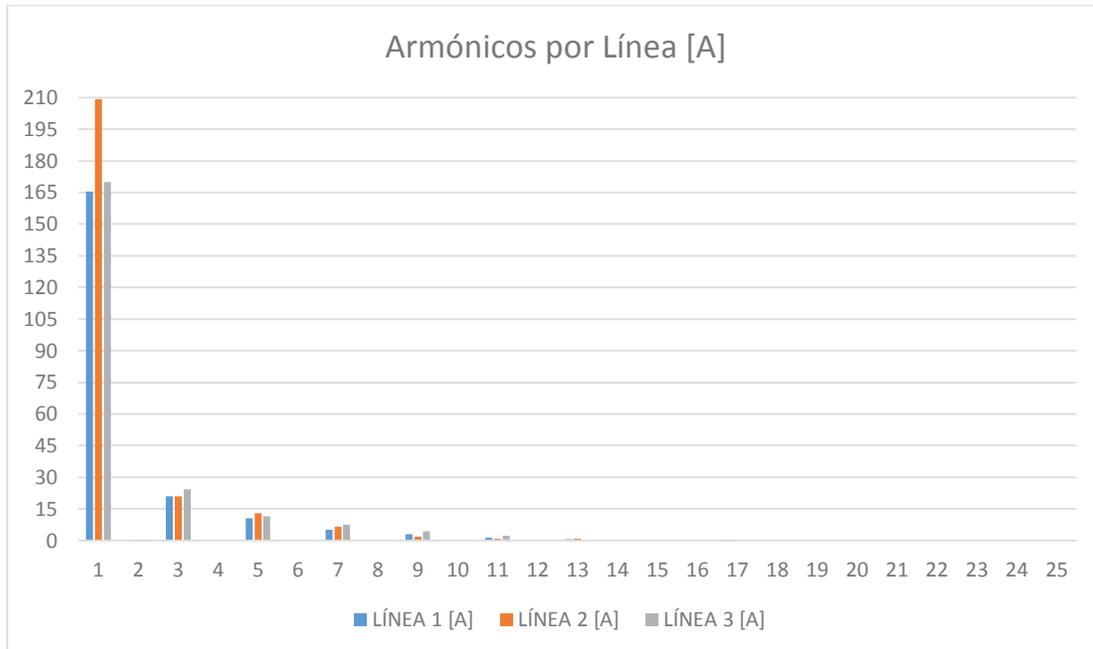
**Figura 3.16** Curva de demanda transformador trifásico

Este transformador presenta sobrecarga en el intervalo de 19h00 a 22h30, ya que su capacidad es de 50 kVA (línea roja en la figura 3.16), y en este intervalo sobrepasa esa magnitud. Se observa que el pico de demanda se da entre las

21:15 y las 21:45, y utilizando la ecuación 3.6 se obtiene los valores de corriente para cada una de las líneas, que se muestran en la tabla 3.5. El espectro de frecuencias se muestra en la figura 3.17.

**Tabla 3.5** Armónicos de corriente en el pico de demanda del transformador trifásico

<b>h</b>	<b>LÍNEA 1 [A]</b>	<b>LÍNEA 2 [A]</b>	<b>LÍNEA 3 [A]</b>
1	165,39	209,24	169,85
2	0,1723	0,3903	0,4751
3	21,067	20,857	24,315
4	0	0	0,049
5	10,641	12,839	11,47
6	0	0	0
7	5,0217	6,5558	7,3822
8	0	0	0
9	2,8843	1,7644	4,301
10	0	0	0
11	1,3457	0,8047	2,2551
12	0	0	0
13	0,6592	0,93	0,2564
14	0	0	0
15	0,1329	0	0
16	0	0	0
17	0,4427	0,0346	0
18	0	0	0
19	0,1962	0,0827	0
20	0	0	0
21	0,2119	0	0
22	0	0	0
23	0	0	0
24	0	0	0
25	0	0	0



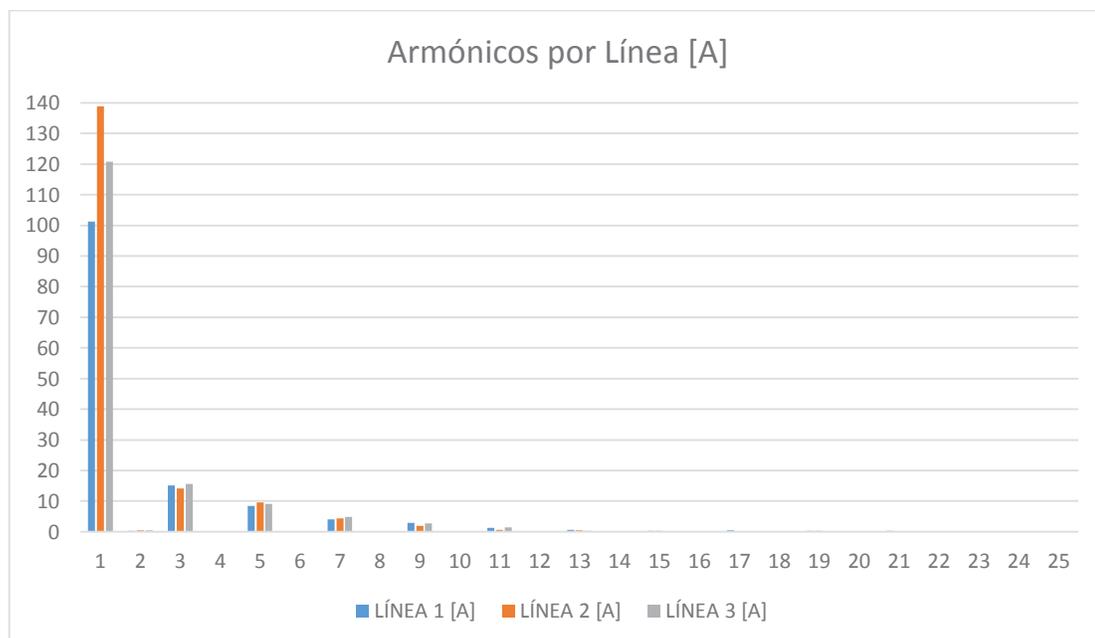
**Figura 3.17** Armónicos por línea en el pico de demanda del transformador trifásico

Usando la ecuación 3.7 se obtienen los valores para la carga, 12 horas antes y 12 horas después del pico. Ya que los valores de los registros de carga son demandas de 15 minutos, una conversión a intervalos de una hora fue necesaria para la correcta aplicación de la ecuación 3.7. Los valores de 12 horas antes se muestran en la tabla 3.6 y el espectro de frecuencias se muestra en la figura 3.18 y para los valores de 12 horas después se tiene la tabla 3.7 y la figura 3.19.

**Tabla 3.6** Armónicos de corriente 12 horas antes del pico de demanda del transformador trifásico

h	LÍNEA 1 [A]	LÍNEA 2 [A]	LÍNEA 3 [A]
1	101,3	138,8	120,83
2	0,2494	0,4576	0,4957
3	15,11	14,077	15,634
4	0,0204	0,0355	0,0669
5	8,4340	9,5236	9,0986
6	0,0094	0	0,0044
7	4,0219	4,3794	4,8248
8	0,0044	0	0

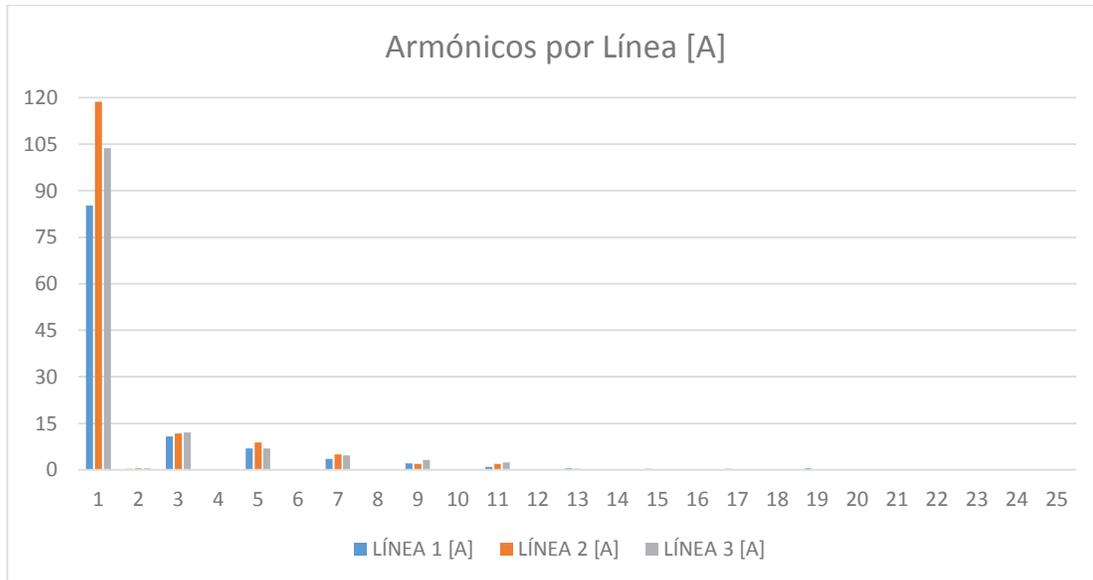
h	LÍNEA 1 [A]	LÍNEA 2 [A]	LÍNEA 3 [A]
9	2,9426	1,8720	2,6728
10	0	0	0
11	1,1973	0,6186	1,4058
12	0	0	0
13	0,5340	0,4807	0,3451
14	0	0	0
15	0,3488	0,2103	0,0645
16	0	0	0
17	0,3750	0,0506	0,1470
18	0	0	0
19	0,3561	0,2701	0,0720
20	0	0	0
21	0,2356	0,0443	0,0840
22	0	0	0
23	0,1062	0	0,0190
24	0	0	0
25	0,0312	0	0



**Figura 3.18** Armónicos por línea antes del pico de demanda del transformador trifásico

**Tabla 3.7** Armónicos de corriente 12 horas después del pico de demanda del transformador trifásico

<b>h</b>	<b>LÍNEA 1 [A]</b>	<b>LÍNEA 2 [A]</b>	<b>LÍNEA 3 [A]</b>
1	85,191	118,62	103,64
2	0,2337	0,3941	0,4856
3	10,753	11,732	12,094
4	0,0401	0,038	0,1078
5	6,8627	8,7544	6,8625
6	0,0097	0	0
7	3,5642	4,9464	4,6975
8	0,0044	0	0,0087
9	2,1104	1,9451	3,1356
10	0	0	0
11	0,9033	1,8569	2,3134
12	0	0	0
13	0,4221	0,3435	0,1293
14	0	0	0
15	0,3112	0,1342	0,1204
16	0	0	0
17	0,2843	0,0226	0,0871
18	0	0	0
19	0,3901	0,1676	0,0878
20	0	0	0
21	0,1716	0,0179	0,0616
22	0	0	0
23	0,1041	0,0044	0,0087
24	0	0	0
25	0,0421	0	0



**Figura 3.19** Armónicos por línea después del pico de demanda del transformador trifásico

Utilizando nuevamente la ecuación 2.6, se obtendrá el  $THD_I$  para compararlo con los obtenidos en las tablas 3.3 y 3.4, y como se explicó anteriormente, de los valores de antes y después del pico de demanda se debe escoger el mayor valor RMS, que en este caso es el de antes del pico de demanda, por lo que se trabajará con los valores de la tabla 3.5 y 3.6.

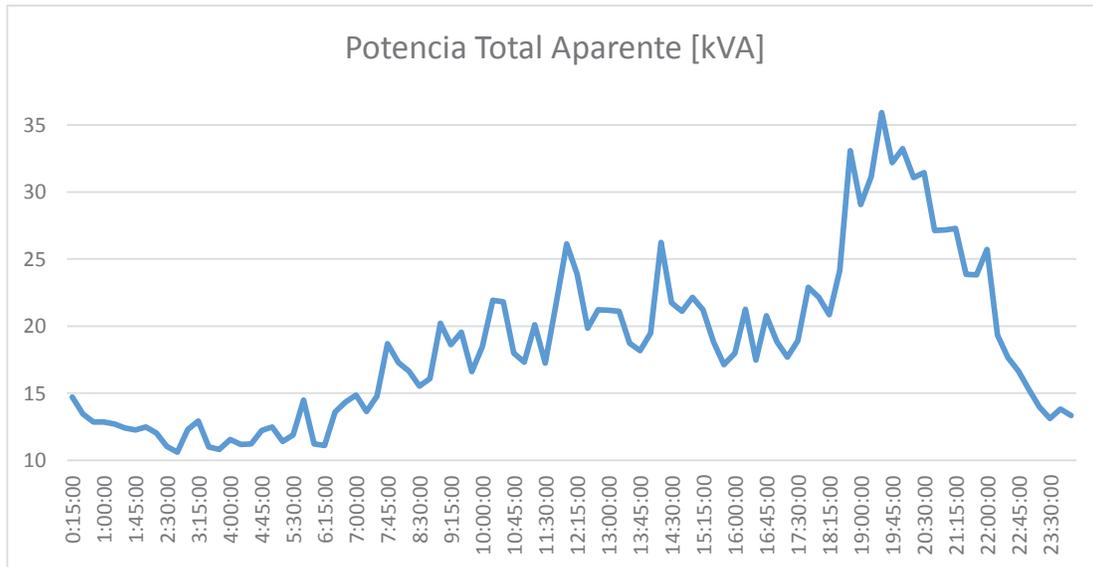
Para el caso de la tabla 3.5 el valor del  $THD_I$  total es 14,518%, y para la tabla 3.6 es de 15,426%. Como se vio en los valores de las tablas 3.3 y 3.4, ninguno sobrepasa estas cantidades, son mucho más bajos, lo que quiere decir que las cocinas no aportan tanto contenido armónico como lo hacen los demás equipos electrónicos existentes en los hogares de los usuarios del transformador, como televisores, equipos de sonido y otros de la electrónica de consumo masivo.

Todos los parámetros que resultan de la medición del perfil de carga de este transformador, se presentan en el Anexo Digital 2.

### 3.4.2.2 Análisis de registros del transformador monofásico

Transformador monofásico Nro. 36785, 50 kVA, ubicado en el sector Santa Anita de Legarda, sur de la ciudad de Quito, tiene 70 usuarios de los cuales 16 están

inscritos en sistema PEC de la EEQ. Las mediciones se realizaron del 20 al 27 de diciembre de 2016. La gráfica de los kVA en demandas de 15 minutos, para el día de mayor demanda, que fue el 26 de diciembre, se muestran en la figura 3.20.



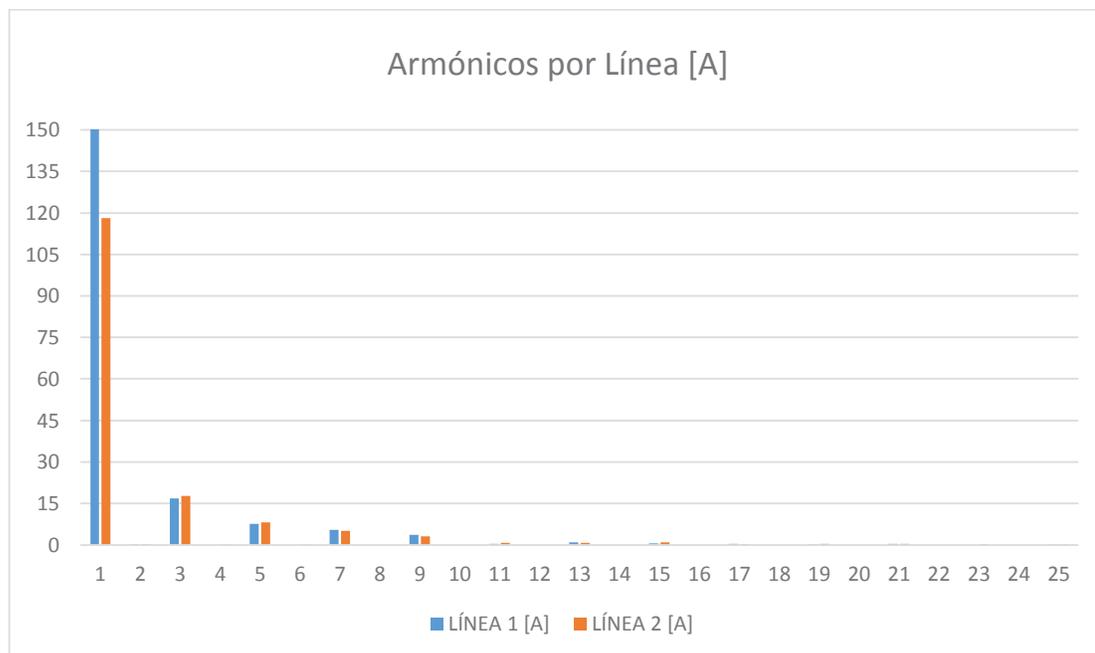
**Figura 3.20** Curva de demanda transformador monofásico

El pico de demanda se da entre las 19:15 y las 19:45. Con la ecuación 3.6 se obtiene los valores de corriente para cada una de las líneas, que se muestran en la tabla 3.8, y en la figura 3.21.

**Tabla 3.8** Armónicos de corriente en el pico de demanda del transformador monofásico

h	LÍNEA 1 [A]	LÍNEA 2 [A]
1	150,1	118,15
2	0,1911	0,3422
3	16,903	17,714
4	0	0,115
5	7,6888	8,2588
6	0	0,0346
7	5,5054	5,0484
8	0	0

h	LÍNEA 1 [A]	LÍNEA 2 [A]
9	3,6142	3,1504
10	0	0
11	0,3894	0,7806
12	0	0
13	0,9273	0,76
14	0	0
15	0,6706	1,0533
16	0	0
17	0,3611	0,3071
18	0	0
19	0,1962	0,4523
20	0	0
21	0,4549	0,4523
22	0	0
23	0	0,2317
24	0	0
25	0,06	0,1374

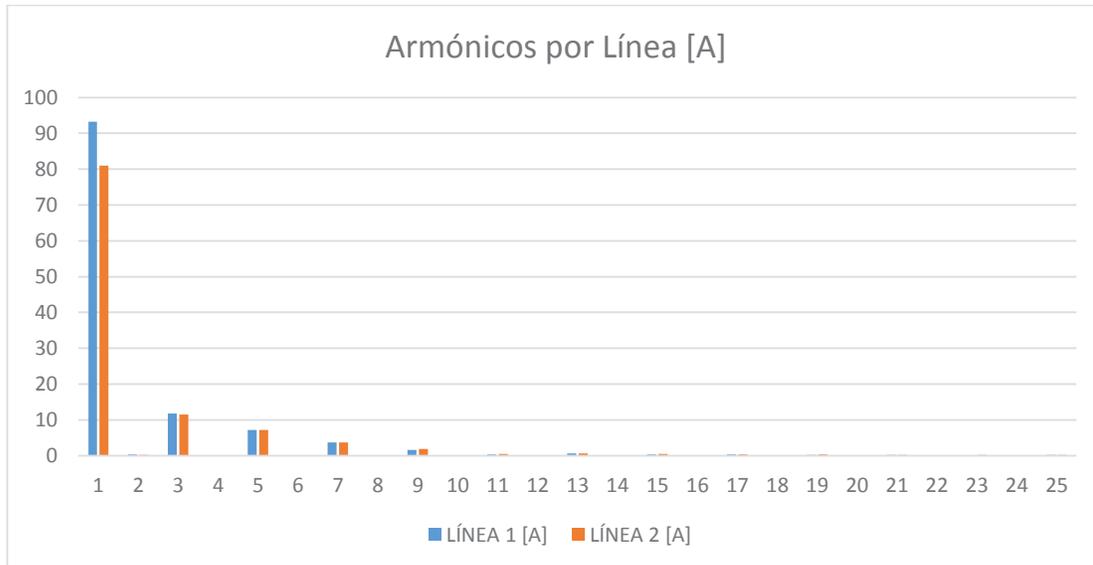


**Figura 3.21** Armónicos por línea en el pico de demanda del transformador monofásico

Usando la ecuación 3.7 se obtiene los valores para la carga 12 horas antes y 12 horas después del pico de demanda, los cuales se muestran en la tabla 3.9 y 3.10, y en las figuras 3.22 y 3.23.

