

**REVISIÓN DEL IMPACTO DE LAS CARGAS NO LINEALES EN LOS  
TRANSFORMADORES DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA**

**JAIRO VASQUEZ CABALLERO  
MARLON ANDRES SUAREZ SILVA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA  
BUCARAMANGA  
2018**

**REVISIÓN DEL IMPACTO DE LAS CARGAS NO LINEALES EN LOS  
TRANSFORMADORES DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA**

**JAIRO VASQUEZ CABALLERO  
MARLON ANDRES SUAREZ SILVA**

**Monografía presentada para optar el título de Especialista en Sistemas de  
Distribución de Energía Eléctrica**

**Director:  
GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA  
Doctor en Ingeniería Eléctrica**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA  
BUCARAMANGA  
2018**

## DEDICATORIA

*A Dios por permitirme estar vivo y con salud para alcanzar este logro*

*A mi Mamá María Teresa y a Mi abuela Eliana; mis primeros mentores, por enseñarme que la herencia más importante que un padre puede dejarle a su hijo es el estudio.*

*Al amor de mi vida Yuly Paulín por amarme tanto, por ser uno de los motores de mi vida, por su sinceridad, y por qué siempre me desea lo mejor de la vida.*

*A mi amigo Jairo Vásquez, por su dedicación y entusiasmo para la realización de este trabajo.*

**Marlon Andrés Suarez Silva**

*A mi madre María Celia, mi hermana Carmen y mi familia con mucho amor y cariño les dedico todo mi esfuerzo.*

*Gracias a mi esposita querida Rosita y gracias a ellos por sus buenos consejos y palabras de aliento para seguir adelante y conseguir esta nueva meta, este logro los comparto con todos ustedes.*

*También por el tiempo compartiendo esta experiencia y conocimientos a mi compañero y amigo e Ingeniero Marlon Andrés y su familia por la confianza que me brindo durante la etapa de estudio.*

**Jairo Vásquez Caballero**

## **AGRADECIMIENTOS**

*Al ing. Jairo Vásquez Caballero, compañero de monografía y gran amigo. Por su dedicación y entrega para culminar este proyecto.*

*A la Universidad Industrial de Santander, y al programa de especialización de sistemas de distribución de energía eléctrica, a los profesores, por guiarnos exigirnos para que cada uno de los estudiantes aprenda.*

*Al ingeniero Gabriel Ordóñez Plata, que, como director de monografía, siempre estuvo presto a resolver inquietudes y sugerir correcciones.*

*Al ingeniero Cesar A. Duarte Gualdrón, que, como evaluador de la monografía, estuvo guiándonos y aconsejándonos mejorar este proyecto.*

**Marlon Andrés Suarez Silva**

Dios, tu amor y bondad no tiene fin, me permite sonreír ante todos por este nuevo logro que son un resultado de tu ayuda celestial.

*A mi madre, mi familia y mi esposita querida Rosita, por su apoyo incondicional y por demostrarme la gran fe que tiene en mí.*

Le agradezco a mi Institución la UIS y a mis maestros e ingenieros y mis formadores *Gabriel Ordóñez Plata y Cesar A. Duarte Gualdrón por sus esfuerzos y dedicación, personas de gran ayuda, por su valiosa guía y asesoramiento en la misma y culminar con gran éxito para que finalmente pudiera graduarme en esta nueva meta*

*A Marlon Andrés, por haber logrado nuestro objetivo con mucha perseverancia y por demostrarme que podemos ser grandes amigos y compañeros de trabajo a la vez.*

Jairo Vásquez Caballero

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	16
1. MARCO TEÓRICO .....	19
1.1 GENERALIDADES DEL SISTEMA ELÉCTRICO COLOMBIANO .....	19
1.2 CLASIFICACIÓN DE REDES EN COLOMBIA .....	22
1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS USUARIOS DEL SERVICIO DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	23
1.4 MARCO REGULATORIO.....	26
1.4.1 Ley 142 de 1994 (ley de los servicios públicos domiciliarios) .....	28
1.4.2 Ley 143 de 1994 (Ley eléctrica).....	28
1.4.3 Resolución CREG 070 de 1998.....	28
1.4.4 Resolución de CREG 024 de 2005 .....	29
1.4.5 Resolución CREG 016 de 2007 .....	29
1.4.6 Resolución CREG 096 de 2000.....	30
1.4.7 Resolución CREG 011 de 2009.....	30
1.4.8 Resolución CREG 065 de 2012.....	31
1.4.9 IEEE 519/2014.....	31
1.4.10 NTC 1358 Protocolo de pruebas para transformadores. ....	32
1.4.11 NTC 317 Electrotecnia. transformadores de potencia y distribución. terminología. ....	32
2. CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA. ....	33
2.1 IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS USUARIOS DEL SERVICIO ELÉCTRICO DE ENERGÍA SUCEPTIBLES DE INTRODUCIR Y GENERAR PERTURBACIONES EN EL SISTEMA ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN. ....	36

2.2 INFLUENCIA DE LA DISTORSIÓN DE LAS SEÑALES DE TENSIÓN Y CORRIENTE EN LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN. ....	42
2.3 EFECTOS PERJUDICIALES DE LAS CARGAS NO LINEALES EN LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN.....	59
2.3.1 Pérdidas totales de potencia en un transformador.....	62
2.3.2 Cálculo de la disminución de la vida útil de los transformadores.....	65
2.3.3 Análisis de la disminución de la vida útil de transformadores de distribución.....	66
2.4 CARACTERÍSTICAS Y ANÁLISIS DE NUEVOS DISEÑOS O CONSTRUCCIÓN DE TRANSFORMADORES PARA CONEXIÓN DE CARGAS NO LINEALES. ....	75
2.4.1 Diseño de transformadores y técnicas para la mitigación de componentes armónicas .....	76
2.4.2 Diseño y ejemplo de construcción de transformador con factor K .....	76
2.4.3 Degradación de la potencia nominal de un transformador estándar .....	85
2.4.4 Bloqueo con transformador Zig Zag.....	86
2.4.5 Técnica para sobredimensionamiento del neutro .....	87
2.4.6 Tecnología de transformador DTZ .....	87
2.4.7 Transformadores de aislamiento.....	89
2.4.8 Rediseño de sistemas de distribución.....	90
2.4.9 Elección del equipo más adecuado para mejorar la calidad de la energía eléctrica de un sistema de distribución .....	90
3. CONCLUSIONES. ....	92
BIBLIOGRAFÍA .....	94

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Equipos electrónicos con un rectificador monofásico y filtro capacitivo. ...	41
Tabla 2. Carga incurrida no lineal y armónica.....	42
Tabla 3. Características de los transformadores de distribución en estudio para medición de calidad de energía. ....	67
Tabla 4. Distorsión armónica para las cargas del transformador comparado con los límites estándar .....	70
Tabla 5 Cargas con factor K. ....	77
Tabla 6. Tabla con factor K. para diferentes tipos de cargas.....	79
Tabla 7. Ejemplo de diseño y selección de transformador con factor K-13 caso 1	82
Tabla 8. Ejemplo de diseño y selección de transformador con factor K-4 CAS0 2	83

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Sistema de energía eléctrica .....	20
Figura 2. Clasificación de redes en Colombia.....	23
Figura 3. Rectificador.....	39
Figura 4. Horno de arco .....	39
Figura 5. Soldador .....	40
Figura 6. Motor de inducción.....	40
Figura 7. Motor de inducción.....	41
Figura 8. Transformador trifásico tipo seco- analizado en artículo.....	45
Figura 9. Diagrama de potencia para los tres tipos de carga.....	46
Figura 10. Parámetros de placa del transformador tipo seco objeto de análisis ....	47
Figura 11. Temperatura en la superficie de las bobinas del transformador de tipo seco Alimentación del tipo de carga 1 .....	48
Figura 12. Temperatura en la superficie del núcleo del transformador de tipo seco. Alimentación del tipo de carga 1 .....	48
Figura 13. Temperatura en la superficie de las bobinas del transformador tipo seco Alimentación del tipo de carga 2 .....	49
Figura 14. Temperatura en la superficie del núcleo del transformador tipo seco. Alimentación del tipo de carga 2 .....	50
Figura 15. Temperatura en la superficie de las bobinas del transformador tipo seco Alimentación del tipo de carga 3 .....	51
Figura 16. Temperatura en la superficie del núcleo del transformador tipo seco. Alimentación del tipo de carga 3 .....	51
Figura 17. Curva de variación de la temperatura promedio de las bobinas del transformador bajo carga tipo1, 2 y 3 .....	52

Figura 18. Formas de onda de la tensión y corriente en el lado secundario del transformador tipo seco cuando se conecta la carga tipo 1 .....	53
Figura 19. Temperaturas en la superficie de los devanados (izquierda) y núcleo del transformador (derecha) cuando se conecta la carga tipo 1 .....	53
Figura 20. Formas de onda de la tensión y corriente en el lado secundario del transformador tipo seco cuando se conecta la carga tipo 2.....	54
Figura 21. Temperaturas en la superficie de los devanados (izquierda) y núcleo del transformador (derecha) cuando se conecta la carga tipo 2.....	54
Figura 22. Formas de onda de la tensión y corriente en el lado secundario del transformador tipo seco cuando se conecta la carga tipo 3.....	55
Figura 23. Temperaturas en la superficie de los devanados (izquierda) y núcleo del transformador (derecha) cuando se conecta la carga tipo 3 .....	56
Figura 24. Porcentaje de error entre las mediciones de temperatura del transformador tipo seco con los tres tipos de carga, con relación a los valores obtenidos en simulación. ....	57
Figura 25. Ciclo de carga diaria en los dos transformadores analizados.....	71
Figura 26. Vida útil del transformador versus carga en presencia de armónicos utilizando datos medidos para el caso 1 (THD= 51,91%) .....	72
Figura 27. Vida útil del transformador versus carga en presencia de armónicos utilizando datos medidos para el caso 2 (THD= 18,36 %) .....	73
Figura 28. Vida útil del transformador versus carga utilizando el límite máximo IEC TR 61000-34:1998 .....	74
Figura 29. Ficha técnica Transformador NL y NLP para cargas no lineales .....	80
Figura 30. Transformador o bobina conexión Zigzag.....	87
Figura 31. Principio de la gran impedancia.....	89

## RESUMEN

**TÍTULO:** REVISIÓN DEL IMPACTO DE LAS CARGAS NO LINEALES EN LOS TRANSFORMADORES DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA\*

**AUTORES:** JAIRO VASQUEZ CABALLERO  
MARLON ANDRES SUAREZ SILVA\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Cargas no lineales, componentes armónicas, series de Fourier, transformadores de distribución, calidad de energía, filtro, diseño.

### DESCRIPCIÓN:

Las últimas tres décadas, debido al avance tecnológico ha habido una expansión y aumento elevado en la proliferación de cargas no lineales, lo cual en múltiples casos ha generado una mala calidad de energía en los sistemas de distribución de energía eléctrica.

Para contribuir a un mayor conocimiento, en esta monografía se estudian los diferentes tipos de usuarios y cargas sensibles que afectan directamente a la fuente, equipo o transformador de distribución, los cuales producen perturbaciones en las ondas de tensión y corriente del sistema de energía eléctrica, afectando el concepto de “Calidad de Energía Eléctrica”

Por todo esto, el problema de las cargas no lineales desmejora las condiciones eléctricas de suministro de energía, produciendo en algunos casos alteraciones o daños en los equipos, que disminuyen su vida útil y pueden llegar a ocasionar pérdidas económicas en los procesos.

Basado en lo anterior, en esta monografía, se revisa el marco regulatorio establecido, se identifican los diferentes efectos nocivos y consecuencias que afectan al transformador de distribución, se describen técnicas de diseño o construcción de transformadores más comunes con sus características para minimizar pérdidas de energía.

Por último, se compara dos casos, basados en la medición de parámetros de la calidad de la energía eléctrica, concluyendo con posibles soluciones o recomendaciones para reducir del impacto de las cargas no lineales en los sistemas de distribución de energía eléctrica.

---

\* Monografía

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Especialización en Sistema de Distribución de Energía Eléctrica. Director: Ingeniero Electricista Doctor Ingeniero Industrial en Ingeniería Eléctrica, Gabriel Ordóñez Plata

## SUMMARY

**TITLE:** REVISION OF THE IMPACT OF NON-LINEAR LOADS ON THE TRANSFORMERS OF THE ELECTRICITY DISTRIBUTION SYSTEMS\*

**AUTHORS:** JAIRO VASQUEZ CABALLERO  
MARLON ANDRÉS SUAREZ SILVA\*\*

**KEYWORDS:** Non-linear loads, harmonic components, Fourier series, distribution transformers, energy quality, filter, design.

### DESCRIPTION:

In the last three decades, due to technological progress, there has been an expansion and a high increase in the proliferation of non-linear loads, which in many cases has generated a poor quality of energy in electric power distribution systems.

To contribute to a greater knowledge, this monograph studies the different types of users and sensitive loads that directly affect the source, equipment or distribution transformer, which produce disturbances in the voltage and current waves of the electric power system, affecting the concept of "Electric Power Quality".

Due to all this, the problem of non-linear loads deteriorates the electrical conditions of energy supply, producing in some cases alterations or damages in the equipment, which diminish its useful life and can end up causing economic losses in the processes.

Based on the above, in this monograph, the established regulatory framework is reviewed, the different harmful effects and consequences affecting the distribution transformer are identified, design techniques or construction of more common transformers with their characteristics are described to minimize energy losses.

Finally, two cases are compared, based on the measurement of parameters of the quality of the electrical energy, concluding with possible solutions or recommendations to reduce the impact of the non-linear loads in the electric power distribution systems

---

\* Monografía

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Especialización en Sistema de Distribución de Energía Eléctrica. Director: Ingeniero Electricista Doctor Ingeniero Industrial en Ingeniería Eléctrica, Gabriel Ordóñez Plata

## INTRODUCCIÓN

A medida que avanza el tiempo se incrementa el consumo de energía eléctrica. La industria demanda mayor energía eléctrica y la población aumenta. Por lo tanto, su consumo también lo hace. Adicionalmente, surgen nuevas tecnologías y a su vez nuevos retos para los agentes del mercado, que cada día se enfrentan a numerosos problemas inherentes al progreso y evolución. Tal es el caso de las cargas no lineales que generan corrientes distorsionadas; que al ser modeladas como una Serie de Fourier, además de la componente fundamental tiene otras componentes llamadas componentes armónicas.

Es sabido que la distorsión de las señales de tensión y corriente incrementan los niveles de cargabilidad de los dispositivos y líneas de los sistemas de distribución de energía eléctrica por el incremento de su valor eficaz.

“En estos últimos tiempos se ha observado un significativo incremento de las averías en los transformadores de distribución, los tópicos y las exigencias para los cálculos a la hora de evaluar cuál es el transformador más apropiado para instalarse siguen manteniéndose (la carga declarada sumatoria de los usuarios, el factor de potencia, consumo de los servicios públicos de iluminación, pérdidas en general, etc.). Ese comportamiento sin duda llamativo da a entender que ha ido apareciendo o se ha vuelto considerable un fenómeno que anteriormente no era considerable e incluso despreciable”.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> RUGGERO RÍOS B, SÁNCHEZ QUINTANA ME “Incidentes Nonlinear load distribution transformer” 2014 Revista científica de la UCSA, Universidad del cono sur de las Américas. Asunción, Paraguay

Particularmente, en el caso de los transformadores, las afectaciones por las distorsiones de las señales de tensión y corriente tienen gran relevancia. Dado que la distorsión de las señales del transformador en su interior incrementa el valor de sus pérdidas de magnetización y de pérdidas térmicas, deteriorando de manera rápida la vida útil del transformador <sup>2</sup>.

Estas distorsiones producen efectos sobre el sistema de potencia mismo, efectos sobre la carga del consumidor, etc. Por normatividad se han establecidos unos indicadores que permiten establecer que cuando se exceden sus valores límites, las pérdidas económicas y técnicas aumentan por encima de los límites establecidos como aceptables por los diferentes agentes que participan en la operación y utilización de los sistemas de energía eléctrica, dando como resultado final un problema en la calidad de la energía eléctrica con base en la forma de onda y la confiabilidad del sistema.

El problema inicial radica en que los diseños de los transformadores estaban sometidos generalmente a cargas sin mayores distorsiones. Sin embargo, desde hace unos 25 años con el incremento de las cargas no lineales del sector industrial y residencial los diseños no se ajustan lo suficiente a la realidad y las pérdidas de energía eléctrica en los transformadores se incrementan.

La distorsión de las señales en los sistemas de distribución tiene aumento significativo debido al uso generalizado de cargas no lineales y/o variantes en el tiempo tanto monofásicas como trifásicas. La distorsión de las señales de corriente y de tensión deteriora la calidad de la energía suministrada por los alimentadores, reduciendo la eficiencia y algunas veces afectan la operación de los equipos conectados a la red eléctrica. En esta monografía se realizará una revisión de los

---

<sup>2</sup> SILVA D. C. L., SOUSA R. H., LIMA F. K. A. and BRANCO C. G. C., "Contributions to the study of energy efficiency in dry-type transformer under nonlinear load," 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, 2015, pp.456-461. doi: 10.1109/ISIE.2015.7281511

efectos de las distorsiones de las señales de tensión y corriente en los transformadores, para establecer las consecuencias negativas que pueden causar el incremento de las cargas no lineales y/o variantes en el tiempo.

## **1. MARCO TEÓRICO**

En Colombia el sector eléctrico ha sido desagrupado en generación, transmisión, red de distribución y comercialización desde que se llevaron a cabo las reformas del sector eléctrico en 1994 y el suministro eléctrico en Colombia depende del Sistema Interconectado Nacional SNI, que cubre las dos terceras partes restantes del territorio nacional. El mercado eléctrico en Colombia tiene segmentos regulados y no regulados. El mercado regulado, que es directamente contratado y servido por compañías de distribución, abarca usuarios industriales, comerciales y residenciales con demandas de energía inferiores a 0.1 MW y el mercado no regulado, los consumidores con demandas de energía superiores a 0.1 MW pueden negociar y contratar libremente su suministro en el mercado mayorista.

La estructura del mercado energético colombiano se basa en las Leyes 142 (Ley de Servicios Públicos) y 143 (Ley de Electricidad) de 1994. El Ministerio de Minas y Energía es la principal institución del sector energético de Colombia. Dentro del Ministerio, UPME (Unidad de Planificación de Minería y Energía) es responsable del estudio de los futuros requerimientos de energía y escenarios de suministro, así como de la elaboración del Plan Nacional de Energía y Plan de Expansión.

### **1.1 GENERALIDADES DEL SISTEMA ELÉCTRICO COLOMBIANO**

El sistema eléctrico colombiano está conformado por 4 actividades (Generación, Transmisión, Distribución y Comercialización). Para que las personas puedan contar con el servicio de energía eléctrica de forma inmediata cuando la requieran es necesario efectuar una serie de procesos:

Producir la energía eléctrica (Generación).

Transportar la energía eléctrica (Transmisión y distribución).

Compra y venta de energía (comercialización).

En un sistema eléctrico (sistema de potencia), la energía eléctrica realiza un recorrido complejo desde los lugares donde se produce, pasando por diferentes etapas de transporte y transformación, hasta llegar finalmente a los centros de consumo donde es utilizada (ver Figura 1) <sup>3</sup>.

A continuación, se realiza una descripción de cada una de los procesos que se consideran en el sector eléctrico colombiano relacionados con la energía eléctrica.

