

DIMENSIONAMIENTO DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN CON BASE AL EFECTO DE LOS ARMÓNICOS

Lina Marcela López Londoño
Saira Daniela Palau Calvo

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
Programa de Ingeniería Eléctrica
Pereira -Risaralda
Año 2017



DIMENSIONAMIENTO DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN CON BASE AL EFECTO DE LOS ARMÓNICOS

Lina Marcela López Londoño
Saira Daniela Palau Calvo

Trabajo de grado presentado como requisito
Parcial para optar al título de
Ingeniero Electricista

Director
Jorge Humberto Sanz Álzate
Ingeniero Electricista

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
Programa de Ingeniería Eléctrica
Pereira - Risaralda
Año 2017



Nota de aceptación

M.Sc. Jorge Huberto Sanz álzate. Director.

Agradecimientos

Le agradecemos a Dios y a nuestros padres por la formación que nos proporcionaron y por la oportunidad brindada para realizar nuestros estudios.

También agradecemos a la Universidad Tecnológica de Pereira por educarnos en un ambiente de excelencia, en donde hemos aprendido valores y nos han inculcado principios de lealtad en el diario vivir, un agradecimiento especial al Ingeniero Jorge Humberto Sanz Álzate por su ayuda, paciencia e interés prestada a esta tesis.

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo hacer una revisión bibliográfica acerca de la distorsión armónica, uno de los problemas que más afecta las redes de distribución de energía eléctrica, ya que altera los ciclos de vida de los elementos pertenecientes al sistema y perturba su buen funcionamiento. Las señales armónicas son múltiplos integrales de la frecuencia fundamental de una onda sinusoidal, generadas por cargas no lineales, estas se suman a la onda fundamental de 60-Hz, lo que provoca distorsiones en la onda.

Por tal motivo se llevó a cabo un estudio sobre las fuentes generadoras de armónicos y sus efectos en diferentes cargas eléctricas presentes comúnmente en instalaciones residenciales y comerciales. En específico se estudió el comportamiento de los transformadores pertenecientes a las redes de distribución, bajo el efecto de los armónicos y su respectivo dimensionamiento para prevenir los daños causados por la distorsión.

Se finalizó con el estudio del dimensionamiento del transformador en presencia de armónicos, referenciándolo al modo de construcción utilizado por ABB Transformadores, definiendo las características de diseño y los materiales indicados en su construcción, con el fin de reducir los efectos causados por estas perturbaciones para mantener el rango de vida útil predefinida y así disminuir los daños ocasionados dentro de la red.

Tabla de contenido

Capítulo 1	11
1. Introducción	11
1.1. Planteamiento del problema	11
1.2. Justificación.....	13
1.3. Objetivos	14
1.3.1. General	14
1.3.2. Específicos	14
1.4. Estado del arte.....	15
1.5. Estructura del trabajo de grado.....	16
Capítulo 2	17
2. Generalidades y fundamentación teórica sobre las cargas no lineales y su afectación a la red de distribución	17
2.1. Definición	17
2.2. Cargas no lineales en redes comerciales y residenciales	17
2.2.1. Principales cargas residenciales.....	18
2.2.2. Principales cargas comerciales.....	23
Capítulo 3	25
3. Generalidades y fundamentación teórica sobre los transformadores de distribución.	25
3.1. Definición	25
3.2. Tipos de transformadores	27
3.2.1. Transformadores de distribución	27
3.2.1.1. Transformadores monofásicos.....	28
3.2.1.2. Transformadores trifásicos	28
Capítulo 4	32
4. Características constructivas básicas de los transformadores	32
4.1. Transformadores de distribución	32
4.1.1. Propiedades de los materiales magnéticos	32
4.1.2. Ciclo de histéresis y corrientes parásitas en un material magnético	33
4.1.3. Características de diseño de los transformadores.....	34
4.1.3.1. Bobinas	35
4.1.3.2. Ductos de refrigeración	38
4.1.3.3. Núcleo	41
4.1.3.4. Factores de apilamiento	44
4.1.3.5. Pérdidas sin carga y potencia de excitación	44
4.1.3.6. Accesorios básicos de los transformadores.....	45
4.2. Transformadores de potencia	46
4.2.1. Devanados	46
4.2.2. Núcleo Magnético.....	46
4.2.3. Tanque Metalmecánico	47
4.2.4. Conmutador sin tensión	47
4.2.5. Conmutador en Carga	47
4.2.6. Aceite Aislante	48

4.2.7.	Sistema de preservación del aceite	48
4.2.8.	Pasatapas.....	48
4.2.9.	Tratamiento de secado bajo Vacío y llenado de aceite	48
Capítulo 5	49
5.	Presencia de armónicos en las redes de distribución y su afectación	49
5.1.	Conceptos generales.....	49
5.2.	Armónicos.....	49
5.2.1.	Parámetros de los armónicos.....	50
5.3.	Distorsión armónica	51
5.4.	IEEE STANDART- 1992.....	52
5.5.	Índices de evaluación	54
5.5.1.	Índice de distorsión armónica total (<i>THD</i>).....	55
5.5.2.	Factor de diversidad (<i>FD</i>)	55
5.5.3.	Factor de atenuación (<i>FA</i>)	56
5.6.	Efectos de la distorsión armónica.....	56
5.6.1.	Resonancia	56
5.6.1.1.	Resonancia en paralelo.....	57
5.6.1.2.	Resonancia en serie	58
5.6.1.3.	Comportamiento del sistema en condiciones de resonancia.....	60
5.6.2.	Efectos en máquinas rotatorias.....	61
5.6.3.	Efectos en plantas generadoras	61
5.6.4.	Interferencia con equipo de medición	62
5.6.5.	Pérdidas energéticas	62
5.6.6.	Costos adicionales de potencia Contratada.....	62
5.6.7.	Sobredimensionamiento de los equipos.....	62
5.7.	Efecto de los armónicos en el sistema de distribución.....	62
5.7.1.	Efectos armónicos en diferentes equipos dentro de una instalación eléctrica	63
5.7.1.1.	Mayores pérdidas en el sistema.	63
5.7.1.2.	Envejecimiento prematuro de los equipos	63
5.7.1.3.	Efecto en los circuitos y en los cables de neutro	64
5.7.1.4.	Efecto en los transformadores	64
5.7.1.5.	Efecto en los capacitores	65
5.7.1.6.	Interferencias con sistemas de protección	66
5.7.1.7.	Interferencia en las comunicaciones.....	67
Capítulo 6	68
6.	Efectos de los armónicos en los transformadores y cambios generados en su construcción.	68
6.1.	Efectos de la distorsión armónica en transformadores de distribución.	68
6.1.1.	Elevación de Temperatura.....	70
6.1.2.	Efecto de los armónicos en las pérdidas.....	71
6.1.2.1.	Efecto en las pérdidas <i>I²R</i> ó pérdidas óhmicas	71
6.1.2.2.	Efecto en las pérdidas por corrientes de Eddy ó parasitas	73
6.1.2.3.	Pérdidas sin carga o de núcleo.....	73
6.1.2.4.	Efectos en las pérdidas adicionales	73
6.2.	Construcción de los transformadores expuestos a armónicos	73

6.2.1.	Diseño del núcleo bajo armónicos.....	76
6.2.2.	Diseño de la bobina bajo armónicos	77
6.2.2.1.	Conductores de neutro	79
6.2.2.2.	Materiales usados en las bobinas	79
6.2.3.	Construcción de Transformadores con pantalla EMC.....	80
6.2.4.	Dimensionamiento del transformador expuesto a armónicos	82
	A continuación, se muestran las características constructivas más significativas de un transformador expuesto a perturbaciones armónicas.	82
6.2.5.	Construcción del transformador expuesto a sobrecarga	87
6.2.5.1.	Valores Límites con Sobrecarga para Transformadores de Distribución..	87
6.2.5.2.	Sobrecarga de Transformadores Secos	88
6.2.5.3.	Tipos de sobrecargas	89
Conclusiones	92
Referencias	94

Esquema de listas especiales

Lista de figuras

Figura 1 . Forma de onda de tensión y corriente de un TV CRT de 21”.....	19
Figura 2 . Espectro armónico de la corriente de un TV CRT de 21”.....	19
Figura 3 . Forma de onda de tensión y corriente de un TV LCD de 32”.....	20
Figura 4 . Espectro armónico de la corriente de un TV LCD de 32”.....	20
Figura 5 . Forma de onda de tensión y corriente de un horno microondas.....	20
Figura 6 . Espectro armónico de la corriente de un microondas.....	21
Figura 7 . Forma de onda de tensión y corriente de una computadora personal de escritorio (CPU + LCD de 19”).....	21
Figura 8 . Espectro armónico de la corriente de una computadora personal de escritorio (CPU + LCD de 19”).....	21
Figura 9 . Forma de onda de tensión y corriente de una lámpara LED.....	23
Figura 10 . Espectro armónico de la corriente de una lámpara LED.....	23
Figura 11 . Esquema de un transformador monofásico.....	26
Figura 12 . Esquema de un transformador trifásico.....	27
Figura 13 . Esquema equivalente del transformador monofásico real incluyendo pérdidas en el núcleo [COR04].....	34
Figura 14 . Cabezal bobina.....	37
Figura 15 . Ducto cartón corrugado.....	38
Figura 16 . Ducto Duck STRip.....	39
Figura 17 . Dimensiones del núcleo.....	41
Figura 18 . Representación núcleo con esquina redondeada.....	42
Figura 19 . Representación núcleo con esquina dodecágono.....	42
Figura 20 . Representación núcleo con esquina cuadrada.....	42
Figura 21 . Representación núcleo con esquina octagonal.....	43
Figura 22 . Proceso de fabricación de un núcleo.....	43
Figura 23 . Configuración del núcleo de un transformador.....	44
Figura 24 . Imagen de una onda deformada.....	50
Figura 25 . Forma de onda de los armónicos 2, 3, 4, 5° y la fundamental.....	51
Figura 26 . Señal resonante a 60 Hz.....	57
Figura 27 . Efecto del sistema a la resonancia paralela.....	58
Figura 28 . Circuito resonante en serie.....	59
Figura 29 . Efecto del sistema a la resonancia serie.....	60
Figura 30 . Límites de operación de bancos de capacitores.....	65
Figura 31 . Efecto en la tensión por un fenómeno transitorio.....	68
Figura 32 . Efecto en la tensión por una condición permanente.....	68
Figura 33 .Cálculo de la elevación de temperatura en transformadores expuestos a armónicos. ABB.....	71
Figura 34 .Densidades de corriente en un mismo conductor, (a) a corriente directa y (b) a corriente de alta frecuencia.....	72

Figura 35 .Hoja de cálculo de diseño de núcleo. ABB.	76
Figura 36 . Aislamiento extendido para bobinas bajo armónicos. ABB.	77
Figura 37 . Otra opción para aislamiento extendido de bobinas bajo armónicos ABB.	78
Figura 38 . Programa cálculo diseño de bobinas ABB.	78
Figura 39 . (a y b) [27]. Pantalla electrostática en transformadores bajo perturbaciones.	81
Figura 40 . Cálculo de sobrecarga para transformadores de distribución ABB. ...	88
Figura 41 . Curvas para la determinación de la sobrecarga de emergencia a). Transformador con enfriamiento por aceite. b). Transformador seco.	90
Figura 42 . Curvas para la determinación de la sobrecarga sistemática admisible a). Transformador con enfriamiento por aceite. b). Transformador seco.	91

Lista de tablas

Tabla 1 . Principales características de los electrodomésticos.	18
Tabla 2 . Principales características de algunas LED ensayadas.	22
Tabla 3 . Tamaños acordes de los conductores de acuerdo a la corriente.	36
Tabla 4 . Ancho de cabezales de acuerdo al BIL de cada bobina y al KVA del transformador.	38
Tabla 5 . Factores de espaciamiento para los ductos de refrigeración.	40
Tabla 6 . factores de apilamiento.	44
Tabla 7 . Base para los límites de corrientes armónicas.	52
Tabla 8 . Límites de distorsión armónica de tensión en porcentaje de la tensión nominal de frecuencia fundamental.	53
Tabla 9 . Sistema de bajo tensión clasificación y límites de distorsión.	53
Tabla 10 . Tabla de límites de corriente armónica para condiciones con duración superior a una hora. Para Periodos más cortos el limite aumenta un 50%.	54
Tabla 11 . Factor K del transformador en base al tipo de carga no lineal que alimenta.	74
Tabla 12 . Efecto piel en los conductores.	72
Tabla 13 . Características físicas de los materiales.	80
Tabla 14 . Límite de corrientes y temperaturas con sobrecarga.	88
Tabla 15 . Límites de Temperatura en transformadores secos.	89

Capítulo 1

1. Introducción

1.1. Planteamiento del problema

Se observó, que a medida que aumentaban las cargas electrónicas, los transformadores funcionaban con ruidos y un calentamiento excesivo, e incluso que se quemaban al cabo de uno o dos años.

¿Quizás los fabricantes de transformadores habían abaratado costos introduciendo materiales de baja calidad? NO. Los transformadores eran los mismos, la causa estaba en los armónicos.

Los transformadores forman parte vital dentro del diseño de las instalaciones eléctricas y son esenciales en el ciclo de distribución de la energía eléctrica en el sector residencial y comercial, donde cada vez es más frecuente el incremento en el uso de cargas no lineales, provocando distorsión de la onda de tensión de los sistemas, estas introducen un elevado contenido armónico en la red, pues muchos de estos dispositivos utilizan fuentes convertidores de corriente alterna a corriente continua que alimentan un condensador, que al cargarse y descargarse provoca crestas puntiagudas en la forma de onda de la corriente. Estas cargas no lineales provocan corrientes armónicas que se propagan en las redes de distribución disminuyendo los índices de calidad y generando un calentamiento perjudicial en el transformador para su vida útil, alrededor del 50% de la pérdida de vida del transformador es causada por tensiones térmicas que se presentan por cargas no lineales.

La principal preocupación del funcionamiento de los transformadores sometidos a cargas armónicas es la sobreelevación de la temperatura de sus devanados al verse expuesto a la saturación por armónicos, se requiere una guía para el diseño de transformadores de distribución en base a los armónicos el cual se asume estará expuesto durante su vida útil garantizando así un funcionamiento óptimo durante un rango de tiempo indicado por el fabricante.

Actualmente el comportamiento de la red está generando elevados costos en la distribución de la energía, llamando la atención de los investigadores en ingeniería para el estudio de la solución de este problema, los transformadores se diseñan con densidades de corriente aptas para evitar la expansión de las pérdidas de Eddy y el efecto piel, y la magnificación de las pérdidas más contraproducentes para el transformador como lo son, las pérdidas representadas por el superíndice de la corriente al cuadrado multiplicado por la resistencia, además se usan materiales

cada vez más delgados y con mejores características que generen menores calentamientos en los devanados , se usan métodos de refrigeración que ayudan a mantener una temperatura máxima y unas pérdidas controladas, y además del uso de métodos de cálculo y compensación para la eliminación de algunos armónicos. A continuación, se expondrá un breve estudio de los armónicos, su afectación tanto en las redes de distribución como en el dimensionamiento de los transformadores usados en la red de media y baja tensión.

1.2. Justificación

La propagación de armónicos en los sistemas de distribución, que están utilizando cargas no lineales ha aumentado, se han convertido en un problema de calidad de energía, tanto para los clientes y proveedores. Las pérdidas originadas por armónicas no sólo causan un aumento en los costos operativos, además crean un calentamiento adicional en los componentes del sistema eléctrico, que a su vez reducen su esperanza de vida. En general, el costo de la calidad de la energía y, en particular, los costos de envejecimiento debido a las pérdidas originadas por armónicos en los transformadores se incrementarán.

Este proyecto se basa en la necesidad establecida por la norma RETIE (Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas), en donde se indica que al momento de diseñar una instalación eléctrica a la que se le aplique el RETIE debe cumplir con requerimientos generales enumerados en el artículo 10 donde uno de ellos hace alusión al cálculo del transformador (especificación h del numeral 10.1 del artículo 10 del RETIE) la cual especifica que se debe cumplir con “El cálculo del transformador incluyendo los efectos de los armónicos y factor de potencia en la carga”.