**Tabla 3.9** Armónicos de corriente 12 horas antes del pico de demanda del transformador monofásico

<b>h</b>	<b>LÍNEA 1 [A]</b>	<b>LÍNEA 2 [A]</b>
<b>1</b>	93,319	80,991
<b>2</b>	0,3507	0,2505
<b>3</b>	11,74	11,502
<b>4</b>	0,1129	0,0561
<b>5</b>	7,1448	7,1486
<b>6</b>	0,0348	0,0097
<b>7</b>	3,6778	3,6792
<b>8</b>	0	0
<b>9</b>	1,6759	1,8456
<b>10</b>	0	0
<b>11</b>	0,3060	0,4816
<b>12</b>	0	0
<b>13</b>	0,5760	0,6369
<b>14</b>	0	0
<b>15</b>	0,4014	0,5504
<b>16</b>	0	0
<b>17</b>	0,3399	0,3767
<b>18</b>	0	0
<b>19</b>	0,2708	0,3347
<b>20</b>	0	0
<b>21</b>	0,2542	0,2747
<b>22</b>	0	0
<b>23</b>	0,1227	0,178
<b>24</b>	0	0
<b>25</b>	0,1639	0,1817

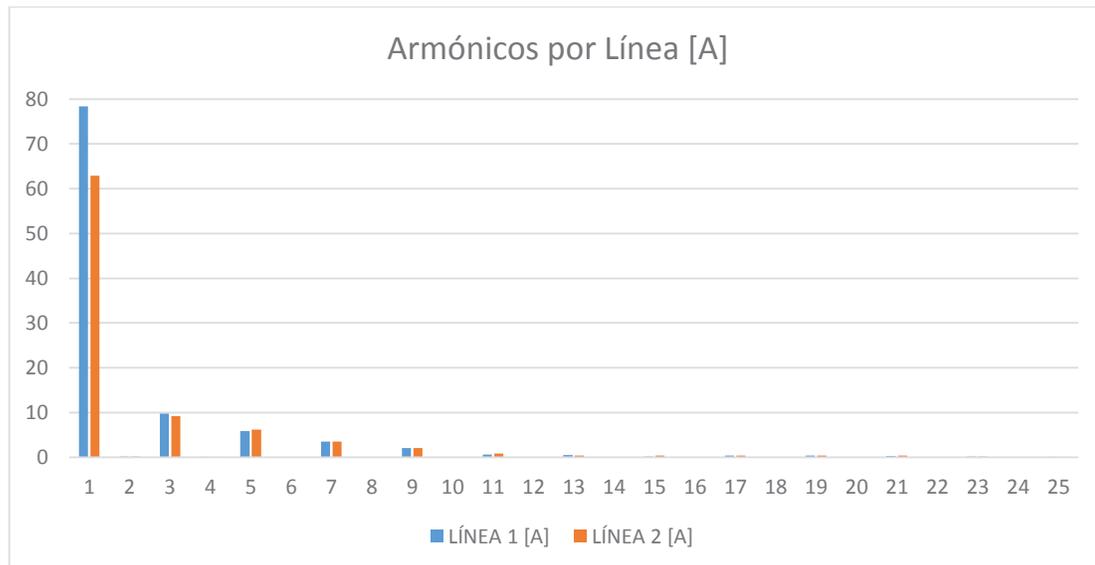


**Figura 3.22** Armónicos por línea antes del pico de demanda del transformador monofásico

**Tabla 3.10** Armónicos de corriente 12 horas después del pico de demanda transformador monofásico

h	LÍNEA 1 [A]	LÍNEA 2 [A]
1	78,4373	62,9306
2	0,1483	0,1767
3	9,7844	9,2394
4	0,0107	0,0311
5	5,8126	6,1445
6	0,0000	0,0000
7	3,5092	3,5363
8	0,0000	0,0000
9	2,0105	2,0597
10	0,0000	0,0000
11	0,6351	0,8526
12	0,0000	0,0000
13	0,5069	0,4094
14	0,0000	0,0000
15	0,2165	0,3546
16	0,0000	0,0000

h	LÍNEA 1 [A]	LÍNEA 2 [A]
17	0,3695	0,4133
18	0,0000	0,0000
19	0,3914	0,4335
20	0,0000	0,0000
21	0,3178	0,3442
22	0,0000	0,0000
23	0,1533	0,1766
24	0,0000	0,0000
25	0,0798	0,0911



**Figura 3.23** Armónicos por línea después del pico de demanda del transformador monofásico

Al igual que en el transformador trifásico, se usarán las tablas de antes y durante el pico de demanda para el cálculo del  $THD_i$ . Para el caso de la tabla 3.8 el valor del  $THD_i$  total es 15,256%, y para la tabla 3.9 es de 16,463%, llegando a la misma conclusión que en el transformador trifásico, que las cocinas de inducción no aportan tanto contenido armónico como lo hacen los demás equipos electrónicos existentes en los hogares de los usuarios del transformador.

Todos los parámetros que resultan de la medición del perfil de carga de este transformador se presentan en el Anexo Digital 3.

## **CAPÍTULO 4: INFLUENCIA DE LAS CORRIENTES ARMÓNICAS SEGÚN LA CONEXIÓN DEL TRANSFORMADOR**

### **4.1 INTRODUCCIÓN**

Como se vio en la sección 2.1.5.1, los efectos de las corrientes armónicas en el transformador se traducen en aumento de las pérdidas en el transformador y en caso de transformadores llenos de líquido, en aumento de la temperatura superior del aceite. Todo esto en conjunto disminuye la vida útil del transformador. Las pérdidas en el transformador se subdividen en pérdidas sin carga y pérdidas con carga. Las pérdidas sin carga se obtienen de la prueba de vacío del transformador. Las pérdidas con carga se obtienen de la prueba de corto circuito del transformador, y éstas a su vez se subdividen en pérdidas por efecto Joule, Foucault y otras pérdidas parásitas. En este capítulo, se describirá el procedimiento para calcular estas pérdidas, al igual que la temperatura superior del aceite.

Para el cálculo de las pérdidas y el aumento de la temperatura superior del aceite se usa como referencia los estándares mencionados en la sección 2.5.1, IEEE Std C57.12.90-2006 e IEEE Std C57.12.91-2001 y además el estándar IEEE Std C57.110.1998 “IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents”.

Los ejemplos citados más adelante son de los transformadores descritos en la sección 3.4.2.1 y 3.4.2.2, para el primer caso, el transformador trifásico presenta una conexión como la referida en la sección 2.2.2.1.2 (DYN5), ya que como dice la teoría descrita, este tipo de conexión se usa mayoritariamente en los sistemas de distribución, y es la conexión más usada en los transformadores trifásicos de la EEQ, para el segundo caso se trata de un transformador monofásico, ya que los transformadores monofásicos también son de gran presencia en las redes residenciales. También se necesitarán los registros de armónicos

correspondientes a cada transformador, así como los datos de placa de los mismos.

## **4.2 CONEXIONES DEL TRANSFORMADOR**

Las conexiones de los bobinados del transformador permiten la reducción del flujo de corrientes armónicas provenientes de cargas monofásicas no lineales, en especial armónicos triples, hacia aguas arriba del transformador, pero a consecuencia de esto, los transformadores asumen los efectos relacionados a estos armónicos, ya que los armónicos se quedan atrapados en el transformador en ciertas conexiones.

El proceso descrito más adelante sirve para cualquier tipo de conexión de transformador trifásico, así como para un transformador monofásico, ya que las mediciones obtenidas reflejarían el contenido armónico que el transformador asumiría independientemente de la conexión.

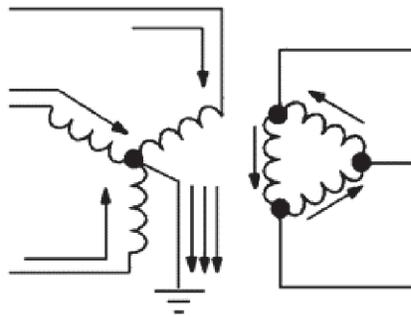
### **4.2.1 TRANSFORMADOR TRIFÁSICO**

Para transformadores trifásicos, los armónicos triples o de secuencia cero ( $3^\circ$ ,  $9^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $21^\circ$ , etc.), fluyen por el neutro de la instalación en sistemas con configuración en Y con neutro, ocasionando problemas típicos de sobrecalentamiento del neutro e interferencias en líneas telefónicas cercanas. La corriente del neutro no contiene fundamental, en un sistema balanceado, por lo que la componente de corriente del tercer armónico en el neutro es 3 veces la corriente del tercer armónico en cualquiera de las fases. Los terceros armónicos de las tres fases coinciden naturalmente en fase y tiempo en el neutro.

#### **4.2.1.1 Conexión Y – $\Delta$**

Los armónicos triples de corriente al estar en fase se suman en el neutro en el lado de alto voltaje. El bobinado delta, en bajo voltaje, provee baja impedancia de secuencia cero facilitando la circulación de los terceros armónicos por las ramas

de los bobinados y permanecen atrapados en el mismo, como se muestra en la figura 4.1.



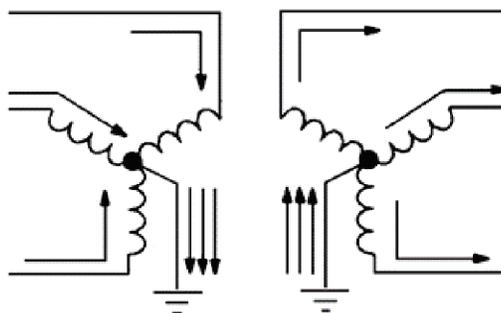
**Figura 4.1** Armónicos en conexión Y – Δ (15)

#### 4.2.1.2 Conexión Δ – Y

Es la conexión utilizada en los sistemas de distribución con bobinado delta conectado al lado de alto voltaje y bobinado Y al de bajo voltaje. Los armónicos triples están relegados a circular exclusivamente desde la carga hacia el transformador, no polucionando aguas arriba del punto conexión del transformador, ya que sucede lo mismo que en la conexión Y – Δ, las corrientes armónicas se quedan atrapadas en la delta, ocasionando el calentamiento del transformador debido a la circulación de estas corrientes.

#### 4.2.1.3 Conexión Y - Y

Para la conexión Y – Y a tierra en ambos lados (figura 4.2), los armónicos terceros balanceados podrán circular desde el bajo voltaje del sistema al de alto voltaje y estarán en igual proporción en ambos niveles de voltaje.



**Figura 4.2** Armónicos en conexión Y – Y [15]

#### 4.2.1.4 Conexión $\Delta - \Delta$

Esta conexión presenta los mismos problemas que se tiene en las conexiones Y –  $\Delta$  o  $\Delta - Y$ , los terceros armónicos quedan atrapados en las deltas.

### 4.3 PÉRDIDAS

#### 4.3.1 PÉRDIDAS POR EFECTO JOULE

Las pérdidas  $I^2R$  están determinadas por el valor de la corriente, si el valor RMS de la corriente de carga se incrementa debido a componentes armónicos, de igual manera lo harán las pérdidas. Para corrientes de carga no sinusoidales, el valor de la corriente RMS será:

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2} \quad (4.1)$$

Donde:

$I$  = corriente de carga RMS [A]

$h_{max}$  = número del armónico significativo más alto ( $h_{max} = 25$ )

#### 4.3.2 PÉRDIDAS POR CORRIENTES DE FOUCAULT EN CONDICIONES NOMINALES

Este tipo de pérdida, en el espectro de frecuencia de potencia, tiende a ser proporcional al cuadrado de la corriente de carga y el cuadrado de la frecuencia, esta característica puede causar pérdidas excesivas en los devanados y por lo tanto un aumento anormal de la temperatura en los devanados del transformador. Dada cualquier corriente de carga no sinusoidal definida bajo condiciones nominales, estas pérdidas pueden expresarse como:

$$P_{EC} = P_{EC-R} \sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_R}\right)^2 h^2 \quad (4.2)$$

Donde:

$P_{EC-R}$  = pérdidas por corrientes de Foucault bajo condiciones nominales [W]

$I_R$  = corriente RMS fundamental bajo frecuencia y condiciones de carga nominales [A]

### 4.3.3 PÉRDIDAS POR CORRIENTES DE FOUCAULT EN CONDICIONES MEDIDAS

La ecuación 4.2 asume que las corrientes medidas de cualquier aplicación son tomadas a las corrientes nominales del transformador. Dado que esto rara vez se encuentra en el campo, es necesario un nuevo término para describir las pérdidas de Foucault a corrientes medidas y la frecuencia de la red  $P_{EC-O}$ . La ecuación 4.2 puede escribirse de una forma más general de la siguiente manera:

$$P_{EC} = P_{EC-O} \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2} \quad (4.3)$$

Donde:

$P_{EC-O}$  = pérdidas de corrientes de Foucault a corriente medida y frecuencia de la red [W]

#### 4.3.3.1 Factor armónico de pérdidas para corrientes de Foucault

Es conveniente definir un número único que se puede usar para determinar las capacidades de un transformador en el suministro de potencia a una carga.  $F_{HL}$  es un factor de proporcionalidad que se aplica a las pérdidas Foucault, lo que representa el calentamiento eficaz RMS como resultado de los armónicos de la corriente de carga.  $F_{HL}$  es la relación entre el total de pérdidas por corrientes de Foucault debido a los armónicos ( $P_{EC}$ ), con las pérdidas por corrientes de Foucault a la frecuencia de red, como si no existieran corrientes armónicas ( $P_{EC-O}$ ). Esta definición en forma de ecuación es:

$$F_{HL} = \frac{P_{EC}}{P_{EC-O}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2} \quad (4.4)$$

Donde:

$F_{HL}$  = factor armónico de pérdidas para corrientes de Foucault

Algunos instrumentos de medida permiten cálculos en términos de armónicos normalizados hacia el total de la corriente RMS o el primer armónico fundamental, la ecuación 4.4 se puede adaptar a estas situaciones dividiendo el numerador y denominador por  $I_1$ , la corriente armónica fundamental, o por  $I$ , la corriente RMS total, quedando de la siguiente manera:

$$F_{HL} = \frac{P_{EC}}{P_{EC-O}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (4.5)$$

Donde:

$I_1$  = corriente fundamental RMS de carga [A]

$$F_{HL} = \frac{P_{EC}}{P_{EC-O}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I}\right)^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I}\right)^2} \quad (4.6)$$

#### 4.3.4 OTRAS PÉRDIDAS PARÁSITAS

Aunque el calentamiento debido a otras pérdidas parásitas generalmente no es una consideración para transformadores de tipo seco, puede tener un efecto importante en transformadores llenos de líquido. Las pérdidas debido a las conexiones de barra, partes estructurales, tanque, etc., son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga y la frecuencia armónica al 0,8 de la potencia:

$$P_{OSL} = P_{OSL-R} \sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_R}\right)^2 h^{0,8} \quad (4.7)$$

Donde:

$P_{OSL-R}$  = otras pérdidas parásitas bajo condiciones nominales [W]

#### 4.3.4.1 Factor armónico de otras pérdidas parásitas

Las ecuaciones correspondientes a este factor, normalizadas a la corriente fundamental y la corriente RMS respectivamente son:

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^{0,8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (4.8)$$

Donde:

$F_{HL-STR}$  = factor armónico de otras pérdidas parásitas

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I}\right)^2 h^{0,8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I}\right)^2} \quad (4.9)$$

### 4.4 TEMPERATURA SUPERIOR DEL ACEITE

Para transformadores con modo de auto enfriamiento ONAN, la temperatura superior del aceite es proporcional al total de pérdidas elevado al exponente 0,8 y puede ser estimada para las pérdidas armónicas, basado en las pérdidas nominales y las pérdidas que se muestran a continuación:

$$\theta_{TO} = \theta_{TO-R} \left( \frac{P_{LL} + P_{NL}}{P_{LL-R} + P_{NL}} \right)^{0,8} \quad (4.10)$$

Donde:

$\theta_{TO}$  = temperatura superior del aceite sobre la temperatura ambiente en condiciones medidas [°C]

$\theta_{TO-R}$  = temperatura superior del aceite sobre la temperatura ambiente bajo condiciones nominales [°C]

$\theta_{TO-R}$  = 65°C según el estándar IEEE Std C57.91-1995

$P_{LL-R}$  = pérdidas de carga bajo condiciones nominales [W]

Y, además:

$$P_{LL} = P + F_{HL} \times P_{EC} + F_{HL-STR} \times P_{OSL} \quad (4.11)$$

El aumento de temperatura en el devanado del punto más caliente del conductor, también proporcional a las pérdidas de carga elevado al exponente 0,8 y se puede calcular como se indica:

$$\theta_g = \theta_{g-R} \left( \frac{I_2^2 R + F_{HL} \times P_{EC} \times 2,4}{I_{2-R}^2 R + P_{EC-R} \times 2,4} \right)^{0,8} \quad (4.12)$$

Donde:

$\theta_g$  = temperatura del punto más caliente sobre la temperatura superior del aceite [°C]

$\theta_{g-R}$  = temperatura del punto más caliente sobre la temperatura superior del aceite bajo condiciones nominales [°C]

$$\theta_{g-R} = \theta_{g1-R} - \theta_{TO-R}$$

$\theta_{g1-R}$  = 80°C según el estándar IEEE Std C57.91-1995

## 4.5 TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

### 4.5.1 CÁLCULO DE PÉRDIDAS A CONDICIONES NOMINALES

#### 4.5.1.1 Cálculo de impedancias

En transformadores trifásicos, tres conjuntos de mediciones de impedancias son realizadas entre pares de devanados, en el lado de alto voltaje. Para obtener las impedancias de los tres devanados, se aplica las siguientes ecuaciones:

$$Z_1 = \frac{Z_{12} - Z_{23} + Z_{31}}{2} \quad (4.13)$$

$$Z_2 = \frac{Z_{23} - Z_{31} + Z_{12}}{2} = Z_{12} - Z_1 \quad (4.14)$$

$$Z_3 = \frac{Z_{31} - Z_{12} + Z_{23}}{2} = Z_{31} - Z_1 \quad (4.15)$$

donde  $Z_{12}$ ,  $Z_{23}$  y  $Z_{31}$  son las impedancias medidas entre pares de devanados.