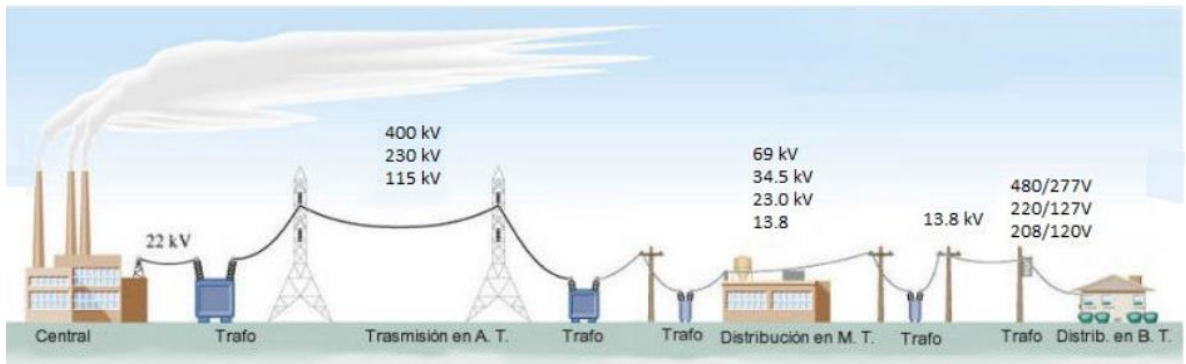
**Generación:** consiste en producir electricidad mediante la utilización de diferentes fuentes de energía, como el agua, el gas, el viento, el sol, los combustibles, entre otras. Esta actividad se realiza en centrales hidráulicas, en plantas térmicas y parques eólicos, de acuerdo con la fuente que se use. Actualmente en Colombia entre el 60 y el 80% de la energía se produce en centrales hidráulicas, y el resto plantas térmicas que usan como combustible: carbón, gas, y diésel, principalmente <sup>4</sup>.

### Figura 1. Sistema de energía eléctrica

---

<sup>3</sup> COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, Resolución CREG 015 de 2018, Por la cual se establece la metodología para la remuneración de la actividad de distribución de energía eléctrica en el sistema interconectado nacional. enero 29 de 2018 [en línea] disponible en: [http://apolo.creg.gov.co/publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/65f1aaf1d57726a90525822900064dac/\\$FILE/Creg015-2018.pdf](http://apolo.creg.gov.co/publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/65f1aaf1d57726a90525822900064dac/$FILE/Creg015-2018.pdf).

<sup>4</sup> Ibíd.



Fuente: RESEARCHGATE Estructuras y equipos de Subestaciones Eléctricas - Scientific Figure on ResearchGate. [en línea] disponible en: [https://www.researchgate.net/Figura-1-Sistema-de-generacion-transmision-subtransmision-y-distribucion-de-energia\\_fig1\\_303543292](https://www.researchgate.net/Figura-1-Sistema-de-generacion-transmision-subtransmision-y-distribucion-de-energia_fig1_303543292) [accessed 18 Oct, 2018]

**Transmisión:** consiste en transportar la energía eléctrica desde las centrales de generación hasta los grandes centros de consumo a través de cables que son sostenidos por torres con características especiales, que permiten llevar grandes cantidades de energía en largas distancias por todo el país. El conjunto de elementos y equipos con los que se realiza este proceso se denomina en Colombia el sistema de transmisión nacional STN <sup>5</sup>.

**Distribución:** consiste en transportar la energía desde los grandes centros de consumo hasta las instalaciones del consumidor final. Se hace mediante cables sostenidos por estructuras de menor tamaño que en el STN, los cuales llevan menores cantidades de energía a través de una misma región para luego distribuirla en pequeñas cantidades para el consumo de cada usuario. El conjunto de elementos que componen este sistema se denominan sistemas de Transmisión Regional (STR) y de Distribución Local (SDL) <sup>6</sup>.

<sup>5</sup> Ibíd.

<sup>6</sup> Ibíd.

**Comercialización:** proceso de comprar grandes cantidades de energía a los productores para venderla a los usuarios o a otras empresas del sector. Los usuarios tienen relación con el comercializador por ser el encargado de la facturación y quien los representa ante los demás agentes de la cadena de prestación del servicio <sup>7</sup>.

## 1.2 CLASIFICACIÓN DE REDES EN COLOMBIA

Adicionalmente, para la interpretación de las definiciones citadas previamente, se deben considerar los niveles de tensión definidos en la resolución CREG 098 de 2008 en mención:

“Niveles de tensión. Los sistemas de Transmisión Regional y/o Distribución Local se clasifican por niveles, en función de la tensión nominal de operación, según la siguiente definición <sup>8</sup>:

**Sistema de Distribución Local (SDL):** Por lo general se alimenta del sistema STR y distribuye la energía a poblaciones o áreas más pequeñas, lo conforman las redes, subestaciones y equipos con tensiones inferiores a 57,5 kV. Este a su vez se divide en tres niveles: Nivel 3, 2 ,1.

Nivel 4: Sistemas con tensión nominal mayor o igual a 57,5 kV y menor a 220 kV.

Nivel 3: Sistemas con tensión nominal mayor o igual a 30 kV y menor de 57,5 kV.

Nivel 2: Sistemas con tensión nominal mayor o igual a 1 kV y menor de 30 kV.

Nivel 1: Sistemas con tensión nominal menor a 1 kV.”

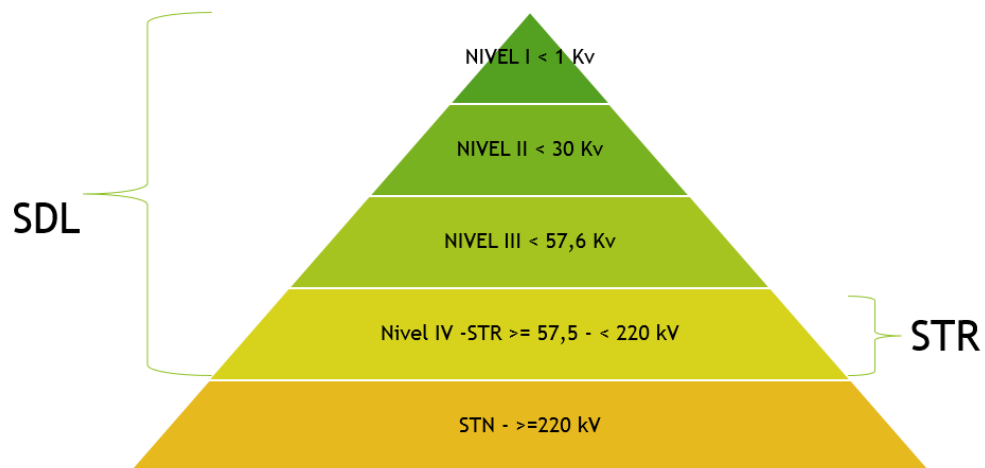
---

<sup>7</sup> Ibíd.

<sup>8</sup> COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA Resolución CREG 098 de 2008, Por la cual se aprueban los principios generales y la metodología para el establecimiento de los cargos por uso de los Sistemas de Transmisión Regional y Distribución Local, 26 de septiembre de 2008 [en línea] disponible en: <http://apolo.creg.gov.co/publicac./rensf/indice01solucion-2008-creg097-2008>

Los dos primeros niveles (1 y 2), baja y media tensión, se denominan sistemas de distribución Local, SDL, y el tercer nivel corresponde a los sistemas de transmisión regional, STR también del SDL. El nivel 4 corresponde a los sistemas de transmisión nacional. La Figura 2 muestra la clasificación de los niveles de tensión del sector eléctrico colombiano.

**Figura 2. Clasificación de redes en Colombia**



Fuente: JIMÉNEZ RIVERA Baisser Antonio Presentación metodología de la expansión

### **1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS USUARIOS DEL SERVICIO DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

La Ley 142 de 1994 únicamente se ocupó de la estratificación de los usuarios residenciales, sin entrar a definir nada respecto de los usos de los distintos servicios, tales como el comercial e industrial. Ha sido por vía reglamentaria o regulatoria en cada uno de los servicios públicos domiciliarios como se han hecho algunas precisiones sobre la materia, así como también a través de los contratos de condiciones uniformes de cada empresa.

El Decreto 229 de 2002, por el cual se modifica el Decreto 302 de 2000 que reglamentó la Ley 142 de 1994 en lo que tiene que ver con la prestación de los servicios de acueducto y alcantarillado, adoptó las siguientes definiciones:

**Servicio comercial:** Es el servicio que se presta a predios o inmuebles destinados a actividades comerciales, en los términos del Código de Comercio.

**Servicio residencial:** Es el servicio que se presta para el cubrimiento de las necesidades relacionadas con la vivienda de las personas.

**Servicio especial:** Es el que se presta a entidades sin ánimo de lucro, previa solicitud a la empresa y que requiere la expedición de una resolución interna por parte de la entidad prestadora, autorizando dicho servicio.

**Servicio industrial:** Es el servicio que se presta a predios o inmuebles en los cuales se desarrollen actividades industriales que corresponden a procesos de transformación o de otro orden.

Por otra parte, la Resolución CREG-108 de 1997, en su artículo 18, estableció que el servicio público domiciliario de energía eléctrica, se prestará bajo la modalidad de **residencial o no residencial**; el residencial es aquel que se presta directamente a los hogares o núcleos familiares, incluyendo las áreas comunes de los conjuntos habitacionales, y el servicio no residencial es el que se presta para otros fines.

A su vez, en su párrafo 3o., se dispuso que los usuarios no residenciales se clasificarán de acuerdo con la última versión vigente de la “Clasificación Industrial Internacional Uniforme de Todas las Actividades Económicas” (CIIU) de las Naciones Unidas, exceptuando a los suscriptores o usuarios oficiales, especiales (según la Ley 142 de 1994, artículo 89.7 y la Ley 286 de 1996. En artículo 5º, se consideran usuarios especiales los hospitales, clínicas, puestos y centros de salud,

y los centros educativos y asistenciales sin ánimo de lucro), y las zonas francas, los cuales se clasificarán en forma separada.

Corresponde a las empresas que prestan el servicio de energía eléctrica, clasificar a los usuarios no residenciales en industriales o comerciales, teniendo en cuenta, según la Resolución CREG-108 de 1997, la última versión vigente de la “Clasificación Industrial Internacional Uniforme de Todas las Actividades Económicas” (CIIU) de las Naciones Unidas. Dentro de esta clasificación existen dos tipos de usuarios: regulados y no regulados

- **USUARIO NO REGULADO:**

Es un consumidor que gracias a superar un nivel límite de consumo, puede negociar libremente la tarifa de suministro de energía eléctrica con el comercializador que desee. A este usuario se le llama No Regulado precisamente porque sus tarifas no están reguladas por la Comisión de Regulación de Energía y Gas -CREG- sino que son acordadas mediante un proceso de negociación entre el consumidor y el comercializador.

La CREG por medio de resoluciones establece los límites mínimos de consumo necesarios para acceder a esta condición. Dichos límites al inicio del mercado se ubicaban en 2 MW, pasaron a 1 MW en 1997. A partir de 1998 se introdujeron los límites en energía además de los de potencia, este año los límites se ubicaron en 0,5 MW en potencia y 270 MWh-mes en energía.

Actualmente, para ser considerado Usuario No Regulado se requiere tener una demanda promedio mensual de potencia durante seis meses, mayor a 0,1 MW, o en energía de 55 MWh-mes en promedio durante los últimos 6 meses. La demanda que estos usuarios representan se ha venido incrementando paulatinamente en el

tiempo, llegando a representar en la actualidad alrededor del 25% de la demanda total del sistema nacional, considerado como grandes consumidores.

#### **1.4 MARCO REGULATORIO**

Las primeras cargas no lineales llegaron a ser los transformadores de potencia debido a su característica intrínseca no lineal cuando funcionan cerca de los límites de saturación del núcleo. Luego de la aparición de los dispositivos de estado sólido, el número de cargas no lineales que distorsionaban las señales de corriente y tensión del sistema eléctrico han ido creciendo exponencialmente, hasta el punto de obligar a la existencia de una norma que las regule y que haga que tanto consumidores como proveedores del servicio eviten una distorsión excesiva de las señales de tensión y corriente.

“La normatividad para limitar la proliferación de las corrientes armónicas en los sistemas de distribución eléctrica en la actualidad se le ha brindado mayor importancia debido al gran incremento de cargas no lineales aunado al incremento en la demanda de la calidad de energía en la red eléctrica de distribución” <sup>9</sup>]. Dentro de las normativas registradas a nivel mundial, la mayoría son de organizaciones tales como el IEEE en EUA ó IEC a nivel mundial. Dentro de los estándares o normas que rigen o recomiendan estos niveles están: “IEEE Guide for Harmonic Control” publicado en 1979, “IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems IEEE 519-1992” <sup>10</sup>.

---

<sup>9</sup> COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA Resolución CREG 108 de 1997. Por la cual se señalan criterios generales sobre protección de los derechos de los usuarios de los servicios públicos domiciliarios de energía eléctrica y gas combustible por red física, en relación con la facturación, comercialización y demás asuntos relativos a la relación entre la empresa y el usuario, y se dictan otras disposiciones., julio 3 de 1997. 2008 [en línea] disponible en: <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/Indice01/Resoluci%C3%B3n-1997-CR108-97>.

<sup>10</sup> SILVA Miguel Ángel y ORDÓÑEZ PLATA Gabriel, “Calidad de la energía eléctrica: Diseño y construcción de un prototipo como alternativa para la monitorización de interrupciones y caídas de

“De cualquier forma, estos impresos están dirigidos hacia la limitación de la distorsión armónica de los consumidores, en función del tamaño relativo de la carga y la distorsión del suministro de potencia, proporcionando niveles de distorsión basados en la tensión de utilización. Los límites impuestos al usuario deben referirse a distorsiones máximas permisibles en la onda de la corriente” <sup>11</sup>.

Dentro de la normativa propuesta por la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI o IEC) relacionada con la distorsión de las señales de tensión y corriente se destacan las siguientes: “IEC 55-2 “ Norma aprobada en el año de 1991, para limitar las corrientes armónicas en equipos de línea menores a 16 A. “IEC 61000-3-4” en 1998, la cual está enfocada a limitar las corrientes armónicas en equipos con corrientes mayores de 16 A. “IEC 61000-3-2”, en enero 2001, la cual establece los límites para emisiones armónicas para equipos con 16 A por fase como máximo” <sup>12</sup>. Además de estas normas en esta comisión se ha establecido la serie 61000 para abordar todas las temáticas relacionadas con la medición, límites, mitigación de la distorsión de las señales de tensión y corriente en un sistema eléctrico.

En Colombia, a partir del año 1994, las Leyes 142 y 143, Ley de Servicios Públicos Domiciliarios y Ley Eléctrica respectivamente otorga a la COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA y GAS (CREG) unas funciones o estándares para mejorar la calidad de suministro de energía eléctrica a través de la calidad de la potencia eléctrica CPE (forma de onda) y la calidad del suministro de la energía eléctrica (confiabilidad).

A continuación, se mencionarán en el marco regulatorio las leyes y los decretos relacionados con la reglamentación de la calidad de la potencia en el sistema eléctrico colombiano.

---

tensión”. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones Universidad Industrial de Santander, diciembre 2005

<sup>11</sup> Ibíd.

<sup>12</sup> Ibíd.

**1.4.1 Ley 142 de 1994 (ley de los servicios públicos domiciliarios)** “Se designa al Estado la intervención de “fijar las normas de calidad a las que deben ceñirse las empresas de servicios públicos en la prestación del servicio y continuidad del mismo”. Así mismo da la facultad la comisión para establecer las normas de calidad que deben cumplir las empresas en la prestación del servicio de energía” <sup>13</sup>.

**1.4.2 Ley 143 de 1994 (Ley eléctrica)** “Establece el sistema para la generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica en todo el territorio nacional, con el objetivo de asegurar una adecuada prestación del servicio mediante el aprovechamiento eficiente de los recursos energéticos, en beneficio del usuario en términos de calidad, oportunidad y costo del servicio. También define las funciones generales para la CREG, específicamente en el Art. 23, literal j) “establecer pautas para el diseño normalización y uso eficiente de equipos y aparatos eléctricos” y literal n) “Definir y hacer operativos los criterios técnicos de calidad, confiabilidad y seguridad del servicio de energía”, para el cumplimiento del objetivo definido del Artículo 20 de la presente Ley <sup>14</sup>.

**1.4.3 Resolución CREG 070 de 1998** Esta resolución establece los criterios de calidad de la potencia y del servicio suministrado por los diferentes operadores de red (OR), con el propósito de dar garantías mínimas en estos aspectos a los usuarios conectados al STR y/o SDL del OR respectivo <sup>15</sup>. “El término Calidad de

---

<sup>13</sup> CONGRESO DE COLOMBIA,. Ley 142 de 1994, Ley de servicios públicos domiciliarios. Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones, Julio 11 de 1994. [en línea] disponible en. [http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley\\_0142\\_1994.html](http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0142_1994.html).

<sup>14</sup> CONGRESO DE COLOMBIA Ley 143 de 1994. Por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética (Ley eléctrica), pp. 6-7. Julio 12 de 1994 . [en línea] disponible en. [http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley\\_0143\\_1994.html](http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0143_1994.html)

<sup>15</sup> COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA Resolución CREG 070 de 1998, Por la cual se modifican las normas de calidad de la potencia eléctrica aplicables a los servicios de Distribución de Energía Eléctrica.. Mayo 28 de 1998. [en línea] disponible en. <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/Indice01/Resoluci%C3%B3n-1998-CREG070-98>

Potencia Suministrada se refiere a las perturbaciones y variaciones de estado estacionario de la tensión y corriente suministrada por el OR. El término Calidad del Servicio Prestado se refiere a los criterios de confiabilidad del servicio”<sup>16</sup>.

La Calidad de la Potencia Suministrada por los diferentes operadores se define con los siguientes indicadores: frecuencia, tensión, contenido de armónicos de las ondas de tensión y corriente, flicker, factor de potencia, transitorios electromagnéticos rápidos y fluctuaciones de tensión. Además, estableció que el responsable de la deficiencia en la calidad de la potencia tendría un plazo máximo de treinta (30) días hábiles para corregir estos problemas.

**1.4.4 Resolución de CREG 024 de 2005** Modifica las normas de la CPE aplicables a los servicios de distribución de energía eléctrica. Establece la instalación de equipos con capacidad de medir parámetros de CPE como la Distorsión Armónica Total de Tensión THDV, el desbalance de tensión  $V2/V1$ , hundimientos y picos de la tensión, la continuidad del servicio, la desviación estacionaria de la tensión R.M.S y la perceptibilidad de tiempo corto Pst. Lo anterior se debe realizar en el 100% de las barras de las subestaciones de los OR en los niveles de tensión inferiores a 115 kV y el 5% de los alimentadores en el nivel de tensión de 13,2 kV. Además, estipula los requisitos de almacenamiento de los indicadores propuestos y presenta los formatos para el registro de datos en las tablas de Perceptibilidad de Tiempo Corto (PST) y Eventos de Tensión (ET)<sup>17</sup>.

**1.4.5 Resolución CREG 016 de 2007** “Es la resolución que junto a la CREG 024 de 2005 regulan actualmente la calidad de potencia en Colombia. Esta sugiere la medición clase A para los indicadores de calidad, fija la instalación del sistema de

---

<sup>16</sup> *Ibíd.*

<sup>17</sup> COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA Resolución CREG 024 de 2005. por la cual se modifican las normas de calidad de la potencia eléctrica aplicables a los servicios de Distribución de Energía Eléctrica., Abril 26 de 2005 . [en línea] disponible en. <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/Indice01/Resoluci%C3%B3n-2005-CREG024-2005>.

medición y registro en el 100% de las barras y circuitos de las subestaciones del nivel de tensión inferior e igual a 115 kV. Por otra parte, establece un procedimiento más estructurado para definir responsabilidades en la introducción de perturbaciones en el sistema de energía eléctrica, menciona que cuando se identifica el usuario causante del problema éste tiene un plazo de ocho (8) días hábiles para ponerse de acuerdo con el OR en la forma como debe ser corregido”

<sup>18</sup>.

**1.4.6 Resolución CREG 096 de 2000** “Esta resolución modifico los numerales 6.2.1, 6.2.2 y 6.2.3 del Anexo General del Reglamento de Distribución de Energía Eléctrica (Resolución CREG 070 de 1988). Recomienda tanto al operador como al usuario el uso de la recomendación IEEE 519 de 1992 en el análisis de armónicos y flicker. A su vez, establece un procedimiento de desconexión de cargas o usuarios que generan perturbaciones electromagnéticas en el sistema; de esta manera el operador ya no es quien define el plazo para la solución del problema, sino que se hace de manera conjunta concediendo al operador un plazo de treinta (30) días hábiles para solucionar las deficiencias de calidad de potencia” <sup>19</sup>.