Dimensionar el transformador teniendo en cuenta el efecto de los armónicos de una manera que pueda ser usado al momento de diseñar una red es de gran importancia para tener un estimado confiable de la vida útil de este y así generar la buena calidad del servicio.

Las pérdidas de vida útil en transformador por sobrecalentamientos de los devanados, pérdidas de aislamiento térmico por calentamiento, pérdidas en el cobre y en el hierro (histéresis y Foucault), disminución del rendimiento, sobredimensionamiento del transformador y saturación del transformador están todas ligadas a la afectación con armónicos, fenómeno presente en todas las redes, por tanto, la importancia de diseñar inicialmente el transformador teniendo en cuenta el efecto de estos.

Dicho lo anterior la monografía a realizar busca dar solución a la dificultad del diseño de instalaciones eléctricas, teniendo como base el diseño del transformador convencional y los métodos de cálculo usados para mitigar las pérdidas ocasionadas por los armónicos esto atendiendo a la norma RETIE (artículo 10, numeral 10.1, especificación h) y con el fin de contribuir al desarrollo de la industria de transformadores.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

Identificar el proceso de dimensionamiento actual de los transformadores y como se afecta la construcción y el diseño de los mismos de acuerdo a los niveles armónicos con los que estarán en contacto durante su vida útil.

1.3.2. Específicos

- Estudiar, identificar y analizar los armónicos presentes en las redes de distribución los cuales afectan la vida útil de los transformadores que se conectan como parte de la cadena de suministro residencial.
- Dimensionar el transformador teniendo en cuenta los valores de distorsión de armónicos, teniendo como enfoque fundamental cada una de las variables de diseño del transformador y su afectación con el fenómeno de la distorsión.
- Definir el tipo de materiales que deben ser usados en el diseño de un transformador, para mitigar el efecto de los armónicos y limitar la afectación de estos durante su vida útil, además para garantizar el cumplimiento de los requisitos estipulados por el usuario.

1.4. Estado del arte

Los transformadores de distribución son las máquinas eléctricas estáticas de mayor uso en los sistemas de transmisión y distribución de la energía eléctrica; operan bajo el principio de inducción electromagnética. El avance de la tecnología ha dado lugar al uso exponencial de cargas eléctricas activas: (hornos microondas, lámparas ahorradoras de energía, sistemas de cómputo, equipos de sonido, telefonía, entre otras).

Como se ve en el artículo [1] este tipo de cargas y otras como las reactivas, originan señales indeseables, como las corrientes armónicas que dan lugar a elevadas corrientes en el hilo del neutro y por lo tanto la multiplicación de campos eléctricos en los transformadores provocando daños en los mismos, por efecto de saturación y calentamiento.

La propagación de armónicos en los sistemas de distribución, que están utilizando cargas no lineales ha aumentado, se han convertido en un problema de calidad de energía, tanto para los clientes y proveedores. Las pérdidas originadas por armónicas no solo causan un aumento en los costos operativos, además crean un calentamiento adicional en los componentes del sistema electrónico, que a su vez reducen su esperanza de vida. En general, el costo de la calidad de la energía y, en particular, el costo de envejecimiento debido a las pérdidas originadas por armónicos en los transformadores se incrementará [2].

En el artículo [3] se presenta la problemática que se puede tener en las instalaciones eléctricas debido a las cargas no lineales que actualmente se han incrementado en las diferentes instalaciones. Se muestran los principios matemáticos, los parámetros involucrados en la toma de decisiones, algunas cargas típicas que generan armónicos, los problemas que pueden indicarnos la presencia de armónicos en una red, así como la manera de disminuirlos ó eliminarlos.

En el artículo [4] presentan pruebas experimentales de la calidad de la energía con diferentes tipos de cargas lineales y no lineales (cargas electrónicas), en el que se realizaron algunas inferencias que permiten ubicar la problemática que se presenta en los transformadores. Esta identificación, sustentada en mediciones muestra los efectos producidos por los armónicos en los transformadores evidenciando, sobrecargas, aumento de temperatura, e incremento de pérdidas. Se presentan algunos elementos para mitigar los efectos adversos, producto de los resultados experimentales tales como, sobredimensionar los conductores, usar transformadores con un factor K elevado y haciendo uso de filtros para atenuar la distorsión armónica.

1.5. Estructura del trabajo de grado

Este trabajo de grado está distribuido de la siguiente manera, en el capítulo introductorio se define el objetivo general y los objetivos específicos que se desean alcanzar con la realización de este trabajo, además del estado del arte y la estructura que se desarrolla a lo largo de todo el documento. En el capítulo dos se realiza una reseña acerca de las generalidades y fundamentación teórica sobre las cargas no lineales y su afectación a la red de distribución.

En el tercer capítulo, se presenta la fundamentación teórica sobre las generalidades de los transformadores de distribución, principios básicos del transformador y tipos de transformadores usados más frecuentemente dentro de las redes.

Los criterios de diseño de transformadores convencionales de distribución y de potencia fueron planteados en el capítulo cuatro. Se especifican los fundamentos básicos del electromagnetismo y leyes determinantes en el planteamiento inicial del diseño, además se definen los criterios de diseño para transformadores convencionales no expuestos a perturbaciones, como conexiones, cálculos de la corriente de excitación y determinación de polaridades.

Recopilando información acerca de la distorsión armónica se plantea el quinto capítulo, donde se muestra la definición de armónicos y distorsión armónica, como también los efectos que estos producen en el sistema de distribución y los equipos que lo conforman.

Finalmente, en el capítulo seis se presenta el dimensionamiento óptimo para los transformadores de distribución expuestos a perturbaciones armónicas, exponiendo los cambios en el diseño, en los materiales usados, en los cálculos de aislamientos y el cálculo de las pérdidas generadas para determinar el nivel de radiación, para posteriormente dar una conclusión sobre la manera más óptima de diseñar un transformador que estará expuesto a armónicos durante toda su vida útil, según las especificaciones dadas por el cliente.

Capítulo 2

2. Generalidades y fundamentación teórica sobre las cargas no lineales y su afectación a la red de distribución

2.1. Definición

Las cargas no lineales son aquellas que producen corrientes de forma diferente a las sinusoidales, es decir, son corrientes que además de generar la componente fundamental contienen otras que son múltiplos enteros, emitiendo pequeños aumentos de corriente en cada ciclo o interrumpiendo la corriente durante un ciclo. Lo que produce que la onda sinusoidal de la corriente se vea distorsionada, a estas corrientes se les conoce como corrientes armónicas.

Estas cargas afectan de manera seria las instalaciones eléctricas en general y están siendo generadas en la actualidad por la fabricación de varios dispositivos modernos, los cuales son aplicaciones de la electrónica de potencia. Las corrientes armónicas generadas por estos equipos electrónicos, distorsionan la onda de corriente sinusoidal original y perturban la operación de estos mismos provocando, además, calentamientos excesivos y pérdidas de energía en máquinas eléctricas, conductores y demás equipos del sistema eléctrico.

2.2. Cargas no lineales en redes comerciales y residenciales

En la actualidad existen variedad de cargas no lineales tanto industriales como comerciales y residenciales, las cuales están basadas en aplicaciones de la electrónica de potencia y estas generan gran cantidad de distorsión armónica en la red. El uso más eficiente de la energía eléctrica y los grandes avances en los procesos industriales han acelerado el uso de cargas no lineales. A continuación, se presentan 4 categorías de las principales fuentes de armónicos [5].

- Dispositivos electrónicos de potencia (convertidores, rectificadores, etc.).
- Dispositivos productores de arcos eléctricos (hornos de arco, Luz fluorescente, máquinas soldadoras, etc.).
- Dispositivos ferromagnéticos (transformadores, motores de inducción, etc.).
- Motores eléctricos que mueven cargas de par torsor bruscamente variable (Molinos de laminación, trituradoras, etc.)

Muchos de los servicios instalados en edificios modernos, centros comerciales y zonas Urbanas, como alumbrado LED, equipos electrónicos de telecomunicaciones, controladores de energía, equipos de seguridad, alarmas, computadoras, televisores, hornos microondas, elevadoras controladas con electrónica de estado sólido, producen grandes niveles de distorsión armónica. Seguidamente se expondrán las principales cargas no lineales en redes residenciales y comerciales.

2.2.1. Principales cargas residenciales

En el artículo [6] se realizó un estudio con el fin de analizar el impacto de las cargas no lineales en las redes de distribución eléctrica. Se analizó el funcionamiento de estas cargas, para esto se realizaron mediciones de diversas lámparas LED y de diferentes electrodomésticos, donde se indicó el porcentaje de distorsión armónica que producen y otras características que eran necesarias para ello.

En la tabla 1 se sintetizan las principales magnitudes eléctricas de los electrodomésticos ensayados.

Electrodoméstico	Id.	I [A]	THDI %	P[W]	FP(Δ)
TV CRT 21"	2	0.378	150.5	46.2	0.55
TV CRT 14"	4	0.315	87.5	53.0	0.71
TV LCD 32"	5	0.500	11.3	107.0	0.98
Deco.TV dig.	7	0.065	140.2	8.1	0.57
Equipo audio 2 canales	8	0.113	41.0	19.7	0.80
Lavarropas	9	1.470	4.0	300.0	0.91
Horno a microondas	10	4.950	35.6	980.0	0.92
Heladera c/freezer	11	1.720	13.3	160.0	0.42
Heladera s/freezer	13	1.001	7.00	125.2	0.57
Freezer	15	0.900	10.0	90.0	0.45
Monitor LCD 19"	17	0.259	121.6	35.7	0.63
CPU encendida	18	0.347	112.2	50.7	0.66
CPU grabando datos	18.1	0.578	127.6	76.6	0.62
Modem Internet	19	0.080	31.2	10.9	0.62
Router WIFI	20	0.053	60.0	9.4	0.79

Tabla 1[6]. Principales características de los electrodomésticos.

Se observa que la gran mayoría genera armónicos de corriente elevados, debido a la creciente proliferación de la electrónica de potencia en los mismos.

Para ilustrar el contenido armónico de los electrodomésticos ensayados se presentan a continuación las formas de onda de tensión y corriente, y los espectros armónicos de corriente de un televisor CRT (Tubo de Rayos Catódicos) de 21 pulgadas (Figura 1 y 2); un televisor LCD (Display de Cristal Líquido) de 32 pulgadas (Figura 3 y 4); de un horno microondas (figura 5 y 6); y de una computadora personal de escritorio (Figura 7 y 8).

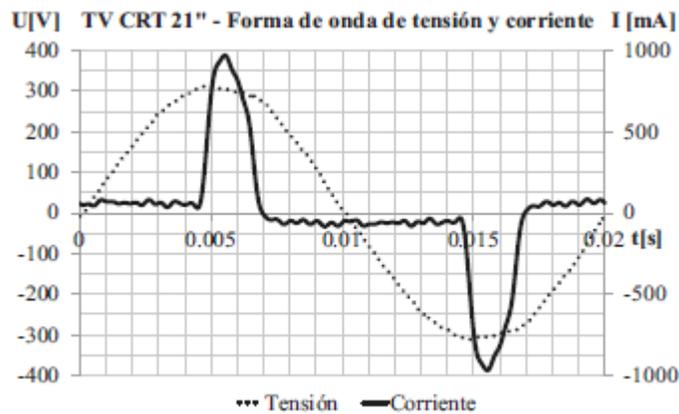


Figura 1 [6]. Forma de onda de tensión y corriente de un TV CRT de 21"

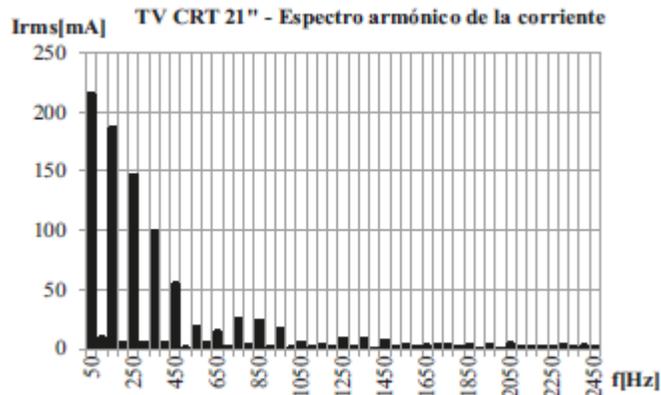


Figura 2 [6]. Espectro armónico de la corriente de un TV CRT de 21"

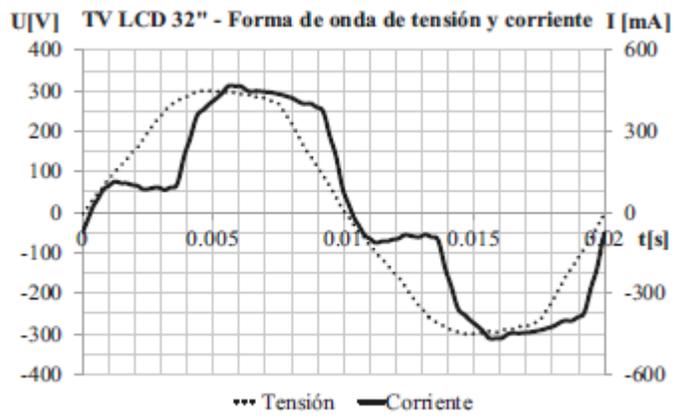


Figura 3 [6]. Forma de onda de tensión y corriente de un TV LCD de 32"

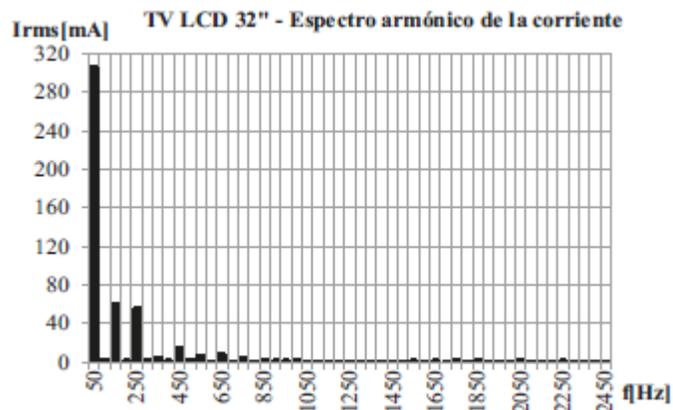


Figura 4 [6]. Espectro armónico de la corriente de un TV LCD de 32".

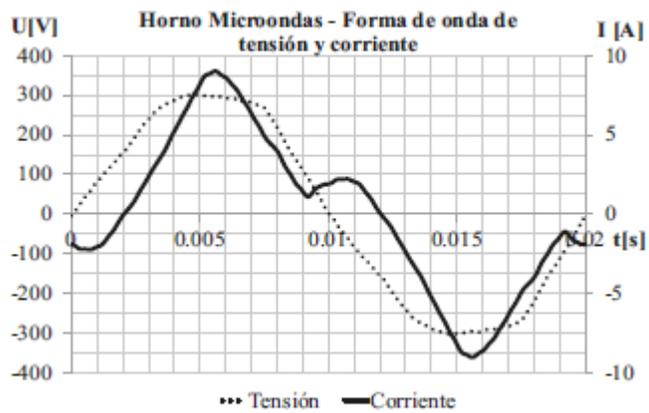


Figura 5 [6]. Forma de onda de tensión y corriente de un horno microondas.

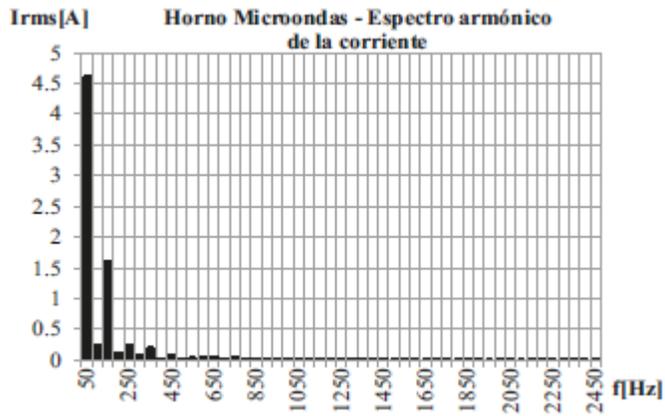


Figura 6 [6]. Espectro armónico de la corriente de un microondas.