Los reportes de pruebas para transformadores trifásicos muestran a las resistencias de las tres fases en serie. Los valores de  $R_1$  y  $R_2$  se calculan de la siguiente manera:

- Bobinado delta:  $R_1 = \frac{2}{9}$  de la resistencia de la suma de las tres fases (4.16)

- Bobinado Y:  $R_2 = \frac{2}{3}$  de la resistencia de la suma de las tres fases (4.17)

donde  $R_1$  es la resistencia equivalente de alto voltaje en  $[\Omega]$  y  $R_2$  es la resistencia equivalente de bajo voltaje en  $[\Omega]$ .

#### 4.5.1.2 Cálculo de corrientes

En transformadores trifásicos, los valores de corrientes nominales se calculan de los kVA y voltajes nominales, utilizando las siguientes expresiones:

$$I_{1-R} = \frac{S}{\sqrt{3}V_{AV}} \quad (4.18)$$

$$I_{2-R} = \frac{S}{\sqrt{3}V_{BV}} \quad (4.19)$$

Donde:

$I_{1-R}$  = corriente de línea fundamental RMS de alto voltaje bajo frecuencia y condiciones de carga nominales [A]

$S$  = potencia aparente nominal del transformador [kVA]

$V_{AV}$  = alto voltaje nominal del transformador [V]

$I_{2-R}$  = corriente de línea fundamental RMS de bajo voltaje bajo frecuencia y condiciones de carga nominales [A]

$V_{BV}$  = bajo voltaje nominal del transformador [V]

#### 4.5.1.3 Cálculo de pérdidas

El componente de pérdidas parásitas se calcula restando las pérdidas  $I^2R$  del transformador de las pérdidas de carga medida. Entonces:

$$P_{TSLR} = P_{LL-R} - K \times [(I_{1-R})^2 \times R_1 + (I_{2-R})^2 \times R_2] \quad (4.20)$$

Donde:

$P_{TSLR}$  = total de pérdidas parásitas bajo condiciones nominales [W]

$K = 1$  para transformadores monofásicos

= 1,5 para transformadores trifásicos

Parte de las pérdidas parásitas es tomada para las pérdidas de corrientes de Foucault. Para transformadores de tipo seco, las pérdidas del bobinado por corrientes de Foucault se asumen que son:

$$P_{EC-R} = P_{TSL-R} \times 0,67 \quad (4.21)$$

Para transformadores rellenos de aceite, las pérdidas Foucault se asumen que son:

$$P_{EC-R} = P_{TSL-R} \times 0,33 \quad (4.22)$$

Entonces, las otras pérdidas parásitas se calculan como:

$$P_{OSL-R} = P_{TSL-R} - P_{EC-R} \quad (4.23)$$

Para transformadores de tipo seco las otras pérdidas parásitas  $P_{OSL-R}$  son iguales a cero, ya que por definición no hay otra pérdida parásita en los devanados.

#### 4.5.1.4 Corrección de temperatura para pérdidas de carga

Ambas pérdidas, las  $I^2R$  y las pérdidas parásitas en un transformador varían con la temperatura. El componente  $I^2R$  de las pérdidas de carga se incrementa con la temperatura. El componente de las pérdidas parásitas disminuye con la

temperatura. Por lo tanto, cuando se desea convertir las pérdidas de carga desde la temperatura que fueron realizadas ( $T_m$ ), a otra temperatura ( $T$ ), las dos componentes de pérdidas se separan correctamente, dando a:

$$P_r(T) = P_r(T_m) \left( \frac{T_K + T}{T_m + T_K} \right) \quad (4.24)$$

$$P_s(T) = P_s(T_m) \left( \frac{T_K + T_m}{T + T_K} \right) \quad (4.25)$$

Luego:

$$P(T) = P_r(T) + P_s(T) \quad (4.26)$$

Donde:

$P_r(T_m)$  = pérdidas  $I^2R$  calculadas a la temperatura  $T_m$  [W]

$P_s(T_m)$  = pérdidas parásitas calculadas a la temperatura  $T_m$  [W]

$P_r(T)$  = pérdidas  $I^2R$  a la temperatura  $T$  [W]

$P_s(T)$  = pérdidas parásitas a la temperatura  $T$  [W]

$P(T)$  = pérdidas de carga del transformador corregidas a la temperatura  $T$  [W]

#### 4.5.1.5 Conversión de mediciones de resistencia

Puede ser necesario convertir las medidas de resistencia a la temperatura a la cual las mediciones para pérdidas fueron realizadas. Las conversiones se realizan con la siguiente expresión:

$$R_s = R_m \left( \frac{T + T_K}{T_m + T_K} \right) \quad (4.27)$$

Donde:

$R_s$  = resistencia a la temperatura deseada  $T$  [ $\Omega$ ]

$R_m$  = resistencia medida [ $\Omega$ ]

$T$  = temperatura deseada [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_K$  = 234,5 para cobre o 225 para aluminio [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_m$  = temperatura medida [ $^{\circ}\text{C}$ ]

#### 4.5.1.6 Temperatura de medición

En el estándar IEEE Std C57.91-1995, se habla acerca de la temperatura ambiente y su incidencia en la carga. La temperatura ambiente es un factor importante para determinar la capacidad de carga de un transformador, ya que la temperatura que aumenta para cualquier carga debe ser añadida a la temperatura ambiente para determinar las temperaturas de funcionamiento. Las clasificaciones del transformador se basan en un promedio de 24 horas a temperatura ambiente de 30°C. Siempre que se pueda medir la temperatura ambiente real, tales ambientes deben promediarse en 24 horas, y luego utilizarse para determinar la temperatura del transformador y la capacidad de carga. La temperatura del aire ambiente vista por un transformador es el aire en contacto con sus radiadores o intercambiadores de calor. En algunas instalaciones, el transformador puede estar al aire libre pero rodeado por edificios o paredes amortiguadoras. Esto puede resultar en la recirculación del aire, y el ambiente debe ser ajustado en consecuencia.

A menudo es necesario predecir la carga que un transformador puede transportar con seguridad en algún momento futuro en un ambiente desconocido. La temperatura ambiente probable para cualquier mes puede ser aproximada a partir de los datos en los informes preparados por la autoridad nacional o local de la atmósfera para las secciones del país donde se encuentra el transformador.

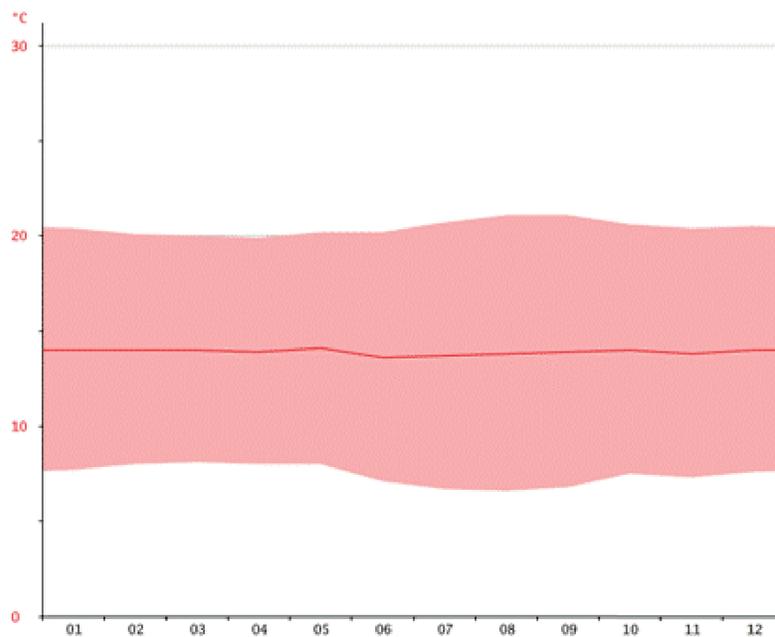
- a) Temperatura media. Utilice la temperatura diaria promedio para el mes involucrado, promediado durante varios años.
- b) Temperatura máxima diaria. Utilice el promedio de las temperaturas máximas diarias para el mes involucrado en promedio durante varios años.

Estos ambientes deben utilizarse de la siguiente manera:

- Para cargas con una expectativa de vida normal, usar la opción a), la temperatura promedio como el ambiente para el mes involucrado.

- Para cargas cortas con sacrificio moderado de la esperanza de vida, utilice b), la temperatura máxima diaria para el mes involucrado.

Durante un día cualquiera, el promedio de 24 horas de temperatura puede exceder el valor derivado de a) o b). Para ser conservador se recomienda que estas temperaturas se incrementen en 5°C ya que el envejecimiento a temperaturas superiores a la media no está totalmente compensado por una disminución del envejecimiento a temperaturas inferiores a la media. Con este margen, la temperatura media aproximada de 24 horas no se rebasará en más de unos pocos días al mes y, si se supera, la pérdida de vida adicional no será grave.



**Figura 4.3** Diagrama de temperatura Quito [16]

**Tabla 4.1** Tabla climática de Quito [16]

MES	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
[°C] (max)	20,4	20,1	20	19,9	20,2	20,2	20,7	21,1	21,1	20,6	20,4	20,5

Ya que las medidas que son utilizadas son solo tomadas para cierta duración en intervalos, se tomará la opción b), y para el caso de Quito, la temperatura máxima promedio, para el mes que fueron realizadas las mediciones para ambos

transformadores, que fue el mes de diciembre, según los datos de la figura 4.3 y la tabla 4.1, es de 20,5°C. Adicionalmente se tomará en cuenta la recomendación de añadir los 5°C, por lo que se estableció una temperatura de medición de 25°C.

#### 4.5.2 EJEMPLO DE CÁLCULO PARA TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

Para este ejemplo, se usará el transformador Nro. 38271 descrito en la sección 3.4.2.1. Los datos de placa, así como los valores de pérdidas de corto circuito y circuito abierto, fueron obtenidos del “Informe de Pruebas de Transformadores en Laboratorio”, de la Dirección de Distribución de la EEQ. Este informe se presenta en el Anexo 1.

##### 4.5.2.1 Datos del transformador

**Tabla 4.2** Datos transformador trifásico Nro. 38271

<b>Potencia [VA]</b>	50000	
<b>Alto voltaje [V]</b>	22860	
<b>Bajo voltaje [V]</b>	210	
<b>Resistencia de AV [<math>\Omega</math>]</b>	<b>H1-H2</b>	114,3
	<b>H2-H3</b>	114,3
	<b>H3-H1</b>	114,3
<b>Resistencia de BV [<math>\Omega</math>]</b>	<b>X1-X0</b>	0,0038
	<b>X2-X0</b>	0,0038
	<b>X3-X0</b>	0,0038
<b>Prueba de CA [W]</b>	291	
<b>Prueba de CC [W]</b>	530	
<b>Temperatura prueba [°C]</b>	21	29
<b>Temperatura medición [°C]</b>	25	

En el informe de pruebas de transformadores en laboratorio, se especifica que los valores de las impedancias se obtuvieron a la temperatura de 21°C, y los valores de las pérdidas a 29°C.

#### 4.5.2.2 Cálculo de impedancias

Aplicando las ecuaciones 4.13, 4.14 y 4.15:

$$Z_1 = \frac{114,3 - 114,3 + 114,3}{2} = 57,15 \Omega$$

$$Z_2 = 114,3 - 57,15 = 57,15 \Omega$$

$$Z_3 = 114,3 - 57,15 = 57,15 \Omega$$

Resistencias de alto voltaje se suman como si estuvieran en serie:

$$R_{AV} = Z_1 + Z_2 + Z_3 = 57,15 + 57,15 + 57,15 = 171,45 \Omega$$

Resistencias de bajo voltaje se suman como si estuvieran en serie:

$$R_{BV} = 0,0038 + 0,0038 + 0,0038 = 0,0114 \Omega$$

Bobinado delta, ecuación 4.16:

$$R_1 = \frac{2}{9} \times 171,45 = 38,1 \Omega$$

Bobinado estrella, ecuación 4.17:

$$R_2 = \frac{2}{3} \times 0,0114 = 0,0076 \Omega$$

Para poder realizar los cálculos correctamente se transforma estos valores de resistencia a la temperatura de 29°C, utilizando la ecuación 4.27:

$$R_1 = 38,1 \left( \frac{29 + 234,5}{21 + 234,5} \right) = 39,293 \Omega$$

$$R_2 = 0,0076 \left( \frac{29 + 234,5}{21 + 234,5} \right) = 0,0078 \Omega$$

#### 4.5.2.3 Cálculo de corrientes

Utilizando las ecuaciones 4.18 y 4.19 se tiene:

$$I_{1-R} = \frac{50kVA}{\sqrt{3} \times 22860V} = 1,2628 A$$

$$I_{2-R} = \frac{50kVA}{\sqrt{3} \times 210V} = 137,46 A$$

#### 4.5.2.4 Cálculo de pérdidas

A partir de la ecuación 4.20 se tiene las pérdidas en condiciones nominales:

$$P_{TSL-R} = 530 - 1,5(1,2628^2 \times 39,293 + 137,46^2 \times 0,0078)$$

$$P_{TSL-R} = 530 - 316,15 = 213,85 W$$

Por lo que las pérdidas por efecto Joule son:  $P = 316,15 W$

Utilizando las ecuaciones 4.24, 4.25 y 4.26 se convierte las pérdidas a la temperatura de medición:

$$P_r(T) = 316,15 \left( \frac{234,5 + 25}{29 + 234,5} \right) = 311,35 W$$

$$P_s(T) = 213,85 \left( \frac{234,5 + 29}{22 + 234,5} \right) = 217,14 W$$

$$P(T) = 311,35 + 217,14 = 528,5 W$$

Las pérdidas por corrientes de Foucault se calculan mediante la ecuación 4.22:

$$P_{EC-R} = 217,14 \times 0,33 = 71,66 \text{ W}$$

Y por la ecuación 4.23 las otras pérdidas parásitas son:

$$P_{OSL-R} = 217,14 - 71,66 = 145,49 \text{ W}$$

Para encontrar el valor de la corriente de carga RMS con efecto de la carga armónica, el valor del factor armónico de pérdidas de Foucault y el valor del factor armónico de otras pérdidas parásitas, es necesario utilizar las ecuaciones 4.1, 4.5 y 4.8 respectivamente, y los valores de los registros de carga de armónicos descritos en las tablas 3.5 y 3.6, para este ejemplo se usarán los valores de la tabla 3.5, que corresponden al pico de demanda.

**Tabla 4.3** Determinación de corrientes con presencia de armónicos

h	ARMÓNICOS [A]			$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$		
	LÍNEA 1	LÍNEA 2	LÍNEA 3	LÍNEA 1	LÍNEA 2	LÍNEA 3
1	165,39	209,24	169,85	1	1	1
2	0,1723	0,3903	0,4751	1,09E-06	3,48E-06	7,83E-06
3	21,067	20,857	24,315	0,0162	0,0099	0,0205
4	0	0	0,049	0	0	8,32E-08
5	10,641	12,839	11,47	0,0041	0,0038	0,0046
6	0	0	0	0	0	0
7	5,0217	6,5558	7,3822	0,0009	0,001	0,0019
8	0	0	0	0	0	0
9	2,8843	1,7644	4,301	0,0003	7,11E-05	0,0006
10	0	0	0	0	0	0
11	1,3457	0,8047	2,2551	6,62E-05	1,48E-05	0,0002
12	0	0	0	0	0	0
13	0,6592	0,9301	0,2564	1,59E-05	1,98E-05	2,28E-06

h	ARMÓNICOS [A]			$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$		
	LÍNEA 1	LÍNEA 2	LÍNEA 3	LÍNEA 1	LÍNEA 2	LÍNEA 3
14	0	0	0	0	0	0
15	0,1329	0	0	6,46E-07	0	0
16	0	0	0	0	0	0
17	0,4427	0,0346	0	7,17E-06	2,7E-08	0
18	0	0	0	0	0	0
19	0,1962	0,0827	0	1,41E-06	1,56E-07	0
20	0	0	0	0	0	0
21	0,2119	0	0	1,6E-06	0	0
22	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0
	$\Sigma$			1,0217	1,0148	1,0278

Por lo que, de acuerdo a la ecuación 4.1, el valor de las corrientes en las líneas en p.u. son:

$$I_1 = 1,0108$$

$$I_2 = 1,0074$$

$$I_3 = 1,0138$$

**Tabla 4.4** Determinación de factores armónicos

h	$h^2 \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$			$h^{0,8} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$		
	LÍNEA 1	LÍNEA 2	LÍNEA 3	LÍNEA 1	LÍNEA 2	LÍNEA 3
1	1	1	1	1	1	1
2	4,34E-06	1,39E-05	3,13E-05	1,89E-06	6,06E-06	1,36E-05
3	0,146	0,0894	0,1844	0,0391	0,0239	0,0494
4	0	0	1,33E-06	0	0	2,52E-07
5	0,1035	0,0941	0,114	0,015	0,0136	0,0165

h	$h^2 \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$			$h^{0,8} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$		
	LINEA 1	LINEA 2	LINEA 3	LINEA 1	LINEA 2	LINEA 3
6	0	0	0	0	0	0
7	0,0452	0,0481	0,0926	0,0044	0,0047	0,009
8	0	0	0	0	0	0
9	0,0246	0,0058	0,0519	0,0018	0,0004	0,0037
10	0	0	0	0	0	0
11	0,008	0,0018	0,0213	0,0005	0,0001	0,0012
12	0	0	0	0	0	0
13	0,0027	0,0033	0,0004	0,0001	0,0002	1,77E-05
14	0	0	0	0	0	0
15	0,0001	0	0	5,64E-06	0	0
16	0	0	0	0	0	0
17	0,0021	7,92E-06	0	6,91E-05	2,64E-07	0
18	0	0	0	0	0	0
19	0,0005	5,63E-05	0	1,48E-05	1,65E-06	0
20	0	0	0	0	0	0
21	0,0007	0	0	1,88E-05	0	0
22	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0
$\Sigma$	1,3335	1,2426	1,4647	1,0609	1,0429	1,0798