**1.4.7 Resolución CREG 011 de 2009** El artículo 14 de esta resolución establece la responsabilidad por la calidad de la potencia en el STN. Este artículo dice: “Identificado el equipo o equipos causantes de una deficiencia en la forma de onda, o de un desbalance en las tensiones de fase, el CND deberá establecer conjuntamente con el TN y los involucrados, un plazo máximo, razonable de

---

<sup>18</sup> COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA Resolución CREG 016 de 2007. Por la cual se modifica parcialmente la Resolución CREG 024 de 2005 que establece las normas de calidad de la potencia eléctrica aplicables a la Distribución de Energía Eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional.. Febrero 26 de 2007. . [en línea] disponible en. <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/Indice01/Resoluci%C3%B3n-2007-CREG016-2007>

<sup>19</sup> COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución CREG 096 de 2000. Por la cual se dictan normas relacionadas con el Período de Transición de que trata el Reglamento de Distribución de Energía Eléctrica, y se complementan algunas disposiciones de esas resoluciones. Noviembre 30 de 2000. [en línea] disponible en: <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/Indice01/Resoluci%C3%B3n-2000-CREG096-2000>.

acuerdo con las buenas prácticas de ingeniería, para la corrección de la deficiencia identificada. El CND deberá informar al Consejo Nacional de Operación (CNO) el plazo acordado. Si transcurrido el plazo fijado no se ha efectuado la corrección pertinente, el TN deberá proceder a la desconexión del equipo causante de la deficiencia o, si no es posible identificar este equipo, de la carga del respectivo Usuario del STN”<sup>20</sup>.

**1.4.8 Resolución CREG 065 de 2012** Esta resolución es “un nuevo proyecto de resolución de carácter general, que pretende establecer las normas de calidad de la potencia eléctrica aplicables en el Sistema Interconectado Nacional”<sup>21</sup>.

Las normas de CPE aplicables en el Sistema Interconectado Nacional SIN, determinan los valores de referencia de los indicadores a cumplir por parte de los OR y usuarios de acuerdo al nivel de tensión de suministro. Concede al OR las pautas mínimas a tener en cuenta para la realización de la medición de los parámetros de calidad de la potencia en el punto de conexión de los usuarios.

Por otra parte, incluye las mediciones de corriente que en la regulación actual no se contempla. Cuando sea aprobado este proyecto de resolución, se convertiría en una base para la evaluación de la CPE de los sistemas de suministro de energía eléctrica<sup>22</sup>.

**1.4.9 IEEE 519/2014.** El propósito de la norma IEEE 519 es el de recomendar límites en la distorsión armónica según dos criterios distintos: 1. Existe una limitación sobre

---

<sup>20</sup> COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución CREG 011 de 2009. por la cual se establecen la metodología y formulas tarifarias para la remuneración de la actividad de transmisión de energía eléctrica en el Sistema de Transmisión Nacional. Febrero 11 de 2009. [en línea] disponible en: [http://www.creg.gov.co/html/Ncompila/htdocs/Documentos/Energia/docs/resolucion\\_creg\\_0011\\_2009.htm](http://www.creg.gov.co/html/Ncompila/htdocs/Documentos/Energia/docs/resolucion_creg_0011_2009.htm).

<sup>21</sup> COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS. Resolución CREG 065 de 2012

<sup>22</sup> *Ibíd.*

el valor eficaz de la corriente no fundamental que un consumidor puede inyectar en la red de distribución eléctrica. 2. Se establece una limitación en el nivel de la distorsión de la señal de tensión que una compañía de distribución de energía eléctrica puede suministrar al consumidor <sup>23</sup>.

**1.4.10 NTC 1358 Protocolo de pruebas para transformadores.** Esta norma establece la información necesaria que debe contener el protocolo de pruebas de rutina para transformadores secos y sumergidos en líquido <sup>24</sup>.

**1.4.11 NTC 317 Electrotecnia. transformadores de potencia y distribución. terminología.** “Esta norma es una recopilación de términos y definiciones relativas principalmente a transformadores eléctricos y aparatos asociados. También incluye datos similares relativos a sistemas de potencia y aislamiento comúnmente involucrados en la tecnología de transformadores” <sup>25</sup>.

---

<sup>23</sup> IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," in *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*, vol., no., pp.1-29, June 11 2014 doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6826459

<sup>24</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIONES Norma Técnica Colombiana NTC (1358), Protocolo de prueba para transformadores 1988.

<sup>25</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIONES Norma Técnica Colombiana NTC (317), Electrotecnia. Transformadores de potencia y distribución. Terminología

## 2. CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

“En la actualidad la calidad del servicio de energía eléctrica tiene cada vez más trascendencia, debido al incremento de los equipos que son sensibles a las perturbaciones de las ondas de tensión y corriente; por lo cual, los usuarios o clientes que se ven afectados reclaman una adecuada calidad del servicio. Por otra parte, las reglamentaciones actuales cada vez son más exigentes en lo relacionado a la calidad del servicio. La calidad del servicio de energía eléctrica comprende tres aspectos esenciales: La continuidad del suministro, la calidad de la energía eléctrica y la calidad de atención comercial al cliente. La continuidad del suministro se evalúa con índices que están relacionados con la duración y el número de las interrupciones del servicio en un periodo de tiempo”<sup>26</sup>.

La calidad de la energía eléctrica se refiere al término ampliamente utilizado en la literatura inglesa "power quality"; ésta, se valora a partir de parámetros como la amplitud, la frecuencia, la forma de onda y la simetría de las señales de tensión y de corriente. Por último, la atención comercial tiene que ver con todo lo relacionado con la capacidad de atención al cliente y con el suministro de información a los usuarios de la energía eléctrica [CEL, 2001],<sup>27</sup>22].

La calidad de la energía eléctrica es afectada por diferentes fenómenos electromagnéticos que ocurren en las redes eléctricas. Estas perturbaciones en su mayoría son causadas por fallas, descargas atmosféricas, cargas no lineales, maniobras y operaciones en el sistema, entre otras. Según la [NTC 5000, 02] estos fenómenos se clasifican en: armónicos, fluctuaciones de tensión (flicker), caídas de tensión (sags ó dips), sobretensiones (swells), interrupciones de tensión, muescas

---

<sup>26</sup> SILVA Miguel Ángel y ORDÓÑEZ PLATA Gabriel Op. Cit.

<sup>27</sup> Ibíd.

de tensión (notching), transitorios, desbalances de tensión y variaciones de frecuencia. Esos fenómenos electromagnéticos ocasionan daños o funcionamientos incorrectos de los elementos conectados al sistema eléctrico, que se ven reflejados en daños en los productos de un proceso, salidas del servicio de energía y/o reinicio de los procesos automatizados. La incidencia de cada uno de estos fenómenos electromagnéticos en la industria y el comercio, se ve reflejada en los costos económicos involucrados en las reparaciones de los daños y costos por la no producción de productos, entre otros <sup>28</sup>.

Algunos de los fenómenos electromagnéticos que más afectan la calidad de la energía eléctrica, son los referentes a las interrupciones y las caídas de tensión. Debido a esto, es necesario establecer normativas basadas en mediciones efectuadas directamente sobre los sistemas eléctricos de cada operador de red, para que éstas tengan en cuenta la ubicación geográfica de las redes, la cantidad y tipos de usuarios que atienden, la infraestructura misma de las empresas que distribuyen la energía eléctrica, y, especialmente en Colombia, su situación social; entre otras razones.

“La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) tiene normativa acerca de la calidad de la energía eléctrica, estas normalizaciones de la serie 61000 tratan sobre principios fundamentales, definiciones, terminología, niveles de compatibilidad; límites de inmunidad y emisión, técnicas de ensayos, mediciones y pruebas a redes y a equipos. En los Estados Unidos el Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos (IEEE) ha desarrollado documentos relacionados con definiciones y principios de la calidad de la energía eléctrica, monitorización de sistemas eléctricos y perturbaciones momentáneas de tensión, entre otras” <sup>29</sup>.

---

<sup>28</sup> *Ibíd.*

<sup>29</sup> *Ibíd.*

La definición del termino Calidad de la Energía Eléctrica no es única y varia de país en país. Veamos algunas definiciones tomadas de instituciones que tratan sobre el tema en diferentes partes del mundo.

El Instituto EPRI (Electric Power Research Institute) de los Estados Unidos, por ejemplo, define la calidad de la Energía Eléctrica (Power Quality) como: “Cualquier problema de potencia manifestado en la desviación de la tensión, de la corriente o de la frecuencia, de sus valores ideales que ocasione falla o mala operación del equipo de un usuario”.

“La norma IEC (61000-2-2/4) y la norma CENELEC (50160) definen la Calidad de la Energía Eléctrica como: “Una característica física del suministro de electricidad, la cual debe llegar al cliente en condiciones normales, sin producir perturbaciones ni interrupciones en los procesos del mismo”.

Para la norma IEEE 1159 de 1995: “El termino se refiere a una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente eléctricas, en un tiempo dado y en una ubicación dada en el sistema de potencia”.

La CREG en Colombia en su Resolución 070 de 1998 conceptuó que: “El termino calidad de la potencia suministrada se refiere a las perturbaciones y variaciones de estado estacionario de la tensión y corriente suministrada por el Operador de Red. El termino calidad del servicio prestado se refiere a los criterios de confiabilidad del servicio.

Algunos países han incluido en el concepto de Calidad de Energía Eléctrica – CEL tanto lo correspondiente al diseño, construcción y operación de la instalación eléctrica como la atención al usuario (facturación y reclamos).

A continuación, se propone definir la CEL de la siguiente manera y, a partir de allí, desarrollar su concepto: la Calidad de la Energía Eléctrica – CEL, es un conjunto de características físicas de las señales de tensión y corriente para un tiempo dado y un espacio determinado, con el objetivo de satisfacer necesidades de un cliente.

Algunos autores consideran que la entidad a la cual se aplica el concepto de Calidad de la Energía Eléctrica es solamente la señal de tensión. Esto sería cierto si se considera un sistema eléctrico lineal en el cual el generador alimenta una sola carga, mediante una fuente de tensión.

Sin embargo, los sistemas eléctricos pueden ser enmallados y una carga (corriente) puede contaminar nuevamente la red de alimentación y esta a su vez aumentar a otra carga con una señal de tensión y corriente contaminada. Por ello lo más conveniente es involucrar en la Calidad de la Energía Eléctrica tanto a la fuente como a la carga, es decir las señales de tensión y corriente.

## **2.1 IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS USUARIOS DEL SERVICIO ELÉCTRICO DE ENERGÍA SUCEPTIBLES DE INTRODUCIR Y GENERAR PERTURBACIONES EN EL SISTEMA ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN.**

Actualmente la utilización de sistemas electrónicos diversos en la red ha generado distorsiones en las señales de tensión y corriente. Esto produce una deficiencia en la calidad de la energía, factor muy importante para la exitosa operación de diversas cargas. La calidad de la energía se entiende como un bajo nivel de disturbios en la red, es decir con el mínimo de distorsiones armónicas, variaciones de tensión, interrupciones, sobretensiones, tanto en el suministro como en la recepción o utilización.

Los usuarios residenciales, comerciales e industriales, tienen una gran cantidad de equipos como: hornos de microondas, computadoras, sistemas con control de parámetros, televisión, iluminación con CFL, iluminación con lámparas LED, y otros equipos. Todos estos equipos contribuyen con la distorsión de las señales de corriente. En algunos casos, cargas motrices como ventiladores y motores de inducción funcionando con sobrecarga, pueden contribuir a la distorsión de la señal de corriente. Las distorsiones de estos aparatos pueden adicionarse y originar problemas en el sistema de potencia y distribución <sup>30</sup>.

Dado que, bajo ciertas condiciones de funcionamiento se pueden generar perturbaciones en el sistema eléctrico deteriorando la magnitud, la forma de onda, la amplitud, y la simetría de la tensión donde son utilizados estos dispositivos. La problemática generada por el incremento de la distorsión de las señales de tensión y corriente ha disminuido la calidad de la energía eléctrica, la cual se considera puede seguir disminuyendo ya que la utilización de equipo electrónico más eficiente y rápido es cada día más frecuente y lo será debido a su mayor eficiencia y bajo costo. La proliferación de las cargas no lineales (aquellas que tienen consumos de corriente no sinusoidales), se ha dado en ausencia de normas completas que limiten las distorsiones de las señales de tensión y corriente que el sistema de potencia, generación, cogeneración, transmisión y distribución, sea capaz de soportar y de absorber.

Existen dos fuentes de perturbaciones de estado estacionario en los sistemas eléctricos:

- La primera son las cargas no lineales en las que la corriente que fluye por ellas no es proporcional a la tensión. Como resultado de esto, cuando se aplica una onda sinusoidal de una sola frecuencia, la corriente resultante no es sinusoidal y su espectro en frecuencia muestran varias componentes de frecuencia.

---

<sup>30</sup> RUGGERO RÍOS B, SÁNCHEZ QUINTANA ME Op. Cit.

Transformadores, reguladores y otros equipos conectados al sistema pueden presentar un comportamiento de carga no lineal y ciertos tipos de bancos de transformadores multifase conectados en estrella-estrella con cargas desbalanceadas o con problemas en su puesta a tierra. Los diodos, los elementos semiconductores y los transformadores que se saturan son ejemplos de equipos generadores de distorsión de las señales de corriente. Estos elementos se encuentran en muchos aparatos eléctricos modernos. Este tipo de elementos son generadores de distorsión de las señales de corriente y lo harán siempre que estén energizados con una tensión alterna. Estas son las fuentes originales de armónicos que se generan sobre el sistema de potencia <sup>31</sup>.

- “El segundo tipo de elementos que generan distorsiones en las señales de corriente son aquellos que son variantes en el tiempo y por consiguiente presentan una impedancia dependiente de la frecuencia. O sea, a una determinada frecuencia pueden tener una impedancia constante pero su impedancia varía en función de la frecuencia. Un ejemplo de una carga variante en el tiempo son los hornos de arco y los soldadores de punto. También se pueden considerar cargas con impedancia que varían con la frecuencia, algunos servomecanismos de motores como los ciclo-convertidores y los sistemas de calentamiento que utilizan como estrategia de control sistemas que bloquean el suministro de tensión en un determinado número de ciclos de la señal <sup>32</sup>.

De acuerdo a lo anterior se pueden establecer en cuatro categorías de dispositivos que generan distorsiones en las señales de corriente <sup>33</sup>.

---

<sup>31</sup> *Ibíd.*

<sup>32</sup> *Ibíd.*

<sup>33</sup> ESPARZA GONZÁLEZ, Mario Salvador; MATA GUERRERO, Jesús Alejandro; CASTAÑEDA RAMOS, Luis Antonio Las cargas no Lineales, su Repercusión en las Instalaciones Eléctricas y sus Soluciones Conciencia Tecnológica, núm. 32, julio-diciembre, 2006, p. 0 Instituto Tecnológico de Aguascalientes, México

Dispositivos electrónicos de potencia (convertidores, rectificadores, etc.) como los mostrados en la Figura 3.

**Figura 3. Rectificador**



Fuente: ABB rectificador CR 4000

Dispositivos productores de arcos eléctricos (hornos de arco, luz fluorescente, máquinas soldadoras, etc.) como los mostrados en las figuras 4 y 5.

**Figura 4. Horno de arco**



Fuente: fabricante REFRA, [en línea] disponible en: [www.refra.com](http://www.refra.com)

**Figura 5. Soldador**



Fuente: fabricante TRUPER

3) Dispositivos ferromagnéticos (transformadores, motores de inducción, etc.) como el motor mostrado en la Figura 6.

**Figura 6. Motor de inducción**



Fuente: SALGENIINDUST[en línea] disponible en: <http://www.sarlgeniindust.com>

4) Motores eléctricos que mueven cargas de par torsor bruscamente variable (molinos de laminación, trituradoras, etc.) como los mostrados en la Figura 7

**Figura 7. Motor de inducción**



Por otra parte, la Tabla 1 lista los dispositivos electrónicos utilizados en residencias, oficinas e industrias que distorsionan las señales de corriente por su característica no lineal y la Tabla 2 presenta el porcentaje de la magnitud de las componentes armónicas con respecto a la componente fundamental de algunos de estos dispositivos electrónicos.

**Tabla 1. Equipos electrónicos con un rectificador monofásico y filtro capacitivo.**

<b>Campo de actividad</b>	<b>Dispositivos electrónicos</b>
Domésticos	TV, Hi-Fi, video, microondas, hornos, lámparas flourecentes, balasto electrónicos, etc.
Oficina	Micro-computadoras, impresoras, fotocopiadoras, máquinas de fax, etc
Industrial	Fuente de alimentación tipo conmutador electrónico, control de velocidad del motor

Fuente: CHAIRUL GAGARIN Irianto and SETIABUDY R., "Design Dtz transformer that compatible with nonlinear load in modern electrical systems," Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics, Bandung, 2011, pp.1-6. doi: 10.1109/ICEEI.2011.6021751

**Tabla 2. Carga incurrida no lineal y armónica**

Dispositivos electrónicos	THD I (%)		
	3rd	5 rd	7 rd
Micro-computadoras y computadoras	78	44	17
Lámparas fluorescentes ,balastos electrónicos	36	3	
Computadores, servidores, equipos informáticos.	48	-	16

Fuente: CHAIRUL GAGARIN Irianto and SETIABUDY R., "Design Dtz transformer that compatible with nonlinear load in modern electrical systems," Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics, Bandung, 2011, pp.1-6. doi: 10.1109/ICEEI.2011.6021751

Por consiguiente, la proliferación de cargas no lineales y/o variantes en el tiempo, en las redes eléctricas representa un nuevo reto para los ingenieros electricistas en el diseño de las instalaciones eléctricas, el mantenimiento y la solución de problemas.

Con relación a los aspectos normativos, la normatividad actual en América marca límites en forma general mientras que la europea se enfoca en mejorar el diseño de los equipos de forma tal que no se genere el problema de las distorsiones de las señales, es decir lo resuelve desde su origen. La selección de la alternativa de solución dependerá de un estudio minucioso del problema tanto técnica como económicamente.

## **2.2 INFLUENCIA DE LA DISTORSIÓN DE LAS SEÑALES DE TENSIÓN Y CORRIENTE EN LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN.**

La distorsión de las señales de tensión y corriente en los sistemas de distribución ha aumentado significativamente, debido al uso generalizado de cargas no lineales

o variantes en el tiempo tanto monofásicas como trifásicas <sup>34 35</sup>. La distorsión de las señales de corriente y de tensión deteriora la calidad de la energía eléctrica suministrada por operadores de red, reduciendo la eficiencia y comprometiendo la operación de los equipos conectados al sistema eléctrico <sup>36</sup>. Algunos equipos requieren una forma de onda sinusoidal para garantizar un funcionamiento adecuado, como es el caso de los transformadores en las redes de distribución <sup>37</sup>.

La distorsión de la corriente debida a las cargas no lineales y/o variantes en el tiempo, se ha convertido en un elemento importante en el rendimiento y vida útil de los transformadores, ya que se originan flujos magnéticos adicionales dispersos en el núcleo y las partes estructurales, además del incremento del valor eficaz de la corriente que circula por los devanados del transformador, lo cual incrementa las pérdidas de potencia tanto en el núcleo magnético como en los devanados <sup>38 39</sup>.

Todo esto trae problemas de seguridad y pérdidas económicas en los servicios públicos debido a una mayor necesidad de mantenimiento en este tipo de equipos, o incluso su prematuro reemplazo, debido a la disminución de la vida útil de los transformadores.

Los sobrecalentamientos en los transformadores son más comunes en los tipos secos que en transformadores refrigerados en aceite dieléctrico <sup>40</sup>. Muchas de las condiciones de operación de los transformadores de tipo seco dependen del

---

<sup>34</sup> SILVA D. C. L., SOUSA R. H., LIMA F. K. A. and BRANCO C. G. C., Op. Cit.

<sup>35</sup> SALMERON P., LITRAN S.P., "Improvement of the Electric Power Quality Using Series Active and Shunt Passive Filters", Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 25, pp. 1058-1067, 2010

<sup>36</sup> SILVA D. C. L., SOUSA R. H., LIMA F. K. A. and BRANCO C. G. C., Op. Cit.

<sup>37</sup> DALILA M.S., KHALID M.N., SHAH M. Md, "Distribution transformer losses evaluation under non-linear load", in Power Engineering Conference. AUPEC 2009. Australasian Universities, pp. 1-6, 2009.