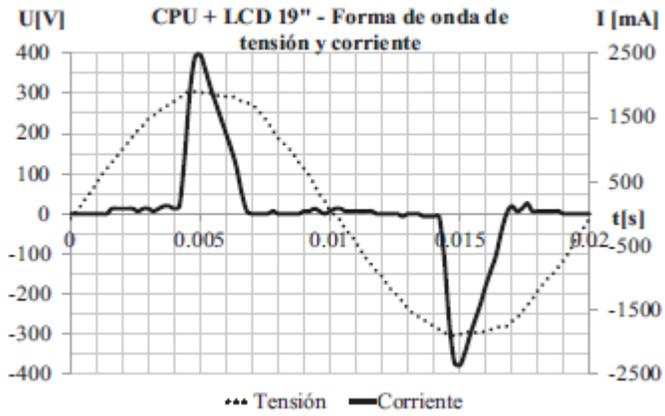


Figura 7 [6]. Forma de onda de tensión y corriente de una computadora personal de escritorio (CPU + LCD de 19")

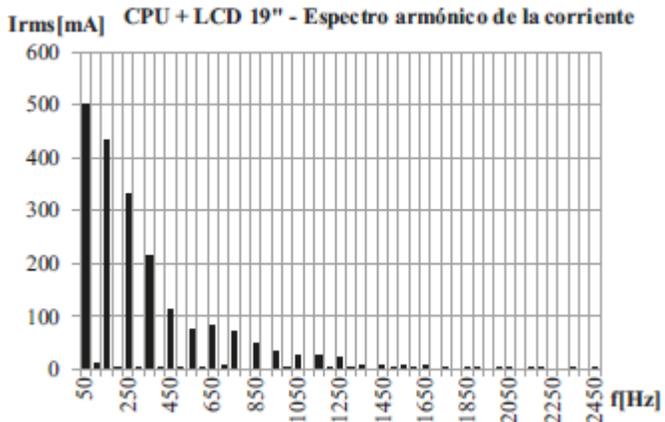


Figura 8 [6]. Espectro armónico de la corriente de una computadora personal de escritorio (CPU + LCD de 19")

En todas estas figuras se observa que la forma de onda de la tensión es aproximadamente sinusoidal pura, mientras que la corriente tiene una forma de

onda que dista mucho de una función sinusoidal. En los espectros armónicos de la corriente de cada carga se evidencia el elevado contenido de componentes armónicos.

Actualmente en las redes de distribución se está reemplazando las lámparas que poseen características lineales, por otras con altos contenidos de armónicos, las cuales son capaces de proveer el mismo flujo lumínico con menor potencia activa, a esta nueva tecnología se le conoce como iluminación LED, presenta muy buenas características lumínicas y ambientales, pero tiene un elevado contenido de armónicos con una distorsión armónica total en muchos casos superior al 100%. A continuación, se cita un estudio realizado sobre la afectación generada a la red por la conexión de lámparas LED.

En la tabla 2 se sintetizan los datos medidos de corriente eficaz total, distorsión armónica total de corriente respecto de la fundamental, potencia activa y factor de potencia verdadero de algunas de las lámparas LED ensayadas.

Lámparas LED	Id.	I [mA]	THDI %	P[W]	FP(Δ)
12W b.c. 6 LED	A1	80	141	9.3	0.54
8W b.c. 6 LED	A11	60	125	7.7	0.60
7W b.f. 16 LED	A13	55	135	6.4	0.53
4W b.f. 4 LED	A16	43	168	4.7	0.53
10W b.c. 8 LED	A21	43	52	6.5	0.71
12W b.c. 1 LED	A23	97	152	10.7	0.51
15W b.c. 12 LED	A25	67	9	13.5	0.92
9 W b.c. 3 LED	G1	57	140	6.8	0.54
6 W b.f. 3 LED	W1	51	137	6.5	0.59
1.7W b.f. 32 LED	J1	18	39	1.3	-
1.5W b.f. 15 LED	J5	21	27	0.9	-
1.7W b.c. 32 LED	J7	42	26	2.2	-
1.3W b.c. 20 LED	J8	21	31	1.2	-

Tabla 2 [6]. Principales características de algunas LED ensayadas.

Se ensayaron 28 lámparas LED de alto rendimiento lumínico y 8 lámparas LED de bajo rendimiento lumínico.

En todos los casos se ensayaron lámparas de diversas marcas, modelos y colores de luz, con el fin de observar cómo varían sus características eléctricas. Se destaca que las lámparas LED en general tienen una elevada distorsión armónica en la

corriente que inyectan a la red, superior al 86 % en la gran mayoría de los modelos, y alcanza valores de hasta 168 % en las LED.

Para ilustrar el contenido armónico de las lámparas ensayados se presentan a continuación las formas de onda de tensión y corriente y los espectros armónicos de corriente de una lámpara LED (Figs. 9 y 10).

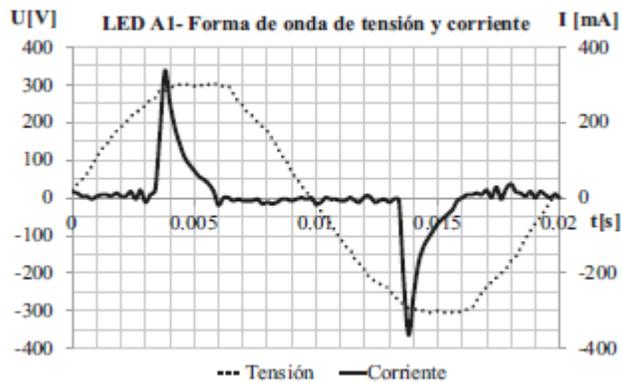


Figura 9 [6]. Forma de onda de tensión y corriente de una lámpara LED.

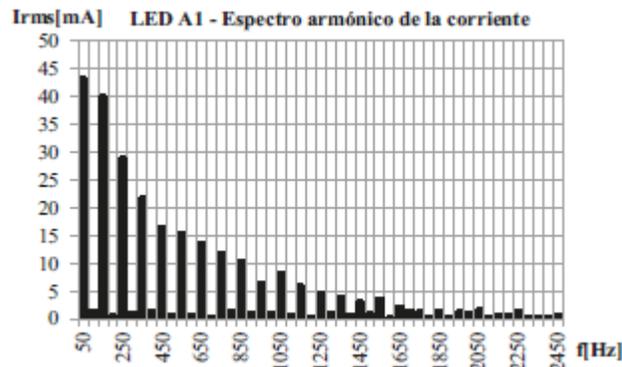


Figura 10 [6]. Espectro armónico de la corriente de una lámpara LED.

En esta figura se observa que la forma de onda de la tensión es aproximadamente sinusoidal pura, mientras que la corriente tiene una forma de onda que dista mucho de una función sinusoidal. En el espectro armónico de la corriente de cada carga se evidencia el elevado contenido de componentes armónicos.

2.2.2. Principales cargas comerciales

Al igual que en la red residencial la iluminación LED es la que genera el mayor porcentaje de contaminación armónica a la red, este tema se trató en el capítulo anterior. A continuación, se mostrarán algunas de las cargas generadoras de armónicos presentes en la red comercial [5].

- **Equipos de telecomunicaciones:**

Los equipos de telecomunicaciones producen niveles de distorsión armónica de hasta 26% en la onda de corriente.

- **Grandes computadoras:**

Las grandes computadoras producen niveles de distorsión armónica de hasta 81% en la onda de corriente.

- **Sistemas de poder ininterrumpido (UPS'S):**

Estos sistemas producen niveles de distorsión armónica de hasta 26% en la onda de corriente.

- **Generadores de emergencia:**

Los generadores pueden producir corrientes armónicas debido a las variaciones en la reluctancia magnética causada por los espacios en el estator y rotor de motores de polo saliente. La magnitud y frecuencia de las componentes armónicas dependen del diseño del motor y están definidas por el método del factor del tono de la máquina, utilizado para traslapar el devanado.

- **Variadores de velocidad:**

Elevadores accionados por medio de control electrónico, estos elevadores producen niveles de distorsión armónica de hasta 45% en la onda de corriente [5].

Capítulo 3

3. Generalidades y fundamentación teórica sobre los transformadores de distribución.

3.1. Definición

La energía eléctrica es una de las formas de energía que mejor se puede transportar a grandes distancias. Se puede obtener de diversas fuentes primarias de energía y es la que más usos y aplicaciones ofrece en la vida cotidiana. Sin embargo, para que se cumpla lo anterior es indispensable disponer de un sistema interconectado, mediante el cual nos sea posible generar la energía, transportarla y distribuirla a todos los usuarios en forma eficaz, segura y con calidad.

En este sistema la energía eléctrica, desde su generación hasta su entrega en los puntos de consumo, pasa por diferentes etapas de adaptación, transformación y maniobra. Para la correcta operación del sistema son necesarios equipos que sean capaces de transformar, regular, maniobrar y proteger.

El sistema eléctrico debe cumplir con la tarea de generar energía eléctrica en los lugares más idóneos para tal fin, transformar esa electricidad a unas características propicias para transportarla a grandes distancias, transformarla nuevamente para poder ser distribuida en los centros de consumo y finalmente adaptarla a valores aptos para los usuarios.

El sistema eléctrico está compuesto por los siguientes elementos:

- Centrales generadoras de energía.
- Estaciones transformadoras elevadoras.
- Líneas de transporte.
- Subestaciones de transformación reductoras.
- Subestaciones de distribución.
- Red de distribución primaria.
- Centros de transformación.
- Red de distribución secundaria.

Actualmente los sistemas operan con energía eléctrica en forma de corrientes alternas trifásicas, esto es debido a su facilidad para modificar las tensiones de transporte por medio de transformadores.

Se define transformador como dispositivo eléctrico estático que consta de un devanado o dos o más devanados, con o sin núcleo magnético para introducir un acoplamiento mutuo entre circuitos eléctricos. El transformador es un dispositivo

que permite modificar potencia eléctrica de corriente alterna con un determinado valor de tensión y corriente en otra potencia de casi el mismo valor, pero, generalmente con distintos valores de tensión y corriente [7].

El transformador es una máquina estática de bajas pérdidas y tiene un uso muy extendido en los sistemas eléctricos de transmisión y distribución de energía eléctrica, cuando se requiere transportar energía desde los centros de generación (Centrales eléctricas) a los centros de consumo, se eleva la tensión (desde unos 15 kV hasta 132, 220 o 500 kV) y se efectúa la transmisión mediante líneas aéreas o subterráneas con menor corriente, ya que la potencia en ambos lados del transformador es prácticamente igual, lo cual reduce las pérdidas de transmisión (I^2R). En la etapa de distribución se reduce la tensión a los valores normales (380/220 V), mediante los transformadores adecuados [7].

Los transformadores son usados en sistemas eléctricos de potencia para transferir potencia por inducción electromagnética entre circuitos de la misma frecuencia, usualmente con cambios de tensión y corriente. Los transformadores de distribución se usan para transferir energía de un circuito de distribución primario hasta un circuito de distribución secundario de servicio al consumidor, estos están usualmente definidos en potencias entre 5 KVA y 500 KVA [8].

A partir de ciertas potencias, los transformadores son trifásicos, pudiéndose armar un conjunto o “banco” trifásico, mediante el uso de tres transformadores monofásicos o bien un solo transformador trifásico, el cual se forma mediante un núcleo magnético y las bobinas necesarias para armar tres fases. Las bobinas tanto primarias como secundarias, pueden ser conectadas en forma de estrella o triángulo, con lo cual se obtienen diferencias de fase entre las tensiones primarias y secundarias.

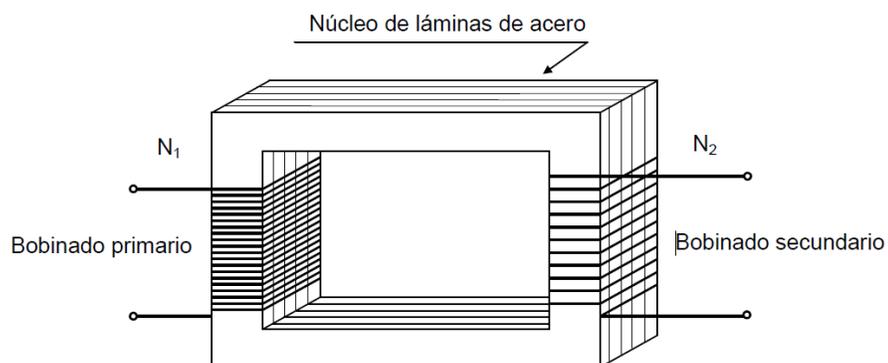


Figura 11 [7]. Esquema de un transformador monofásico.

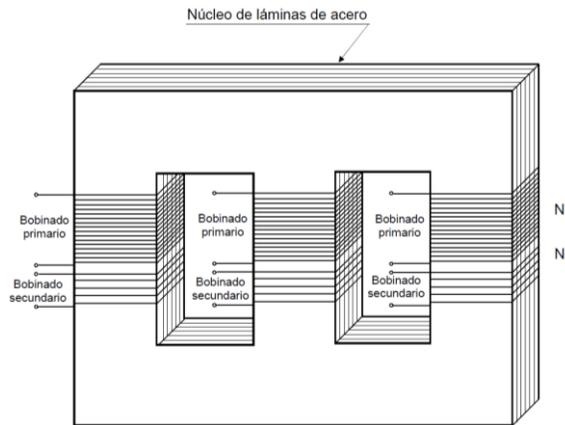


Figura 12 [7]. Esquema de un transformador trifásico.

3.2. Tipos de transformadores

Los transformadores pueden estar destinados a transformar potencias de cierta consideración, alimentados por tensión y frecuencia fijas (transformadores de potencia o transformadores de Distribución). Pueden usarse en circuitos de la técnica de la comunicación, previstos para trabajar con tensiones y frecuencias diversas (transformadores de comunicación). Otra aplicación consiste en facilitar la conexión adecuada de aparatos de medida o de protección (transformadores de medida) [7].

Por los sistemas de tensiones se clasifican en monofásicos, trifásicos, trifásicos-exafásicos, etc. Según aumenten la tensión o la disminuyan se denominan transformadores elevadores o transformadores reductores. Según el medio ambiente para el que estén preparados, en transformadores para intemperie o para tipo interior, De acuerdo con el elemento refrigerante que requieran en transformadores secos o sumergidos en aceite. Según pueda proporcionar permanentemente su potencia nominal con refrigeración natural o no se distinguen los transformadores con refrigeración natural de los transformadores con refrigeración forzada.

Los transformadores usados dentro de las redes residenciales y comerciales, son transformadores de distribución con potencias generalmente entre 5 KVA y 5MVA para monofásicos y trifásicos, entre los cuales tenemos varios tipos de transformadores.

3.2.1. Transformadores de distribución

Se denomina transformadores de distribución, a los transformadores de tensiones iguales o inferiores a 67.000 V, tanto monofásicos como trifásicos. Aunque la mayoría de unidades están proyectadas para montaje en postes, algunos de los

tamaños de potencia superiores, por encima de las clases de 18 K, se construyen para montaje en estaciones o en plataformas. Las aplicaciones típicas son para alimentar residencias edificios o almacenes públicos, y centro comerciales según las condiciones de servicio se pueden clasificar de la siguiente manera [7].

3.2.1.1. Transformadores monofásicos

Básicamente está formado por un núcleo compuesto de láminas de hierro y dos bobinados, a los cuales denominaremos primario y secundario. El bobinado primario con “N1” espiras es aquel por el cual ingresa la energía y el secundario con “N2” espiras es aquel por el cual se suministra dicha energía.