De acuerdo a la ecuación 4.5, el factor armónico de pérdidas para corrientes de Foucault será:

$$F_{HL-L1} = 1,3052$$

$$F_{HL-L2} = 1,2245$$

$$F_{HL-L3} = 1,4251$$

El factor armónico de otras pérdidas parásitas, de acuerdo a la ecuación 4.8 será:

$$F_{HL-STR-L1} = 1,0384$$

$$F_{HL-STR-L2} = 1,0277$$

$$F_{HL-STR-L3} = 1,0506$$

Las pérdidas totales deben corregirse para reflejar que el valor de corriente RMS es mayor que la corriente nominal, y también para los efectos del contenido armónico. Para este caso la corriente de carga es 120,32% para la línea 1; 152,21% para la línea 2 y 123,56% para la línea 3; resultando en el siguiente factor para determinar las pérdidas para esta carga específica:

$$P_{LL(pu)1} = (1,0108)^2 \times (1,2032)^2 = 1,479$$

$$P_{LL(pu)2} = (1,0074)^2 \times (1,5221)^2 = 2,3512$$

$$P_{LL(pu)3} = (1,0138)^2 \times (1,2356)^2 = 2,3813$$

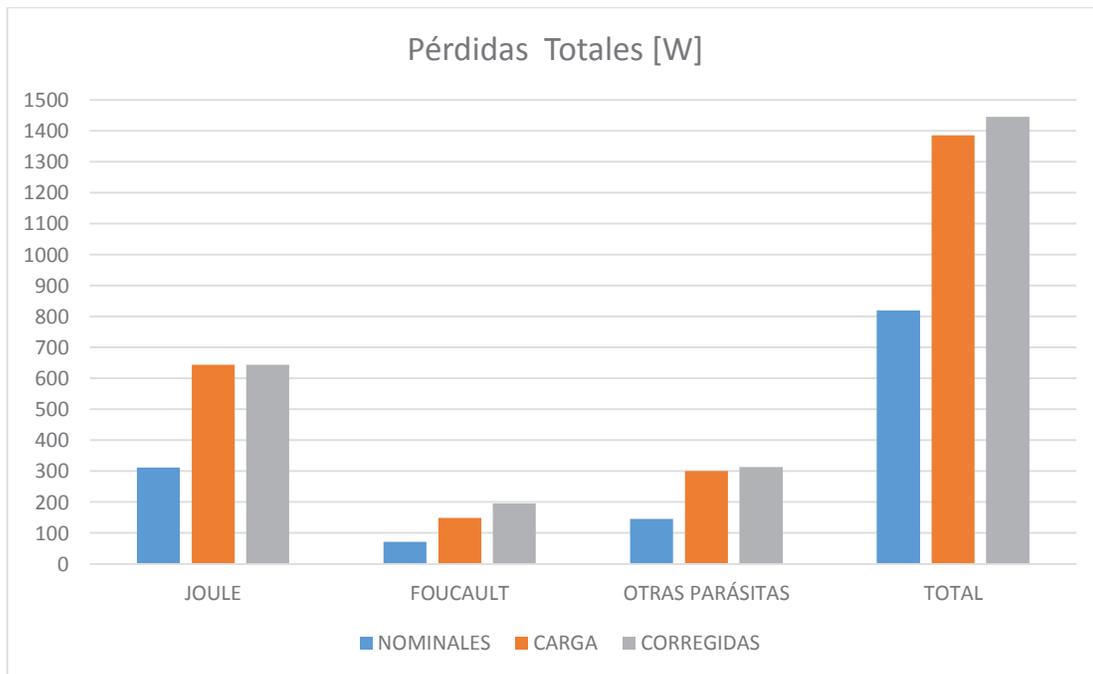
Estos factores se multiplican por todos los valores nominales obtenidos para cada línea, obteniendo así, los valores correspondientes a las mediciones realizadas.

Las pérdidas totales se encuentran resumidas en la tabla 4.5 y la figura 4.4.

**Tabla 4.5** Pérdidas totales en el pico de demanda del transformador trifásico

TIPO DE PÉRDIDA		PÉRDIDAS NOMINALES A 29°C [W]	PÉRDIDAS DE CARGA A 25°C [W]	FACTOR ARMÓNICO	PÉRDIDAS CORREGIDAS [W]
VACÍO		291	291		291
JOULE	LÍNEA 1	103,78	153,49		153,49
	LÍNEA 2	103,78	244,02		244,02
	LÍNEA 3	103,78	247,14		247,14
FOUCAULT	LÍNEA 1	23,886	35,326	1,3052	46,107

TIPO DE PÉRDIDA		PÉRDIDAS NOMINALES A 29°C [W]	PÉRDIDAS DE CARGA A 25°C [W]	FACTOR ARMÓNICO	PÉRDIDAS CORREGIDAS [W]
	LÍNEA 2	23,886	56,16	1,2245	68,769
	LÍNEA 3	23,886	56,879	1,4251	81,059
OTRAS PARÁSITAS	LÍNEA 1	48,495	71,723	1,0384	74,476
	LÍNEA 2	48,495	114,02	1,0277	117,18
	LÍNEA 3	48,495	115,48	1,0506	121,33
<b>TOTAL [W]</b>		819,5	1385,24		1444,57



**Figura 4.4** Pérdidas totales en el pico de demanda del transformador trifásico

Ya que el transformador se encuentra en sobrecarga, se puede observar que las pérdidas producidas sin armónicos son 1385,24 W y con armónicos son 1444,57 W. En ambos casos las pérdidas sobrepasan a las pérdidas nominales, por lo que

se deben tomar medidas de corrección a este transformador. Las pérdidas por efecto de los armónicos son de 59,33 W.

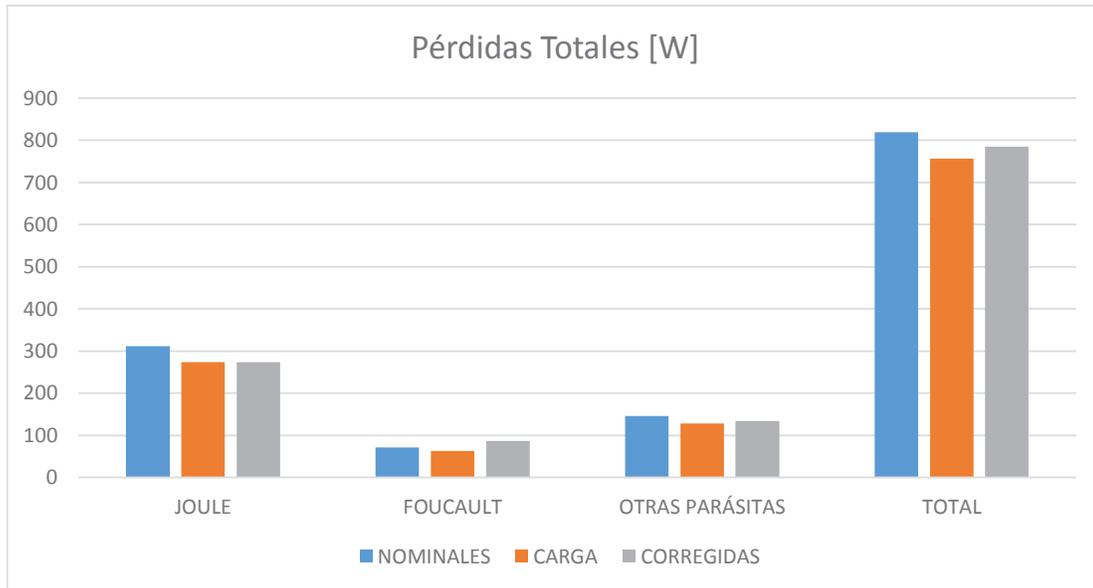
El mismo procedimiento se aplica para los valores de la tabla 3.6 obteniendo los resultados de la tabla 4.6 y la figura 4.5.

**Tabla 4.6** Pérdidas totales antes del pico de demanda del transformador trifásico

TIPO DE PÉRDIDA		PÉRDIDAS NOMINALES A 29°C [W]	PÉRDIDAS DE CARGA A 25°C [W]	FACTOR ARMÓNICO	PÉRDIDAS CORREGIDAS [W]
VACIO		291	291		291
JOULE	LÍNEA 1	103,78	58,15		58,15
	LÍNEA 2	103,78	107,53		107,53
	LÍNEA 3	103,78	108,42		108,42
FOUCAULT	LÍNEA 1	23,886	13,383	1,5069	20,168
	LÍNEA 2	23,886	24,748	1,2598	31,178
	LÍNEA 3	23,886	24,954	1,3945	34,798
OTRAS PARÁSITAS	LÍNEA 1	48,495	27,172	1,059	28,775
	LÍNEA 2	48,495	50,246	1,0312	51,814
	LÍNEA 3	48,495	50,664	1,0465	53,02
TOTAL [W]		819,5	756,27		784,26

Los valores de pérdidas en el intervalo de antes del pico, no sobrepasan los valores nominales, sin embargo, hay que tomar en cuenta que se encuentran

cerca del valor nominal, y también que, en el intervalo de pico de demanda, las pérdidas sobrepasan el valor nominal. Las pérdidas por efecto de los armónicos son de 27,99 W.



**Figura 4.5** Pérdidas totales antes del pico de demanda del transformador trifásico

#### 4.5.2.5 Cálculo de la temperatura superior del aceite

Para el cálculo de la temperatura superior del aceite en el pico de demanda, se usa la ecuación 4.10:

$$\theta_{TO} = 65 \left( \frac{1444,57}{819,5} \right)^{0,8} = 102,3^{\circ}C$$

La temperatura del punto más caliente se calcula usando la ecuación 4.12, para ello es necesario calcular los términos  $I_{2-R}^2 R$  y  $I_{2-R}^2 R$ :

$$I_{2-R}^2 R_{L1} = 1,5 \times \frac{2}{3} \times 137,46^2 \times 0,0039 = 72,931 \text{ W}$$

Ya que las resistencias del secundario del transformador son de igual magnitud, entonces queda:

$$I_{2-R}^2 R_{L2} = 72,931 \text{ W}$$

$$I_{2-R}^2 R_{L3} = 72,931 \text{ W}$$

Estos valores se multiplican por su respectivo porcentaje de carga de cada línea:

$$I_{2-R}^2 R_{L1} = 72,931 * 1,479 = 107,86 \text{ W}$$

$$I_{2-R}^2 R_{L2} = 72,931 * 2,3512 = 171,47 \text{ W}$$

$$I_{2-R}^2 R_{L3} = 72,931 * 2,3813 = 173,67 \text{ W}$$

Reemplazando los valores en la ecuación se obtiene:

$$\theta_g = (80 - 65) \left[ \frac{(107,86 + 171,47 + 173,67) + (46,107 + 68,769 + 81,059) \times 2,4}{(72,931 + 72,931 + 72,931) + (23,886 + 23,886 + 23,886) \times 2,4} \right]^{0,8}$$

$$\theta_g = 29,841^\circ\text{C}$$

El incremento del punto más caliente sobre la temperatura ambiente es:

$$\text{INCREMENTO} = 102,3 + 29,841 = 132,14^\circ\text{C}$$

La temperatura nominal del punto más caliente es de  $80^\circ\text{C}$ , y el incremento al ser de  $132,14^\circ\text{C}$  está sobrepasando esta cantidad, por lo que el transformador, junto con las excesivas pérdidas encontradas anteriormente, se encuentra trabajando en condiciones no adecuadas, y es necesario aplicar medidas de corrección, las cuales se hablarán en el capítulo siguiente.

Para el caso de 12 horas antes del pico de demanda se tiene:

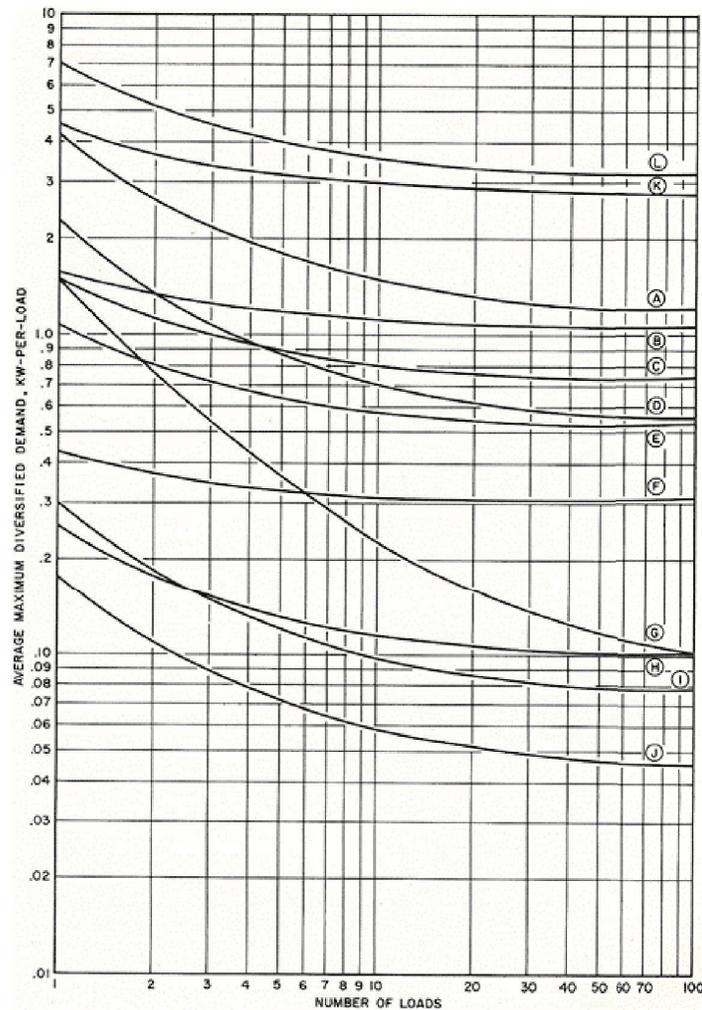
$$\theta_{T0} = 62,793^\circ\text{C}$$

$$\theta_g = 15,263^\circ\text{C}$$

$$\text{INCREMENTO} = 78,056^\circ\text{C}$$

Cuando se hallaron las pérdidas en este intervalo, las mismas no sobrepasaban el valor nominal, se encontraban cerca de la cantidad, y de igual manera sucede en el incremento, no sobrepasa los 80°C nominales, pero es cercano a la cantidad.

#### 4.5.2.6 Impacto de cocinas de inducción



**Figura 4.6** Demanda máxima diversificada de 30 minutos característica de varias cargas residenciales modernas [17]

Los registros de armónicos de cocinas de inducción en las tablas 3.1 y 3.2, solo están descritos para una cocina de inducción, para aumentar el impacto de más cocinas de inducción se usó la figura 4.6, que es la curva de demanda diversificadas de 30 minutos características de ciertas cargas residenciales modernas de la Westinghouse.

La curva D de la figura 4.6, corresponde a una cocina eléctrica, y a partir de ésta, se puede obtener los factores de coincidencia (FC) para las cocinas de inducción. Por ejemplo, para obtener el factor de coincidencia de 10 cocinas de inducción, se realizaría el siguiente proceso:

$$FC_{10} = \frac{0,7}{2,296} = 0,3049$$

El mismo procedimiento se emplearía para obtener los demás valores, quedando los valores de la tabla 4.7.

**Tabla 4.7** FC cocinas de inducción

# cocinas	FC
1	1
2	0,625
3	0,4734
4	0,4168
5	0,3759
6	0,3593
7	0,3341
8	0,3223
9	0,3145
10	0,3049
20	0,277
30	0,2539
40	0,2504
50	0,247
60	0,243
70	0,2395
80	0,2395
90	0,2395
100	0,2395

Así, usando el FC y un factor de demanda de 0,8 para la cocina de inducción, se puede actualizar la tabla de una a varias cocinas de inducción.

Para poder saber cuántas cocinas aumentarán en cada transformador, es necesario tomar en cuenta que no todos los clientes usarán la cocina de inducción en el futuro, debido a un fenómeno que se lo conoce como penetración de las tecnologías, que quiere decir que cualquier tecnología no ingresa de inmediato a ser usada por todos los consumidores, y toma años en ser adaptada por todos, o incluso nunca llegar a usarse por ciertas personas, tal como lo sugiere un artículo del Harvard Business Review en la figura 4.7. Por citar un ejemplo de la figura se toma el caso del teléfono, que desde su inclusión en los hogares de Estados Unidos alrededor del año 1900, se nota que ya en el año 2005, aún no ha sido adoptado por todos los hogares. Tomando en cuenta esta consideración, se analizará a los transformadores con aproximadamente la mitad de sus usuarios utilizando las cocinas de inducción.

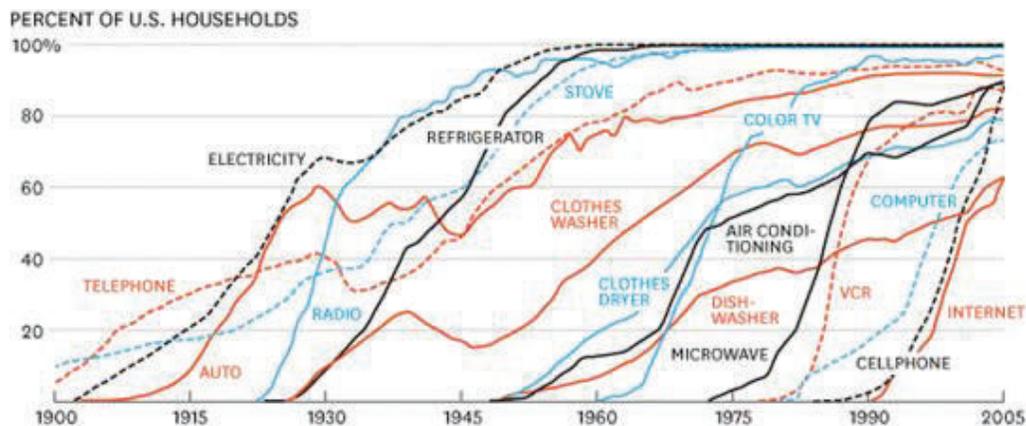


Figura 4.7 Ritmo de adopción de las tecnologías [18]

Otro aspecto que hay que tomar en cuenta es que no todos los usuarios inscritos en el PEC están utilizando las cocinas de inducción actualmente, esto se logró determinar revisando los registros de consumo mensual de antes y después de haberse instalado las cocinas de inducción, al tener instalado la cocina los registros de consumo debieron aumentar en los meses posteriores a la instalación, y en algunos casos esto no se dio, por lo que esto también influye en el aumento de las cocinas de inducción al transformador. Para este caso de

estudio se tiene que, de los 18 usuarios inscritos en el PEC, y una vez analizados sus consumos, solo 12 clientes se encuentran utilizando la cocina. Lo que quiere decir que de los 155 clientes del transformador menos los 12 que ya se encuentran utilizando, se analizará los efectos con 66 cocinas, 22 en cada línea.