<sup>38</sup> SILVA D. C. L., SOUSA R. H., LIMA F. K. A. and BRANCO C. G. C., Op. Cit.

<sup>39</sup> TACI M.S., SARUL M.H., YILDIRMAZ G., "The effects of the harmonic components upon transformer active losses in case of (non)sinusoidal sources and (non)linear loads", in Industrial Technology. Proceedings of IEEE International Conference on, vol. 1, pp. 741-746, 2000

<sup>40</sup> PIERCE L.W., "Transformer design and application considerations for non-sinusoidal load currents," Industry Applications, IEEE Transactions on, vol.32, pp. 633-645, 1996

aislamiento de los devanados ligado con la temperatura y su correcto funcionamiento <sup>41</sup>, <sup>42</sup>.

A continuación, se resume como ejemplo el estudio presentado en el artículo: "Contributions to the study of energy efficiency in dry-type transformer under nonlinear load <sup>43</sup>", donde se realizan las mediciones térmicas de un transformador de distribución que alimentado cargas tanto lineales como no lineales. En el documento se denomina la carga lineal carga tipo 1. También se consideran dos cargas no lineales: un puente completo trifásico rectificador con filtro RL de salida, denominado carga tipo 2 y otra carga no lineal que consiste en un rectificador trifásico de puente completo con filtro RC de salida, denominado carga tipo 3.

La potencia trifásica de salida es de 3,2 kVA para todas las cargas, y la relación de transformación del transformador es 380 V/220 V. El diagrama de conexión de las tres cargas se presenta en la Figura 9. Las características técnicas de los datos de placa para el transformador trifásico, así como las distorsiones armónicas totales de las corrientes de las tres cargas se muestran en la Figura 10.

La Figura 8 muestra el transformador trifásico de tipo seco utilizado. En la experimentación <sup>44</sup>.

---

<sup>41</sup> SILVA D. C. L., SOUSA R. H., LIMA F. K. A. and BRANCO C. G. C., Op. Cit.

<sup>42</sup> WANGNING, X. DING, "Three-Dimensional Finite Element Analysis on Fluid Thermal Field of Dry-Type Transformer," Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), Second International Conference on, pp. 516-519, 2012

<sup>43</sup> SILVA D. C. L., SOUSA R. H., LIMA F. K. A. and BRANCO C. G. C., Op. Cit.

<sup>44</sup> *Ibíd.*

**Figura 8. Transformador trifásico tipo seco- analizado en artículo**



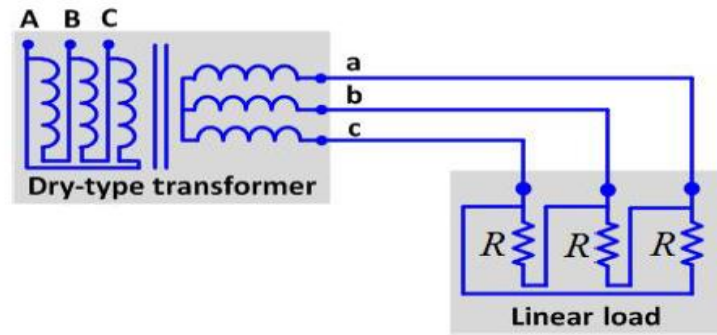
Fuente: SILVA D. C. L., SOUSA R. H., LIMA F. K. A. and BRANCO C. G. C., "Contributions to the study of energy efficiency in dry-type transformer under nonlinear load," 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, 2015, pp.456-461. doi: 10.1109/ISIE.2015.7281511

Inicialmente, las mediciones térmicas se realizaron con el transformador suministrando energía a una carga lineal, llamada carga tipo 1. Posteriormente, una carga no lineal que consiste en un puente rectificador trifásico con filtro de salida RL, aquí llamada carga tipo 2, fue usado. Y finalmente, otra carga no lineal que consiste en un rectificador de puente completo trifásico con salida de filtro RC, llamada carga tipo 3. La potencia de salida trifásica fue de 3,2 kVA para todas las cargas, y la tensión de alimentación trifásica era igual a 220 V. El diagrama de potencia está esquematizado en la Fig. 9. El valor nominal los datos de placa para el transformador trifásico se muestra en la Fig10, así como el porcentaje de distorsión armónica total (THDi) <sup>45</sup>.

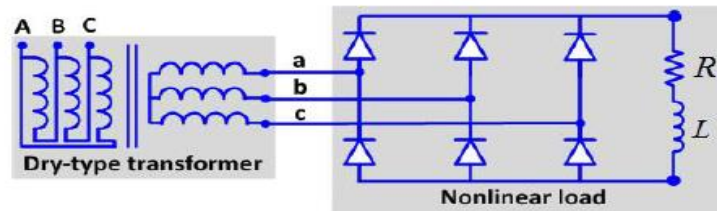
---

<sup>45</sup> Ibíd.

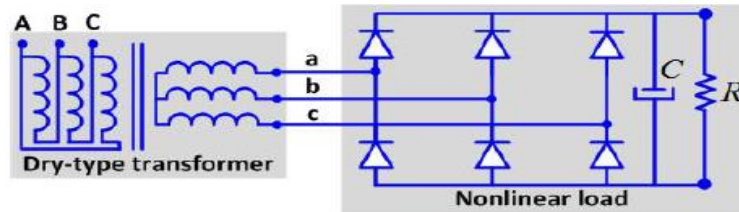
Figura 9. Diagrama de potencia para los tres tipos de carga



(a) Load type 1.



(b) Load type 2.



(c) Load type 3.

Fuente: SILVA D. C. L., SOUSA R. H., LIMA F. K. A. and BRANCO C. G. C., "Contributions to the study of energy efficiency in dry-type transformer under nonlinear load," 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, 2015, pp.456-461. doi: 10.1109/ISIE.2015.7281511

## Figura 10. Parámetros de placa del transformador tipo seco objeto de análisis

TABLE I. TRANSFORMER PLATE DATA AND THDI OF LOADS.

Parameters	Values
Three-phase power	10kVA
Voltage	380-200V- $\Delta$ Y
Frequency	60Hz
Operating temperature	50°C
Insulation temperature limit	150°C
Temperature limit of the windings	80°C
<b>Loads</b>	
THDi – Load type 1	< 1%
THDi – Load type 2	26.62%
THDi – Load type 3	43.98%

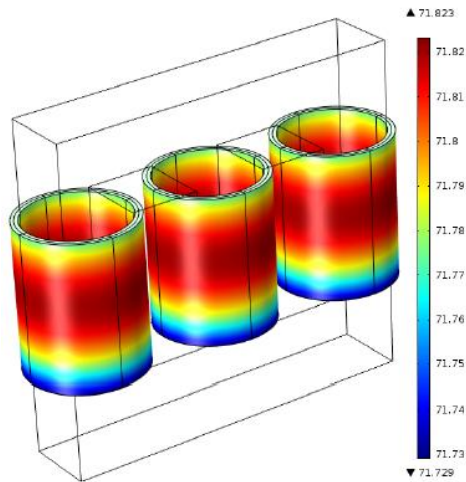
Fuente: SILVA D. C. L., SOUSA R. H., LIMA F. K. A. and BRANCO C. G. C., "Contributions to the study of energy efficiency in dry-type transformer under nonlinear load," 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, 2015, pp.456-461. doi: 10.1109/ISIE.2015.7281511

La temperatura inicial para la simulación del transformador fue de 26°C. Al final de la simulación, los resultados para la carga lineal (tipo 1) mostraron los puntos más calientes de los devanados, la temperatura máxima fue de 71,82°C, como se observa en la Figura 11. En la Figura 12 se observa que la temperatura máxima del núcleo, con un valor máximo de 44,71°C <sup>46</sup>.

---

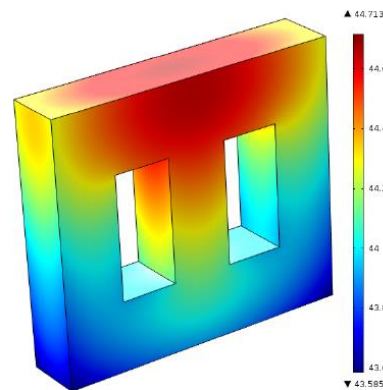
<sup>46</sup> Ibíd.-

**Figura 11. Temperatura en la superficie de las bobinas del transformador de tipo seco Alimentación del tipo de carga 1**



Fuente: SILVA D. C. L., SOUSA R. H., LIMA F. K. A. and BRANCO C. G. C., "Contributions to the study of energy efficiency in dry-type transformer under nonlinear load," 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, 2015, pp.456-461. doi: 10.1109/ISIE.2015.7281511

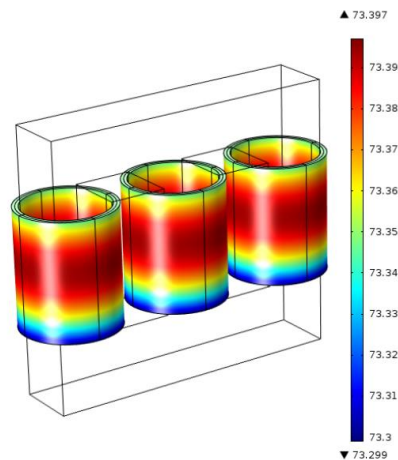
**Figura 12. Temperatura en la superficie del núcleo del transformador de tipo seco. Alimentación del tipo de carga 1**



Fuente: SILVA D. C. L., SOUSA R. H., LIMA F. K. A. and BRANCO C. G. C., "Contributions to the study of energy efficiency in dry-type transformer under nonlinear load," 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, 2015, pp.456-461. doi: 10.1109/ISIE.2015.7281511

El efecto de la carga tipo 2 sobre el aumento de temperatura del transformador se muestra en la Figura 13, con una temperatura máxima de 73,3°C en la superficie de los devanados, y 45,1°C en la superficie del núcleo como se puede ver en Figura 14 <sup>47</sup>.

**Figura 13. Temperatura en la superficie de las bobinas del transformador tipo seco Alimentación del tipo de carga 2**

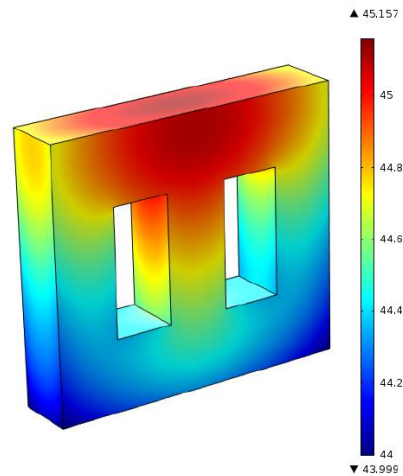


Fuente: SILVA D. C. L., SOUSA R. H., LIMA F. K. A. and BRANCO C. G. C., "Contributions to the study of energy efficiency in dry-type transformer under nonlinear load," 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, 2015, pp.456-461. doi: 10.1109/ISIE.2015.7281511

---

<sup>47</sup> Ibíd.

**Figura 14. Temperatura en la superficie del núcleo del transformador tipo seco. Alimentación del tipo de carga 2**



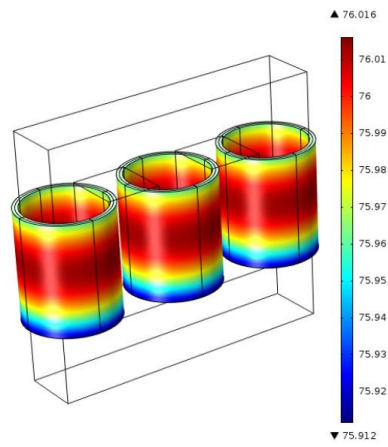
Fuente: SILVA D. C. L., SOUSA R. H., LIMA F. K. A. and BRANCO C. G. C., "Contributions to the study of energy efficiency in dry-type transformer under nonlinear load," 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, 2015, pp.456-461. doi: 10.1109/ISIE.2015.7281511

El alto valor de la distorsión armónica de la carga tipo 3 se reflejó en el aumento de temperatura tanto en el núcleo como en la bobina. Se observa en la Figura 15 como la mayor temperatura en los devanados alcanzó 76,01°C y la Figura 16 muestra que la temperatura del núcleo alcanzó un máximo de 46,18°C <sup>48</sup>.

---

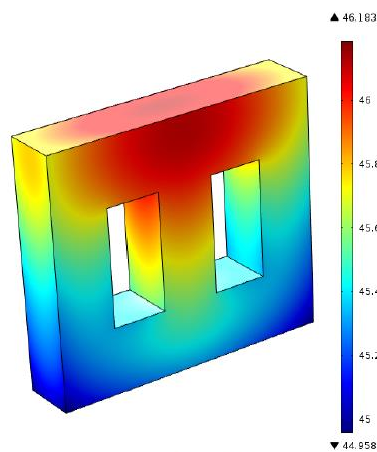
<sup>48</sup> Ibíd.

**Figura 15. Temperatura en la superficie de las bobinas del transformador tipo seco Alimentación del tipo de carga 3**



Fuente: SILVA D. C. L., SOUSA R. H., LIMA F. K. A. and BRANCO C. G. C., "Contributions to the study of energy efficiency in dry-type transformer under nonlinear load," 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, 2015, pp.456-461. doi: 10.1109/ISIE.2015.7281511

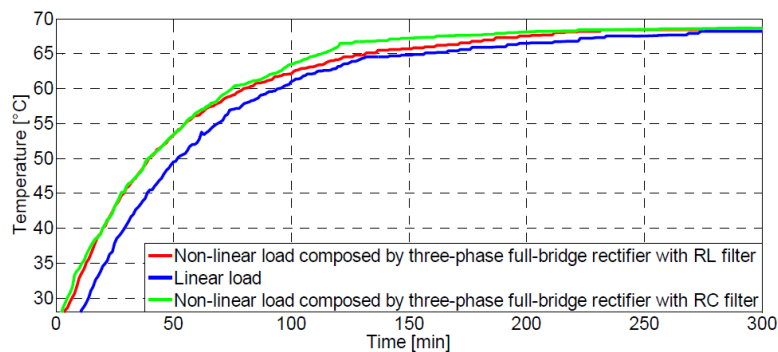
**Figura 16. Temperatura en la superficie del núcleo del transformador tipo seco. Alimentación del tipo de carga 3**



Fuente: SILVA D. C. L., SOUSA R. H., LIMA F. K. A. and BRANCO C. G. C., "Contributions to the study of energy efficiency in dry-type transformer under nonlinear load," 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, 2015, pp.456-461. doi: 10.1109/ISIE.2015.7281511

Se midieron las temperaturas de los devanados y el núcleo mientras se sometían a cargas de tipo 1, 2 y 3. Las mediciones se tomaron cada 1 minuto, lo que permitió trazar las curvas de la variación de la temperatura promedio como se puede ver en la Figura 17. Las temperaturas finales alcanzadas fueron 68,2°C, 68,4°C y 68,8°C para el tipo de carga 1, 2 y 3, respectivamente <sup>49</sup>.

**Figura 17. Curva de variación de la temperatura promedio de las bobinas del transformador bajo carga tipo1, 2 y 3**



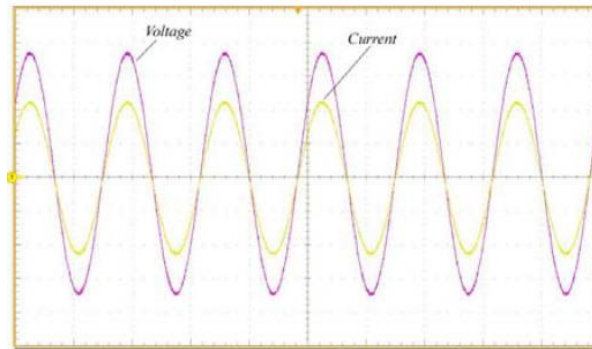
Fuente: SILVA D. C. L., SOUSA R. H., LIMA F. K. A. and BRANCO C. G. C., "Contributions to the study of energy efficiency in dry-type transformer under nonlinear load," 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, 2015, pp.456-461. doi: 10.1109/ISIE.2015.7281511

La Figura 18 muestra las formas de onda de la tensión y la corriente en el secundario del transformador cuando se conectó la carga tipo 1. Por otra parte, la Figura 19 muestra la temperatura en los devanados y núcleo del transformador. Para este caso, la temperatura máxima de los devanados alcanzó los 72,7°C, y la del núcleo alcanzó 46°C <sup>50</sup>. En este caso la tensión y corriente no están distorsionadas.

<sup>49</sup> Ibíd.

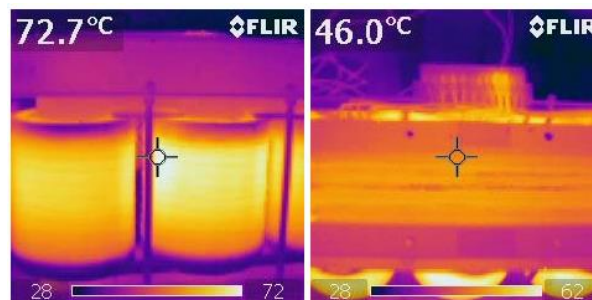
<sup>50</sup> Ibíd.

**Figura 18. Formas de onda de la tensión y corriente en el lado secundario del transformador tipo seco cuando se conecta la carga tipo 1**



Fuente: SILVA D. C. L., SOUSA R. H., LIMA F. K. A. and BRANCO C. G. C., "Contributions to the study of energy efficiency in dry-type transformer under nonlinear load," 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, 2015, pp.456-461. doi: 10.1109/ISIE.2015.7281511

**Figura 19. Temperaturas en la superficie de los devanados (izquierda) y núcleo del transformador (derecha) cuando se conecta la carga tipo 1**

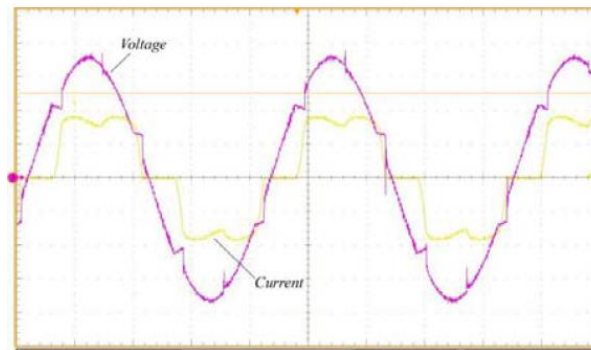


Fuente: SILVA D. C. L., SOUSA R. H., LIMA F. K. A. and BRANCO C. G. C., "Contributions to the study of energy efficiency in dry-type transformer under nonlinear load," 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, 2015, pp.456-461. doi: 10.1109/ISIE.2015.7281511

Cuando al transformador se le conecta la carga no lineal tipo 2, las formas de onda de la tensión y la corriente se muestran en la Figura 20. Por otra parte, la Figura 21 muestra la temperatura en los devanados y núcleo del transformador. Para este

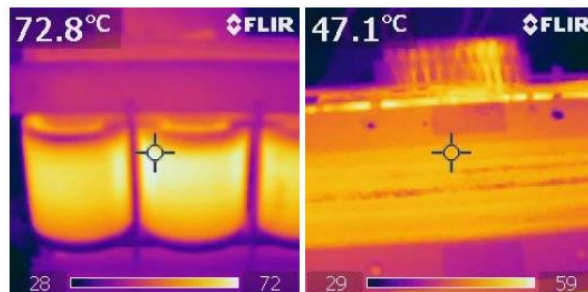
caso, la temperatura máxima de los devanados alcanzó los 72,8°C, y la del núcleo alcanzó 47,1°C <sup>51</sup>. En este caso la tensión y corriente están distorsionadas.