- **Transformadores monofásicos tipo poste convencionales**

La aplicación de los transformadores tipo poste es la distribución de energía eléctrica, reduciendo la tensión de las líneas de transmisión de media tensión a los niveles de baja tensión residencial o industrial. Normalmente se utiliza aceite mineral como aislante.

- **Transformadores monofásicos tipo poste auto protegidos**

Un transformador auto protegido comprende, desde su etapa de diseño, elementos de protección contra sobretensiones, sobrecargas y elementos para aislarlo de la red en caso de fallas internas o externas, se fabrican desde 10 kVA a 75 kVA monofásicos Son usados principalmente en cargas de servicios residenciales y donde las compañías de electricidad requieren un control de la carga.

Los accesorios que brindan autoprotección son los siguientes:

- DPS (pararrayo).
- Fusibles de protección Link.
- Fusible de expulsión.
- Interruptor.

3.2.1.2. Transformadores trifásicos

Transformadores de potencia o distribución, que son conectados a tres líneas o fases y pueden estar o no conectados a un neutro común o tierra. Estos transformadores tienen tres devanados de alta tensión y tres de baja tensión.

- **Transformador tipo subestación**

Ese tipo de transformador está diseñado para trabajar bajo techo o a la intemperie. Es adecuado para suministrar energía eléctrica en edificios, e instalaciones en general que requieren un alto grado de seguridad. Permiten ser instalados cerca de

los centros de consumo, reduciendo al mínimo la pérdida de potencia y los costos de instalación. Pueden ser suministrados sumergidos en aceite aislante o en fluido incombustible de silicona cuando por motivos de seguridad así requiera.

- **Transformador tipo Pedestal**

El transformador de distribución para montaje sobre pedestal PAD MOUNTED, está diseñado para proveer servicio eléctrico en sistemas de distribución subterráneos, y también está diseñado para instalarse en el interior o exterior de zonas residenciales o en terrazas de edificios.

- **Transformador tipo Sumergible**

Los transformadores tipo sumergible, están destinados a ser instalados en cámara o bóveda bajo el nivel del suelo donde existe la posibilidad de inmersión ocasional con agua. Podrán permanecer sumergidos durante 12 horas en un volumen de agua de 3 metros sobre el transformador sin que ocurran filtraciones.

- **Transformadores especiales**

Son transformadores que son utilizados como por ejemplo para reguladores de tensión, transformadores para rectificadores, transformadores para horno de arco eléctrico, transformadores desfasadores, autotransformadores para minas, transformadores para pruebas, transformadores para fuentes de corriente directa [7].

- **Transformadores secos**

Los transformadores de distribución de este rango se utilizan para reducir las tensiones de distribución suministradas por las compañías eléctricas, a niveles de baja tensión para la distribución de potencia principalmente en áreas metropolitanas (edificios públicos, oficinas, subestaciones de distribución) y para aplicaciones industriales [9].

Los transformadores secos son ideales para estas aplicaciones, porque pueden ser ubicados cerca del punto de utilización de la potencia lo cual permitirá optimizar el sistema de diseño, minimizando los circuitos de baja tensión y alta intensidad con los correspondientes ahorros en pérdidas y conexiones de baja tensión. Los transformadores secos son medioambientalmente seguros, proporcionan un excelente comportamiento a los cortocircuitos y robustez mecánica, sin peligro de fugas de ningún tipo de líquidos, sin peligro de fuego o explosión y son apropiados para aplicaciones interiores o exteriores. En muchos países es obligatorio instalar transformadores secos cuando las subestaciones están situadas en edificios públicos.

Los transformadores de tipo seco encapsulado al vacío están diseñados a prueba de humedad y son adecuados para funcionar en ambientes húmedos o muy contaminados. Son los transformadores idóneos para funcionar en ambientes que presenten una humedad superior al 95% y en temperaturas por debajo de los $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Resumiendo, algunas de sus características:

- Los que menos espacio necesitan.
- Los que menos trabajo de ingeniería civil precisan.
- No requieren características de seguridad especiales (detección de incendios).
- Exentos de mantenimiento.
- Una vida útil de los transformadores más larga gracias a un bajo envejecimiento térmico.
- Puede instalarse cerca del lugar de consumo reduciendo las pérdidas de carga.
- Un diseño óptimo sujeto a mejoras constantes tan pronto como se dispone de nuevos materiales.
- Son seguros y respetan el medio ambiente.
- Contaminación medioambiental reducida.
- Sin riesgo de fugas de sustancias inflamables o contaminantes.
- Fabricación segura para el medio ambiente (sistema cerrado).
- Apropriados para zonas húmedas o contaminadas.
- Sin peligro de incendio.
- Los transformadores son incombustibles.
- Alta resistencia a los cortocircuitos.
- Gran capacidad para soportar sobrecargas.
- Buen comportamiento ante fenómenos sísmicos.
- Capaces de soportar las condiciones más duras de balanceo y vibraciones.
- Impactos medioambientales mínimos.
- Alto reciclado (90%) [9]

Los transformadores secos se fabrican en dos clases que son:

- **Secos tipo H, Bobinado Abierto**

Estos a su vez se fabrican en dos tipos, los denominados BAJA-BAJA, en potencias desde 15 kVA hasta 500 kVA trifásicos y entre 10 kVA y 100 kVA monofásicas, en tensiones menores de 600 V (trifásicos y monofásicos con derivaciones hasta 45 kVA y 50 kVA , respectivamente), Se usan comúnmente para la conversión de bajas tensiones como por ejemplo $440\text{V}/220\text{V}$ o $220\text{V}/440\text{V}$, en locales comerciales o industriales que poseen equipos a diferentes niveles de tensión. Usualmente no llevan derivaciones de tensión y se confinan en tanques que los

protegen de los agentes atmosféricos, con encerramientos del grado IP que el cliente solicite.

Los denominados transformadores ALTA-BAJA, en potencias desde 15 *kVA* hasta 1250 *kVA* clase 15 *kV*, de acuerdo a la norma NTC. Se usan normalmente en centros comerciales, edificios e industrias donde tengan que ser minimizados los riesgos de incendio. Se construyen con bobinados de sección circular y núcleos apilados de sección escalonada. Todo su esquema de aislamiento está diseñado con materiales clase 180°C, para que soporte las condiciones de calentamiento y sobrecarga establecidas por la norma. No llevan tanque, porque están diseñados para ser incluidos dentro de los gabinetes de las subestaciones de alta tensión.

- **Secos tipo F, Encapsulados en Resina Epóxicas:**

Los transformadores secos encapsulados en resinas epóxicas han alcanzado un alto grado de confiabilidad de tal forma que pueden ser utilizados en lugares con elevado porcentaje de humedad y contaminación, eliminando problemas como riesgos de incendio y emisiones de sustancias tóxicas y nocivas. Están fabricados con materiales aislantes que retardan la llama y son autoextingibles.

Se fabrican generalmente transformadores trifásicos desde 15 *kVA* hasta 30000 *kVA*, de acuerdo a las normas ANSI e IEC. Estos transformadores se encuentran diseñados para trabajar en condiciones adversas, a continuación, se establece la fiabilidad del equipo.

E2, clase ambiental, el transformador puede estar sometido a una condensación consistente o a una intensa contaminación o a una combinación de ambos fenómenos.

C2, clase climática, el transformador está diseñado para funcionar, ser transportado y almacenado a temperaturas ambientes hasta -25°C .

F1, comportamiento frente al fuego, el transformador está sujeto a riesgo de incendio. Dentro de un tiempo determinado, acordado entre fabricante y comprador, el fuego tiene que auto extinguirse. La emisión de sustancias tóxicas y de humos opacos tiene que ser mínima [9].

Capítulo 4

4. Características constructivas básicas de los transformadores.

4.1. Transformadores de distribución

4.1.1. Propiedades de los materiales magnéticos

Relación B-H de un material

La inducción magnética y la intensidad H , están ligadas a través de la permeabilidad magnética del material [10].

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r H \quad (1)$$

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \quad (2)$$

Donde

μ = Permeabilidad magnética $\left(\frac{Wb}{A} \cdot v \cdot m\right)$,

μ_0 = permeabilidad magnética del vacío $\left(\frac{Wb}{A} \cdot v \cdot m\right)$,

μ_r = permeabilidad relativa (sin dimensiones), siendo:

- Materiales no magnéticos $\mu_r \approx 1$
- Materiales ferromagnéticos $2000 < \mu_r < 6000$ (valores usuales en la zona lineal).

Los materiales ferromagnéticos, compuestos de hierro y sus aleaciones con cobalto, tungsteno, níquel, aluminio y otros metales, son los materiales magnéticos más comunes. Si el medio magnético es lineal, la permeabilidad magnética es constante, y si no lo es, depende del valor de H . El comportamiento de un material magnético como el hierro es, en realidad, no lineal, y está definido por la curva $B - H$.

Es interesante representar la relación no lineal entre B y H en una bobina con un núcleo ferromagnético en función de la tensión aplicada y de la intensidad absorbida. Para ello, se observa que la intensidad de campo magnético es

proporcional a la intensidad, ya que, aplicando la ley de Ampere a un camino cerrado a través del núcleo [10].

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum N \quad (3)$$

4.1.2. Ciclo de histéresis y corrientes parásitas en un material magnético

Los materiales magnéticos sometidos a un flujo variable en el tiempo sufren un calentamiento debido a la histéresis magnética y a las corrientes parásitas de Foucault. Estos fenómenos provocan las llamadas pérdidas magnéticas (consumo de potencia activa que se disipa en forma de calor en el núcleo). Las pérdidas por histéresis son debidas a los defectos de la estructura cristalina del material, y se producen cuando se modifican las fronteras de los dominios magnéticos. Son proporcionales a la frecuencia (número de veces que varían los dominios), y se pueden expresar como:

$$P_H = K_H f B^\alpha \quad (4)$$

Donde α es un coeficiente empírico cuyo valor suele ser de 1,6.

Las pérdidas por corrientes inducidas de Foucault son, básicamente, unas pérdidas por efecto Joule, debidas a la resistencia eléctrica del material. Dependen de la inducción y de la frecuencia, pueden expresarse como,

$$P_F = K_F f^2 B^2 \quad (5)$$

Normalmente se acepta que las pérdidas por ciclo de histéresis y por corrientes inducidas de Foucault para una frecuencia fija dependen de la inducción al cuadrado, es decir, de la tensión al cuadrado:

$$P_H + P_F = K_1 B^2 = K_2 \cdot U^2 \quad (6)$$

Hay dos tipos de ciclos de histéresis de un material magnético:

- Dinámico: se obtiene con tensión alterna y su área incluye las pérdidas por histéresis y por corrientes inducidas de Foucault.
- Estático: se obtiene con tensión continua variable y su área sólo incluye las pérdidas por histéresis.

Para limitar las pérdidas por corrientes de Foucault en los transformadores, se suele construir el núcleo con chapas aisladas eléctricamente entre sí, con lo que se limita la posibilidad de circulación de corrientes inducidas al aumentar la resistencia eléctrica que ofrece el núcleo a este tipo de corrientes (sin alterar las propiedades magnéticas). Incorporación de las pérdidas en el núcleo: transformador monofásico real. El modelo que se emplea en la práctica es un modelo lineal que tiene en cuenta las pérdidas en el núcleo. Su validez está limitada a que se puedan despreciar los efectos de saturación del núcleo, lo que sucede en la mayoría de los casos.

Las pérdidas que provocan la histéresis magnética y las corrientes parásitas de Foucault (pérdidas magnéticas), no están incluidas en el esquema de la figura 13. Sea por deducciones físicas o con apoyo matemático se termina incorporando en el esquema una resistencia ficticia, $R_{Fe'}$, tal que su potencia media disipada coincida con estas pérdidas. Como son proporcionales aproximadamente al cuadrado de la tensión de alimentación del transformador, se suele colocar en paralelo con $M\mu'$. El esquema resultante es el siguiente [10]:

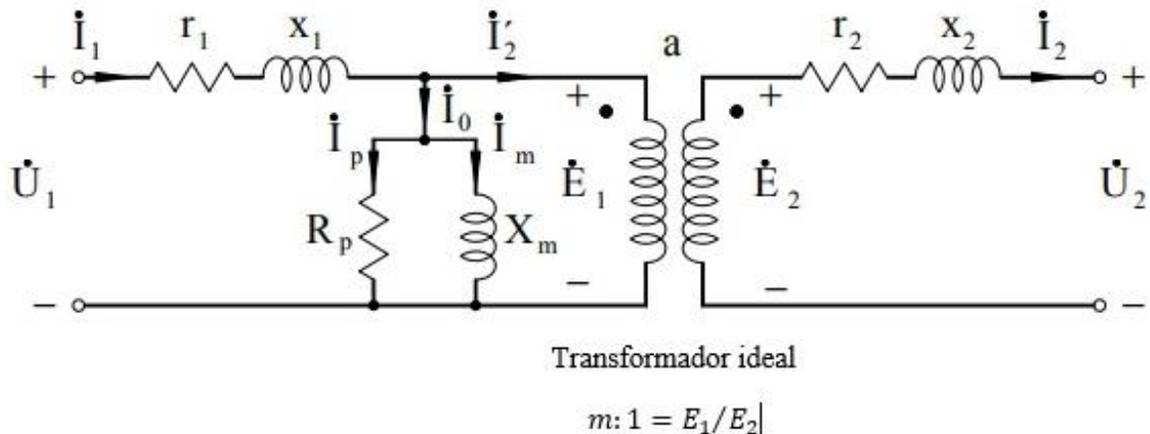


Figura 13 [10]. Esquema equivalente del transformador monofásico real incluyendo pérdidas en el núcleo [COR04].

4.1.3. Características de diseño de los transformadores

En el proceso previo para la creación de transformadores se utilizan programas de diseño como CALBOB 7.0 (cálculo de bobinas versión 7.0) o SDM (Software de diseño Magnetrón), CDS (software de diseño para ABB), para dicha creación se tiene en cuenta la siguiente lista de chequeo, donde se definen los parámetros básicos para cada una de las piezas que componen el conjunto del transformador.

4.1.3.1. Bobinas

Las bobinas de los transformadores eléctricos están construidas con conductores en el cobre y/o aluminio, el número de vueltas de cada bobinado está determinado por el KVA, la tensión y la Corriente nominales de cada transformador; obteniendo los valores de cada bobina por separado primaria y secundaria con base en el tipo de conexión de cada una [11].

Ejemplo:

- **Transformador monofásico en estrella**

$$KVA \text{ Bobina} = KVA \text{ Transformador}$$

$$\text{Voltaje Bobina} = \text{Voltaje línea} - \text{tierra del transformador}$$

$$\begin{aligned} \text{Voltaje línea} - \text{tierra del transformador} \\ = \frac{\text{voltaje línea} * -\text{línea del transformador}}{\sqrt{3}} \end{aligned}$$

$$\text{Corriente Bobina} = \frac{KVA \text{ Bobina} \times 1000}{\text{Voltaje Bobina}} \quad (7)$$

- **Transformador trifásico en delta**

$$KVA \text{ Bobina} = \frac{KVA \text{ Transformador}}{3}$$

$$\text{Voltaje Bobina} = \text{Voltaje línea} - \text{línea del transformador}$$

$$\text{Corriente Bobina} = \frac{KVA \text{ Bobina} \times 1000}{\text{Voltaje Bobina}} \quad (8)$$

- **Conductores de los enrollamientos de la bobina**

El tamaño del cable depende de la corriente de bobinado y del tamaño de la bobina. El material usado puede ser cobre o aluminio respetando las densidades máximas 3.5 Amps/mm^2 para conductor en el cobre , 2.0 Amps/mm^2 para conductor de aluminio. Para minimizar las pérdidas por Eddy este conductor tiene que tener un área transversal pequeña.

A continuación, se muestran los tamaños acordes de los conductores de acuerdo a la corriente.

Maximum Lead Current in Amps	Lead Width in mm	Aluminum lead thickness in mm	Copper lead thickness in mm
100	40	2	1
200	60	2	1
300	80	2	2
400	100	2	2
600	140	3	2
800	140	3	2
1000	140	4	3
1500	160	5	3
2000	160	7	4
2500	160	8	5
3000	160	10	6
3500	160	11	7
4000	160	13	8
4500	160	15	9

Tabla 3 [11]. Tamaños acordes de los conductores de acuerdo a la corriente.