Los registros de consumo de los usuarios de este transformador con cocina de inducción se muestran en el Anexo 2.

Se presentan resultados para los dos tipos de cocina de inducción analizadas funcionando a plena carga, es decir, con los 4 quemadores actuando simultáneamente (tablas 3.1 y 3.2), y solo se tomarán en cuenta las medidas realizadas con el instrumento Dranetz PowerExplorer PX5, ya que las mediciones realizadas con este analizador contemplan armónicos pares e impares, dando un mayor acertamiento a los resultados, ya que las pruebas de la EEQ también contemplan armónicos pares, mientras que el instrumento Fluke 1735 solo realiza mediciones de armónicos impares.

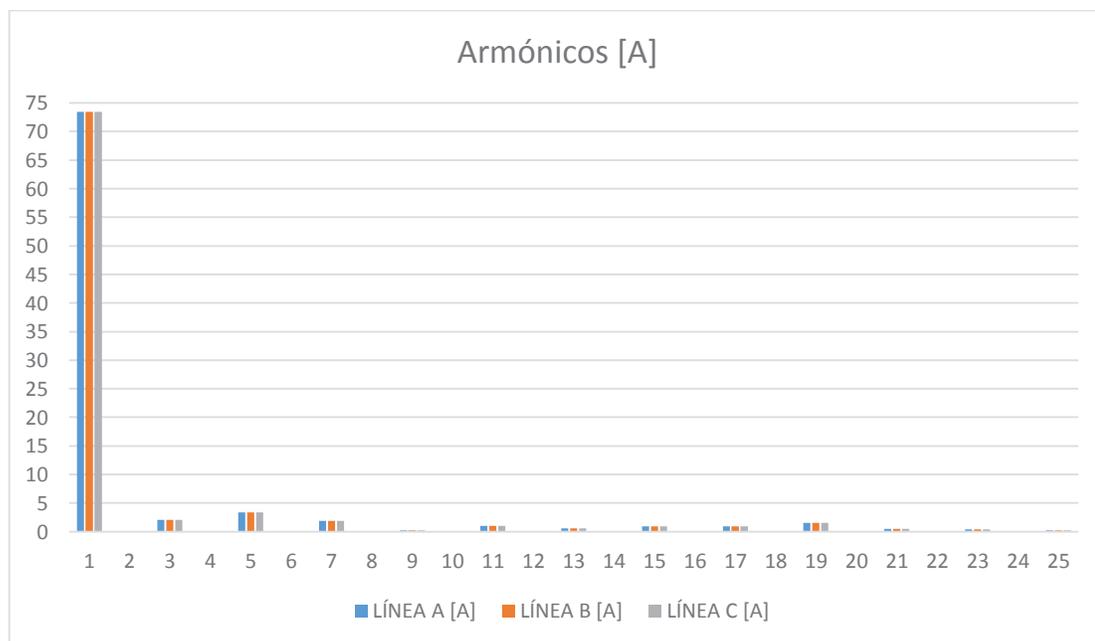
#### 4.5.2.6.1 *Cocina Haier*

En la tabla 4.8 y figura 4.8, se presentan los armónicos de corriente, y en la tabla 4.9 y figura 4.9 se muestran las pérdidas totales.

**Tabla 4.8** Armónicos de 66 cocinas Haier

<b>h</b>	<b>LÍNEA A [A]</b>	<b>LÍNEA B [A]</b>	<b>LÍNEA C [A]</b>
<b>1</b>	73,473	73,473	73,473
<b>2</b>	0,0807	0,0807	0,0807
<b>3</b>	2,0612	2,0612	2,0612
<b>4</b>	0,0502	0,0502	0,0502
<b>5</b>	3,3936	3,3936	3,3936
<b>6</b>	0,0585	0,0585	0,0585
<b>7</b>	1,8735	1,8735	1,8735
<b>8</b>	0,0356	0,0356	0,0356

h	LÍNEA A [A]	LÍNEA B [A]	LÍNEA C [A]
9	0,2537	0,2537	0,2537
10	0,0372	0,0372	0,0372
11	1,0015	1,0015	1,0015
12	0,0285	0,0285	0,0285
13	0,5603	0,5603	0,5603
14	0,0391	0,0391	0,0391
15	0,9113	0,9113	0,9113
16	0,0325	0,0325	0,0325
17	0,9644	0,9644	0,9644
18	0,0337	0,0337	0,0337
19	1,5351	1,5351	1,5351
20	0,0467	0,0467	0,0467
21	0,5171	0,5171	0,5171
22	0,0302	0,0302	0,0302
23	0,3777	0,3777	0,3777
24	0,0271	0,0271	0,0271
25	0,2264	0,2264	0,2264



**Figura 4.8** Armónicos de 66 cocinas Haier

**Tabla 4.9** Pérdidas totales de 66 cocinas Haier

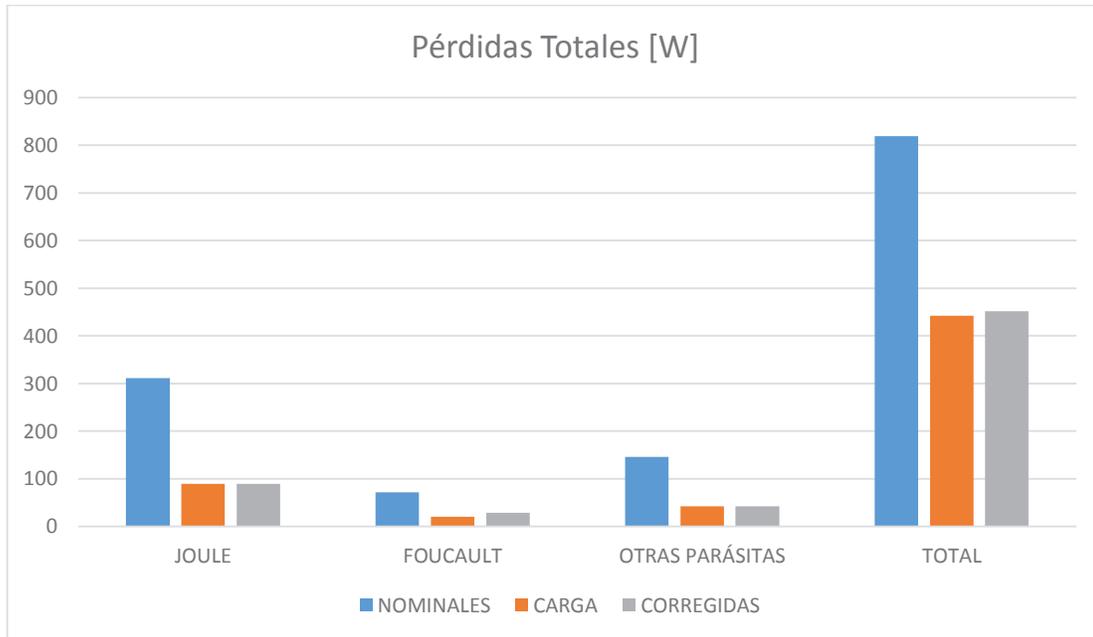
TIPO DE PÉRDIDA		PÉRDIDAS NOMINALES A 29°C [W]	PÉRDIDAS DE CARGA A 25°C [W]	FACTOR ARMÓNICO	PÉRDIDAS CORREGIDAS [W]
VACÍO		291	291		291
JOULE	LÍNEA 1	103,78	29,788		29,788
	LÍNEA 2	103,78	29,788		29,788
	LÍNEA 3	103,78	29,788		29,788
FOUCAULT	LÍNEA 1	23,886	6,8556	1,4033	9,6206
	LÍNEA 2	23,886	6,8556	1,4033	9,6206
	LÍNEA 3	23,886	6,8556	1,4033	9,6206
OTRAS PARÁSITAS	LÍNEA 1	48,495	13,919	1,0184	14,175
	LÍNEA 2	48,495	13,919	1,0184	14,175
	LÍNEA 3	48,495	13,919	1,0184	14,175
<b>TOTAL [W]</b>		819,5	442,69		451,75

El incremento de la temperatura del aceite será:

$$\theta_{TO} = 40,363^{\circ}C$$

$$\theta_g = 6,2977^{\circ}C$$

$$\text{INCREMENTO} = 46,662^{\circ}C$$



**Figura 4.9** Pérdidas totales de 66 cocinas Haier

#### 4.5.2.6.2 Cocina Midea

En la tabla 4.10 y figura 4.10, se presentan los armónicos de corriente, correspondientes a las 66 cocinas de inducción repartidas en 22 cocinas cada línea, y en la tabla 4.11 y figura 4.11 se muestran las pérdidas totales correspondientes a estos valores.

**Tabla 4.10** Armónicos de 66 cocinas Midea

h	LÍNEA A [A]	LÍNEA B [A]	LÍNEA C [A]
1	54,086	54,086	54,086
2	0,3442	0,3442	0,3442
3	1,1918	1,1918	1,1918
4	0,1172	0,1172	0,1172
5	1,7190	1,7190	1,7190
6	0,0849	0,0849	0,0849
7	1,5561	1,5561	1,5561
8	0,0710	0,0710	0,0710
9	0,8107	0,8107	0,8107

h	LÍNEA A [A]	LÍNEA B [A]	LÍNEA C [A]
10	0,0928	0,0928	0,0928
11	1,0430	1,0430	1,0430
12	0,0671	0,0671	0,0671
13	0,2691	0,2691	0,2691
14	0,0501	0,0501	0,0501
15	0,7996	0,7996	0,7996
16	0,0455	0,0455	0,0455
17	0,6843	0,6843	0,6843
18	0,0456	0,0456	0,0456
19	1,4407	1,4407	1,4407
20	0,0564	0,0564	0,0564
21	0,4154	0,4154	0,4154
22	0,0715	0,0715	0,0715
23	0,6800	0,6800	0,6800
24	0,0680	0,0680	0,0680
25	0,2568	0,2568	0,2568

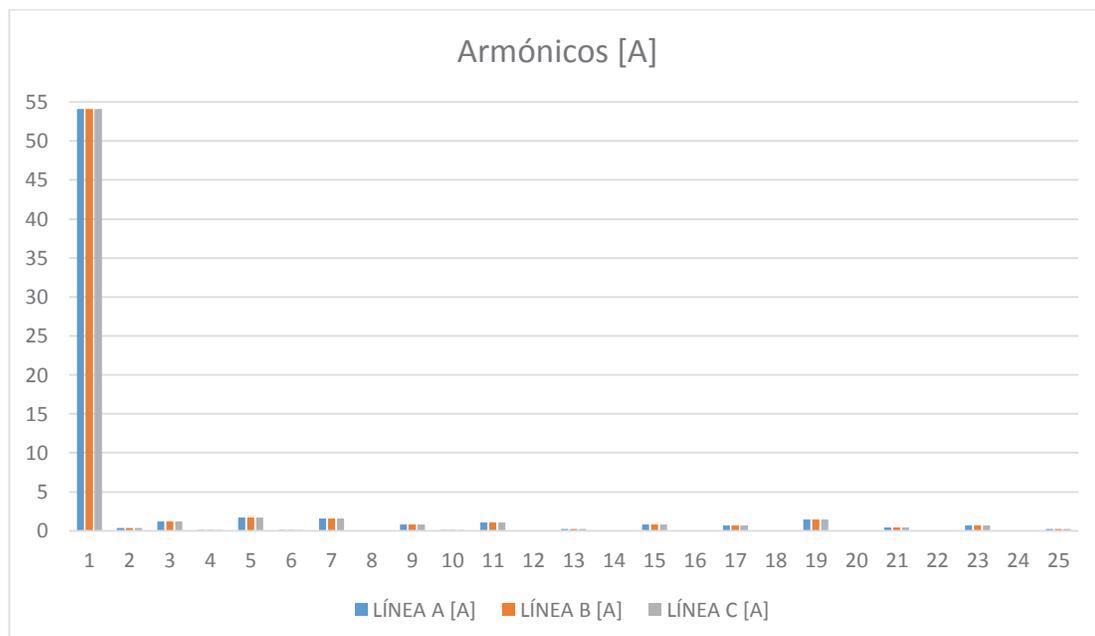


Figura 4.10 Armónicos de 66 cocinas Midea

Tabla 4.11 Pérdidas totales de 66 cocinas Midea

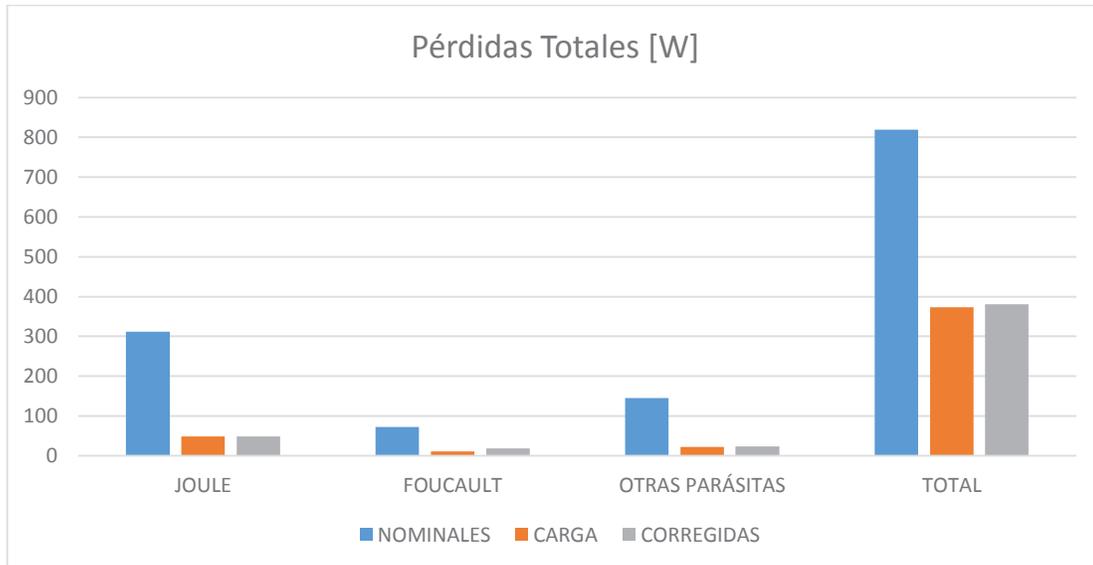
TIPO DE PÉRDIDA		PÉRDIDAS NOMINALES A 29°C [W]	PÉRDIDAS DE CARGA A 25°C [W]	FACTOR ARMÓNICO	PÉRDIDAS CORREGIDAS [W]
VACÍO		291	291		291
JOULE	LÍNEA 1	103,78	16,1361		16,1361
	LÍNEA 2	103,78	16,1361		16,1361
	LÍNEA 3	103,78	16,1361		16,1361
FOUCAULT	LÍNEA 1	23,886	3,7137	1,6096	5,9777
	LÍNEA 2	23,886	3,7137	1,6096	5,9777
	LÍNEA 3	23,886	3,7137	1,6096	5,9777
OTRAS PARÁSITAS	LÍNEA 1	48,495	7,5399	1,0224	7,7089
	LÍNEA 2	48,495	7,5399	1,0224	7,7089
	LÍNEA 3	48,495	7,5399	1,0224	7,7089
TOTAL [W]		819,5	373,17		380,47

El aumento de la temperatura superior del aceite será:

$$\theta_{TO} = 35,183^{\circ}C$$

$$\theta_g = 4,093^{\circ}C$$

$$\text{INCREMENTO} = 39,275^{\circ}C$$



**Figura 4.11** Pérdidas totales de 66 cocinas Midea

Para el caso de ambas cocinas se tiene que las pérdidas por efecto de los armónicos son considerablemente bajas, para el caso de la cocina Haier son 9,06 W y para la cocina Midea 7,3 W lo que explica que las pérdidas obtenidas en las tablas 4.5 y 4.6, a pesar de tener 12 cocinas de inducción instaladas, las cocinas no son lo que realmente causa las mayores pérdidas en el transformador, los demás aparatos electrónicos existentes en los hogares de los usuarios, son los causantes de las mayores pérdidas en el transformador, ya que generan mayor contenido armónico que las cocinas de inducción.

De igual manera ocurre con el aumento de la temperatura superior del aceite, el incremento para las cocinas Haier se encuentra a 33,338°C de la temperatura nominal (80°C), y a 40,725°C en las cocinas Midea.

## 4.6 TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

El procedimiento, cálculos y ecuaciones son similares a los del transformador trifásico, siendo los cambios los siguientes:

- Los valores de impedancia  $R_1$  y  $R_2$  se mantienen iguales a las de la prueba de laboratorio, no se realiza ningún tipo de cálculo de impedancia.

- Las ecuaciones 4.18 y 4.19 cambian al quitar el valor de  $\sqrt{3}$  de las mismas:

$$I_{1-R} = \frac{S}{V_{AV}} \quad y \quad I_{2-R} = \frac{S}{V_{BV}}$$

- El valor de K en la ecuación 4.20 es de 1.

#### 4.6.1 RESULTADOS PARA TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

Se usará el transformador Nro. 36785 descrito en la sección 3.4.2.2 y los datos de las tablas 3.8 y 3.9.

##### 4.6.1.1 Datos del transformador

Los datos se tomaron del “Informe de Pruebas de Transformadores en Laboratorio”, de la Dirección de Distribución de la EEQ, Anexo 1.