**Figura 20. Formas de onda de la tensión y corriente en el lado secundario del transformador tipo seco cuando se conecta la carga tipo 2**



Fuente: SILVA D. C. L., SOUSA R. H., LIMA F. K. A. and BRANCO C. G. C., "Contributions to the study of energy efficiency in dry-type transformer under nonlinear load," 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, 2015, pp.456-461. doi: 10.1109/ISIE.2015.7281511

**Figura 21. Temperaturas en la superficie de los devanados (izquierda) y núcleo del transformador (derecha) cuando se conecta la carga tipo 2**



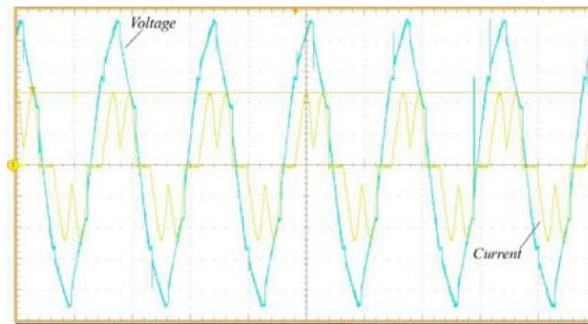
Fuente: SILVA D. C. L., SOUSA R. H., LIMA F. K. A. and BRANCO C. G. C., "Contributions to the study of energy efficiency in dry-type transformer under nonlinear load," 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, 2015, pp.456-461. doi: 10.1109/ISIE.2015.7281511

---

<sup>51</sup> Ibíd.

Por último, se analiza el comportamiento de los parámetros del transformador cuando se le conecta la carga no lineal tipo 3. Las formas de onda de la tensión y la corriente se muestran en la Figura 22. Por otra parte, la Figura 23 muestra la temperatura en los devanados y núcleo del transformador. Para este caso, la temperatura máxima de los devanados alcanzó los 73,8°C, y la del núcleo alcanzó 48,3°C<sup>52</sup>. En este caso la tensión y corriente están también distorsionadas, pero su distorsión es mayor que la presentada cuando se conectó la carga tipo 2.

**Figura 22. Formas de onda de la tensión y corriente en el lado secundario del transformador tipo seco cuando se conecta la carga tipo 3**



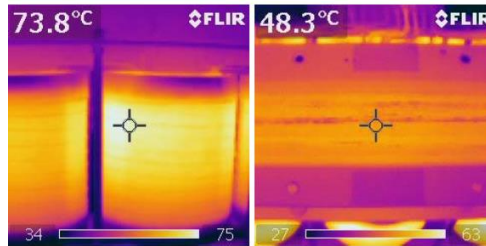
Fuente: SILVA D. C. L., SOUSA R. H., LIMA F. K. A. and BRANCO C. G. C., "Contributions to the study of energy efficiency in dry-type transformer under nonlinear load," 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, 2015, pp.456-461. doi: 10.1109/ISIE.2015.7281511

La alta distorsión en la corriente, causada por la carga tipo 3, resulta en un aumento de las pérdidas de potencia del transformador tanto en los devanados como en el núcleo magnético. El punto más caliente medido en los devanados es de 75°C.

---

<sup>52</sup> Ibíd.

**Figura 23. Temperaturas en la superficie de los devanados (izquierda) y núcleo del transformador (derecha) cuando se conecta la carga tipo 3**



Fuente: SILVA D. C. L., SOUSA R. H., LIMA F. K. A. and BRANCO C. G. C., "Contributions to the study of energy efficiency in dry-type transformer under nonlinear load," 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, 2015, pp.456-461. doi: 10.1109/ISIE.2015.7281511

La Figura 24 muestra los errores porcentuales entre las temperaturas más altas medida en los tres experimentos con relación a los valores obtenidos en las simulaciones. Estos errores son mayores en las temperaturas del núcleo del transformador y en general se puede establecer que el modelo desarrollado en el simulador del transformador y las cargas es adecuado para predecir el efecto térmico de las cargas (lineales o no) en los transformadores.

**Figura 24. Porcentaje de error entre las mediciones de temperatura del transformador tipo seco con los tres tipos de carga, con relación a los valores obtenidos en simulación.**

TABLE II. PERCENTAGE ERROR BETWEEN MEASUREMENTS AND THERMAL SIMULATIONS OF DRY-TYPE TRANSFORMER.

Load type	Transformer	Simulations (°C)	Measurements (°C)	Error (%)
1	Coils	71.8	72.1	0.42
	Core	44.7	46.0	2.83
2	Coils	73.4	72.8	0.83
	Core	45.1	47.1	4.20
3	Coils	76.0	75.0	1.30
	Core	46.2	48.3	2.10

Fuente: SILVA D. C. L., SOUSA R. H., LIMA F. K. A. and BRANCO C. G. C., "Contributions to the study of energy efficiency in dry-type transformer under nonlinear load," 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, 2015, pp.456-461. doi: 10.1109/ISIE.2015.7281511

Los resultados del documento de la referencia <sup>53</sup> corroboran que a mayor distorsión de la señal de corriente, son mayores las pérdidas de potencia en los devanados y núcleo del transformador, elevando la temperatura del transformador en el caso de la carga tipo 3 por encima de la temperatura de funcionamiento adecuada. El estudio demuestra que los conductores de los devanados son los elementos más afectados por la distorsión de la señal de corriente, esto quiere decir que los puntos calientes tienen temperaturas mucho más altas, superiores a las que se presentan cuando el transformador está alimentando una carga lineal. Este efecto se evidenció en el caso relacionado con la carga tipo 3, en donde la temperatura del punto más caliente medida estuvo 5°C por debajo de la temperatura límite de funcionamiento de los devanados, y cerca de 3°C por encima de la temperatura del punto más caliente de los devanados obtenido cuando la carga es lineal (carga tipo 1).

<sup>53</sup> *Ibíd.*

Otro aspecto a mencionar es que las temperaturas dentro de los devanados son superiores que las del núcleo del transformador y la tendencia es a exceder el límite de temperatura de operación de los devanados, cuanto mayor sea la distorsión de la corriente establecida por la carga no lineal.

Las pérdidas adicionales de potencia en un transformador de distribución, depende de la amplitud de las componentes armónicas de la corriente, debidas a la distorsión causada por las cargas no lineales.

Las pérdidas de potencia de un transformador están determinadas por el valor eficaz de las corrientes en los devanados primario y secundario de los transformadores, las resistencias de estos devanados y las pérdidas de potencia en el núcleo del transformador y de evalúan aplicando la ecuación 1 <sup>54</sup>:

$$P_C = \sum_{n=0}^{50} i_n^2 (p) R_n(p) + \sum_{n=0}^{50} i_n^2 (s) R_n(s) + P_{EC} + P_{OSL} \quad (1)$$

Donde:

$P_C$ : pérdidas totales de potencia en los devanados del transformador

$n$ : Orden de la corriente armónica.

$i_n(p)$ : Corriente armónica primaria.

$i_n(s)$ : Corriente armónica secundaria.

$R_n(p)$ : resistencia del devanado primario al  $n$  – ésimo armónico.

---

<sup>54</sup> IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid-Filled and Dry- Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Non sinusoidal Load Currents - Redline, IEEE Std C57.110-2008 (Revision of IEEE Std C57.110-1998), 2008

$P_{EC}$ : pérdidas por corrientes de Foucault o corriente parasitas para condiciones sinusoidales

$P_{OSL}$ : Pérdidas de potencia adicionales en las partes metálicas en condiciones sinusoidales

Para el cálculo de  $P_{EC}$  y  $P_{OSL}$  es necesario conocer el factor de pérdida armónico,  $F_{HL}$ . Las pérdidas de histéresis asociadas al núcleo magnético del transformador en condiciones no sinusoidales se indican en la ecuación 2.<sup>55</sup>:

$$\frac{P_{Hn}}{P_{H1}} = \left[ 1 + \left( \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n} \frac{V_n}{V_1} \cos \varphi_n \right)^2 \right] \quad (2)$$

Donde:

$P_{Hn}$  : pérdidas totales por histéresis para tensión de alimentación distorsionada.

$P_{H1}$ : pérdidas por histéresis para tensión de alimentación distorsionada.

$V_n$ : voltaje de  $n$  – ésimo armónico.

$V_1$ : componente fundamental de voltaje.

$\varphi_n$ : ángulo de fase de  $n$  – ésimo armónico.

### 2.3 EFECTOS PERJUDICIALES DE LAS CARGAS NO LINEALES EN LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN.

El incremento de las cargas no lineales y/o variantes en el tiempo en los sistemas de distribución de energía ha incrementado la distorsión de las señales de corriente, causando problemas con la calidad de energía eléctrica tanto para los clientes como para los proveedores de la electricidad. Las pérdidas de potencia debidas a la

---

<sup>55</sup> EMANUEL A.E., WANG Xiaoming, "Estimation of Loss of Life of power Transformers Supplying Nonlinear Loads", IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, pp-628-636, 1985

distorsión de las señales de tensión y corriente, no solo causan un aumento en los costos operacionales, sino que también crean un calentamiento adicional en los componentes del sistema de potencia, lo que a su vez reduce su expectativa de vida útil.

Esto ocurre tanto en cargas residenciales como comerciales e industriales, donde el incremento de cargas no lineales ha ido en aumento. En general, el costo de la calidad de la energía eléctrica y, en particular, los costos de envejecimiento debido a las pérdidas de potencia adicionales causadas por las distorsiones de las señales de tensión y corriente en los transformadores se han ido incrementando.

Algunos de los estudios reportados (<sup>56</sup>, <sup>57</sup> y <sup>58</sup>) muestran que el aumento de la distorsión de las señales de tensión y corriente al aumentar las pérdidas del transformador, disminuye su vida útil.

Una distorsión elevada de las señales de corriente puede causar pérdidas excesivas que conducen a aumentos anormales de la temperatura de los transformadores, que afectaran la expectativa de vida estándar estipulada, lo cual causa pérdidas económicas.

Un impacto de la distorsión de las corrientes en los transformadores es el aumento de las pérdidas de potencia por corrientes parásitas tanto en el núcleo como en los devanados del transformador que pueden causar puntos calientes. Estas pérdidas de potencia por las corrientes parásitas aumentan en proporción directa con el

---

<sup>56</sup> *Ibíd.*

<sup>57</sup> RADMEHR, M.; FARHANGI, S.; NASIRI, A. . Effect of Power Quality Distortion on Electrical Drives and Transformer Life in Paper Industries: Simulation and Real Time Measurements. Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2006. 18-23 June 2006. Iran: IEEE, 1 - 9.

<sup>58</sup> SAMESIMA, M.I., WILSON RESENDE, J., and ARAUJO, S.C.N. Analysis of transformer loss of life driving nonlinear industrial loads by the finite elements approach. IEEE Industry Applications Conference, 1995. Thirtieth IAS Annual Meeting.

cuadrado de la corriente en el conductor y el cuadrado de la frecuencia de la componente armónica <sup>59</sup>.

El aumento en las pérdidas de potencia por corrientes parásitas del transformador debido a la distorsión de la corriente tiene un efecto significativo en las temperaturas de operación de los transformadores.

A continuación, se describen los diferentes impactos que tiene la distorsión de las señales de tensión y corriente en un transformador.

**A. Efecto de la distorsión de corriente en las pérdidas óhmicas.** Las pérdidas óhmicas ( $I^2R$ ) adicionales son debidas a las corrientes distorsionadas de los devanados primario y secundario. La distorsión de las corrientes incrementa el valor cuadrático medio de la corriente (valor eficaz) y por tanto se incrementan las pérdidas de potencia por efecto óhmico ( $I^2R$ ) <sup>60</sup>.

**B. Efecto de la distorsión de la corriente en las pérdidas de potencia por corrientes parásitas.** Las pérdidas de potencia por corrientes parásitas de los devanados del transformador son proporcionales al cuadrado de la componente armónica de la corriente y al cuadrado de frecuencia de esta componente. Estas corrientes parásitas causan pérdidas de potencia especialmente en el núcleo del transformador, causando un aumento de la temperatura en el transformador <sup>61</sup>. En las figuras 19, 21 y 23 se resaltan los puntos calientes que se presentan en los devanados y núcleo de un transformador debidos a la circulación de corrientes, incluidas las corrientes parásitas.

---

<sup>59</sup> SAID D. M. and NOR K. M., "Effects of harmonics on distribution transformers," *2008 Australasian Universities Power Engineering Conference*, Sydney, NSW, 2008, pp. 1-5.

<sup>60</sup> IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid-Filled and Dry- Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Non sinusoidal Load Currents - Redline, IEEE Std C57.110-2008 (Revision of IEEE Std C57.110-1998), 2008

<sup>61</sup> *Ibíd.*

Otras pérdidas de potencia por corrientes parásitas (OSLP) en el núcleo, abrazaderas y partes estructurales también se incrementan a una tasa proporcional al cuadrado de la corriente de la carga, pero estas pérdidas de potencia no se incrementan de forma proporcional al cuadrado de la frecuencia y se conocen como pérdidas de corrientes de Foucault. Estudios realizados por han demostrado que las pérdidas por corrientes parásitas en barras colectoras, conexiones y partes estructurales aumentan proporcionalmente a un factor de exponente de aproximadamente 0,8 o menos <sup>62</sup> en lugar de 2. Para los transformadores tipo seco, el aumento de temperatura debido a estas corrientes parásitas es menos crítico, pero debe tenerse en cuenta su impacto en los transformadores que están sumergidos en líquido o aceite.

**C. Efecto en la subida de aceite superior.** La subida de aceite superior de los transformadores inmersos en aceite u otro líquido, aumentará a medida que las pérdidas de potencia del transformador se incrementen, ya que esto incrementa la temperatura del aceite. Cualquier aumento en otras pérdidas parásitas afectará principalmente a la subida del aceite <sup>63</sup>.

**2.3.1 Pérdidas totales de potencia en un transformador** Las pérdidas de los transformadores generalmente se clasifican en pérdidas en vacío y pérdidas con carga como se muestra en la ecuación (3) <sup>64 65</sup>

$$P_T = P_{NL} + P_{LL} \quad (3)$$

Donde:

$P_T$ : Pérdidas total, [W]

$P_{NL}$ : Sin pérdida en vacío, [W]

---

<sup>62</sup> *Ibíd.*

<sup>63</sup> *Ibíd.*

<sup>64</sup> SAID D. M. and NOR K. M., Op. Cit.

<sup>65</sup> RADMEHR, M.; FARHANGI, S.; NASIRI, A. Op. Cit.

$P_{LL}$ : Pérdida con carga, [W]

Las pérdidas de potencia en vacío o pérdidas de magnetización son debidas a la magnetización del núcleo del transformador. Las pérdidas de potencia con carga se subdividen en las pérdidas óhmicas ( $I^2R$ ) y las pérdidas por dispersión del flujo magnético en los devanados, núcleo, abrazaderas del núcleo, blindaje magnético, paredes del recinto o del tanque, etc.<sup>66</sup>. Por lo tanto, la pérdida de potencia total se subdivide en pérdidas en los devanados y pérdidas parásitas en componentes distintos de los devanados  $P_{OSL}$ .

La pérdida parásita de los devanados incluye los cables del devanado y la pérdida debida a las corrientes circulantes está dada entre los filamentos o los circuitos de devanado paralelo como se muestra en la ecuación (4).

$$P_{LL} = P_{I^2R} + P_{EC} + P_{OSL} \quad (4)$$

Donde:

$P_{LL}$ : pérdidas con carga [W]

$P_{I^2R}$ : pérdida en el devanado [W]

$P_{EC}$ : pérdidas de corriente Foucault [W]

$P_{OSL}$ : otras pérdidas [W]

Las pérdidas nominales de un transformador se pueden calcular utilizando los datos nominales del mismo. Para calcular las corrientes nominales primaria y secundaria de un transformador se utiliza la siguiente ecuación:

$$I_{1-rated} = \frac{P (kVA)}{\sqrt{3} \cdot V_1} \quad I_{2-rated} = \frac{P (kVA)}{\sqrt{3} \cdot V_2} \quad (5)$$

---

<sup>66</sup> SAID D. M. and NOR K. M., Op. Cit.

Y las pérdidas de potencia de los devanados se obtienen como:

$$P_{I^2R-rated} = k * [I_{1-rated}^2 * R_1 + I_{2-rated}^2 * R_2] \quad (6)$$

Donde:

$k$

= 1,0 para transformadores monofásicos, y 1,5 para transformadores trifásicos

Las pérdidas totales se obtienen de acuerdo con la ecuación (7)

$$P_{LL-rated} = P_{I^2R-rated} + P_{TSL-rated} \quad (7a)$$

$$P_{TSL-rated} = P_{EC-rated} + P_{OSL-rated} \quad (7b)$$

Donde:

$I_{1-rated}$ : corriente nominal en el lado primario del transformador

$I_{2-rated}$ : corriente nominal en el lado secundario del transformador

$R_1$ : resistencia primaria de DC

$R_2$ : resistencia secundaria de DC

$P_{LL-rated}$ : pérdidas con carga [W]

$P_{TSL}$  = Pérdidas de potencia de dispersión [W]

Con base en los estándares IEEE <sup>67</sup>, para el transformador de tipo seco, se puede suponer que las pérdidas de potencia por corrientes parásitas es aproximadamente 0,67 del total de pérdidas parásitas.

---

<sup>67</sup> IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid-Filled and Dry- Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Non sinusoidal Load Currents - Redline, IEEE Std C57.110-2008 (Revision of IEEE Std C57.110-1998), 2008.

**2.3.2 Cálculo de la disminución de la vida útil de los transformadores** Las pérdidas de potencia adicionales debidas a la distorsión de la señal de corriente en los transformadores generan un calentamiento adicional; donde la mayor concentración y disipación de temperatura ocurre en los devanados. Este calor extra genera un impacto significativo en la reducción de la vida útil en el aislamiento del transformador <sup>68</sup>.

La estimación de la pérdida de vida útil del transformador se basa en la tasa de deterioro de los materiales aislantes <sup>69 70</sup>. Aproximadamente el 50% de la pérdida de vida útil de un transformador es causada por las tensiones térmicas que son producidas por las corrientes distorsionadas <sup>71</sup>.

La temperatura máxima de los devanados está dada por la siguiente ecuación:

$$\theta_{HS} = \theta_A + \Delta\theta_{HS} \quad (8)$$

Donde:

$\theta_A =$  temperatura ambiente

$\theta_{HS} =$  temperatura del devanado del punto más caliente (°c)

$\Delta\theta_{HS}$

= aumento de la temperatura del devanado del punto más caliente por encima de la temperatura ambiente.

El factor de envejecimiento relativo  $F_{AA}$ , la pérdida de vida real *Real life* de un transformador se pueden expresar de la siguiente manera <sup>72</sup>

---

<sup>68</sup> SAID D. M. and NOR K. M., Op. Cit.

<sup>69</sup> RADMEHR, M.; FARHANGI, S.; NASIRI, A. .

<sup>70</sup> SAMESIMA, M.I., WILSON RESENDE, J., and ARAUJO, S.C.N.

<sup>71</sup> *Ibíd.*

<sup>72</sup> IEEE Std C57.91-1995, Guide for Loading Mineral-Oil- Immersed Transformers

$$F_{AA} = \exp\left(\frac{15000}{383} - \frac{15000}{\theta_H + 273}\right) \quad \% \text{ LOL} = \frac{F_{AA} * t * 100}{\text{normal insulation life}} \quad (9a)$$

$$\text{Life (pu)} = 9,8 * 10^{-18} e^{\left(\frac{15000}{\theta_H + 273}\right)} \quad (9b)$$

$$\text{Real life} = \text{Life (pu)} * \text{normal insulation life} \quad (9c)$$

$$\text{Real life} = \frac{\text{normal insulation life}}{F_{AA}} \quad (9d)$$

Donde:

$F_{AA}$  = factor de envejecimiento relativo

% LOL = pérdida de vida del transformador en %

$t$  = periodo de tiempo dado.

**2.3.3 Análisis de la disminución de la vida útil de transformadores de distribución** Con el fin de analizar con datos medidos el impacto de la calidad de energía eléctrica en los transformadores de distribución y los efectos de la distorsión de las señales de corriente en la reducción de su vida útil; se analizarán dos casos presentados por los autores D.M. Said and K.M. Nor en el documento Effects of Harmonics on Distribution Transformers <sup>73</sup>. En ambos casos, los datos medidos se registraron durante una semana con intervalos de cinco minutos.

El primer caso corresponde a un edificio de un centro de cómputo y el segundo caso es la oficina y los edificios de unas salas de conferencias. La diferencia aquí es que la cantidad de computadoras conectadas al primer caso es mayor que la del segundo caso. Sin embargo, en ambas situaciones el tipo de carga conectada incluye cargas no lineales

---

<sup>73</sup> SAID D. M. and NOR K. M., Op. Cit.