El número de vueltas se calcula de acuerdo a:

$$\text{Número de vueltas a un voltaje } V = \frac{V \times \text{número de vueltas del secundario}}{\text{voltaje del secundario}} \quad (9)$$

- **Aislamientos de la bobina**

Se determina a través del estudio de los siguientes aspectos:

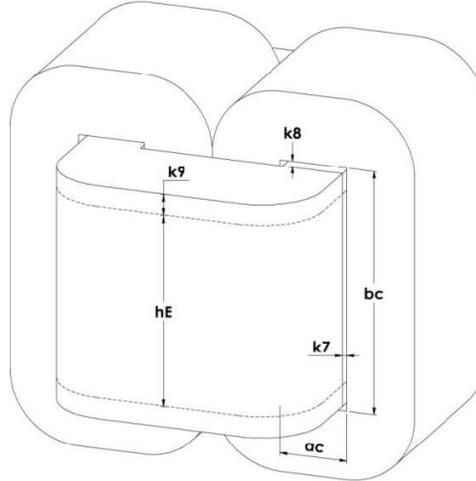


Figura 14 [11]. Cabezal bobina.

- $k7$ = Tolerancia bobina núcleo en ac [cm]
- $K8$ = Tolerancia bobina núcleo en bc [cm]
- $K9 = K91$ = Cabezal bobina en AT [cm]
- $K9 = K92$ = Cabezal bobina en BT [cm]
- ac = dimensiones del núcleo [cm]
- bc = dimensiones del núcleo [cm]
- hE = dimensiones del núcleo [cm]

Casquillo de baja tensión donde se selecciona la potencia y el BIL teniendo en cuenta el tipo de pérdida si es normal o baja.

- Aislamiento entre capas de AT (Alta Tensión) y BT (Baja Tensión). Se procura que este aislamiento sea en el mismo espesor del papel utilizado en BT-AT.
- Espesor del cabezal en AT y BT en el cual se selecciona un espesor menor que el espesor del conductor. Los cabezales en las bobinas de BT y AT tienen como finalidad aumentar sustancialmente la resistencia mecánica de las bobinas evitando su deformación en el proceso de ensamble y/o en condiciones de corto circuito. Se utiliza en forma rectangular y en forma trapezoidal.
- Ancho de cabezales se define de acuerdo al BIL (Niveles de aislamiento de acuerdo al nivel de tensión) de cada bobina y al KVA del transformador [11].

BIL Withstand	Applied Voltage Withstand	Major Insulation Type	Major Insulation Thickness (mm)	Comments	Total High-to-Low Thickness needed (for reference only) (includes extended insulation)
30 40	10 10	11 of .13mm paper or 6 of .25mm paper	1.43 or 1.50	Extended insulation not needed	1.43 or 1.50
60	20	6 of .13mm paper or 3 of .25mm paper	0.78 or 0.75	In addition to this major insulation, use 3 turns of extended insulation as shown on the next page.	1.53 or 1.50
75	28	11 of .13mm paper or 6 of .25mm paper	1.43 or 1.50	In addition to this major insulation, use 3 turns of extended insulation as shown on the next page.	2.18 or 2.25
95	38	16 of .13mm paper or 8 of .25mm paper	2.08 or 2.00	In addition to this major insulation, use 3 turns of extended insulation as shown on the next page.	2.83 or 2.75
125	40	18 of .13mm paper + one 3mm duct or 9 of .25mm paper + one 3mm duct	5.34 or 5.25	In addition to this major insulation, use 3 turns of extended insulation as shown on the next page.	6.09 or 6.00
125 150	50 50	14 of .13mm paper + one 3mm duct or 7 of .25mm paper + one 3mm duct	4.82 or 4.75	In addition to this major insulation, use 6 turns of extended insulation as shown on the next page.	6.32 or 6.25
170 200	70 70	18 of .13mm paper + one 3mm duct or 9 of .25mm paper + one 3mm duct	5.34 or 5.25	In addition to this major insulation, use 6 turns of extended insulation as shown on the next page.	6.84 or 6.75

Tabla 4 [11]. Ancho de cabezales de acuerdo al BIL de cada bobina y al KVA del transformador.

4.1.3.2. Ductos de refrigeración

Los ductos de refrigeración se pueden conformar de varias formas, todos orientados en facilitar su aplicación en el proceso de fabricación de las bobinas, además de obtener la mejor transferencia de calor entre el conductor y el aceite. Las formas más frecuentes son [12]:

- Cartón corrugado:



Figura 15 [12]. Ducto cartón corrugado.

El ducto actúa directamente sobre dos caras del conductor por lo cual la transferencia del calor entre conductor y aceite será del 100% en el área que el conductor está en contacto con el aceite [12].

- Duck STrip:

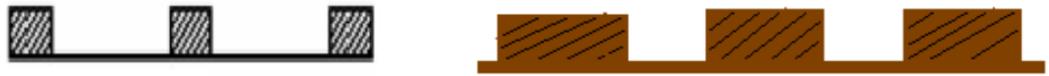


Figura 16 [12]. Ducto Duck STrip.

Está compuesto por cuñas de cartón rígido pegadas sobre una capa de papel epóxicas que cubre la totalidad del área.

El espesor de las cuñas y su espaciamento dependen de la aplicación que se les vaya a dar según la capacidad (KVA) de la bobina, el ducto actúa sobre dos caras del conductor.

- Una directamente en contacto.
- La otra a través de la capa de papel.

Asumimos que la transferencia de calor en la cara que está directamente en contacto será 100% y que en la otra cara por efecto del papel la transmisión solo será del 75% [12].

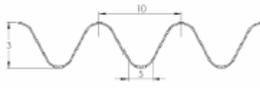
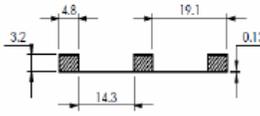
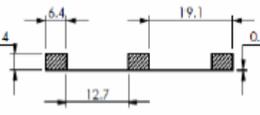
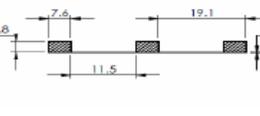
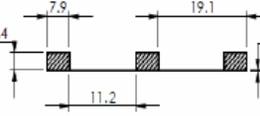
Tipo		Dimen [mm] forma	Fpi	Fa	FP
carton corrugado			$\frac{5.0}{10} = 0.5$	2,0	1,0
Duck Strip	A		$\frac{14.3}{19.1} = 0.75$	1,75	1,31
	B		$\frac{12.7}{19.1} = 0.64$	1,75	1,17
	C		$\frac{11.5}{19.1} = 0.60$	1,75	1,05
	D		$\frac{11.2}{19.1} = 0.59$	1,75	1,03

Tabla 5 [12]. Factores de espaciamento para los ductos de refrigeración.

4.1.3.3. Núcleo

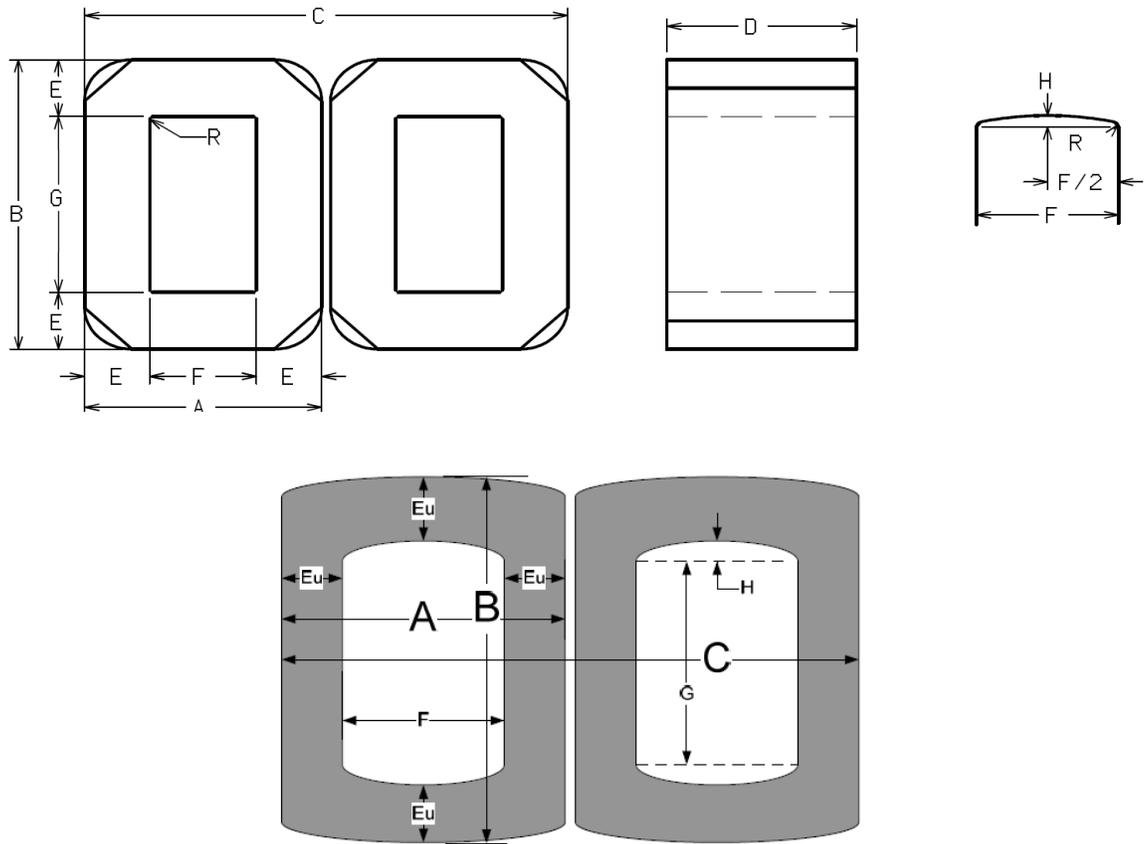


Figura 17 [13]. Dimensiones del núcleo.

A = Anchura total de un bucle de núcleo.

E = Espesor del alzo.

B =Altura total de un bucle de núcleo.

G =Altura de la ventana del núcleo.

C =Anchura total de dos bucles de núcleo colocados lado a lado.

D =Profundidad de un bucle de núcleo.

El núcleo puede ser fabricado con diferentes formas geométricas en sus puntas, ya que estas pueden llegar a generar un mayor fenómeno de histéresis, tenemos las siguientes configuraciones [13]:

- Núcleo con esquina redondeada

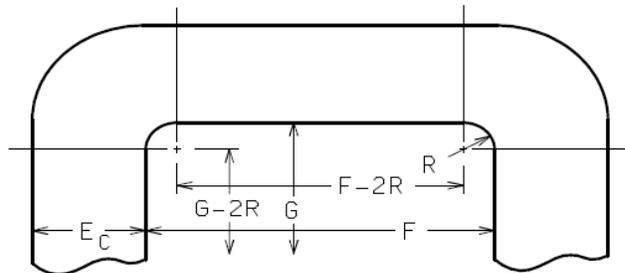


Figura 18 [13]. Representación núcleo con esquina redondeada.

- Núcleo con esquina en dodecágono

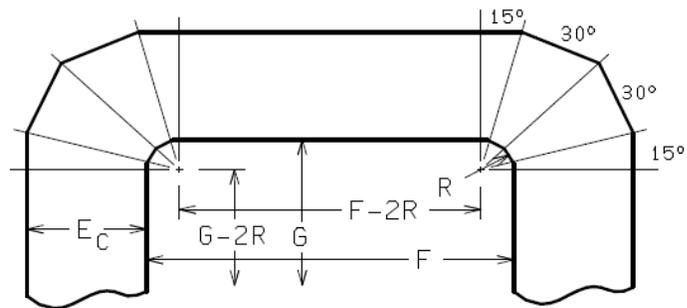


Figura 19 [13]. Representación núcleo con esquina dodecágono.

- Núcleo con esquina cuadrada

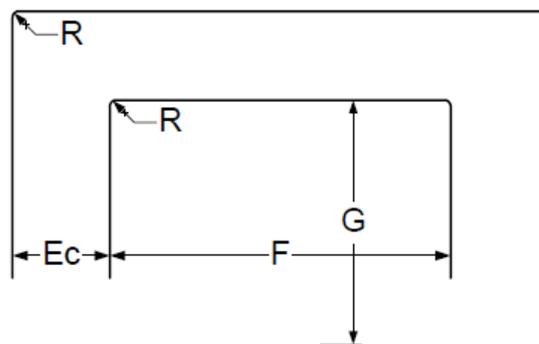


Figura 20 [13]. Representación núcleo con esquina cuadrada.

- Núcleo con esquina octagonal

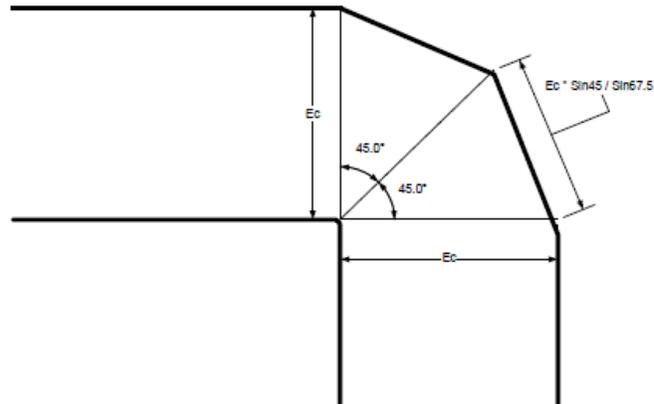


Figura 21 [13]. Representación núcleo con esquina octagonal.

- Fabricación:

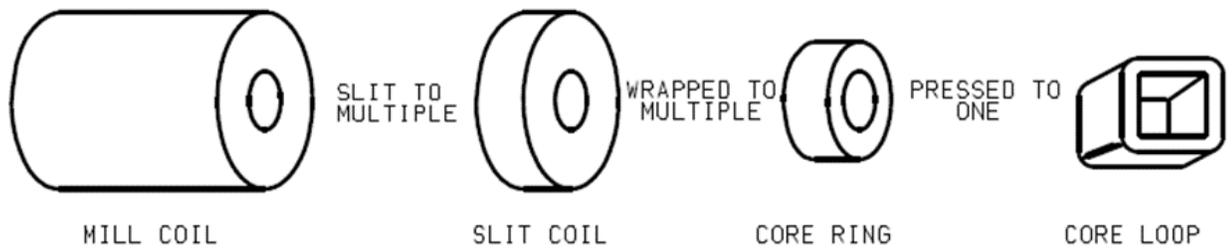


Figura 22 [13]. Proceso de fabricación de un núcleo.

Los pasos en la fabricación de un núcleo de acero de silicio de grano orientado (acero eléctrico) son:

- Un bloque de acero se corta en múltiples bobinas.
- Cada bobina de hendidura se envuelve en anillos de múltiples núcleos.
- Cada anillo de núcleo se presiona en un bucle de núcleo.
- La forma del bucle de núcleo está restringida.
- El bucle de núcleo es recocido.
- Prueba, clasificación, emparejamiento de bucles de núcleo.

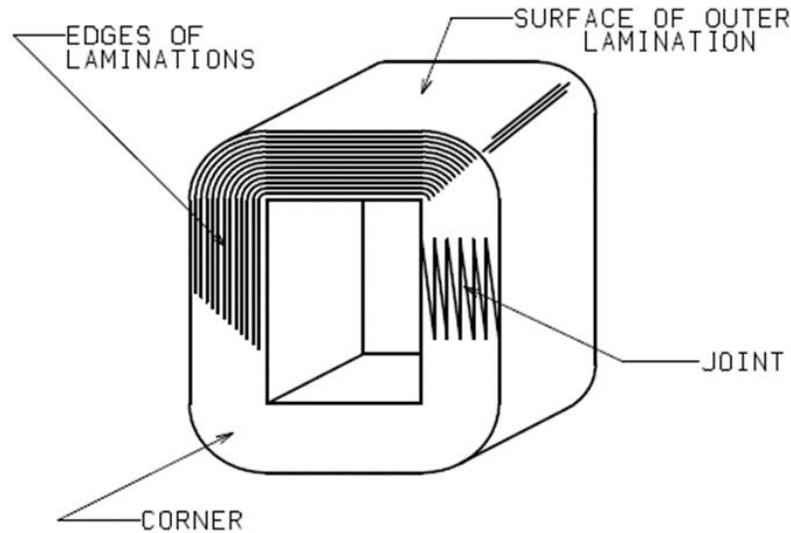


Figura 23 [13]. Configuración del núcleo de un transformador.