**Tabla 4.12** Datos transformador monofásico Nro. 36785

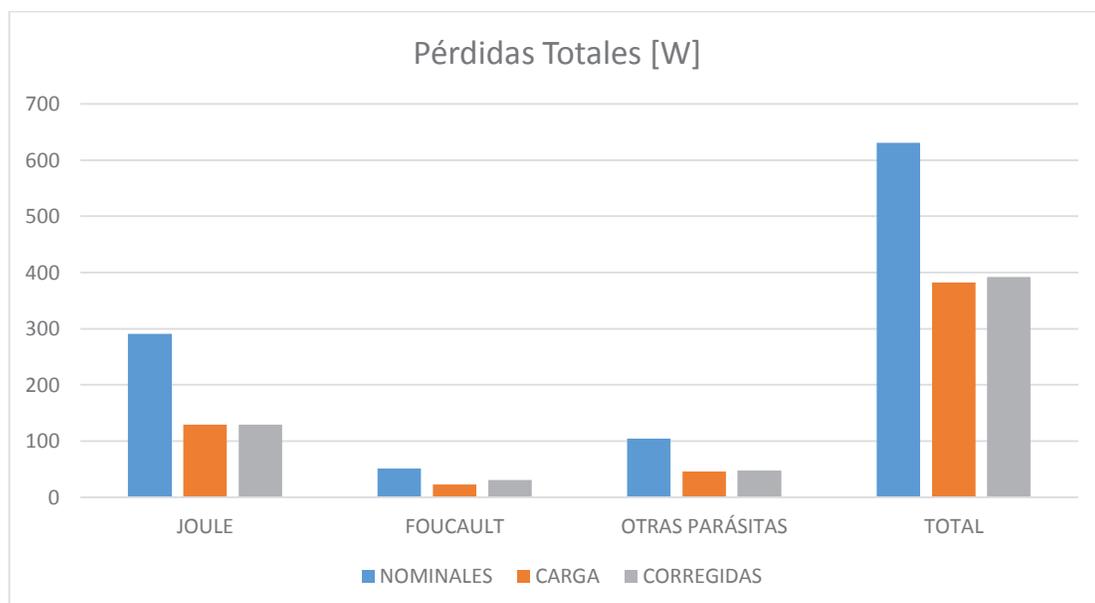
<b>Potencia [VA]</b>	50000	
<b>Alto voltaje [V]</b>	22860	
<b>Bajo voltaje [V]</b>	240	
<b>Resistencia de AV [<math>\Omega</math>]</b>	13,39	
<b>Resistencia de BV [<math>\Omega</math>]</b>	<b>X1-X2</b>	0,0029
	<b>X2-X3</b>	0,0022
<b>Prueba de CA [W]</b>	184	
<b>Prueba de CC [W]</b>	444	
<b>Temperatura prueba [<math>^{\circ}</math>C]</b>	20	
<b>Temperatura medición [<math>^{\circ}</math>C]</b>	25	

##### 4.6.1.2 Resultados de pérdidas

Usando los valores en el pico de demanda de la tabla 3.8, se obtiene los resultados de la tabla 4.13 y la figura 4.12, y con los de la tabla 3.9, que son los valores de antes del pico de demanda, se obtiene la tabla 4.14 y la figura 4.13.

**Tabla 4.13** Pérdidas totales en el pico de demanda del transformador monofásico

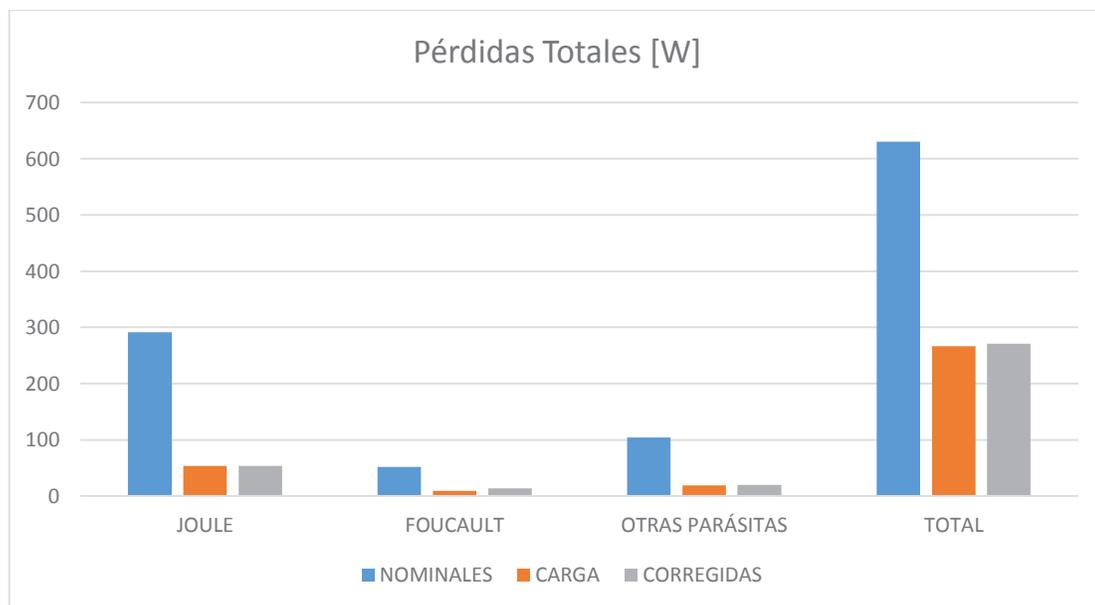
TIPO DE PÉRDIDA		PÉRDIDAS NOMINALES A 20°C [W]	PÉRDIDAS DE CARGA A 25°C [W]	FACTOR ARMÓNICO	PÉRDIDAS CORREGIDAS [W]
VACÍO		184	184		184
JOULE	LÍNEA 1	165,48	87,387		87,387
	LÍNEA 2	125,54	41,593		41,593
FOUCAULT	LÍNEA 1	29,185	15,412	1,2885	19,859
	LÍNEA 2	22,141	7,3356	1,4739	10,812
OTRAS PARÁSITAS	LÍNEA 1	59,255	31,291	1,0326	32,312
	LÍNEA 2	44,952	14,894	1,0546	15,707
<b>TOTAL [W]</b>		<b>630,55</b>	<b>381,91</b>		<b>391,67</b>



**Figura 4.12** Pérdidas totales en el pico de demanda del transformador monofásico

**Tabla 4.14** Pérdidas totales antes del pico de demanda del transformador monofásico

TIPO DE PÉRDIDA		PÉRDIDAS NOMINALES A 20°C [W]	PÉRDIDAS DE CARGA A 25°C [W]	FACTOR ARMÓNICO	PÉRDIDAS CORREGIDAS [W]
VACÍO		184	184		184
JOULE	LÍNEA 1	165,48	33,9888		33,9888
	LÍNEA 2	125,54	19,5563		19,5563
FOUCAULT	LÍNEA 1	29,185	5,9945	1,3834	8,2930
	LÍNEA 2	22,141	3,4491	1,5210	5,2461
OTRAS PARÁSITAS	LÍNEA 1	59,255	12,1706	1,0448	12,7156
	LÍNEA 2	44,952	7,0027	1,0588	7,4146
<b>TOTAL [W]</b>		<b>630,55</b>	<b>266,162</b>		<b>271,215</b>



**Figura 4.13** Pérdidas totales antes del pico de demanda del transformador monofásico

Para este transformador las pérdidas por efectos de los armónicos son más bajas que en el transformador trifásico, esto se debe a que este transformador no se encuentra sobrecargado, solo se encuentra operando a un 42,8% de su capacidad nominal para el caso del pico de demanda, y a un 18% para el caso de antes del pico de demanda, lo que se traduce en pérdidas de Foucault y otras pérdidas parásitas sin armónicos considerablemente más bajas a las nominales, y al multiplicar por los factores armónicos respectivos, que, en el caso del factor armónico de otras pérdidas parásitas se encuentran cercanos a la unidad, estas pérdidas no aumentan su magnitud de igual manera que lo hacen en el transformador trifásico.

#### 4.6.1.3 Resultados de temperatura superior del aceite

- Para el pico de demanda:

$$\theta_{TO} = 44,409^{\circ}C$$

$$\theta_g = 7,466^{\circ}C$$

$$\text{INCREMENTO} = 51,875^{\circ}C$$

- Para antes del pico de demanda:

$$\theta_{TO} = 33,097^{\circ}C$$

$$\theta_g = 3,182^{\circ}C$$

$$\text{INCREMENTO} = 36,279^{\circ}C$$

Debido a que el aumento de la temperatura superior del aceite tiene relación directa con las pérdidas, los incrementos encontrados se encuentran muy alejados de la temperatura nominal del transformador.

#### 4.6.1.4 Impacto de las cocinas de inducción

Al igual que en el transformador trifásico, se analizaron los consumos de los 16 usuarios inscritos en el PEC, y se determinó que solo 12 usan la cocina de

inducción, y de igual manera se analizará el aumento de cocinas con la mitad de los usuarios, que, de los 70 existentes que tiene menos los 12 que poseen cocina, quedan 24 por añadir, 12 por cada línea. Se muestran resultados para ambos tipos de cocina de inducción, en la tabla 4.15 y figura 4.14 de la cocina Haier, y en la tabla 4.16 y figura 4.15 de la cocina Midea.

Los registros de consumo de los usuarios de este transformador con cocina de inducción se muestran en el Anexo 2.

**Tabla 4.15** Pérdidas totales con 24 cocinas de inducción Haier

TIPO DE PÉRDIDA		PÉRDIDAS NOMINALES A 20°C [W]	PÉRDIDAS DE CARGA A 25°C [W]	FACTOR ARMÓNICO	PÉRDIDAS CORREGIDAS [W]
VACÍO		184	184		184
JOULE	LÍNEA 1	165,48	7,6855		7,6855
	LÍNEA 2	125,54	5,8304		5,8304
FOUCAULT	LÍNEA 1	29,185	1,3555	1,4033	1,9021
	LÍNEA 2	22,141	1,0283	1,4033	1,4430
OTRAS PARÁSITAS	LÍNEA 1	59,255	2,7520	1,0184	2,8026
	LÍNEA 2	44,952	2,0877	1,0184	2,1261
TOTAL [W]		630,55	204,74		205,79

El aumento de la temperatura superior del aceite para cocinas Haier será:

$$\theta_{TO} = 26,538^{\circ}C$$

$$\theta_g = 0,7959^{\circ}C$$

$$\text{INCREMENTO} = 27,334^{\circ}C$$

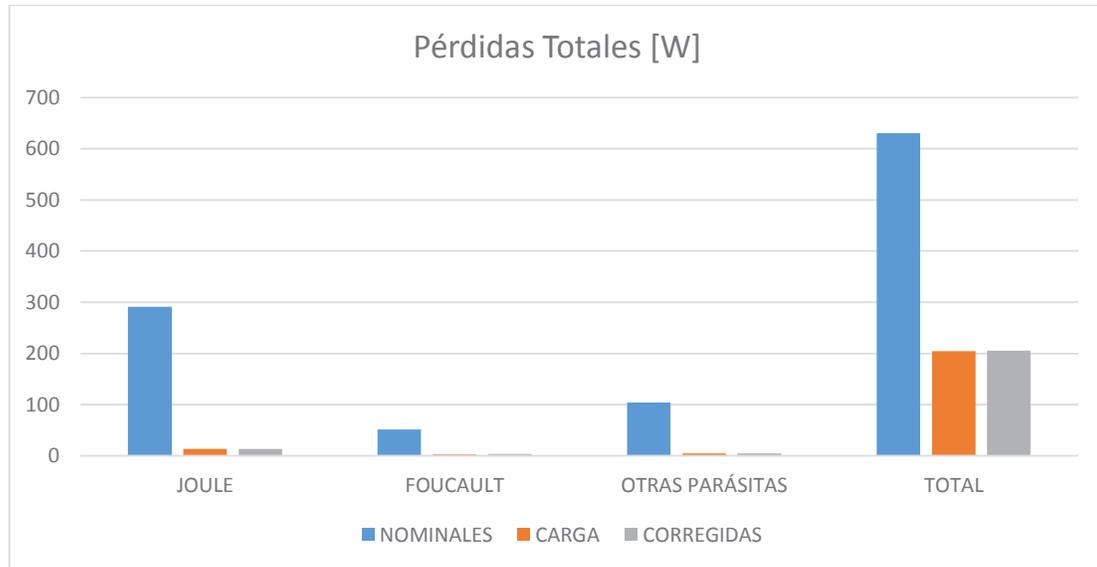


Figura 4.14 Pérdidas totales de 12 cocinas Haier

Tabla 4.16 Pérdidas totales con 24 cocinas de inducción Midea

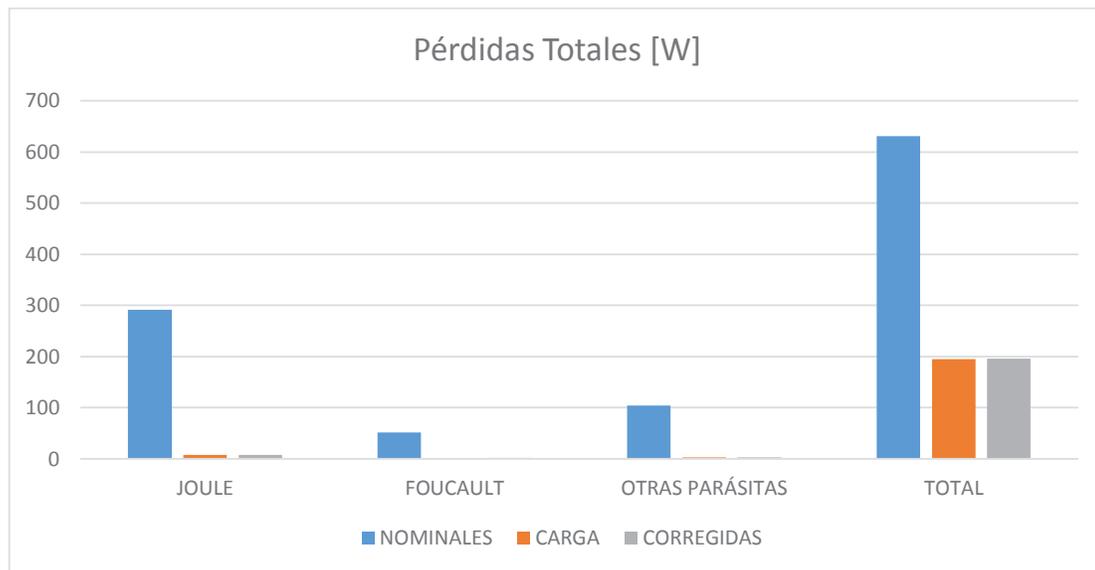
TIPO DE PÉRDIDA		PÉRDIDAS NOMINALES A 20°C [W]	PÉRDIDAS DE CARGA A 25°C [W]	FACTOR ARMÓNICO	PÉRDIDAS CORREGIDAS [W]
VACÍO		184	184		184
JOULE	LÍNEA 1	165,48	4,1633		4,1633
	LÍNEA 2	125,54	3,1583		3,1583
FOUCAULT	LÍNEA 1	29,185	0,7343	1,6096	1,1819
	LÍNEA 2	22,141	0,5570	1,6096	0,8966
OTRAS PARÁSITAS	LÍNEA 1	59,255	1,4908	1,0224	1,5242
	LÍNEA 2	44,952	1,1309	1,0224	1,1563
TOTAL [W]		630,55	195,23		196,08

Para las cocinas Midea, el aumento de la temperatura superior del aceite será:

$$\theta_{TO} = 26,532^{\circ}C$$

$$\theta_g = 0,4586^{\circ}C$$

$$\text{INCREMENTO} = 25,991^{\circ}C$$



**Figura 4.15** Pérdidas totales de 12 cocinas Midea

Las pérdidas con armónicos para los dos tipos de cocina se encuentran alrededor de 1 W, lo que indica que la presencia de las cocinas de inducción en este transformador representa pérdidas pequeñas, al igual que el aumento de la temperatura superior del aceite.

## **CAPÍTULO 5: MÉTODOS DE MITIGACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS CORRIENTES ARMÓNICAS SOBRE LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN**

La mejor solución para evitar el problema de armónicos, sería que los equipos no produjeran este tipo de distorsión, y esto se logra tomando las medidas preventivas de corrección en el mismo equipo, tales como son los filtros que, como se vio en la sección 2.1.6, desvían o bloquean el paso de las corrientes armónicas.

Dado que la mayoría de equipos no poseen medidas de prevención de armónicos, es natural que esto se traduzca en un contenido armónico hacia el transformador, y ya que sería imposible analizar cuáles y cuántos son los equipos causantes como para tratar de resolverlos uno por uno, es necesario tratar de corregir el problema en el transformador, para lo cual se puede usar nuevamente filtros, o los demás métodos de mitigación posibles listados en la sección 2.1.6.

### **5.1 COCINA DE INDUCCIÓN**

Como se vio en los capítulos 3 y 4, la cocina de inducción no es la mayor causante del contenido armónico en los transformadores estudiados en el campo, y esto se debe a que la cocina ya cuenta con el filtrado correspondiente.

Interferencia electromagnética (ruido) y distorsión armónica se producen debido a las altas frecuencias de conmutación que se generan en el circuito resonante, que causa corrientes excesivas a todos los órdenes de armónicos de la frecuencia de accionamiento. Esto se debe a que el condensador en el circuito resonante presentaría una reactancia capacitiva progresivamente más baja a frecuencias crecientes, dando lugar a grandes picos de corriente en las transiciones de conmutación, ya que el inversor trata de cargar y descargar rápidamente el condensador en los bordes ascendentes y descendentes de la onda.

### 5.1.1 FILTRO EMC

Como se indica en la sección 3.2.1, para la interferencia electromagnética, la cocina tiene un filtro EMC. El estándar ANSI C63.14-1998 “American National Standard Dictionary for Technologies of Electromagnetic Compatibility (EMC), Electromagnetic Pulse (EMP), and Electrostatic Discharge (ESD)”, define a la Compatibilidad Electromagnética (EMC), como a la habilidad de un dispositivo, equipo o sistema a funcionar satisfactoriamente en su entorno electromagnético sin introducir perturbaciones electromagnéticas intolerables en ese entorno, lo que quiere decir que este filtro impide el paso del ruido y la interferencia electromagnética hacia el sistema, como se indica en la figura 3.6.

### 5.1.2 FILTRO DE ARMÓNICOS

Para la distorsión armónica se tiene un filtro pasa bajos, que se encuentra después de la etapa de rectificación (figura 3.6), en la entrada del inversor de alta frecuencia, el cual introduce muy poca atenuación a las frecuencias que son menores que una determinada o llamada frecuencia de corte, y las frecuencias que son mayores que esta frecuencia de corte, son fuertemente atenuadas. Para el caso de la cocina esta frecuencia de corte puede ser entre 20 a 100 kHz, que es el rango de operación de una cocina de inducción.

Se usa un filtro pasa bajos debido a que frecuencias mayores, los armónicos serán de mayor magnitud, incluso los de orden mayor a 25, que suelen ser despreciables, por lo que es preferible atenuar los valores a esta frecuencia que, a una frecuencia menor, ya que a frecuencias menores los armónicos serán de menor magnitud.

Para el correcto diseño de este filtro pasa bajos se debe tomar la mayor frecuencia de operación de la cocina como frecuencia de corte, es decir, operando a plena carga (con los 4 quemadores), ya que como se explica, el filtro atenúa de mejor manera las frecuencias mayores a la de diseño, y esto se ve reflejado en los valores de  $THD_i$  obtenidos en las tablas 3.3 y 3.4, a manera de

que aumenta la operación de los quemadores el  $THD_i$  va disminuyendo, ya que las frecuencias menores son menos atenuadas, pero al ser valores de menor magnitud, sus efectos, tales como las pérdidas en el transformador, no serán significativos, tal como se demostró en el capítulo anterior.