En el edificio del centro de cómputo, un transformador dañado, fue reemplazado en 2001 por otro con una potencia nominal de 2500 kVA. El transformador antiguo tenía una potencia nominal de 2000 kVA y se usaba desde 1985, por lo que la vida útil de este transformador se redujo a 16 años, su esperanza de vida útil era 20,55 años <sup>74</sup>.

En cuanto al transformador del Caso 2, el transformador se utiliza desde 1988, y la esperanza de vida de este transformador es de veinte años.

Los parámetros obtenidos para diagnosticar la calidad de la potencia eléctrica son: la frecuencia, el valor eficaz de la tensión, el valor eficaz de la corriente, la distorsión armónica total de corriente, la potencia activa, la potencia reactiva, la potencia aparente, las componentes armónicas de la tensión, las componentes armónicas de la corriente, el factor de potencia y factor de potencia de desplazamiento. La Tabla 3 muestra las especificaciones de los transformadores de distribución y la Tabla 4 muestra las componentes armónicas de las corrientes para las cargas conectadas a los dos transformadores, las cuales se comparan con los estándares IEC TR 61000-3-4:1998 <sup>75</sup>.

**Tabla 3. Características de los transformadores de distribución en estudio para medición de calidad de energía.**

<b>Características</b>	<b>Caso 1</b>	<b>Caso 2</b>
Perdidas de potencia en vacío	2 500 W	1 600 W
Pérdidas de potencia con carga	25 000 W	14 570 W
Potencia ( KVA )	2500	1500
Tensión primaria	11000 v	11000 V
Tensión secundaria	433 V	433 V
Aumento de temperatura del devanado	100 °C	65 ° C
Temperatura ambiente	30 °C	30 ° C

---

<sup>74</sup> Ibíd.

<sup>75</sup> líd.

Características	Caso 1	Caso 2
Normal Insulation life	20,55 años	20,55 años

Fuente: SAID D. M. and NOR K. M., "Effects of harmonics on distribution transformers," 2008 Australasian Universities Power Engineering Conference, Sydney, NSW, 2008, pp. 1-5.

Teniendo en cuenta la ecuación (8) se sustituyen los valores para cada caso con el fin de hallar la temperatura del devanado del punto más caliente

$$\theta_{HS(caso1)} = \theta_{A(caso1)} + \Delta\theta_{HS(caso1)}$$

$$\theta_{HS(caso1)} = 30^{\circ}C + 100^{\circ}C$$

$$\theta_{HS(caso1)} = 130^{\circ}C$$

$$\theta_{HS(caso2)} = \theta_{A(caso2)} + \Delta\theta_{HS(caso2)}$$

$$\theta_{HS(caso2)} = 30^{\circ}C + 65^{\circ}C$$

$$\theta_{HS(caso2)} = 95^{\circ}C$$

Teniendo en cuenta la ecuación (9b) se sustituyen los valores para caso 1 y 2

$$life (p.u)_{caso1} = 9,8 * 10^{-18} e^{\left(\frac{15000}{100+273}\right)} = 2,8585$$

$$life (p.u)_{caso2} = 9,8 * 10^{-18} e^{\left(\frac{15000}{65+273}\right)} = 183,928$$

El uso de esta fórmula aísla la temperatura como principal variable que afecta la vida térmica; indica también el grado hasta el cual el nivel de envejecimiento es acelerado por encima de lo normal para temperaturas por encima de una temperatura de referencia de 110 °C y se reduce debajo de lo normal para temperaturas menor es a 110 °C

Teniendo en cuenta la ecuación 9(a) se sustituyen los valores para el caso 1 y 2 y hallamos el factor envejecimiento.

$$F_{AA}(caso1) = \exp^{\left(\frac{15000}{383} - \frac{15000}{100 + 273}\right)} = 0,3499$$

$$F_{AA}(caso2) = \exp^{\left(\frac{15000}{383} - \frac{15000}{65 + 273}\right)} = 0,00543$$

El envejecimiento del aislamiento del transformador es acelerado en los puntos más calientes en comparación a las temperaturas de otros puntos menos calientes y que son tomados como referencia. La Norma IEEE C57, 91 -1995 establece que: La temperatura de referencia para los puntos más calientes es de 110 °C para transformadores con elevación de 65 °C en promedio en bobinado y de 95 °C para los transformadores con elevación de 55 °C en promedio del bobinado (sin aislamiento térmico mejorado)<sup>76</sup>. Para valores de temperatura en los puntos calientes excediendo sus valores de temperatura de referencia el factor de aceleración de envejecimiento es mayor que 1, caso contrario el factor de aceleración de envejecimiento es menor que 1.

Cálculo % de pérdida de vida útil para los casos 1 y 2

$$\% LOL caso1 = \frac{0.3499 * 9 * 100}{180000} = 0,0017\%$$

$$\% LOL caso2 = \frac{0.00543 * 9 * 100}{180000} = 0,000027\%$$

---

<sup>76</sup> COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA Resolución CREG 108 de 1997 Op. Cit.

El valor máximo de pérdida de vida diaria para una carga nominal, según la interpretación de la norma IEEE Std C57,91 - 1995, para el aislamiento térmicamente mejorado a 65 °C de referencia es de 0,0133 %, cumpliendo el tiempo de vida estimado de diseño de este tipo de aislamiento de 180000 horas ó 20,55 años.

Cálculo de vida real caso 1 y 2

$$Real\ life\ caso1 = 2,8585 * 20,55 = 58,74$$

$$Real\ life\ caso2 = 183,928 * 20,55 = 3779,72$$

$$Real\ life\ caso1 = \frac{20,55\ años}{0,3499} = 58,73$$

$$Real\ life\ caso2 = \frac{20,55\ años}{0,00543} = 3784,53$$

**Tabla 4. Distorsión armónica para las cargas del transformador comparado con los límites estándar**

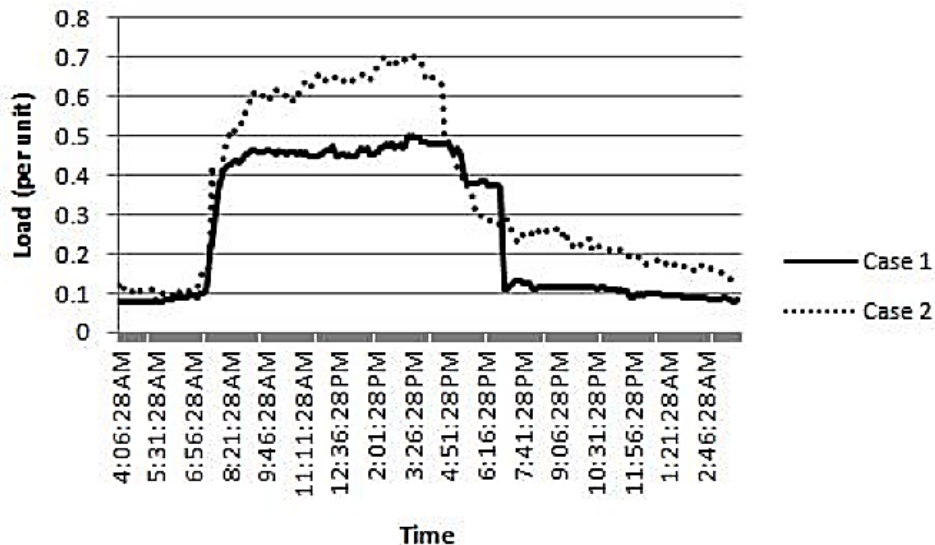
<b>No. Armónico</b>	<b>Datos medición (A) Caso 1</b>	<b>Datos medición (A) Caso 2</b>	<b>Límite máximo estándar según IEC TR 61000-3- 4:1998 )</b>
1	100	100	
3	33,83	13,2	21,6
5	29,62	10,16	10,7
7	19,35	5,66	7,2
9	14,7	4,1	3,8
11	6,81	2,1	3,1
13	5,07	1,78	2

No. Armónico	Datos medición (A) Caso 1	Datos medición (A) Caso 2	Límite máximo estándar según IEC TR 61000-3- 4:1998 )
15	3,25	1,8	0,7
<b>THD%</b>	<b>51,91</b>	<b>18,36</b>	<b>25,72</b>

Fuente: SAID D. M. and NOR K. M., "Effects of harmonics on distribution transformers," 2008 Australasian Universities Power Engineering Conference, Sydney, NSW, 2008, pp. 1-5.

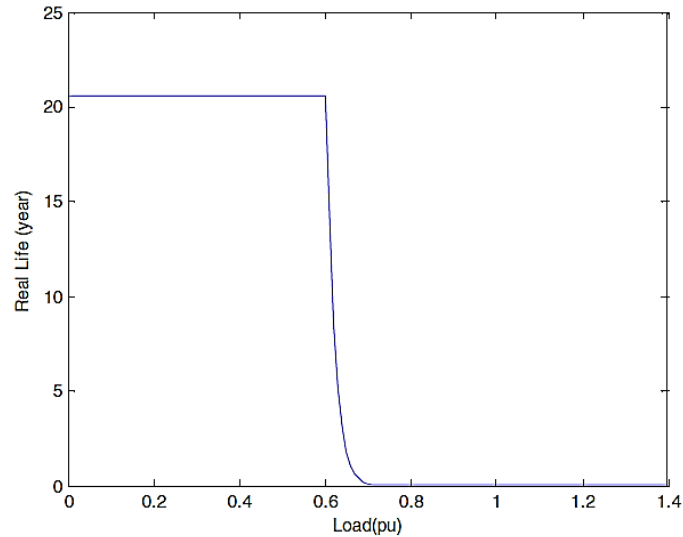
La distorsión armónica total para el Caso 1 es 51,91% y para el Caso 2 y 18,36% respectivamente. La curva diaria o carga por unidad de los transformadores se muestra en la Figura 25. El uso de las cargas en el edificio es desde las 8 horas hasta las 17 horas. La carga máxima en por unidad que tiene los transformadores es de aproximadamente 0,5 p.u. para el Caso 1 y 0,7 p.u. para el Caso 2.

**Figura 25. Ciclo de carga diaria en los dos transformadores analizados**



Fuente: SAID D. M. and NOR K. M., "Effects of harmonics on distribution transformers," 2008 Australasian Universities Power Engineering Conference, Sydney, NSW, 2008, pp. 1-5.

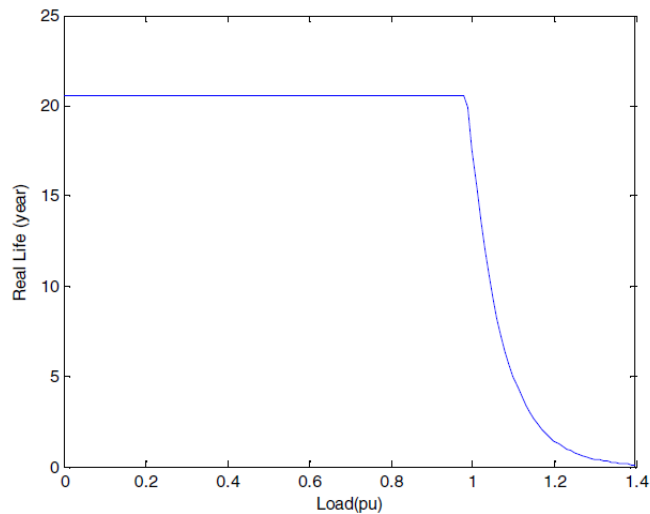
**Figura 26. Vida útil del transformador versus carga en presencia de armónicos utilizando datos medidos para el caso 1 (THD= 51,91%)**



Fuente: SAID D. M. and NOR K. M., "Effects of harmonics on distribution transformers," 2008 Australasian Universities Power Engineering Conference, Sydney, NSW, 2008, pp. 1-5.

La Figura 26 muestra que para la distorsión armónica total del 51,91%, el transformador tendrá una vida útil normal con una carga inferior a 0,60 por unidad porque su factor de envejecimiento es menor a 1.

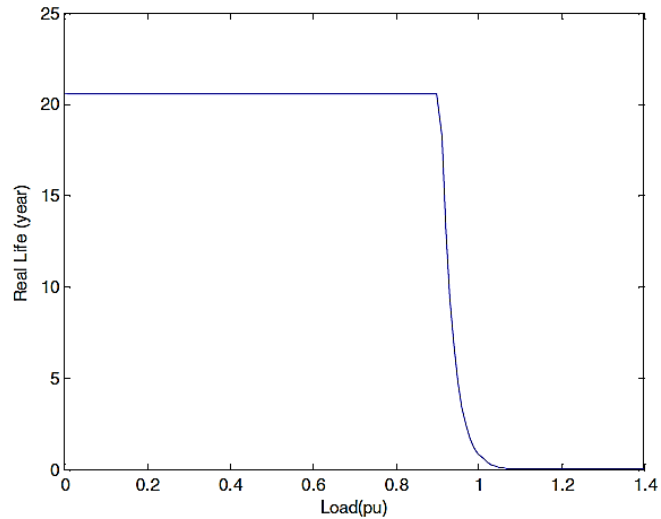
**Figura 27. Vida útil del transformador versus carga en presencia de armónicos utilizando datos medidos para el caso 2 (THD= 18,36 %)**



Fuente: SAID D. M. and NOR K. M., "Effects of harmonics on distribution transformers," 2008 Australasian Universities Power Engineering Conference, Sydney, NSW, 2008, pp. 1-5.

Para el Caso 2, la Figura 27 muestra que el transformador mantiene su vida útil aún si la carga que se conecta al transformador es la nominal siempre y cuando se mantenga la distorsión armónica total del 18,36%.

**Figura 28. Vida útil del transformador versus carga utilizando el límite máximo IEC TR 61000-34:1998**



Fuente: SAID D. M. and NOR K. M., "Effects of harmonics on distribution transformers," 2008 Australasian Universities Power Engineering Conference, Sydney, NSW, 2008, pp. 1-5.

La Figura 28 muestra el impacto en la vida útil del transformador cuando la distorsión armónica total de corriente es el máximo propuesto por la norma IEC TR 61000-34:1998 (25,72%). En este caso, si la cargabilidad del transformador excede el 90%, la vida útil del transformador disminuirá en aproximadamente un 28% por cada aumento del 1% en la cargabilidad del transformador.

Para el Caso 1, el transformador tiene una cargabilidad máxima del 50% y por lo tanto, el factor de aceleración de envejecimiento es menor que 1. Esto significa que la vida útil del transformador no será inferior a su vida normal esperada. Sin embargo, con los mismos niveles de distorsión armónica y considerando una temperatura ambiente de 30°C y una temperatura de referencia de 100°C, si la cargabilidad del transformador aumenta al 70%, el factor de aceleración de

envejecimiento será 2,53 y la esperanza de vida real de este transformador disminuirá de 20,55 a 8,12 años.

El estudio del impacto la distorsión de la corriente en los transformadores de potencia es importante, porque estos se encuentran entre los equipos más costosos y los equipos de planta más críticos en las empresas del sector eléctrico, especialmente en la red de transmisión y distribución de energía eléctrica <sup>77</sup>.

## **2.4 CARACTERÍSTICAS Y ANÁLISIS DE NUEVOS DISEÑOS O CONSTRUCCIÓN DE TRANSFORMADORES PARA CONEXIÓN DE CARGAS NO LINEALES.**

Existen varias técnicas o diseños para la mitigación del impacto de la distorsión de las señales de tensión y corriente en las redes de distribución de energía eléctrica y en los equipos que la conforman como los transformadores. Unas son para bloquear el paso de las componentes armónicas que fluyen hacia los equipos sensibles como los equipos electrónicos.

Otros dispositivos son diseñados para permitir la circulación de las componentes armónicas a través de ellos, los cuales se confinan para circular por zonas limitadas de la red, preferentemente circunscritas a los focos emisores de las mismas. Y la otra forma es vivir con el problema, pero “protegido”. Esto se logra sobredimensionan los equipos de potencia que estarán sometidos a corrientes y tensiones distorsionadas.

En general las técnicas que se emplean hacen la función de un filtro, algunas de ellas son: filtros de choque, filtros de absorción, protección de instalaciones de

---

<sup>77</sup> SAID D. M. and NOR K. M Op. Cit.

variadores de frecuencia por medio de reactores de choque, compensadores estáticos, bloqueo de corrientes armónicas de secuencia cero con transformadores estrella/delta, bloqueo de corrientes armónicas con transformadores de aislamiento, bloqueo con transformadores zig-zag., sobredimensionamiento de la capacidad del hilo de neutro, variadores de frecuencia sintonizados, degradación de potencia en transformadores ordinarios, degradación de la capacidad nominal de los conductores eléctricos, transformadores tipo K, entre otros <sup>78</sup>.

**2.4.1 Diseño de transformadores y técnicas para la mitigación de componentes armónicas** Actualmente existen varias técnicas para reducir el impacto de las cargas no lineales en los transformadores de distribución ya sea desde el punto de vista del diseño y fabricación hasta alternativas de conexión para mitigar el incremento de la distorsión de las señales y así reducir las pérdidas ocasionadas por calentamiento en los devanados.

A continuación, se presentan algunas de estas alternativas.

**2.4.2 Diseño y ejemplo de construcción de transformador con factor K** En la referencia <sup>79</sup> se dice con respecto a los transformadores con factor k lo siguiente: “Estos transformadores están diseñados para soportar sobrecalentamientos en los devanados producidos por las armónicas, el factor K indica la capacidad de la distorsión armónica que el transformador soporta; ocupan más espacio que los transformadores estándar. Para el cálculo de un transformador factor K se hace el promedio de los diferentes niveles de distorsión ponderándolos con la cantidad de KVA instalados de cada nivel. Estos cálculos se hacen involucrando valores de p.u. (por unidad) de la corriente RMS para cada una de las frecuencias armónicas;

---

<sup>78</sup> ESPARZA GONZÁLEZ, Mario Salvador; MATA GUERRERO, Jesús Alejandro; CASTAÑEDA RAMOS, Luis Antonio Op. Cit.

<sup>79</sup> Ibíd.

básicamente cada  $I_h(pu)$  es elevado al cuadrado y luego multiplicado por el cuadrado de la armónica  $h^2$ <sup>80</sup>.

El factor K se obtiene con la siguiente ecuación:

$$K = \sum_n [I_h(pu)]^2 * h^2 \quad (10)$$

El factor K, se multiplica por las pérdidas de potencia debido a las corrientes de Eddy, que produce el incremento de calor en el transformador debido a la distorsión armónica. De acuerdo a la norma ANSI C57 110-1986 se establecen los factores K1, K-4, K-9, K-13, K-20, K-30 Y K-40. En la Tabla 5 se indican los contenidos armónicos hasta la armónica 15 para los factores K-4, K-13, K-20-K-30 más utilizados. Los valores aquí establecidos son estimados y los valores reales en un sistema pueden variar, el usuario seleccionara el factor K más adecuado a su sistema.

**Tabla 5 Cargas con factor K.**

<b>CARGAS CONFACTOR K</b>					
<b>Armónica</b>	<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>K-4</b>	<b>K-13</b>	<b>K-20</b>	<b>K-30</b>
1	60	100,000%	100,000%	100,000%	100,000%
3	180	16,667%	33,333%	41,667%	50,000%
5	300	10,000%	20,000%	25,000%	30,000%
7	420	7,143%	14,286%	17,857%	21,429%
9	540	5,555%	11,111%	13,889%	16,667%
11	660	4,545%	9,091%	11,364%	13,636%
13	780	3,846%	7,692%	9,615%	11,538%
15	900	3,333%	6,667%	8,333%	10,000%

Fuente: TRANSFORMADORES ORION Fabricante de transformadores MANUFACTURAS ELECTRICAS ORION S.A de C.V MEXICO D.F [en línea] disponible en: <http://www.transformadoresorion.com/factork.html>

<sup>80</sup> Ibíd.

En la referencia <sup>81</sup> se menciona que: “De acuerdo con los fabricantes, los transformadores que cumplen con el factor K son similares a los transformadores trifásicos secos normales y se fabrican con los mismos cuidados, sin embargo para los de factor K se tienen que tomar en cuenta las corrientes distorsionadas aumentan el valor eficaz de la corriente, el calentamiento debido a las pérdidas indeterminadas por alta frecuencia, la circulación de las corrientes de la componente del tercer armónico dentro de la conexión delta y en el neutro de la estrella, la configuración adecuada de los conductores en paralelo y otros elementos como el blindaje electrostático. Al contemplar estas consideraciones hacen que los transformadores con factor K resulten constructivamente más robustos, con dimensiones y pesos mayores que su contraparte normal, aumentado conforme al valor del factor K” <sup>82</sup>.