4.1.3.4. Factores de apilamiento

Los factores de apilamiento típicos (también denominados factor de espacio o factor de laminación) deben obtenerse del proveedor de acero eléctrico para el tipo de acero utilizado [14]:

SF_u = factor de apilamiento a 0.35 N/mm^2 de presión

SF_c = factor de apilamiento a 3.5 N/mm^2 de presión

Steel Tk (mm)	C-2 Coating	C-2 Coating	C-5 Coating	C-5 Coating
	SF_u	SF_c	SF_u	SF_c
.18	.972	.981	.953	.962
.23	.979	.987	.963	.972
.28	.982	.990	.969	.977
.36	.984	.992	.974	.982

Tabla 6 [14]. factores de apilamiento.

4.1.3.5. Pérdidas sin carga y potencia de excitación

Las pérdidas sin carga, o True Watts (TW), es la parte de las pérdidas totales que es independiente de la carga en el transformador. La pérdida sin carga se compone de pérdidas en el núcleo y dieléctricas. Las pérdidas dieléctricas, en una bobina bien

procesada, Son una parte muy pequeña de la pérdida sin carga y generalmente se desprecian. Se calculan de la siguiente manera [14]:

Pérdidas sin carga

$$= \text{peso total del núcleo} * \frac{TW}{Kg} * \text{FACTOR DE DESTRUCCIÓN} \quad (10)$$

La potencia excitación, o Watts aparentes (*AW*), se utiliza para calcular la corriente de excitación

Potencia de excitacion

$$= \text{peso total del núcleo} * \frac{AW}{kg} * \text{FACTOR DE DESTRUCCIÓN}$$

$$\text{Porcentaje de corriente de excitacion} = \frac{\text{Potencia de excitación}}{10 * KVA} \quad (11)$$

Los fabricantes del acero al silicio entregan dos curvas: *Watts/Kg* vs inducción y *Volt – Amps/ Kg* vs inducción hechas a una frecuencia definida 50 o 60 Hz [14].

4.1.3.6. Accesorios básicos de los transformadores

Los transformadores están provistos de los siguientes accesorios estándar, los accesorios adicionales pueden ser añadidos de acuerdo a las especificaciones del cliente [15].

- Pasatapas.
- Conservador de aceite con indicador de nivel de aceite.
- Válvulas de llenado y vaciado, y Válvula para toma de muestras de aceite.
- Terminales para la puesta en tierra.
- Ganchos para elevación.
- Bases para apoyo de gatos.
- Radiadores desmontables.
- Placa de características.
- Desecador de silicagel.
- Relé Buchholz.
- Indicador de temperatura del aceite.

4.2. Transformadores de potencia

Los transformadores son diseñados con base en la tecnología LDT (Large Distribution Transformers) desarrollada por el centro de excelencia en Finlandia (ABB). Los transformadores son del tipo convencional, provistos de un conservador de aceite. Se producen dos tipos de transformadores [16]:

- Transformadores con conmutador sin tensión
- Transformadores con conmutador bajo carga

Los transformadores pueden ser sobrecargados según IEC Publicación 354 (1972). El conmutador en carga y los pasatapas se eligen de manera que no se limite la capacidad de sobrecarga. Los métodos de refrigeración son ONAN o ONAN/ONAF.

4.2.1. Devanados

Los devanados son de cobre electrolítico o aluminio. Los bobinados del tipo multicapa, de disco o helicoidal están hechos con un alambre rectangular aislado con papel. Los transformadores con cambiador de tomas bajo carga normalmente tienen un bobinado de regulación separado. Tendrán un aislamiento A_0 y estarán diseñados y construidos para soportar sobretensiones de acuerdo a los niveles de aislamiento establecidos y para resistir los ensayos dieléctricos especificados en las normas correspondientes. Garantizan además una resistencia mecánica satisfactoria para evitar todas las deformaciones mecánicas y daños provocados por la corriente de corto circuito del transformador. Su calidad es de la más alta resistencia dieléctrica, de bajo nivel de descargas parciales y eficiente disipación de calor [16].

4.2.2. Núcleo Magnético

El núcleo con tres columnas, será construido de láminas de acero con grano de silicio orientado, laminadas en frío, sin envejecimiento y alta permeabilidad magnética, Los empalmes entre columna y culata están intercalados a 45° y solapados. La sección transversal de la columna es circular, y estará conectado a tierra y a su estructura de fijación a través de conexiones removibles. Estará montado rígidamente con todas sus partes firmemente aseguradas entre sí y con el tanque, para soportar los devanados y para prevenir cualquier desplazamiento bajo los esfuerzos de cortocircuito, condiciones sísmicas y de transporte especificadas, así como para reducir a un mínimo de vibraciones durante la operación [16].

4.2.3. Tanque Metalmecánico

La caja del transformador es normalmente de tipo rígido, provista de radiadores adosados conectados a la caja por medio de una válvula de separación y cierre. Bajo petición, la caja puede hacerse resistente al vacío. Alternativamente los transformadores hasta 5 MVA pueden estar provistos de una caja compacta con aletas onduladas para refrigeración.

El tanque principal y su tapa estarán contruidos de láminas soldadas con la suficiente rigidez para soportar sin deformación permanente todos los esfuerzos a los cuales serán sometidos los transformadores en las condiciones de operación establecidos en las normas correspondientes. Estará equipado con los dispositivos para facilitar el levantamiento con grúa y las guías adecuadas para dirigir la parte activa durante su introducción o remoción del tanque. Patines o ruedas con pestaña del tipo orientable serán colocados en la base del tanque, dispuestos en forma rectangular, los cuales permiten deslizar al transformador en cualquier dirección [16].

4.2.4. Conmutador sin tensión

Los transformadores están normalmente equipados con un conmutador en vacío de 5 posiciones en el lado de alta tensión, con el mando situado en la tapa. Cuando se cambia de posición el transformador tiene que estar desconectado, sin tensión. Posición 1 del conmutador (posición +) corresponde a la relación más alta, que da la tensión más baja en el lado de baja tensión. Posición 5 del conmutador (posición -) corresponde a la relación más baja, que por consiguiente dará la tensión más alta en el lado de baja tensión. Los transformadores que tienen doble tensión primarias (o secundarias) están normalmente equipados con selector con el mando en la tapa [16].

4.2.5. Conmutador en Carga

El cambiador de tomas en carga está montado en la tapa de la caja principal del transformador. El cambiador funciona como un interruptor selector, combinando las características de un conmutador en carga y de un selector de posiciones. El selector está ubicado en un compartimento de aceite separado y conectado con su propio conservador; puede levantarse para inspección y el aceite en el compartimento puede ser cambiado independientemente. El conmutador en carga se acciona por muelle de gran velocidad y dispone de resistencias de transición para limitar la corriente. El cambiador de tomas dispone de un relé de protección. El conmutador bajo carga está provisto de un accionamiento motorizado para control local y a distancia. Normalmente el motor es trifásico y la unidad de control y los circuitos de calentamiento son para alimentación monofásica AC. Si se solicita, se pueden suministrar circuitos DC [16].

4.2.6. Aceite Aislante

El aceite mineral usado en los transformadores es conforme a IEC 296 y a numerosas normas nacionales. El aceite es inhibido para retardar el proceso de envejecimiento. Bajo petición, se pueden entregar los transformadores con conmutador sin tensión con aceite de silicona o fluido MIDEL. El aceite mineral debe ser completamente nuevo y estar libre de PCB's [16].

4.2.7. Sistema de preservación del aceite

Los transformadores tendrán un sistema de preservación de aceite del tipo tanque sellado o incluirá un depósito de expansión o tanque conservador montado sobre el tanque del transformador y los respectivos respiradores deshidratantes [16].

4.2.8. Pasatapas

Los pasatapas son del tipo de porcelana y situados sobre la tapa. Los aisladores pueden cambiarse sin abrir el transformador. Los pasatapas son conformes a IEC 137 ó cualquier norma solicitada. Los terminales pueden estar provistos de una caja cubre bornes de aislamiento al aire. Dicha caja puede situarse en el lado primario y/o secundario y puede estar diseñada para conexión a cable o conducto de barras. Alternativamente los transformadores pueden estar provistos de pasatapas enchufables [16].

4.2.9. Tratamiento de secado bajo Vacío y llenado de aceite

El tratamiento de secado bajo vacío tiene lugar en un horno especial, donde los bobinados son calentados por corriente y simultáneamente el aire es evacuado del horno hasta alcanzar un vacío de 1 Mbar. El transformador se llena con el aceite mientras está bajo vacío. De esta manera la humedad y los gases son efectivamente eliminados de los bobinados y del aceite.

Se presta especial atención en el proceso de secado de las partes activas y llenado del transformador con aceite mineral aislante. El control absoluto de los niveles de humedad del papel asegura una eficiente capacidad de resistencia eléctrica. Durante el proceso de secado las bobinas son sometidas a ciclos de presión que permiten el acomodo de los elementos aislantes y establecimiento de la altura final de la bobina. El aceite caliente es depositado bajo vacío desde el fondo del tanque, lo cual permite asegurar que todos los espacios son llenados, así como que el aislamiento sólido sea impregnado completamente con el aceite mineral aislante. El proceso de secado es controlado por software especializado con el objetivo de garantizar los ciclos correctos de temperatura y vacío, lo que genera un menor desgaste de la vida útil del papel aislante durante este proceso [16].

Capítulo 5

5. Presencia de armónicos en las redes de distribución y su afectación

5.1. Conceptos generales

Actualmente los sistemas eléctricos cuentan con una gran cantidad de cargas no lineales, las cuales generan a partir de formas de onda sinusoidales a la frecuencia de la red, otras ondas de diferentes frecuencias ocasionando el fenómeno conocido como generación de armónicos.

5.2. Armónicos

Los armónicos son tensiones o corrientes sinusoidales que poseen frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia a la cual el sistema de alimentación está diseñado para operar. Las formas de onda distorsionadas pueden ser descompuestas en una suma de la señal de frecuencia fundamental y los armónicos. Estos son producidos por cargas no lineales, lo cual significa que su impedancia no es constante (está en función de la tensión). Estas cargas no lineales a pesar de ser alimentadas con una tensión sinusoidal adsorben una intensidad no sinusoidal, pudiendo estar la corriente desfasada un ángulo ϕ respecto a la tensión. En un sistema de potencia eléctrica, los aparatos y equipos que se conectan a él, tanto por la propia empresa como por los clientes, están diseñados para operar a 50 ó 60 ciclos, con una tensión y corriente sinusoidal. Por diferentes razones, se puede presentar un flujo eléctrico a otras frecuencias de 50 ó 60 ciclos sobre algunas partes del sistema de potencia o dentro de la instalación de un usuario. La forma de onda existente está compuesta por un número de ondas sinusoidales de diferentes frecuencias, incluyendo una referida a la frecuencia fundamental. El término componente armónico o simplemente armónico, se refiere a cualquiera de las componentes sinusoidales mencionadas previamente, la cual es múltiplo de la fundamental [17].

En la figura 24, se puede apreciar una onda deformada por los efectos de los armónicos:

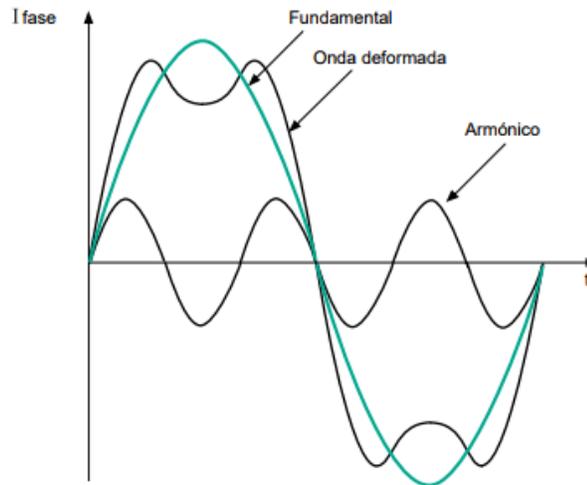


Figura 24 [18]. Imagen de una onda deformada.

5.2.1. Parámetros de los armónicos

Los armónicos se definen habitualmente con los tres datos más importantes que les caracterizan, que son [18]:

- Su amplitud: hace referencia al valor de la tensión o intensidad del armónico.
- Su orden: hace referencia al valor de su frecuencia referido a la fundamental (60 Hz). Así, un armónico de orden 3 tiene una frecuencia 3 veces superior a la fundamental.
- El orden del armónico, también referido como el rango del armónico, es la razón entre la frecuencia de un armónico f_n y la frecuencia del fundamental (60 Hz)

$$n = \frac{f_n}{f_1} \text{ (Por principio, la fundamental } f_1 \text{ tiene rango 1).}$$

- Su frecuencia: se define como el resultado de multiplicar el número de orden del armónico por la frecuencia fundamental (60 Hz) por ejemplo:

$$3^{\text{a}} \text{ armónica } 3 \times 50 \text{ Hz} = 150 \text{ Hz}$$

$$5^{\text{a}} \text{ armónica } 5 \times 50 \text{ Hz} = 250 \text{ Hz}$$

$$7^{\text{a}} \text{ armónica } 7 \times 50 \text{ Hz} = 350 \text{ Hz}$$

La figura 25 ilustra la onda sinusoidal de corriente alterna a la frecuencia fundamental (60 Hz) y su 2do, 3ro, 4to Y 5to armónico, en cada grafica se observa la relación de frecuencia angular de las ondas (w), entre mayor es el armónico (W) se hace más grande

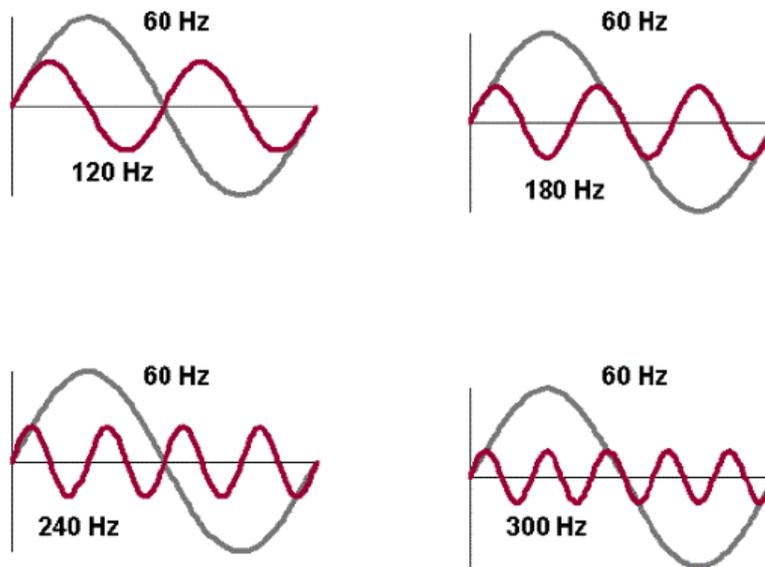


Figura 25 [19]. Forma de onda de los armónicos 2, 3, 4, 5° y la fundamental.

Actualmente los armónicos que más causan daño en los sistemas eléctricos son el tercero, quinto y séptimo, debido a que presentan grandes magnitudes y pueden ayudar a la amplificación de tensión y corriente, cuando el circuito entra en resonancia [19].