### **5.1.3 MITIGACIÓN EN LAS COCINAS DE INDUCCIÓN**

De lo expuesto se concluye que las cocinas de inducción que forman parte del Programa Gubernamental, ya incluyen un medio de mitigación de los efectos del contenido de armónicos, gracias a la prevención que significó el Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 101 “ARTEFACTOS ELECTRODOMÉSTICOS PARA COCCIÓN POR INDUCCIÓN que, limitó el contenido de armónicos. Dicho sea, de paso, que la misma Norma limitó el factor de potencia a fin de que la electrónica interna se encarga de los dos temas, al simultáneamente. Es decir, que en este caso se aplicó el mejor método de mitigación, en el propio equipo que produce las armónicas de corriente, por esa razón no hace falta ningún método adicional.

## **5.2 TRANSFORMADOR**

### **5.2.1 CONDICIONES USUALES DE SERVICIO**

En el estándar IEEE Std C57.12.00-2006 “IEEE Standard for Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers”, se explica que la corriente de carga debe ser aproximadamente sinusoidal, y que el factor armónico ( $THD_i$ ), no debe exceder el 5% con respecto a la fundamental. También describe que el aumento de la temperatura en el nivel superior del aceite no debe exceder los 65°C a los kVA nominales, y que el incremento del punto más caliente, no debe sobrepasar los 80°C a los kVA nominales. Lo que quiere decir que, si se opera el transformador con una potencia aparente menor que la nominal, éstas temperaturas deberían ser menores que las nominales.

Según el estándar IEEE Std C57.91-1995, cuando la temperatura del nivel superior del aceite excede los 105°C (aumento de 65°C sobre temperatura ambiente de 40°C de acuerdo con IEEE Std C57.12.00-2006), existe la posibilidad de que la expansión del aceite sea mayor que la capacidad de contención del tanque y también dan como resultado una presión que hace que el dispositivo de alivio de presión opere y expulse el aceite. La pérdida de aceite también puede crear problemas con el sistema de conservación del aceite o exponer las piezas eléctricas al enfriarse.

Para los transformadores de tipo seco se tiene el estándar IEEE Std C57.12.01-2005 “IEEE Standard General Requirements for Dry-Type Distribution and Power Transformers, Including Those with Solid-Cast and/or Resin Encapsulated Windings”, en donde al igual que los transformadores rellenos de líquido el THD<sub>r</sub> no debe exceder el 5% con respecto a la fundamental. Para los límites de temperatura se tiene que el aumento de la temperatura del punto más caliente sobre la temperatura ambiente no debe exceder los valores de la tabla 5.1 y de igual manera el aumento promedio de la temperatura en los devanados no debe exceder los valores de esta tabla.

**Tabla 5.1** Límites de aumento de temperatura para los devanados de transformadores de tipo seco de tipo continuo [19]

<b>Clase de temperatura del sistema de aislamiento [°C]</b>	<b>Aumento de la temperatura del punto más caliente de los devanados [°C]</b>	<b>Aumento promedio de la temperatura de los devanados por resistencia [°C]</b>
130	90	75
150	110	90
180	140	115
200	160	130
220	180	150

La tabla 5.1 está basada en una temperatura ambiente media diaria de 30°C, con una temperatura ambiente máxima de 40°C.

Existe otra condición descrita en el estándar IEEE Std C57.110.1998, la que explica que todos los transformadores deben operar en condiciones usuales de servicio, condiciones descritas en los estándares IEEE Std C57.12.00-2006 o IEEE Std C57.12.01-2005, con excepción de aquellos transformadores de distribución con corriente de carga con contenido de armónicas, es decir, para transformadores que se encuentren ya en operación o estén destinados a suplir a cargas con corrientes no sinusoidales, para los cuales se refiere a la capacidad del transformador, donde el transformador se prevé sea capaz de suministrar una corriente de carga de cualquier contenido armónico, siempre que la pérdida de carga total, la pérdida de carga en cada devanado y la densidad de la pérdida en la región de la mayor pérdida de corriente de Foucault no exceda los niveles de carga, frecuencia nominal y las condiciones de onda sinusoidal de diseño nominal. Además, se tiene que la condición limitante es la densidad de la pérdida en la región de mayor pérdida de corriente de Foucault en la bobina; por lo tanto, esta es la base utilizada para el establecimiento de equivalencia de capacidad.

Lo que quiere decir que hay dos condiciones limitantes para saber si un transformador puede o no suministrar carga con contenido armónico, la primera es que las pérdidas totales obtenidas no superen a las pérdidas totales nominales, y la segunda es que independientemente si supera o no las pérdidas totales nominales, las pérdidas por corrientes de Foucault obtenidas no deben superar a las nominales.

### **5.2.2 CICLO DE CARGA DEL TRANSFORMADOR**

En la sección 3.4.2, se describe al ciclo de carga del transformador, que puede ser equivalente a dos intervalos, uno en el pico de demanda y otro de 12 horas antes o 12 horas después del pico de demanda, dependiendo cual sea mayor, tal como se muestra en la figura 5.1.

La línea entre-cortada de la figura 5.1 representa el ciclo de carga diaria equivalente, obtenido de las ecuaciones 3.6 y 3.7. Para ambos transformadores, el intervalo de 12 horas antes del pico de demanda resultó mayor, esto se da por

la introducción de las cocinas de inducción, que, a pesar de tener solo instaladas 12 en cada transformador, existe un aumento de la carga antes y después del mediodía debido al uso de las cocinas, que, en ciclos de carga anteriores a la introducción de las cocinas de inducción, no solía existir. Una vez obtenida la carga diaria equivalente del transformador, se deben analizar los efectos en el transformador en estos dos intervalos, y ver cuál será la condición limitante para determinar su capacidad. En los dos transformadores, los valores en el pico de demanda son más significantes que los valores de antes del pico de demanda.

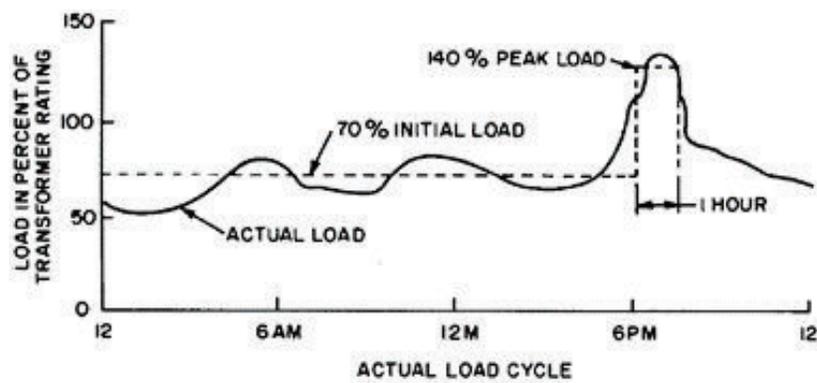


Figura 5.1 Ciclo de carga diaria equivalente del transformador

### 5.2.3 ANÁLISIS DE TRANSFORMADORES

Los dos transformadores de estudio son del tipo inmerso en líquido, por lo que se tomará en cuenta las condiciones descritas por el estándar IEEE Std C57.12.00-2006, y el estándar IEEE Std C57.110-1998. Ya que los transformadores se encuentran alimentando cargas con armónicas, se hará especial énfasis en las condiciones descritas por el estándar IEEE Std C57.110-1998.

#### 5.2.3.1 Transformador trifásico

Para el caso del transformador trifásico, en la tabla 4.5, tanto los valores de pérdidas totales y las pérdidas por corrientes de Foucault, superan a las pérdidas nominales; esto se da por la sobrecarga que existe en el transformador, mas no por la introducción de las cocinas de inducción, ya que las pérdidas por cocinas de inducción no son significantes.

Al tener sobrecarga en el transformador, las corrientes de cada línea son mayores a las corrientes nominales, lo que representa que todas las pérdidas, a excepción de las pérdidas en vacío, aumenten en magnitud. Al tener pérdidas mayores a las nominales, la temperatura superior del aceite también es mayor a la nominal. Como se vio en la sección 3.4.2.1, el  $THD_I$  es de 14,518%.

El transformador no cumple con las condiciones expuestas por los dos estándares para operar en condiciones usuales de servicio, por lo que la solución para este transformador sería sustituirlo por otro de mayor capacidad, o hacer una remodelación del circuito de bajo voltaje, transfiriendo carga hacia otro transformador cercano, y así disminuir la sobrecarga.

### **5.2.3.2 Transformador monofásico**

En el transformador monofásico, en la tabla 4.13, las pérdidas totales y las de Foucault, no sobrepasan los valores de pérdidas nominales. De igual manera la temperatura superior del aceite se mantiene bajo los valores nominales.

Este transformador cumple con las condiciones descritas por el estándar IEEE Std C57.110-1998, pero no cumple con la condición del estándar IEEE Std C57.12.01-2005 con respecto al  $THD_I$  ya que como se vio en la sección 3.4.2.2 este valor es de 15,256%. Cabe destacar que este  $THD_I$  no es causado por las cocinas de inducción, como se ha demostrado anteriormente.

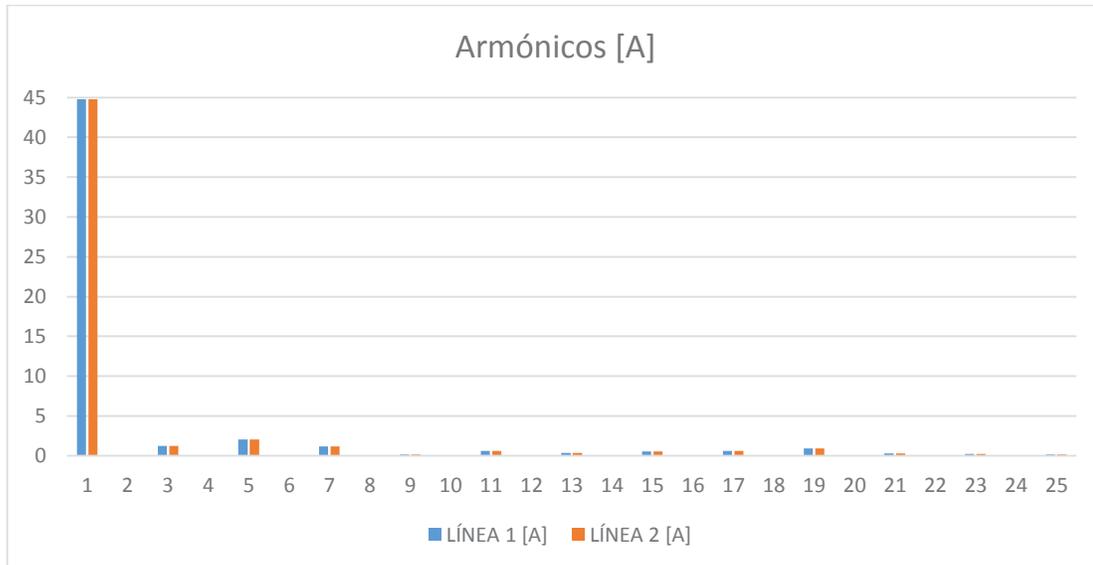
Ya que no es posible determinar cuántas cocinas de inducción en cada línea están instaladas, se usarán como ejemplos los descritos en las tablas 4.15 y 4.16, es decir, con las cocinas de inducción que se instalarían a futuro, y se calculará el TDD, término descrito en la sección 2.1.2.7, que representa la distorsión armónica con respecto a una corriente nominal, para lo cual se usará la del transformador.

Para 24 cocinas de inducción, distribuidas 12 en cada línea se tiene las corrientes armónicas de la tabla 5.2 y la figura de espectros de frecuencias 5.2, para las

cocinas de inducción Haier, y la tabla 5.3 y la figura de espectros de frecuencias 5.3, para las cocinas de inducción Midea.

**Tabla 5.2** Armónicos de 24 cocinas de inducción Haier

<b>h</b>	<b>LÍNEA 1 [A]</b>	<b>LÍNEA 2 [A]</b>
1	44,793	44,793
2	0,0492	0,0492
3	1,2566	1,2566
4	0,0306	0,0306
5	2,0689	2,0689
6	0,0357	0,0357
7	1,1422	1,1422
8	0,0217	0,0217
9	0,1547	0,1547
10	0,0227	0,0227
11	0,6106	0,6106
12	0,0174	0,0174
13	0,3416	0,3416
14	0,0238	0,0238
15	0,5556	0,5556
16	0,0198	0,0198
17	0,5879	0,5879
18	0,0205	0,0205
19	0,9358	0,9358
20	0,0285	0,0285
21	0,3152	0,3152
22	0,0184	0,0184
23	0,2303	0,2303
24	0,0165	0,0165
25	0,1381	0,1381

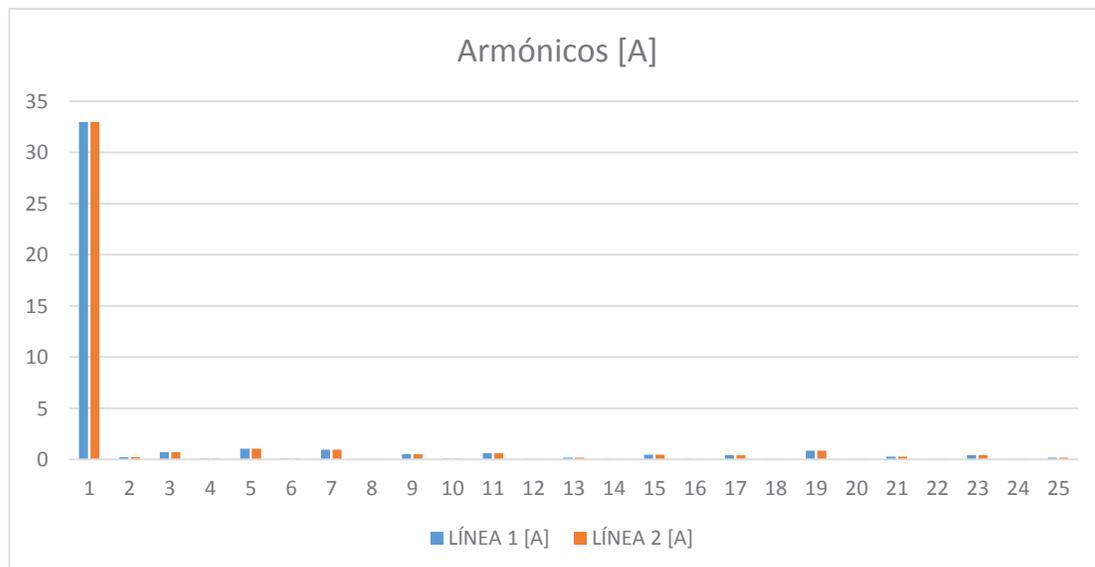


**Figura 5.2** Armónicos de corriente de 24 cocinas de inducción Haier

**Tabla 5.3** Armónicos de 24 cocinas de inducción Midea

h	LÍNEA 1 [A]	LÍNEA 2 [A]
1	32,973	32,973
2	0,2098	0,2098
3	0,7266	0,7266
4	0,0715	0,0715
5	1,0480	1,0480
6	0,0518	0,0518
7	0,9486	0,9486
8	0,0433	0,0433
9	0,4943	0,4943
10	0,0566	0,0566
11	0,6359	0,6359
12	0,0409	0,0409
13	0,1641	0,1641
14	0,0305	0,0305
15	0,4875	0,4875
16	0,0277	0,0277
17	0,4172	0,4172

h	LÍNEA 1 [A]	LÍNEA 2 [A]
18	0,0278	0,0278
19	0,8783	0,8783
20	0,0344	0,0344
21	0,2532	0,2532
22	0,0436	0,0436
23	0,4145	0,4145
24	0,0414	0,0414
25	0,1566	0,1566



**Figura 5.3** Armónicos de corriente de 24 cocinas de inducción Midea

Aplicando la ecuación 2.7 para los valores de la tabla 5.2, el TDD da como resultado 1,47%, y para los valores de la tabla 5.3, se obtiene el valor de 1,04%. Estos valores representan el contenido armónico que se reflejaría en el transformador, y se encuentran por debajo de los niveles permitidos. Actualmente hay 12 cocinas de inducción instaladas en este transformador, y están repartidas entre las dos líneas del transformador, lo que quiere decir que los valores de TDD serían menores que los obtenidos.

## CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 CONCLUSIONES

- Los armónicos de corriente producidos por las cocinas de inducción no representan un problema para los transformadores de distribución, ya que cada una cuenta con el filtrado de armónicos respectivo, que disminuyen su magnitud y efectos.
- A pesar de que las cocinas no cumplen con el  $THD_i$  de 5% que solicita el INEN, los niveles de  $THD_i$  encontrados son cercanos, o un poco altos en condiciones de baja carga, que no afectan la operación de los transformadores, ya que la energía distorsionante que fluye es también baja, tal como se muestra en los valores de TDD obtenidos en la sección 5.2.3.2, que son menos del 5% requerido por el estándar IEEE Std C57.12.00-2006.
- El transformador trifásico, analizado en campo, presenta pérdidas superiores a las nominales, pero esto se produce debido a la sobrecarga que presenta el transformador, aún antes de la inclusión de las cocinas de inducción, ya que, si se comparan los valores de pérdidas con armónicos del transformador monofásico, que no se encuentra sobrecargado, sus valores son relativamente bajos aun teniendo el mismo número de cocinas de inducción instaladas.
- Las pérdidas debidas al contenido armónico para ambos transformadores son relativamente bajas, teniendo en cuenta que las cocinas no aportan tanto contenido como el producido por los demás equipos electrónicos existentes que, al contrario de las cocinas, no cuentan con el filtrado correspondiente, lo que hace que generen más contenido armónico que las cocinas de inducción.
- Uno de los objetivos específicos de este trabajo de titulación es proponer una metodología para aliviar el efecto de las corrientes armónicas producidas por las cocinas de inducción en los transformadores de distribución, pero debido a

que las cocinas de inducción ya cuentan con el filtrado correspondiente, necesario para su correcto funcionamiento y aprobación de las normas vigentes para su óptimo desempeño, tal como se indica en la sección 5.1, no es necesario tomar medidas adicionales de corrección en cuanto a mitigación de corrientes armónicas que generan las cocinas de inducción se refiere.

- El procedimiento detallado en este trabajo de titulación, para el cálculo de los efectos en el transformador, puede ser aplicado para cualquier tipo de conexión en un transformador trifásico, y para cualquier tipo de transformador monofásico, de igual manera se puede usar cualquier tipo de distribución de corriente armónica, ya que el procedimiento es detallado de una forma general, y no de una forma específica que se limite a los dos transformadores estudiados, o a la distribución de corriente armónica de las cocinas de inducción.