Adicionalmente se resalta en esta publicación que: “Estos diseños de transformadores con factor K tienen como base el cuidado de manejar un circuito magnético calculado a bajas densidades, basándose en emplear conductores en paralelo para proporcionar un camino más eficiente de la corriente, y la colocación de vías de refrigeración propias para la disipación del sobrecalentamiento provocado por las corrientes y tensiones no sinusoidales” <sup>83</sup>.

La Tabla 6 presenta los factores K de diferentes tipos de cargas no lineales.

Por otra parte, la Figura 29 muestra una ficha técnica de transformadores diseñados para alimentar cargas no lineales y variantes en el tiempo.

---

<sup>81</sup> TRANSFORMADORESORION *Fabricante de transformadores MANUFACTURAS ELECTRICAS ORION S.A de C.V MEXICO D.F [en línea] disponible en:* <http://www.transformadoresorion.com/factork.html>

<sup>82</sup> *Ibíd.*

<sup>83</sup> *Ibíd.*

**Tabla 6. Tabla con factor K. para diferentes tipos de cargas**

alumbrado con lámparas incandescentes	K-1
calefacción por resistencia eléctrica	K-1
Motores sin estado solido	K-1
Control de los transformadores/dispositivos electromagnéticos de control	K-1
Motores generadores (sin estado sólido)	K-1
Descarga eléctrica de iluminación	K-4
UPS con filtro en la entrada	K-4
Soldadoras eléctricas	K-4
Equipos de calentamiento por inducción	K-4
Plc's y control de estado solido	K-4
Equipos de telecomunicaciones	K-13
UPS sin filtro en la entrada	K-13
Circuitos de receptáculos múltiples en áreas de cuidados generales de salud, salones de escuelas, etc.	K-13
Circuitos de receptáculos múltiples en pruebas u otras áreas de producción.	K-13
Cargas de computadoras	K-20
Circuitos de receptáculos múltiples dentro de salas de operación y recuperación de hospitales	K-20

Fuente: TRANSFORMADORESORION Fabricante de transformadores  
MANUFACTURAS ELECTRICAS ORION S.A de C.V MEXICO D.F [en línea]  
disponible en: <http://www.transformadoresorion.com/factorK.html>

**Figura 29. Ficha técnica Transformador NL y NLP para cargas no lineales**

Transformadores de Propósito Especial  
Transformadores para Cargas no Lineales  
Modelo NL Estándar y Modelo NLP Premium

**Aplicación**

Los tipos NL y NLP son transformadores de tipo seco diseñados para alimentar aplicaciones tales como computadoras, copadoras, impresoras, máquinas de FAX, terminales de pantalla de vídeo y otros equipos que tienen fuentes de poder electrónicas. Estos transformadores están especialmente contruados para manejar armónicos altos asociados con tales cargas. El tipo NLP está diseñado particularmente para aplicaciones no lineales más severas y tiene niveles de ruido reducidos; tres decibeles por debajo de las normas NEMA.

**Características**

Las características para servicio de cargas no lineales incluyen:

- Transformadores de tipo seco, trifásicos, 480 Delta – 208Y/120
- Blindaje electrostático
- Clase de aislamiento 220
- Flujo del núcleo reducido para compensar la distorsión armónica del voltaje
- Neutro al 200% con terminales de doble tamaño para cables adicionales del usuario
- Capacidad adicional de los devanados para compensar mayores pérdidas de carga no lineales.
- Elevación de temperatura 115°C
- Gabinetes de alta resistencia ventilados para interiores (protectores de clima disponibles)
- Listado por UL

**Modelo NL Estándar trifásico de 60 Hz**

kVA	Número de Catálogo	Taps a capacidad plena *	Temp. de Elev. en ° C	Peso (kg.)	Gab	Diagrama de alambrado
<b>Primario 480 Volts Delta Devanado de Aluminio</b>						
<b>Secundario 208Y/120VVolts 60 Hz Factor K-4 UL</b>						
15	15T3FISNL	6-2.5%2+4-	115	109	17D	10
30	30T3FISNL	6-2.5%2+4-	115	136	18D	10
45	45T3FISNL	6-2.5%2+4-	115	227	19D	10
75	75T3FISNL	6-2.5%2+4-	115	329	21D	10
112.5	112T3FISNL	6-2.5%2+4-	115	431	22D	10
150	150T3FISNL	6-2.5%2+4-	115	585	24D	10
225	225T3FISNL	6-2.5%2+4-	115	882	25D	10
300	300T68FISNL	4-2.5%2+2-	115	953	25D	11
500	500T90FISNL	4-3.5%2+2-	115	1633	29D	11

<b>Primario 480 Volts Delta Devanado de Cobre</b>						
<b>Secundario 240 Volts 60 Hz Factor K-4 UL</b>						
15	15T3HFISUNL	6-2.5%2+4-	115	330	18D	10
30	30T3HFISUNL	6-2.5%2+4-	115	350	18D	10
45	45T3HFISUNL	6-2.5%2+4-	115	475	18D	10
75	75T3HFISUNL	6-2.5%2+4-	115	865	21D	10
112.5	112T3HFISUNL	6-2.5%2+4-	115	1090	22D	10
150	150T3HFISUNL	6-2.5%2+4-	115	1450	24D	10
225	225T3HFISUNL	6-2.5%2+4-	115	2065	25D	10
300	300T68HFISUNL	4-2.5%2+2-	115	2200	25D	11
500	500T90HFISUNL	4-2.5%2+2-	115	4300	29D	11

■ Para los tipos de gabinetes vea la Tabla de Dimensiones en la Pág. 27.  
◆ Vea los diagramas de alambrado en la Página 41.



Transformadores tipo NL para servicio de carga no lineal y transformadores tipo NLP para servicio de carga no lineal más severo.

**Modelo NLP Trifásico**

kVA	Número de Catálogo	Taps a capacidad plena *	Elev. de Temp ° C	Peso (kg.)	Gab	Diag de alam. ◆
<b>Primario 480 Volts Delta Devanado de Aluminio</b>						
<b>Secundario 208Y/120VVolts 60 Hz Factor K-13 UL</b>						
15	15T3HFISNLP	6-2.5%2+4-	115	112	17D	10
30	30T3HFISNLP	6-2.5%2+4-	115	159	18D	10
45	45T3HFISNLP	6-2.5%2+4-	115	272	19D	10
75	75T3HFISNLP	6-2.5%2+4-	115	354	22D	10
112.5	112T3HFISNLP	6-2.5%2+4-	115	465	22D	10
150	150T3HFISNLP	6-2.5%2+4-	115	631	25D	10
225	225T3HFISNLP	6-2.5%2+4-	115	912	25D	10
300	300T68HFISNLP	4-2.5%2+2-	115	953	30D	11
500	500T90HFISNLP	4-3.5%2+2-	115	1633	32F	11
<b>Primario 480 Volts Delta Devanado de Cobre</b>						
<b>Secundario 240 Volts 60 Hz Factor K-13 UL</b>						
15	15T3HFISUNLP	6-2.5%2+4-	115	150	18D	10
30	30T3HFISUNLP	6-2.5%2+4-	115	173	18D	10
45	45T3HFISUNLP	6-2.5%2+4-	115	272	19D	10
75	75T3HFISUNLP	6-2.5%2+4-	115	393	22D	10
112.5	112T3HFISUNLP	6-2.5%2+4-	115	567	22D	10
150	150T3HFISUNLP	6-2.5%2+4-	115	887	25D	10
225	225T3HFISUNLP	6-2.5%2+4-	115	1112	25D	10
300	300T68HFISUNLP	4-2.5%2+2-	115	1089	30D	11
500	500T90HFISUNLP	4-3.5%2+2-	115	2268	33F	11

Fuente: SQUARE D, SCHNEIDER ELECTRIC Documento Transformadores secos de Baja Tensión Guía de Selección Clase 7400

## Ejemplo Casos 1 y 2

El transformador debe de ser capaz de disipar el calor producido por sus pérdidas sin sobrecalentarse ni deteriorar su vida útil. Por lo general, los transformadores son construidos solo para soportar el aumento de temperatura debido a las corrientes parásitas a frecuencia nominal de 60 Hz, es decir, gran parte de los transformadores de distribución tienen factor  $K$  igual a 1. Para los dos casos estudiados se estima el valor del factor  $K$  que debe tener cada uno de los transformadores de distribución para soportar la distorsión armónica total en corriente de acuerdo con la carga instalada y considerando estar expuesto a una sobrecarga. Los dos transformadores de distribución alimentan una carga comercial o centros de cómputo con una carga mayor para el caso 1 y un factor  $K$ -13 y menor carga para caso 2 con factor  $K$ -4 respectivamente. El factor  $K$  debe marcarse claramente en la placa de identificación del transformador.

Con respecto a la denominación de un transformador como  $K$ -1, significa que es el transformador convencional se diseña para soportar solamente los efectos de calentamiento de las pérdidas normales y de las pérdidas adicionales por corrientes parásitas (eddy losses) resultantes considerando que la carga instalada tiene características lineales e invariantes en el tiempo y por consiguiente las señales de tensión y corriente presentan una distorsión muy baja (se considera la energía transformada en este equipo es sólo de 60Hz. Por otra parte, la denominación  $K$ -4, significa que el transformador está diseñado para suministrar la potencia nominal, sin sobrecalentamiento, considerando que la corriente de carga esta distorsionada y que el modelo matemático de esta corriente tiene como límite las componentes armónicas presentadas en la Tabla 5. El número "4" también indica su capacidad de soportar hasta cuatro veces las pérdidas de corriente de "eddy" con relación a un transformador  $K$ -1.

Por otra parte, un transformador K-13 también se diseña para que soporte una corriente distorsionada de la carga en este caso, el límite de la distorsión armónica individual del modelo matemático de la Serie de Fourier, que puede soportar es de hasta un 200% a la establecida para un transformador clasificado como K-4.

La Tabla 7 muestra el ejemplo del diseño del Caso 1, donde se seleccionó un transformador con clasificación K-13. Por otra parte, la Tabla 8 presenta la información utilizada para el diseño del Caso 2 donde el transformador seleccionado está clasificado como K-4.

**Tabla 7. Ejemplo de diseño y selección de transformador con factor K-13 caso 1**

<b>TRANSFORMADOR CON FACTOR K-13 SELECCIONADO PARA CASO 1 (2.3.3)</b>			
<b>No. Armónico</b>	<b>Datos medición (A)</b>	<b>Datos de fabricante Tomado referencia tabla 5.</b>	<b>TIPO DE CARGA - FACTOR K- 13 (Caso 1)</b>
	<b>Caso 1</b>	<b>K-13</b>	
1	100	100,00%	*K-13: Un transformador K-13 puede acomodar 200% de la carga armónica de un transformador clasificado como K-4 Equipamientos de Telecomunicación (por ejem. PBX) - K-13 UPS sin filtros de entrada - K-13 Alimentación de receptáculos multihilos en general en áreas con instrumentos de cuidados con la salud y aulas de escuelas, etc. - K-13 Fuentes de circuitos con receptáculos multihilos para equipamientos de inspección y pruebas en sectores productivos o líneas de producción - K-13
3	33,83	33,33%	
5	29,62	20,00%	
7	19,35	14,29%	
9	14,7	11,11%	
11	6,81	9,09%	
13	5,07	7,69%	
15	3,25	6,67%	

**Tabla 8. Ejemplo de diseño y selección de transformador con factor K-4 CASO 2**

<b>TRANSFORMADOR CON FACTOR K-4 SELECCIONADO PARA CASO 2 (INCISO 2.3.3)</b>			
<b>No. Armónico</b>	<b>Datos medición (A)</b>	<b>Datos de fabricante Tomado referencia tabla 5.</b>	<b>TIPO DE CARGA - FACTOR K- 4 (Caso 2)</b>
	<b>Caso 2</b>	<b>K-4</b>	
1	100	100,00%	Iluminación con lámparas de descargas - K-4 Equipamiento de calentamiento inductivo - K-4 PLCs y controles de estado sólido (otros además de drives variadores de velocidad). Equipamientos de Telecomunicación (por ejemplo. PBX) - K-4 Clase de temperatura: B (130°C) o F (155°C)
3	13,2	16,67%	
5	10,16	10,00%	
7	5,66	7,14%	
9	4,1	5,56%	
11	2,1	4,55%	
13	1,78	3,85%	
15	1,8	3,33%	

La expectativa de vida normal de un transformador es una referencia convencional que se basa en considerar su funcionamiento en servicio continuo con su carga nominal, en un medio ambiente cuya temperatura es de 30°C y con una sobrelevación de temperatura del punto caliente de 100°C (temperatura 130 °C). Si este valor se supera debe esperarse una reducción de la vida útil de los equipos.

Para sobrecarga se recomienda no superar ciertos límites de corriente en valor relativo y temperaturas del punto caliente y del aceite en la capa superior.

Se puede decir que todo el marco teórico revisado, arroja una misma conclusión, la construcción y diseño del transformador de distribución para este tipo de carga se ve seriamente afectada cuando este está expuesto a cargas de características no lineales o invariantes en el tiempo, que distorsionan las señales de corriente,

causando pérdidas potencia considerablemente mayores con respecto a las generadas por un transformador diseñado de forma convencional para suministrar energía a carga lineales e invariantes en el tiempo. En estos casos un calentamiento del transformador del orden del 20% por encima del calentamiento normal afecta seriamente la vida útil del transformador.

Por consiguiente, para garantizar un óptimo funcionamiento y evitar daños en los equipos de las redes de distribución de energía eléctrica (usuarios comerciales, industriales o residenciales), se debe dimensionar el transformador, afectando los factores que elevan su capacidad de sobrecarga, y generan cambios determinantes en la fabricación y en los materiales usados. Los cambios más significantes son los ocasionados dentro de la parte activa; el núcleo se debe diseñar mucho más robusto, puesto que los transformadores se construyen aprovechando al máximo sus propiedades magnéticas. Para no tener que sobredimensionar el transformador que va a estar expuesto a señales distorsionadas, se debe diseñar inicialmente teniendo en cuenta el cálculo del factor  $K$ , el cual se define con base a la cantidad de sobre corrientes y sobrecargas asumidas como las perturbaciones a las cuales se va a exponer durante su vida útil.

Por otra parte, para impedir la transmisión de señales de alta frecuencia entre los devanados primario y secundario de un transformador, en algunos transformadores se instala una pantalla EMC. Esta pantalla electrostática aumenta las dimensiones del transformador.

En relación a su instalación se debe de tomar precauciones especiales, para que la conexión de la puesta a tierra se realice de forma correcta, con el objeto de evitar que la pantalla adquiera potenciales elevados. Para el diseño de las bobinas se debe tener en cuenta que, se puede emplear conductores conformados por sub conductores, continuamente transpuestos, para reducir la componente radial del campo de dispersión, procurando que la distribución axial de corrientes de los

arrollamientos de alta tensión y de baja tensión resulten compensados en toda su extensión, evitando bobinas de distinta altura. Los arrollamientos deben llevar mayor cantidad de conductores en sentido axial, para generar un área de sección transversal mayor a la generada en una bobina convencional, igualmente es aconsejable aumentar levemente la cantidad de conductores en dirección radial, para controlar la sobre temperatura media.

Con relación al calibre de los conductores del transformador, en su dimensionamiento se debe tener en cuenta que la distorsión de la corriente puede causar deterioro en los conductores de las fases y del neutro. En algunos casos en mayor grado sobre el conductor del neutro. En estos escenarios, el tamaño del conductor del neutro se incrementa para soportar la circulación de la corriente distorsionada que en su modelo matemático tiene un alto valor en las componentes armónicas de orden “triple-N”.

#### **2.4.3 Degradación de la potencia nominal de un transformador estándar**

Esta técnica está basada en la normativa ANSI/IEEE C57, 110-1986. Consiste en un cálculo de los KVA utilizables en un transformador estándar sometido a un flujo determinado de corriente armónica. Este método inicia con los cálculos de las pérdidas de potencia del transformador a su frecuencia nominal y determina los KVA utilizables, en relación a los KVA nominales, por medio de una expresión algebraica que obtiene la influencia de las pérdidas de potencia por corrientes parásitas e introduce el factor K, asociado al sobrecalentamiento del transformador <sup>84</sup> Matemáticamente se puede expresar así:

$$P_T = P_W + P_{C+} P_{OSL} \quad (11)$$

Donde:

---

<sup>84</sup> ESPARZA GONZÁLEZ, Mario Salvador; MATA GUERRERO, Jesús Alejandro; CASTAÑEDA RAMOS, Luis Antonio

$P_T$  = pérdidas totales en el transformador.

$P_w$  = son las pérdidas en el devanado

$P_C$  = pérdidas en el núcleo, incluyendo las pérdidas por histerisis

$P_{OSL}$  = pérdidas por dispersión del flujo magnético

**2.4.4 Bloqueo con transformador Zig Zag** De acuerdo con la referencia <sup>85</sup>: “Hasta ahora no hay un método efectivo y económico para superar el tercer armónico y triplen en el sistema trifásico distribución a cuatro hilos. Al integrar el principio de inhibir el flujo magnético de fase y al mismo tiempo aumentar la impedancia inductiva a través del transformador de zigzag de transposición, se puede lograr una reducción de la bobina secundaria, tripleta armónica” <sup>86</sup>.

Este transformador consiste en un devanado en zig-zag, que proporciona un desplazamiento angular igual que un devanado en delta, este transformador es de gran ayuda para mitigar las componentes armónicas de secuencia cero. Es un transformador con devanados delta en la parte de la fuente y devanado estrella en la parte de la carga no lineal, lo adicional en este devanado estrella es que tiene una bobina en serie en cada fase y estas forman un ángulo de 120° con respecto a la bobina de la fase correspondiente, produciéndose un desplazamiento angular igual que un devanado delta; además de proporcionar un hilo de neutro para cargas monofásicas. El transformador es una alternativa para sustituir a uno convencional cuando presente pérdidas de potencia y sobrecalentamientos debidos a la distorsión armónica de las cargas. Además, si se combina con filtros de las componentes armónicas 5<sup>a</sup> y 7<sup>a</sup> en sustitución de los reactores de choque puede constituir un sistema de bloqueo o filtro generalmente muy eficiente <sup>87</sup>[17].

---

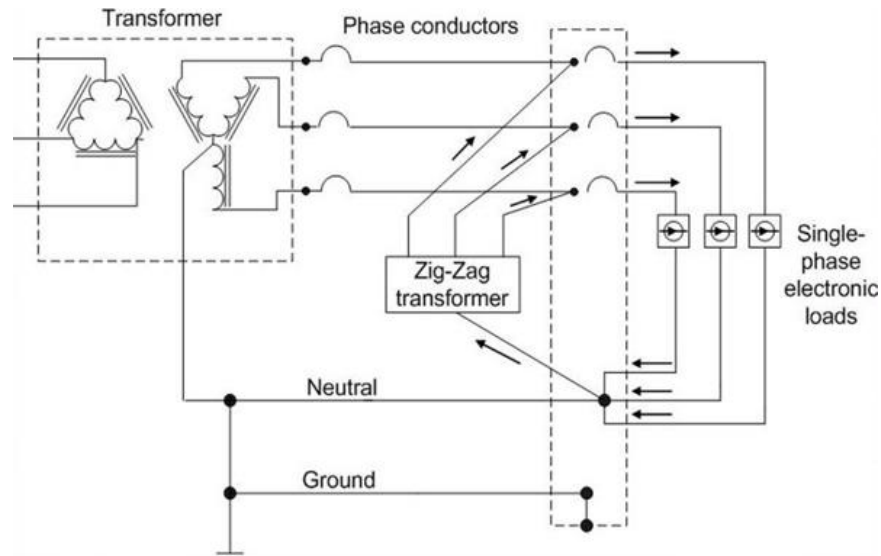
<sup>85</sup> CHAIRUL GAGARIN Irianto and SETIABUDY R., "Design Dtz transformer that compatible with nonlinear load in modern electrical systems," *Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics*, Bandung, 2011, pp.1-6. doi: 10.1109/ICEEI.2011.6021751

<sup>86</sup> *Ibíd.*

<sup>87</sup> ESPARZA GONZÁLEZ, Mario Salvador; MATA GUERRERO, Jesús Alejandro; CASTAÑEDA RAMOS, Luis Antonio Op. Cit.