5.3. Distorsión armónica

Las distorsiones armónicas son los cambios en la forma de onda de tensión y corriente de los sistemas eléctricos, provocados por cargas no lineales en general, convirtiendo la onda sinusoidal normal en una forma de onda compleja. Este no es un tema que se haya planteado recientemente, pero ha cobrado importancia en los últimos años dada la gran cantidad de distorsión que añaden equipos modernos que contienen cargas no lineales, y que, por su concentración tan elevada, ha comenzado a causar problemas en todo tipo de equipos a tal grado que se han tenido que tomar consideraciones para el diseño de sistemas de potencia y de instalaciones, que van desde el aumento del calibre de conductores, hasta el diseño de filtros especializados en armónicos.

En los sistemas eléctricos antiguos, los armónicos eran causados por la saturación de los transformadores, motores y generadores, principalmente, pero su efecto se consideraba despreciable dada la cantidad relativamente pequeña que había, pero en los sistemas eléctricos modernos, las fuentes de armónicos están presentes en prácticamente cualquier punto, pues las cargas no lineales son cada vez más comunes, debido a su gran abanico de aplicaciones, aunque con la gran desventaja que significa que éste tipo de cargas sean, en la mayoría de los casos, las más sensibles a la distorsión que provocan [20].

5.4. IEEE STANDART- 1992

La filosofía de esta norma busca limitar la inyección de armónicos de los clientes individuales de manera que no creen tensiones inaceptables de distorsión bajo las características normales del sistema y limitar la distorsión armónica total de la tensión proporcionado por el proveedor. Los límites de distorsión de tensión y corriente deben usarse como valores de diseño de los sistemas eléctricos para “el peor de los casos” en condiciones de operación normales que duran más que una hora. Para periodos más cortos, como los arranques, los límites pueden ser excedidos en un 50%.

Esta norma divide la responsabilidad de limitar las armónicas entre los usuarios finales y las empresas de distribución. Los usuarios finales serán los responsables de limitar las inyecciones de corrientes armónicas mientras que los proveedores serán principalmente responsables de limitar la distorsión de tensión en la red de distribución.

Los límites de corriente y tensión armónicos para esta norma son analizados en el (point of common coupling) PCC. Este es el punto donde otros clientes comparten la misma red o donde pueden conectarse nuevos clientes en el futuro. La norma busca un acercamiento justo de asignación de cuota de límite de armónicos para cada cliente. Asigna límites de la inyección de corriente basados en el tamaño del sistema de potencia, el mismo que está definido por su capacidad de cortocircuito. La relación de cortocircuito está definida como la proporción de corriente de cortocircuito máximo en el PCC para la máxima demanda de corriente de carga (componente de frecuencia fundamental) en el PCC.

La base para limitar las inyecciones armónicas de los clientes individuales es evitar niveles inaceptables de distorsiones de tensión. Por eso los límites de corriente se establecen de tal manera que las inyecciones armónicas totales para cada cliente individual no excedan la distorsión de tensión máxima mostrada en la tabla 7.

Relación de cortocircuito en el PCC	Tensión máximo individual de frecuencia armónica (%)	Caso supuesto
10	2.5 - 3.0	Sistema dedicado
20	2.0 - 2.5	1 – 2 Clientes grandes
50	1.0 - 1.5	Pocos clientes relativamente grandes
100	0.5 - 1.0	5-20 Clientes medianos
1000	0.05 - 0.10	Muchos clientes Pequeños

Tabla 7 [23]. Base para los límites de corrientes armónicas.

La tabla 7 muestra los límites de corrientes armónicas para varios tipos de sistemas. En cargas más pequeñas (valores con relación de cortocircuito típicamente más grandes) es permitido un porcentaje mayor de corrientes armónicas que las cargas más grandes con valores menores de relación de cortocircuito. Las cargas más grandes deben ser sometidas a límites más estrictos de distorsión dado que ocupan una porción más grande de la capacidad de carga de sistema. Los límites de corriente toman en cuenta la diversidad de corrientes armónicas de las cuales algunas armónicas tienden a cancelarse mientras que otras se suman.

Los límites de corrientes armónicas en el PCC son establecidos para limitar tensiones individuales de distorsión y distorsiones totales de tensión THD_v , para los valores mostrados en la tabla 8. Puesto que la distorsión de tensión depende de la impedancia del sistema, la clave para controlar la distorsión de tensión es controlar la impedancia. Dos condiciones principales que producen una impedancia alta son cuando el sistema es demasiado débil para alimentar la carga adecuadamente o cuando el sistema está en resonancia, el último es el más común. Por consiguiente, si se mantiene la tensión de distorsión en valores reducidos aseguramos que el sistema se mantenga fuera de resonancia.

Ocasionalmente, nuevos transformadores y líneas tendrán que ser agregadas para incrementar la robustez del sistema.

Tensión de barra en el punto de acoplamiento común	Distorsión individual de Tensión (%)	Distorsión total de Tensión THD (%)
Hasta 69 KV	3.0	5.0
De 69 KV a 137.9 KV	1.5	2.5
138 KV y más	1.0	1.5
Nota: Los sistemas de alto tensión pueden llegar hasta un 2.0 % en THD cuando lo que causa es un alto tensión terminal DC, el cual podría ser atenuado		

Tabla 8 [23]. Límites de distorsión armónica de tensión en porcentaje de la tensión nominal de frecuencia fundamental.

Se muestra a continuación en las tablas 9,10 los límites señalados por norma.

	Aplicación especial	Sistema general	Sistema dedicado
Profundidad de la muesca	10%	20%	50%
THD (Tensión)	3%	5%	10%
Área de la muesca*	16,400	22,800	36,500
* En volt- microsegundos a valores de V & I			

Tabla 9 [23]. Sistema de bajo tensión clasificación y límites de distorsión.

Límites de corriente armónica para carga no lineal en el punto común de acoplamiento con otras cargas, para tensiones entre 120 – 69,000 V						
Máxima distorsión armónica impar de la corriente, en % del armónico fundamental						
ISC/IL	< 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	TDD
< 20 *	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
Límites de corriente armónica para cada carga no lineal en el punto común de acoplamiento con otras cargas, para tensiones entre 69,000 – 161,000 V						
Máxima distorsión armónica impar de la corriente, en % del armónico fundamental						
ISC/IL	< 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	17 ≤ h < 23	35 ≤ h	TDD
< 20 *	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20 < 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50 < 100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100 < 1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
> 1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0
Límites de corriente para carga no lineal en el punto común de acoplamiento con otras cargas, para tensiones < 161,000 V						
Máxima distorsión armónica impar de la corriente, en % del armónico fundamental						
ISC/IL	< 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	17 ≤ h < 23	35 ≤ h	TDD
< 50	2.0	1.0	0.75	0.30	0.15	2.5
50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75
Los armónicos pares se limitan al 25% de los límites de los armónicos impares mostrados anteriormente						
*Todo equipo de generación se limita a estos valores independientemente del valor de <i>ISC/IL</i> que presente						
Donde <i>ISC</i> = corriente máxima de cortocircuito en el punto de acoplamiento común. <i>IL</i> = Máxima demanda de la corriente de carga (a frecuencia fundamental) en el punto de acoplamiento común.						
<i>TDD</i> = distorsión total de la demanda (RSS) en el % de la demanda máxima						

Tabla 10 [23]. Tabla de límites de corriente armónica para condiciones con duración superior a una hora. Para Periodos más cortos el limite aumenta un 50%.

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

5.5. Índices de evaluación

A continuación, se detallan los índices utilizados para cuantificar los niveles de distorsión armónicas.

5.5.1. Índice de distorsión armónica total (*THD*)

Uno de los índices más utilizados es la denominada distorsión armónica total, citada en la literatura anglosajona como *THD* (Total Harmonic Distortion), y aplicable tanto para corriente como para tensión. Este índice se define como la relación entre el valor eficaz del total de las componentes armónicas y el valor eficaz correspondiente a la componente fundamental. Este valor es usualmente expresado como un porcentaje de la onda fundamental. Así para la onda de corriente será:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1} 100\% \quad (12)$$

Donde:

k : número de armónica.

I_1 : valor eficaz de la onda fundamental de corriente.

I_k : valor eficaz del armónico k .

El THD_I puede variar desde pocas unidades porcentuales hasta superar el 100%, como ocurre en las fuentes de potencia conmutadas. Aunque los armónicos de corriente de frecuencia más elevada pueden tener valores pequeños, al ser las reactancias de la línea y de los transformadores proporcionales a la frecuencia, los armónicos de tensión pueden tomar valores significativos.

De forma similar se expresa la distorsión en la tensión:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}}{V_1} 100\% \quad 13$$

5.5.2. Factor de diversidad (*FD*)

Las dispersiones en el ángulo de fase de los armónicos de cargas individuales provocan una disminución de las corrientes armónicas en la red. Este efecto, conocido como diversidad, se debe principalmente a diferencias en los parámetros del sistema de distribución y a los de la propia carga.

El factor de diversidad de corriente (FD_k) se define para cualquier armónico k y un conjunto de n cargas conectadas en paralelo, como la magnitud del fasor de la corriente de red, dividido por la suma de magnitudes de las corrientes individuales, para el mismo orden de armónico.

$$FD_k = \left| \frac{\sum_{i=1}^n \bar{I}_{k(i)}}{\sum_{i=1}^n I_{k(i)}} \right| \quad (14)$$

Este factor varía entre 0 y 1. Un bajo valor de este índice implicará una cancelación importante para el armónico bajo análisis.

5.5.3. Factor de atenuación (FA)

La atenuación es provocada por la propia impedancia del sistema de potencia y por la correspondiente distorsión de tensión que tiende a reducir las corrientes armónicas en la red producida por cargas no lineales.

El factor de atenuación FA_k para el armónico k está definido como la magnitud de la corriente total del armónico k cuando n cargas idénticas están conectadas en paralelo, dividida por n veces la magnitud de la corriente de una única carga.

$$FA_k = \left| \frac{I_{k(n)}}{n I_{k(1)}} \right| \quad (15)$$

$I_{k(n)}$: corriente para el armónico k con n cargas conectadas en paralelo.

$I_{k(1)}$: corriente para el armónico k con una sola carga conectada.

Con los factores de atenuación y diversidad es posible cuantificar el error que se comete al analizar los índices de distorsión (corriente y tensión) utilizando la técnica de inyección de armónicos como fuentes de corrientes fijas respecto al método de modelos reales [22].

5.6. Efectos de la distorsión armónica

Como se ha dicho, el uso masivo de equipos electrónicos hace que la distorsión en los circuitos de distribución crezca gradualmente y de manera constante durante las últimas décadas. La distorsión en la tensión de la red ocurre gracias a que el flujo de corrientes armónicas produce caídas de tensión no lineales en la impedancia de la red, creando niveles de distorsión muy cercanos al límite de compatibilidad de las redes de alimentación pública, y al margen de inmunidad de los equipos electrónicos, incrementando de esta forma sus posibles fallas.

5.6.1. Resonancia

Las condiciones de resonancia son aquellas en las que un sistema pasa de ser inductivo a capacitivo o viceversa, este cambio provoca problemas muy graves como pueden ser sobre corrientes o sobre tensiones, los cuales ocasionan el fallo

y/o destrucción de equipos que se encuentran expuestos a estos fenómenos de resonancia [20].

Un ejemplo de señal resonante se muestra en la figura 26:

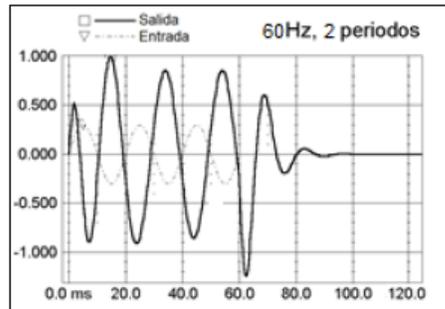


Figura 26 [20]. Señal resonante a 60 Hz.

5.6.1.1. Resonancia en paralelo

Este tipo de resonancia produce una alta impedancia en la fuente de armónicos respecto a frecuencias resonantes. Hay muchas formas de producir resonancias en paralelo, pero entre ellas las más destacadas se encuentran, conectar capacitores al mismo bus que una fuente de armónicos. Suponiendo que la impedancia del sistema es completamente [20].

La frecuencia de resonancia paralela se encuentra con:

$$f_p = f \sqrt{\left(\frac{S_s}{S_c}\right)} \quad (16)$$

Donde

f : es la frecuencia nominal (Hz)

f_p : la frecuencia de resonancia en paralelo (Hz),

S_c : el valor del capacitor en VARs

S_s : el valor en VARs del cortocircuito.

Para determinar si hay resonancia se mide la cantidad de distorsión de tensión en el sistema además de la cantidad de distorsión en corriente en la fuente alimentadora y en las cargas. Para que se produzca la resonancia, en general tienen que cumplirse relaciones entre la tensión y corriente. Prácticamente se reducen a un par de cosas que son:

- Corriente baja en la barra del bus combinado con alta distorsión armónica en tensión en el sistema.

- Grandes cantidades de armónicos de corriente en las cargas y cables con gran distorsión de tensión en el bus, la resonancia se encuentra en los capacitores.

La figura 27, muestra el efecto del sistema sobre la resonancia paralela.

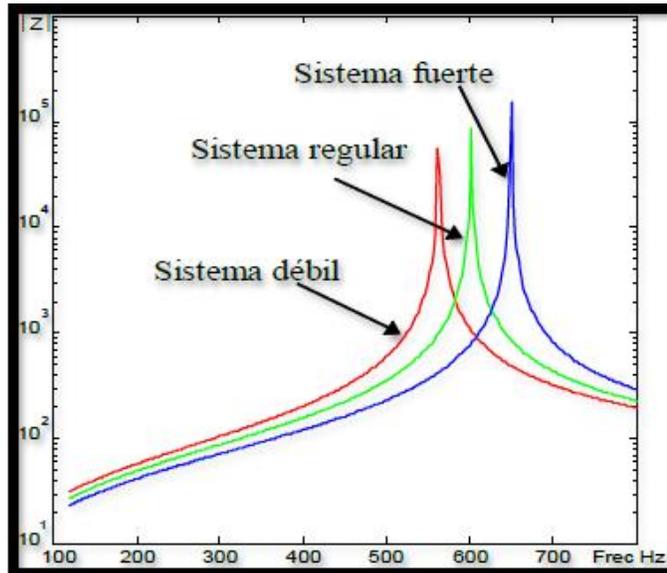


Figura 27 [20]. Efecto del sistema a la resonancia paralela.

La figura 27, muestra que a medida que el sistema sea más débil se tiene que las frecuencias de resonancia se acercan cada vez más a frecuencias que pueden existir en el sistema como por ejemplo la 3^a, 5^a, 7^a armónica, ocasionando así problemas casi seguros de resonancia llevando a la destrucción al banco de capacitores.

Si la carga inyecta una corriente armónica de una frecuencia igual o cercana a la frecuencia de resonancia paralela al sistema, entonces las corrientes y tensiones experimentarán una amplificación puesto que la admitancia equivalente se acerca a cero (impedancia muy alta), esto produce los problemas de calentamiento inherentes a las corrientes armónicas (en cables, transformadores, interruptores), la operación de fusibles, y el posible daño o envejecimiento prematuro de equipo [20].

5.6.1.2. Resonancia en serie

Es igual que la resonancia paralela, pero en este caso ocurre cuando una impedancia inductiva se encuentra en serie con un capacitor, es decir se diferencian en que ahora el circuito presenta una trayectoria de baja impedancia a las corrientes armónicas (casi cortocircuito), esta resonancia causará problemas similares a los

que se tienen en el caso de la resonancia paralelo. En la figura 28 se puede apreciar el circuito resonante serie.