## **6.2 RECOMENDACIONES**

- Se recomendó internamente en la EEQ, realizar un estudio a los transformadores sobre su capacidad, antes de seguir instalando cocinas de inducción, ya que, al ir aumentando cada vez más, los transformadores deben estar preparados para asumir la carga, o de lo contrario, tomar las debidas medidas preventivas para evitar el caso del transformador trifásico analizado.
- Al igual que la cocina de inducción, los demás equipos electrónicos deberían tener sus propias medidas preventivas para no producir tanto contenido armónico, y así causar menos efectos hacia el transformador.
- Todos los transformadores que se encuentran en funcionamiento deberían tener su “Informe de Pruebas de Transformadores en Laboratorio”, y realizando registros de carga de calidad de energía, calcular los efectos de las corrientes armónicas, para que en caso de exista alguna irregularidad, tomar las debidas medidas correctivas.

- En los registros de carga obtenidos de los transformadores, se puede apreciar el desbalance que existe entre las líneas, se debe prestar atención a esta novedad para evitar sobrecalentamiento en el neutro.

## REFERENCIAS

- [1] Salazar, G. (2013). Perturbaciones. Escuela Politécnica Nacional.
- [2] <https://steffalcaraz.wordpress.com/2014/09/24/practica-4-simulacion-de-la-operacion-del-osciloscopio-y-generador-de-funciones/>
- [3] <http://www.promax.es/esp/productos/analizadores-de-espectros-rf>
- [4] <http://getec.cl/analizadores-de-red/303-mpr63-analizador-de-red.html>
- [5] <http://www.fluke.com/fluke/eses/medidores-de-calidad-de-la-energia-electrica/registradores-de-calidad-electrica/fluke-435-series-ii.htm?pid=73939>
- [6] Chapman, S. Máquinas Eléctricas. Tercera Edición.
- [7] ON Semiconductor. (2014). Induction Cooking - Everything you need to know.
- [8] Callebaut, J. (2014). Application Note Induction Heating. European Copper Institute & Laborelec.
- [9] Esteve, V. (1999). Influencia de los componentes parásitos en el análisis y diseño de inversores resonantes paralelo para aplicaciones de calentamiento por inducción. Universidad de Valencia, Valencia-España.
- [10] Franco, C., Acero, J., Alonso, R., Sagüés, C. & Paesa, D. (2012). Inductive Sensor for Temperature Measurement in Induction Heating Applications. IEEE Sensors Journal, Vol. 12, N° 5.
- [11] Lucía, O., Acero, J., Carretero, C. & Burdío, J. (2013). Induction Heating Appliances. IEEE Industrial Electronics Magazine.

- [12] <http://www.fluke.com/fluke/eses/medidores-de-calidad-de-la-energia-electrica/registradores-de-calidad-electrica/fluke-1735.htm?pid=56028>
- [13] PowerXplorer® PX5, USER'S GUIDE.
- [14] FLUKE 1744/1743 Power Quality Logger, User's Manual
- [15] Salazar, G. (2013). Mitigación de Perturbaciones. Escuela Politécnica Nacional.
- [16] <https://es.climate-data.org/location/1012/>
- [17] Westing house (1965). Electric utility referencing book. Distribution and systems. Westinghouse, USA.
- [18] Gunther, R. The Pace of Technology Adoption is Speeding Up. Harvard Business Review. Obtenido de: <https://hbr.org/2013/11/the-pace-of-technology-adoption-is-speeding-up> (Noviembre 2015).
- [19] IEEE Std C57.12.01 (2005). IEEE Standard General Requirements for Dry-Type Distribution and Power Transformers, Including Those with Solid-Cast and/or Resin Encapsulated Windings.

## ANEXO 1: INFORMES DE PRUEBAS DE TRANSFORMADORES

A continuación, se presenta los Informes de Pruebas de Transformadores en Laboratorio de la Dirección de Distribución de la EEQ, de los transformadores estudiados.

- **TRANSFORMADOR TRIFÁSICO**



EMPRESA  
ELÉCTRICA  
QUITO S.A.

EMPRESA ELÉCTRICA QUITO S.A.  
DIRECCION DE DISTRIBUCION

Fecha 2016-12-13  
Página 1 de 3

SDI\_R\_ORD\_PTLAB

INFORME DE PRUEBAS DE TRANSFORMADORES EN LABORATORIO

SISTEMA DE  
INFORMACION DE  
DISTRIBUCION

No. Orden	5481	Movm	3
Marca	ECUATRAN	Nro. Serie	0493302
Potencia	50 KVA	Alta Tensión	22.860
Impedancia	3.44	Año de Fabricación	2002
Fase	TRIFASICO	Tipo	CONVENCIONAL
Fecha Ingreso	2010-05-28	Docto Soli	571
Nro. Empresa	E-38271	N. Docto/Proy.	UEV-RDD-09-31
Baja Tensión	210/121		
Voltaje MT	22.860		

1. RESISTENCIA ENTRE BORNES		Tap	T <sup>m</sup>	MT	H1 H2	H1 H3	H2 H3	H2 H1	H1 T
		1	21.00		114.30	114.30	114.30		Ω
BT	X0 X1 X0 X2	X0 X3	X1 X2	X2 X3	X1 X3				
	3.80	3.80	3.80	7.90	7.90	7.90	mΩ		

2. RESISTENCIA DE AISLAMIENTO T <sup>m</sup>	Medida entre:
	MT y BT: 11670.00 MΩ
	MT y T: 6540.00 MΩ
	BT y T: 6070.00 MΩ

3. RIGIDEZ DIELECTRICA DEL ACEITE NORMA ASTM D 877	Muestra	1 Descar	2 Descar	3 Descar	4 Descar	5 Descar	Promedio	PCBS
	1	38.00	40.00	38.00	37.00	41.00	38.80	KV



EMPRESA ELÉCTRICA QUITO S.A.  
DIRECCION DE DISTRIBUCION

Fecha 2016-12-13

Página 2 de 3

SDI\_R\_ORD\_PTLAB

INFORME DE PRUEBAS DE TRANSFORMADORES EN LABORATORIO

SISTEMA DE  
INFORMACION DE  
DISTRIBUCION

4. ENSAYO DE CORTOCIRCUITO-IMPEDANCIA EN VOLT.	H1	H2	H3	H1	Promedio	
	420.00	429.00	418.00		421.67	V
	1.26	1.26	1.26		1.26	A
Pérdidas (Cu):	530.00	Uz%:	3.19	T <sup>m</sup> C:	29.40	
Pérdidas referidas a 85°C:	648.00	Impedancia referida a 85°C:			3.28	

5. ENSAYO SIN CARGA-CORRIENTE DE EXCITACION	H1	H2	H3	H1	Promedio	
	121.00	121.00	121.00		121.00	V
	2.65	1.66	1.23		1.85	A
Pérdidas (Po):	291.00	Corriente Excitación:			1.34	

6. RELACION DE TRANSFORMACION-SECUENCIA DE FASES-POLARIDAD-GRUPO CONEXION								
Voltaje de alimentación:		210/121	Grupo:		DYN5	Polaridad:		
TAP	H1	R / T	H2	R / T	H3	R / T	H1	R / T
1	22806.08	188.48	22800.03	188.43	22786.72	188.32		
2	22233.75	183.75	22228.91	183.71	22215.60	183.60		
3	21667.47	179.07	21661.42	179.02	21649.32	178.92		
4	21096.35	174.35	21090.30	174.30	21078.20	174.20		
5	20525.23	169.63	20519.18	169.58	20507.08	169.48		



EMPRESA ELÉCTRICA QUITO S.A.  
DIRECCION DE DISTRIBUCION

Fecha 2016-12-13

Página 3 de 3

SDI\_R\_ORD\_PTLAB

INFORME DE PRUEBAS DE TRANSFORMADORES EN LABORATORIO

SISTEMA DE  
INFORMACION DE  
DISTRIBUCION

**Observaciones:**

EL TRANSFORMADOR ESTA EN CONDICIONES DE SER PUESTO HA EXPLOTACION

Ensayado por: Ing. Giovanni Trujillo Fecha inicio: 2010-05-18

Revisado por: Sr. Jose Espin Fecha final: 2010-05-18

Solicitado por: Ing. Augusto Curillo Estado Eq.: Bueno

- TRANSFORMADOR MONOFÁSICO



EMPRESA ELECTRICA QUITO S.A.  
DIRECCION DE DISTRIBUCION

Fecha 2016-12-12  
Pagina 1 de 3

SDI\_R\_ORD\_PTLAB

INFORME DE PRUEBAS DE TRANSFORMADORES EN LABORATORIO

SISTEMA DE  
INFORMACION DE  
DISTRIBUCION

No. Orden	6046	Movm	1
Marca	ECUATRAN	Nro. Serie	5827698
Potencia	50 KVA	Alta Tensión	22.860
Impedancia	1.5	Año de Fabricación	1998
Fase	MONOFASICO	Tipo	CONVENCIONAL
Fecha Ingreso	2014-01-21	Dcto Soli	
Nro. Empresa	E-36785	N.Dcto/Proy.	
Baja Tensión	240/120		
Voltaje MT	22.860		

1. RESISTENCIA ENTRE BORNES		Tap	T <sup>m</sup>	MT	H1 H2	H1 H3	H2 H3	H2 H1	H1 T
		1	20.00						13.39Ω
BT	X0 X1 X0 X2	X0 X3		X1 X2	X2 X3	X1 X3			
				2.90	2.20	4.80	mΩ		

2. RESISTENCIA DE AISLAMIENTO T <sup>m</sup>		Medida entre:	
		MT y BT:	648000.00 MΩ
		MT y T:	0.00 MΩ
		BT y T:	598000.00 MΩ

3. RIGIDEZ DIELECTRICA DEL ACEITE NORMA ASTM D 877		Muestra	1 Descar	2 Descar	3 Descar	4 Descar	5 Descar	Promedio	PCBS
		1	33.00	35.00	32.00	34.00	33.00	33.40	KV



EMPRESA ELECTRICA QUITO S.A.  
DIRECCION DE DISTRIBUCION

Fecha 2016-12-12  
Página 2 de 3

SDI\_R\_ORD\_PTLAB

INFORME DE PRUEBAS DE TRANSFORMADORES EN LABORATORIO

SISTEMA DE  
INFORMACION DE  
DISTRIBUCION

4. ENSAYO DE CORTOCIRCUITO-IMPEDANCIA EN VOLT.		H1	H2	H3	H1	Promedio
					176.00	V
					3.78	A
Pérdidas (Cu):	444.00	Uz%:	1.33	T <sup>m</sup> C:	20.00	
Pérdidas referidas a 85°C:		537.00		Impedancia referida a 85°C:		1.47

5. ENSAYO SIN CARGA-CORRIENTE DE EXCITACION		H1	H2	H3	H1	Promedio
					240.00	V
					2.41	A
Pérdidas (Po):		194.00		Corriente Excitación:		1.15

6. RELACION DE TRANSFORMACION-SECUENCIA DE FASES-POLARIDAD-GRUPO CONEXION								
Voltaje de alimentación: 240/120			Grupo:			Polaridad: SUSTRAC1		
TAP	H1	R/T	H2	R/T	H3	R/T	H1	R/T
1							13203.36	55.01
2							12873.36	53.64
3							12543.36	52.26
4							12212.88	50.89
5							11883.36	49.51



EMPRESA ELECTRICA QUITO S.A.  
DIRECCION DE DISTRIBUCION

Fecha 2016-12-12  
Página 3 de 3

SDI\_R\_ORD\_PTLAB

INFORME DE PRUEBAS DE TRANSFORMADORES EN LABORATORIO

SISTEMA DE  
INFORMACION DE  
DISTRIBUCION

Observaciones:

EL TRANSFORMADOR PUEDE ENTRAR EN SERVICIO.

Ensayado por: Sr. Pablo Sotomayor      Fecha inicio: 2014-01-18  
Revisado por: Sr. Jose Espin              Fecha final: 2014-01-20  
Solicitado por: Ing. Augusto Curillo      Estado Eq.: Bueno

## **ANEXO 2: REGISTROS DE CONSUMOS MENSUALES DE CLIENTES CON COCINA DE INDUCCIÓN**

Para analizar cuantos usuarios del total de inscritos en el PEC, se encontraban utilizando la cocina de inducción, se analizó los registros de consumos mensuales de cada uno de los mismos, de esta forma se logró determinar cuáles usuarios se encontraban usando la cocina, ya que sus consumos debieron aumentar en los meses posteriores a la instalación.

El color amarillo en las celdas de cada usuario representa el mes donde se encuentra registrada la fecha de instalación de la cocina en el sistema PEC.

Los registros se obtuvieron desde febrero de 2014 (02 14), hasta octubre de 2016 (10 16) para ambos transformadores, y se encuentran expresados en kWh/mes.

- **TRANSFORMADOR TRIFÁSICO**

De los 18 usuarios inscritos en el sistema PEC, se determinó que solo 12 se encuentran utilizando la cocina e inducción. Los registros se muestran en la tabla A2.1

- **TRANSFORMADOR MONOFÁSICO**

De los 16 usuarios inscritos en el sistema PEC, se determinó que solo 12 se encuentran utilizando la cocina e inducción. Los registros se muestran en la tabla A2.2.

**Tabla A2.1 Registros de consumo mensual [kWh/mes] de clientes con cocina de inducción del transformador trifásico 38271**

#	02 14	03 14	04 14	05 14	06 14	07 14	08 14	09 14	10 14	11 14	12 14	01 15	02 15	03 15	04 15	05 15	06 15	07 15	08 15	09 15	10 15	11 15	12 15	01 16	02 16	03 16	04 16	05 16	06 16	07 16	08 16	09 16	10 16		
1																					13	5	4	5	2	2	0	1	0	0	0	0	0	4	
2																																		0	45
3										1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	20	18	19	29	22	18	26	28	26	23	
4																								1	30	70	99	92	98	118	101	120	123		
5		24	27	28	28	30	27	30	31	30	27	25	34	31	31	39	46	93	90	97	96	74	73	70	63	75	81	77	81	91	90	111	103		
6	108	108	83	98	85	79	86	82	91	82	80	86	94	87	84	84	72	85	84	73	87	89	80	91	81	78	92	108	84	109	72	88	109		
7	81	85	96	98	82	75	90	86	109	76	80	103	91	88	93	114	78	96	68	99	89	69	69	102	95	70	107	92	73	81	117	148	120		
8																					150	134	143	165	142	132	149	123	130	134	119	130	123		
9	114	109	86	104	91	133	69	119	154	117	127	131	115	103	157	180	169	165	195	191	221	191	185	220	145	109	142	130	140	147	109	88	42		
10													96	1	0	64	109	143	163	138	143	125	113	163	140	130	155	155	138	128	147	142	137		
11																					0	147	200	221	164	149	168	146	149	165	149	167	157		
12																					155	139	130	144	115	125	182	142	141	155	154	192	171		
13	122	121	122	131	139	145	164	119	174	134	124	135	168	155	157	163	150	123	134	117	156	125	136	197	169	200	210	180	182	151	174	175	146		
14	176	154	136	175	149	142	174	151	162	166	145	119	133	124	145	205	206	209	208	225	257	241	231	236	222	192	248	231	242	243	220	218	201		
15	148	142	151	203	151	141	187	160	160	142	133	155	167	159	157	182	143	189	205	163	186	243	199	236	209	237	332	281	293	249	238	307	318		
16	237	233	204	250	251	251	273	251	261	247	237	262	261	239	242	271	267	284	296	296	325	256	257	272	242	223	285	262	272	290	263	320	293		
17	129	127	150	166	142	147	194	193	199	191	197	204	223	187	218	228	210	236	242	219	247	228	234	261	214	215	337	266	261	292	282	357	342		
18						1	0	58	181	203	222	307	314	280	326	359	336	303	312	299	275	258	272	308	367	1196	682	291	308	314	332	373	374		

**Tabla A2.2 Registros de consumo mensual [kWh/mes] de clientes con cocina de inducción del transformador monofásico 36785**

#	02 14	03 14	04 14	05 14	06 14	07 14	08 14	09 14	10 14	11 14	12 14	01 15	02 15	03 15	04 15	05 15	06 15	07 15	08 15	09 15	10 15	11 15	12 15	01 16	02 16	03 16	04 16	05 16	06 16	07 16	08 16	09 16	10 16	
1						86	106	54	93	51	54	59	77	45	53	64	73	24	21	44	17	78	23	53	48	62	63	50	49	57	32	30	118	
2	131	206	212	166	256	50	171	156	65	306	197	203	192	143	123	75	60	45	28	69	57	43	61	76	79	66	156	102	72	69	71	52	60	
3											34	0	0	0	0	1	3	2	5	6	74	82	81	98	88	77	79	53	102	111	106	117	101	
4	0	0	0	1	0	0	0	3	2	1	101	127	99	90	92	114	109	100	132	101	14	2	0	8	92	8	3	43	212	207	213	237	205	
5	27	16	75	66	39	40	26	14	81	127	104	86	104	95	129	131	123	126	132	110	71	97	110	117	139	114	147	133	106	111	149	165	159	
6	84	64	49	54	41	45	43	32	39	36	31	34	34	35	20	91	65	80	57	80	142	117	113	145	161	151	174	171	222	195	136	214	170	
7	117	125	127	132	100	82	92	86	164	102	140	131	101	216	32	147	143	161	167	159	165	150	153	203	193	183	181	180	209	181	207	229	170	
8										418	302	197	185	201	175	178	196	162	171	172	171	159	150	176	193	166	143	173	162	166	170	153	165	163
9	175	126	114	102	96	117	131	137	172	154	156	177	156	143	170	221	177	177	173	174	206	169	169	248	200	165	187	149	158	195	228	190		
10										188	213	175	191	228	211	185	165	171	156	161	154	168	169	189	204	195	158	199	184	157	181	153	198	228
11	59	11	135	87	73	72	75	94	84	63	72	104	87	77	72	123	226	240	222	222	271	244	189	234	201	217	222	193	198	235	178	201	228	
12	106	92	106	110	110	104	95	106	166	189	182	139	258	183	176	202	192	194	205	178	216	199	196	241	251	230	273	249	243	274	253	267	195	
13	328	310	321	335	334	319	319	332	373	371	328	395	368	328	341	395	391	468	389	366	269	297	320	357	249	186	192	169	172	202	179	190	176	
14	14	18	0	0	0	1	31	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	1	244	270	330	341	289	288	342	321	302	315	305	300	284		
15	145	147	156	186	172	185	195	227	263	232	221	367	270	237	264	260	242	252	259	260	306	242	260	298	281	291	342	267	294	276	302	362	309	
16						329	277	247	277	264	237	271	271	253	246	302	356	293	225	267	197	212	203	194	265	279	333	329	306	315	285	290		