La Figura 30 muestra la topología del transformador en conexión Zigzag.

**Figura 30. Transformador o bobina conexión Zigzag**



Fuente: Tomado presentación metodología de solución conexión zigzag

**2.4.5 Técnica para sobredimensionamiento del neutro** Esta técnica es empleada para disminuir las caídas de tensión que producen las componentes armónicas de secuencia cero en cargas monofásicas (Se considera alta cuando se tienen valores del 10% del valor pico respecto a la amplitud fase/neutro de la onda de tensión). En algunos casos la corriente por el neutro alcanza valores superiores al de la corriente de fase; razón por la cual es necesario redimensionar el conductor neutro. Además, el código NEC en su inciso 210-4a recomienda utilizar un calibre igual o mayor al de los conductores de fase <sup>88</sup>.

**2.4.6 Tecnología de transformador DTZ** El documento de la referencia <sup>89</sup> menciona que: “La demanda para satisfacer las necesidades del patrón de carga eléctrica moderna con las cargas no lineales dominantes son los principales

<sup>88</sup> *Ibíd.*

<sup>89</sup> CHAIRUL GAGARIN Irianto and SETIABUDY R., Op. Cit.

desafíos para los fabricantes y académicos en el desarrollo de la tecnología de transformador óptima, para superar uno de los problemas de calidad eléctrica debido a los armónicos. Una forma de "limpiar" es usar el circuito de filtro LCR".<sup>90</sup>.

Los filtros pueden omitir la frecuencia fundamental y eliminar la frecuencia más alta. Sin embargo, hay innovaciones alternativas y simples para superar la distorsión de la señal de corriente de un transformador. El enfoque de este método aún utiliza inductores, condensadores y resistencias como en el filtro, pero todas las características de los componentes del filtro son asumidas por la fuga de inductancia, la capacitancia interna y la resistencia del transformador de circuito interno. Las conexiones de devanado del transformador tienen un impacto significativo en el flujo de corrientes armónicas de la carga monofásica no lineal de orden 3<sup>91</sup>.

Por eso, el diseño del transformador triplete amortiguador armónico (DTZ) para reducir el impacto de las componentes armónicas con el propósito de mejorar el rendimiento del sistema. Como resultado, el sistema eléctrico en su conjunto se vuelve más eficiente y con menos pérdidas de potencia, además de ser más eficiente porque no necesita usar equipos de filtrado adicional<sup>92</sup>. La Figura 31 presenta la topología del transformador DTZ para mitigar las componentes armónicas de orden tres.

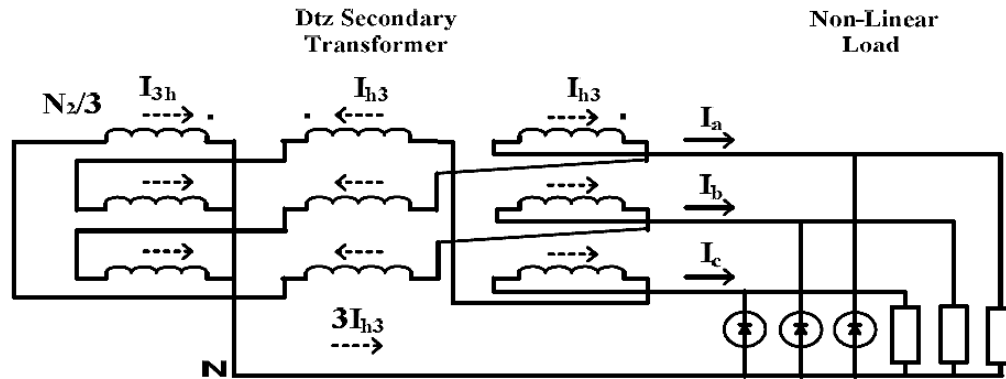
---

<sup>90</sup> *Ibíd.*

<sup>91</sup> BASTIÃO Fernando and HARMONIC Humberto Jorge, Distortion Analysis on The MV and LV Distribution Networks: Problems, Influencing Factors and Possible Solutions, Department of Electrical Engineering and Computers F.C.T.U.C., University of Coimbra Polo II da Universidad, 3030-290 Coimbra (Portugal), internet 25 Mei 2011

<sup>92</sup> CHAIRUL GAGARIN Irianto and SETIABUDY R., Op. Cit.

**Figura 31. Principio de la gran impedancia.**



Fuente: CHAIRUL GAGARIN Irianto and SETIABUDY R., "Design Dtz transformer that compatible with nonlinear load in modern electrical systems," Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics, Bandung, 2011, pp.1-6. doi: 10.1109/ICEEI.2011.6021751

**2.4.7 Transformadores de aislamiento** Los transformadores de aislamiento son equipos recomendados para aislar eléctricamente y reducir los disturbios eléctricos hacia las cargas sensibles y para proteger señales indeseables de alta frecuencia. Las aplicaciones típicas de los transformadores de aislamiento con protección de pantalla electrostática son:

- Supresión de oscilaciones momentáneas y ruido que viajan de la fuente de las cargas sensibles.
- Supresión de oscilaciones momentáneas y ruido en el punto donde se originan previniendo su inducción de la fuente a los alimentadores.
- Proveer aislamiento de un circuito a otro.

Hoy en día la instalación de componentes y sistemas electrónicos en la industria, crece aceleradamente. Los circuitos electrónicos que operan a un nivel de tensión bajo en corriente directa, son muy sensibles. Para todas las aplicaciones "sensibles" la pantalla electrostática se encarga de reducir y controlar la capacitancia, los

ruidos, transitorios y armónicos en la línea de tensión, creados por: cargas no lineales, conmutaciones de interruptores estáticos en el arranque y parada de motores, capacitores o dispositivos de electrónica de potencia.

**2.4.8 Rediseño de sistemas de distribución** Una de las posibles soluciones para la mitigación de las distorsiones de las señales de tensión y corriente es rediseñar el sistema de distribución. Al instalar equipos de gran capacidad en el sistema de transmisión nacional y en el sistema de distribución local particularmente en el caso de los transformadores es que este reduce en gran medida el problema de las distorsiones de las señales, especialmente las de corriente, al reducir la impedancia transitoria y proporcionalmente disminuir la distorsión armónica en la tensión. En los sistemas conectados en estrella la capacidad del neutro debe ser incrementada 173% con respecto a la capacidad de las fases, debido a la posibilidad que transiten una cantidad significativa de componentes armónicas.

En el caso de la conexión delta en los transformadores, este proporciona una trayectoria para que circule la tercera armónica y todos sus múltiplos, de esta forma las armónicas de orden  $(3*N)$  generados por los usuarios circulan en la trayectoria cerrada formada por la delta de los devanados del transformador. Las pérdidas de calor generadas por las componentes armónicas en los devanados del transformador, pueden ser significativas debiendo ser apropiada su capacidad.

**2.4.9 Elección del equipo más adecuado para mejorar la calidad de la energía eléctrica de un sistema de distribución** El primer aspecto a tener en cuenta al seleccionar un equipo de compensación es determinar el objetivo que se pretende al instalar el equipo. Antes de seleccionar el equipo es necesario haber realizado previamente un estudio del sistema eléctrico, que debe tener como mínimo: el inventario del tipo de carga instalada, la medición de parámetros eléctricos requeridos para realizar un análisis de calidad de energía eléctrica.

Algunas pautas generales a tener en cuenta son las siguientes:

Para mejorar el factor de potencia en instalaciones donde existen cargas no lineales en porcentaje inferior al 20% del total de las cargas presentes, se pueden utilizar banco de capacitores para uso interior, convencional fijo o automáticos y en lo posible instalados cerca de las cargas inductivas de mayor impacto en el sistema eléctrico.

- En el caso que se supere el 20% de las cargas no lineales, pero inferior al 50%, generalmente los filtros anti-resonantes cumplen satisfactoriamente su función de compensadores del factor de potencia y al mismo tiempo reducen a niveles tolerables la distorsión armónica total THD.
- Cuando las cargas no lineales superan el 50%, en la mayor parte de los casos se recurre a filtros sintonizados en los cuales se deberá efectuar un dimensionamiento a medida, teniendo en cuenta los siguientes aspectos como: orden de las componentes de armónicas de mayor impacto, para diseñar un filtrado con tantas ramas como componentes armónicas se quieran filtrar. También es necesario estimar el valor máximo de las corrientes armónicas a filtrar.

### **3. CONCLUSIONES.**

En síntesis, al término de esta monografía se puede afirmar que la calidad de energía eléctrica de un sistema eléctrico, depende de diversos factores que se deben tener en cuenta para evaluar el impacto que puede tener dicha calidad en los equipos que estén instalados en él.

Con relación a los transformadores de distribución, se deben considerar una serie de características del sistema que incluyen parámetros como la frecuencia, la tensión y la corriente.

La instalación de cargas no lineales en los sistemas eléctricos han tenido un incremento sustancial y su impacto en el rendimiento y vida útil de los transformadores debe ser diagnosticado adecuadamente para que se establezca si es necesario mitigar estos impactos para garantizar el buen funcionamiento de este equipo para que no altere el adecuado suministro de la energía eléctrica a los usuarios que están conectados.

El impacto de las cargas no lineales instaladas en un transformador depende del nivel de distorsión que causen especialmente en las señales de corriente y de la cargabilidad del transformador. Estos aspectos deben valorarse para establecer la necesidad o no de mitigar su impacto y garantizar de esta forma una vida útil del transformador adecuada. Por otra parte, del modelo matemático de la corriente distorsionada, las componentes armónicas de altas frecuencias, incrementan las pérdidas de potencia en el núcleo, incrementadas en proporción al cuadrado de la corriente de carga y en proporción al cuadrado de frecuencia debido al efecto pelicular.

Aunque durante el diseño y la construcción de un transformador, se dimensione adecuadamente para su operación, cuando este alimenta un gran número de cargas no lineales es evidente el incremento en las pérdidas de potencia, tanto en el núcleo como en los devanados, lo cual incrementa la temperatura del transformador y en algunos casos generan puntos calientes que deterioran el buen funcionamiento del núcleo o de los devanados del equipo.

La proliferación de cargas no lineales en las redes eléctricas representa un nuevo reto para los ingenieros electricistas y eléctricos en el diseño y construcción de los transformadores de distribución de potencia, en el mantenimiento y la solución de problemas.

La normatividad actual en América marca límites en forma general, mientras que la europea se enfoca a mejorar el diseño de los equipos de forma tal que no se genere el problema, es decir lo aborda desde su origen donde es más conveniente mitigarlo. La selección de la alternativa de solución dependerá de un estudio minucioso del problema tanto técnica como económicamente.

Por todo lo expuesto durante el desarrollo de esta monografía se concluye que, los transformadores diseñados especialmente para instalaciones que presentan cargas no lineales y/o variantes en el tiempo, son mucho más robustos y costosos, y aunque sean dimensionados correctamente para su operación, cuando estos alimentan un elevado número de cargas no lineales evidencian igualmente, incrementos en sus pérdidas tanto en núcleo como en los devanados.

## BIBLIOGRAFÍA

BASTIÃO Fernando and HARMONIC Humberto Jorge, Distortion Analysis on The MV and LV Distribution Networks: Problems, Influencing Factors and Possible Solutions, Department of Electrical Engineering and Computers F.C.T.U.C., University of Coimbra Polo II da Universidad, 3030-290 Coimbra (Portugal), internet 25 Mei 2011.

CHAIRUL GAGARIN Irianto and SETIABUDY R., "Design Dtz transformer that compatible with nonlinear load in modern electrical systems," Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics, Bandung, 2011, pp.1-6. doi: 10.1109/ICEEI.2011.6021751

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, Resolución CREG 015 de 2018, Por la cual se establece la metodología para la remuneración de la actividad de distribución de energía eléctrica en el sistema interconectado nacional., enero 29 de 2018 [en línea] disponible en: [http://apolo.creg.gov.co/publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/65f1aaf1d57726a90525822900064dac/\\$FILE/Creg015-2018.pdf](http://apolo.creg.gov.co/publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/65f1aaf1d57726a90525822900064dac/$FILE/Creg015-2018.pdf).

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA Resolución CREG 098 de 2008, Por la cual se aprueban los principios generales y la metodología para el establecimiento de los cargos por uso de los Sistemas de Transmisión Regional y Distribución Local, 26 de septiembre de 2008 [en línea] disponible en: <http://apolo.creg.gov.co/publicac./rensf/indice01solucion-2008-creg097-2008>

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA Resolución CREG 108 de 1997. Por la cual se señalan criterios generales sobre protección de los derechos de los usuarios de los servicios públicos domiciliarios de energía eléctrica y gas combustible por red física, en relación con la facturación, comercialización y demás asuntos relativos a la relación entre la empresa y el usuario, y se dictan otras disposiciones., julio 3 de 1997. 2008 [en línea] disponible en: <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/Indice01/Resoluci%C3%B3n-1997-CR108-97>.

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA Resolución CREG 070 de 1998, Por la cual se modifican las normas de calidad de la potencia eléctrica aplicables a los servicios de Distribución de Energía Eléctrica.. Mayo 28 de 1998. [en línea] disponible en: <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/Indice01/Resoluci%C3%B3n-1998-CREG070-98>

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA Resolución CREG 024 de 2005. , por la cual se modifican las normas de calidad de la potencia eléctrica aplicables a los servicios de Distribución de Energía Eléctrica., Abril 26 de 2005 . [en línea] disponible en: <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/Indice01/Resoluci%C3%B3n-2005-CREG024-2005>.

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA Resolución CREG 016 de 2007. Por la cual se modifica parcialmente la Resolución CREG 024 de 2005 que establece las normas de calidad de la potencia eléctrica aplicables a la Distribución de Energía Eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional.. Febrero 26 de 2007. . [en línea] disponible en: <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/Indice01/Resoluci%C3%B3n-2007-CREG016-2007>

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución CREG 096 de 2000. Por la cual se dictan normas relacionadas con el Período de Transición de que trata el Reglamento de Distribución de Energía Eléctrica, y se complementan algunas disposiciones de esas resoluciones. Noviembre 30 de 2000. [en línea] disponible en: <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/Indice01/Resoluci%C3%B3n-2000-CREG096-2000>.

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución CREG 011 de 2009. por la cual se establecen la metodología y formulas tarifarias para la remuneración de la actividad de transmisión de energía eléctrica en el Sistema de Transmisión Nacional. Febrero 11 de 2009. . [en línea] disponible en: [http://www.creg.gov.co/html/Ncompila/htdocs/Documentos/Energia/docs/resolucion\\_creg\\_0011\\_2009.htm](http://www.creg.gov.co/html/Ncompila/htdocs/Documentos/Energia/docs/resolucion_creg_0011_2009.htm).

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS. Resolución CREG 065 de 2012

CONGRESO DE COLOMBIA Ley 143 de 1994. Por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética (Ley eléctrica), pp. 6-7. Julio 12 de 1994 . [en línea] disponible en. [http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley\\_0143\\_1994.html](http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0143_1994.html)

CONGRESO DE COLOMBIA,. Ley 142 de 1994, Ley de servicios públicos domiciliarios. Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones, Julio 11 de 1994. [en línea] disponible en. [http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley\\_0142\\_1994.html](http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0142_1994.html).

DALILA M.S., KHALID M.N., SHAH M. Md, "Distribution transformer losses evaluation under non-linear load", in Power Engineering Conference. AUPEC 2009. Australasian Universities, pp. 1-6, 2009.

EMANUEL A.E., WANG Xiaoming, "Estimation of Loss of Life of power Transformers Supplying Nonlinear Loads", IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, pp- 628-636, 1985.

ESPARZA GONZÁLEZ, Mario Salvador; MATA GUERRERO, Jesús Alejandro; CASTAÑEDA RAMOS, Luis Antonio Las cargas no Lineales, su Repercusión en las Instalaciones Eléctricas y sus Soluciones Conciencia Tecnológica, núm. 32, julio-diciembre, 2006, p. 0 Instituto Tecnológico de Aguascalientes, México

IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," in IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992), vol., no., pp.1-29, June 11 2014 doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6826459.

IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid-Filled and Dry- Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Non sinusoidal Load Currents - Redline, IEEE Std C57.110-2008 (Revision of IEEE Std C57.110-1998), 2008.

IEEE Std C57.91-1995, Guide for Loading Mineral-Oil- Immersed Transformers.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIONES Norma Técnica Colombiana NTC (1358), Protocolo de prueba para transformadores 1988.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIONES  
Norma Técnica Colombiana NTC (317), Electrotecnia. Transformadores de potencia y distribución. Terminología.

MOTTA L. and FAÚNDES N., "Active / passive harmonic filters: Applications, challenges & trends," 2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Belo Horizonte, 2016, pp. 657-662.doi: 10.1109/ICHQP.2016.7783319

PIERCE L.W., "Transformer design and application considerations for non-sinusoidal load currents," Industry Applications, IEEE Transactions on, vol.32, pp. 633-645, 1996.

RADMEHR, M.; FARHANGI, S.; NASIRI, A. . Effect of Power Quality Distortion on Electrical Drives and Transformer Life in Paper Industries: Simulation and Real Time Measurements. Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2006. 18-23 June 2006. Iran: IEEE, 1 - 9.

RESEARCHGATE Estructuras y equipos de Subestaciones Eléctricas - Scientific Figure on ResearchGate. [en línea] disponible en: [https://www.researchgate.net/Figura-1-Sistema-de-generacion-transmision-subtransmision-y-distribucion-de-energia\\_fig1\\_303543292](https://www.researchgate.net/Figura-1-Sistema-de-generacion-transmision-subtransmision-y-distribucion-de-energia_fig1_303543292) [accessed 18 Oct, 2018]

RUGGERO RÍOS B, SÁNCHEZ QUINTANA ME "Incidences Nonlinear load distribution transformer" 2014 Revista científica de la UCSA, Universidad del cono sur de las Américas. Asunción, Paraguay.

SAID D. M. and NOR K. M., "Effects of harmonics on distribution transformers," 2008 Australasian Universities Power Engineering Conference, Sydney, NSW, 2008, pp. 1-5.

SALMERON P., LITRAN S.P., "Improvement of the Electric Power Quality Using Series Active and Shunt Passive Filters", Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 25, pp. 1058-1067, 2010.

SAMESIMA, M.I., WILSON RESENDE, J., and ARAUJO, S.C.N. Analysis of transformer loss of life driving nonlinear industrial loads by the finite elements approach. IEEE Industry Applications Conference, 1995. Thirtieth IAS Annual Meeting.

SCHNEIDER D. M., OLIVEIRA M. O., PERRONE O. E., LEDESMA J. J. and JUNIOR O. H. A., "Desarrollo de filtro de potencia tipo "C" para control de parámetros de Calidad de Energía," 2016 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON), Buenos Aires, Argentina, 2016, pp. 1-6. doi: 10.1109/ARGENCON.2016.7585301

SILVA D. C. L., SOUSA R. H., LIMA F. K. A. and BRANCO C. G. C., "Contributions to the study of energy efficiency in dry-type transformer under nonlinear load," 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, 2015, pp.456-461. doi: 10.1109/ISIE.2015.7281511

SILVA Miguel Ángel y ORDÓÑEZ PLATA Gabriel, "Calidad de la energía eléctrica: Diseño y construcción de un prototipo como alternativa para la monitorización de interrupciones y caídas de tensión". Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones Universidad Industrial de Santander, diciembre 2005.

SQUARE D, SCHNEIDER ELECTRIC Documento Transformadores secos de Baja Tensión Guía de Selección Clase 7400

TACI M.S., SARUL M.H., YILDIRMAZ G., "The effects of the harmonic components upon transformer active losses in case of (non)sinusoidal sources and (non)linear

loads”, in Industrial Technology. Proceedings of IEEE International Conference on, vol. 1, pp. 741-746, 2000.

TRANSFORMADORESORION Fabricante de transformadores MANUFACTURAS ELECTRICAS ORION S.A de C.V MEXICO D.F [en línea] disponible en: <http://www.transformadoresorion.com/factork.html>

WANGNING, X. DING, "Three-Dimensional Finite Element Analysis on Fluid Thermal Field of Dry-Type Transformer," Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), Second International Conference on, pp. 516-519, 2012.