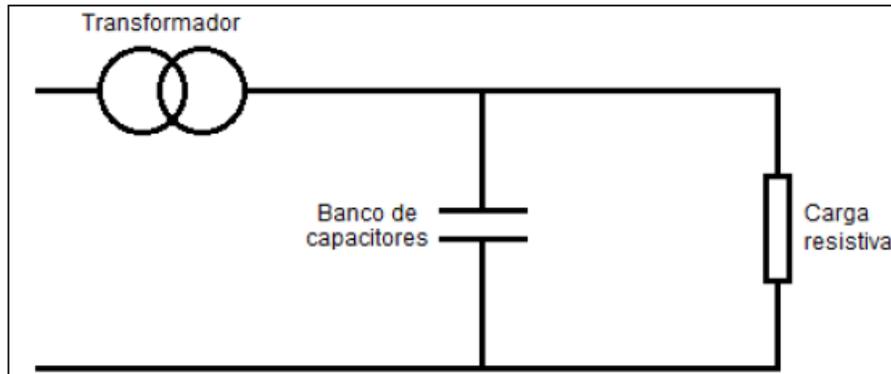


Figura 28 [20]. Circuito resonante en serie.

El gran problema de este tipo de resonancia es que con pequeños niveles de armónicos de la señal de tensión se pueden producir grandes flujos de corriente en los capacitores, lo que terminará por dañarlos, [20]. La frecuencia de resonancia en serie se encuentra con,

$$f_s = f_1 \sqrt{\left(\frac{S_t}{S_c Z_t} - \frac{S_t^2}{S_c^2} \right)} \quad (17)$$

Donde: S_t es el valor del transformador, Z_t la impedancia en por unidad del transformador, S_c el valor del capacitor y S_t el valor resistivo de la carga.

El valor de corriente real depende del factor de calidad del circuito (Q) y su frecuencia está normalmente entre 5 y 500 Hz.

La figura 29, muestra el efecto del sistema sobre la resonancia serie.

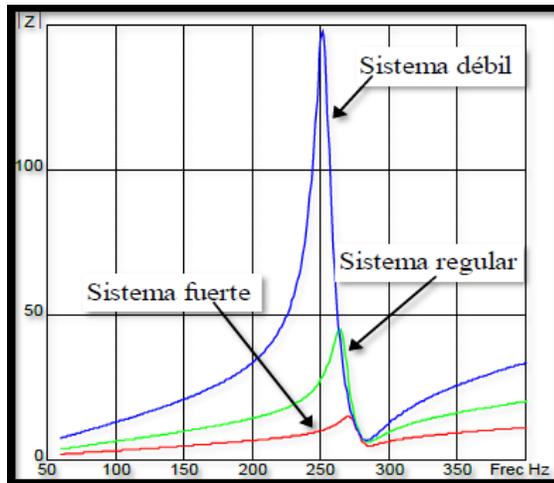


Figura 29 [20]. Efecto del sistema a la resonancia serie.

La figura 29, muestra que a medida que el sistema es más débil, se tienen impedancias muy grandes antes de la resonancia, pudiendo ocasionar estos picos sobre tensiones armónicas muy fuertes [20].

5.6.1.3. Comportamiento del sistema en condiciones de resonancia

Como ya lo mencionamos, el principal efecto de la resonancia armónica es el daño a los capacitores de los compensadores estáticos de VAR's, que puede derivar en su destrucción cuando su dieléctrico se rompe, pero hay otro tipo de daños a los componentes de la red y están asociado con el control del sentido de la onda (señalización de la línea), es decir, bajo ciertas condiciones de distorsión se da el caso en el que por el ángulo de la señal total, la suma de la fundamental más las armónicas, la tensión y la corriente se mueven en sentido contrario al que se necesita. Esto es, vuelven al generador en lugar de moverse al sitio de la carga.

Algunas veces se usan filtros sintonizados para evitar que elementos de baja impedancia absorban la frecuencia de señalización. Cuando hay resonancias en casos como éste, existen flujos grandes de corriente que dañan los capacitores de sintonización de los filtros. La falla en los capacitores puede producirse hasta en 2 días, operando en estas condiciones, dependiendo de la frecuencia de resonancia en serie.

Un último efecto de las resonancias se genera cuando existen bajas impedancias que combinadas con cargas de valor constante generan caídas de corriente que a su vez provoca la pérdida de amortiguamiento del sistema. La consecuencia de esta pérdida de amortiguamiento es que, al perder la capacidad de absorber energía causa un desempeño pobre de los equipos a largo plazo [20].

5.6.2. Efectos en máquinas rotatorias

El efecto más notable en las máquinas rotativas es la pérdida por calentamiento, la cual aparece cuando la distorsión armónica supera el 5%. En las máquinas rotativas, picos de corrientes y tensiones armónicas causan pérdidas en los devanados del estator en el circuito del rotor y en las laminaciones tanto del rotor como del estator.

Los motores de AC tienen pérdidas significativamente más grandes que los de DC a causa de las corrientes de Eddy y el efecto piel. Las corrientes armónicas producen campos en el estator y en las conexiones de los devanados que también producen pérdidas. En motores de inducción, armónicos de frecuencias altas producen pérdidas en el hierro dependiendo de la magnitud del ángulo de sesgo de los devanados y las características del hierro laminado. La pérdida térmica más grave, producida por efecto de armónicos, es la pérdida de potencia por fatiga de los devanados que se alcanza por un gran factor de distorsión relacionado con la inductancia de los mismos.

La capacidad de la máquina de soportar estas pérdidas, depende de la temperatura. Otro tipo de efectos que los armónicos causan en las máquinas rotativas son los torques armónicos. Las corrientes armónicas del estator producen movimiento en el eje del motor, que físicamente es producido por torque mecánico. Estos torques giran en la misma dirección que los campos causados por los armónicos. Si los armónicos son de secuencia positiva giraran en ese sentido, si son de secuencia negativa giraran en sentido contrario.

Sus efectos no son tan notables dado que los torques producen deslizamientos muy pequeños, además, estos torques se anulan, al producirse en pares. Sin embargo, hay ocasiones que los torques no pueden ser despreciados, dado que producen pulsos, es decir torques grandes, pero de duración muy breve [20].

5.6.3. Efectos en plantas generadoras

Como se ha mencionado anteriormente la mayoría de las cargas actuales son de naturaleza no lineal, por lo tanto, los generadores de energía eléctrica deben cumplir con especificaciones diseñadas para garantizar su operación sin calentamiento excesivo o vibraciones torsionales, que afectarían gravemente su operación.

El problema en los generadores se ubica en sus terminales, donde pueden producirse corrientes armónicas de secuencia positiva y negativa, que contribuyen a la aparición de torques pulsantes y vibraciones torsionales. También se presenta calentamiento a causa de la distorsión, lo que provoca la fatiga en el barniz aislante de los devanados, y por tanto se acorta la vida útil o el tiempo de mantenimiento del generador. Hablando de la regulación de tensión se produce por la forma en que se

provoca el exceso de corrientes de secuencia negativa que también desbalancea el sistema [20]. Para una operación sin problemas se requiere:

- Rotor horneado con barras de amortiguamiento en el cobre.
- Asegurar una reactancia transitoria entre 16% y 18%.
- Factor de potencia superior a 0.85.
- Distorsión armónica menor al 2%.

5.6.4. Interferencia con equipo de medición

La instrumentación de medición es afectada por la presencia de tensiones y corrientes armónicas, ya que estos instrumentos se diseñan y calibran solamente para corriente y tensión fundamental. La presencia de armónicas genera un torque electromagnético adicional que puede causar operación errónea.

5.6.5. Pérdidas energéticas

El efecto Joule, inducido por las corrientes armónicas en los conductores y equipos, causa pérdidas energéticas adicionales [20].

5.6.6. Costos adicionales de potencia Contratada

La presencia de corrientes armónicas provoca que se incremente el nivel de potencia contratada y, consecuentemente, el costo de la suscripción. Lo que, es más, los distribuidores de energía tenderán a penalizar en el futuro a quienes produzcan perturbaciones armónicas [20].

5.6.7. Sobredimensionamiento de los equipos

El decalaje de las fuentes de energía (generadores, transformadores y SAI's) implica su sobredimensionado. Los conductores deben ser dimensionados teniendo en cuenta la circulación de las corrientes armónicas. Debido a que las frecuencias de los armónicos son mayores que la de la fundamental, las impedancias que se presentan para estas corrientes son mayores. Para evitar excesivas pérdidas debidas al efecto joule, es necesario sobredimensionar los conductores. La circulación de corrientes armónicas en el conductor del neutro implica su sobredimensionamiento [20].

5.7. Efecto de los armónicos en el sistema de distribución

Los efectos de las armónicas en un sistema de distribución eléctrica tienen influencia sobre las pérdidas, operación y en el desempeño del sistema. A menos

de que las armónicas sean controladas hasta límites aceptables, los equipos de potencia y especialmente los equipos electrónicos pueden ser dañados, dando como resultado costosos cambios de equipos.

Las repercusiones de los armónicos se deben tanto a corrientes como a tensiones, los efectos producidos por corrientes armónicas son comúnmente vistos en el desempeño cotidiano de los equipos, mientras que los efectos de las tensiones son responsables generalmente de degradar los aislamientos eléctricos y, por tanto, disminuir la vida útil de los equipos.

A continuación, se describen algunos de los efectos comunes de los armónicos:

5.7.1. Efectos armónicos en diferentes equipos dentro de una instalación eléctrica

- Aumento de las pérdidas entre los equipos y los cables, líneas y demás dispositivos asociados.
- Intermitencia y reducción del par de torsión en equipos rotativos
- Envejecimiento prematuro debido al incremento de estrés sobre el aislamiento del equipo.
- Aumento de ruido auditivo de equipo rotativo y estático.
- Mala operación de equipos sensibles a las formas de onda.
- Amplificación substancial de corrientes y tensiones debido a resonancia.
- Interferencia en sistemas de comunicación debido a uniones inductivas entre circuitos de potencia y comunicación.

5.7.1.1. Mayores pérdidas en el sistema.

Una parte de las pérdidas en transformadores, motores y conductores es función de la frecuencia, por lo que la presencia de armónicas incrementa las pérdidas en el sistema y en algunos casos reduce la capacidad de los equipos. Es por ello que en sistemas con armónicas los transformadores no se pueden utilizar a toda su capacidad, ya que presentarían un calentamiento excesivo, por lo que sería necesario utilizar equipos de diseño especial [20].

5.7.1.2. Envejecimiento prematuro de los equipos

Las armónicas, además de incrementar el calentamiento de los equipos, aumentan el valor pico de la tensión, lo que provoca un envejecimiento prematuro del aislamiento de los equipos [20].

5.7.1.3. Efecto en los circuitos y en los cables de neutro

Las corrientes armónicas generan pérdidas adicionales en los conductores, acentuadas por el efecto pelicular. En una señal distorsionada por cargas electrónicas, luego del armónico fundamental, el tercer armónico es normalmente el de mayor amplitud, y si existen varias cargas de tipo electrónico conectadas a un mismo sistema trifásico, los terceros armónicos fluirán en fase y se sumarán en el cable de neutro, produciendo de esta manera corrientes y caídas de tensión indeseables [19].

Los conductores involucrados en la resonancia de un sistema, pueden ser expuestos a sobre tensiones y al efecto corona, que pueden conducir a fallas dieléctricas (aislamiento), los conductores que se someten a niveles ordinarios de armónicos son propensos a calentamientos.

El flujo de corriente no-sinusoidal en el conductor provocará calentamiento adicional por encima del que se esperaría para el valor *rms* de la forma de onda.

Al circular corriente a través de un conductor se produce calentamiento como resultado de las pérdidas por efecto Joule, I^2R donde R es la resistencia a corriente directa del cable y la corriente está dada por el producto de la densidad de corriente por el área transversal del conducto, a medida que aumenta la frecuencia de la corriente que transporta el cable disminuye el área efectiva por donde está circula puesto que la densidad de corriente crece en la periferia exterior, lo cual se refleja como un aumento en la resistencia efectiva del conductor.

Por lo tanto, la resistencia a corriente alterna de un conductor es mayor que su valor a corriente directa y aumenta con la frecuencia, por ende, también aumentan las pérdidas por calentamiento.

A frecuencia de 60 *Hz*, este efecto se puede despreciar, no porque no exista, sino porque este factor no se considera en la manufactura de los conductores. Sin embargo, con corrientes distorsionadas, las pérdidas por efecto Joule son mayores por la frecuencia de las componentes armónicas de la corriente [20].

5.7.1.4. Efecto en los transformadores

Los efectos generales de los armónicos en los transformadores son [21]:

- Aumento en las pérdidas en el cobre.
- Aumento en las pérdidas en el núcleo.
- Posibilidad de resonancias entre las bobinas del transformador y la capacitancia de la línea.
- Esfuerzos en el aislamiento.

En el capítulo 6 se amplía la información sobre los efectos producidos por los armónicos en los transformadores.

5.7.1.5. Efecto en los capacitores

Dejando de lado a los transformadores se describirán ahora los efectos de los armónicos en bancos de capacitores. El primero de ellos es el sobre el estrés que causa el incremento del valor RMS de la tensión. No solo la tensión se ve afectado, pues el valor de la corriente y el de la temperatura se ven incrementados. La suma de estos tres factores compromete el punto de falla del dieléctrico reduciéndolo sensiblemente. La IEEE es su estándar de octubre de 2002, denominado 18-2002, estándar para capacitores de potencia, emite los límites de operación para bancos de capacitores en la figura 24.

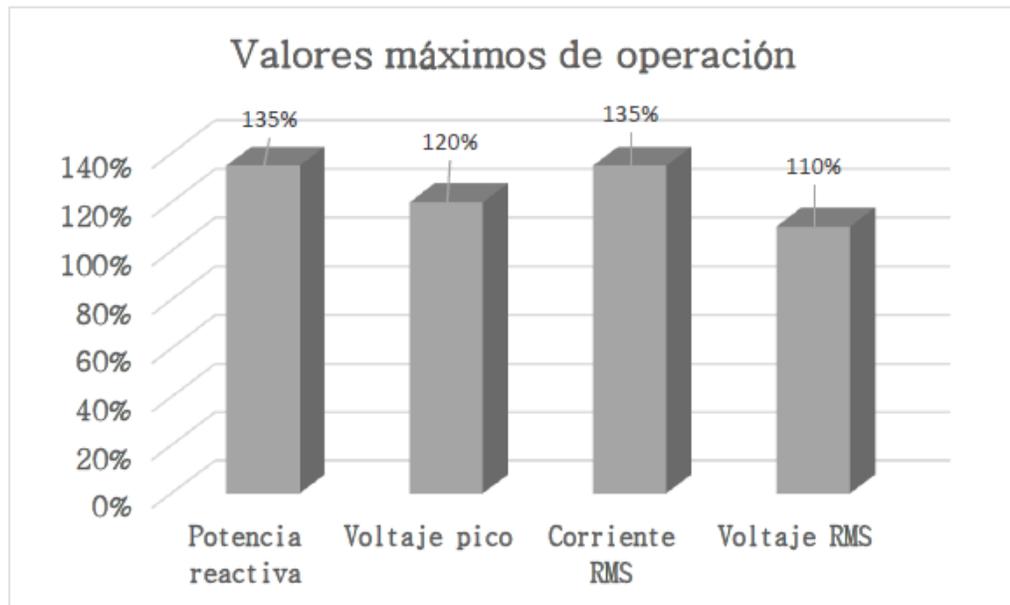


Figura 30 [20]. Límites de operación de bancos de capacitores.

El análisis de los bancos de capacitores se basa en la tensión porque de este parámetro depende del valor de potencia reactiva a la salida del dispositivo. Dicho valor se encuentra con la siguiente expresión (18):

$$VAR = \frac{V^2}{X_c} \quad (18)$$

Como la salida de potencia depende del cuadrado de la tensión de entrada una pequeña variación significa un incremento importante en la potencia reactiva. El origen de esta variación en la tensión puede ser una carga “ligera” en comparación

a la capacidad del sistema o la operación de una protección únicamente causando el desbalance del sistema, además de, obviamente la distorsión armónica, que a su vez es causa del problema con las protecciones, por esta razón es que cobra importancia la IEEE 18-2002, pues a partir de, por ejemplo, la escala antes vista, se diseñan filtros sintonizados de acuerdo a las necesidades del sistema. Si la resonancia que se presenta es en serie se limita a la parte resistiva. Del valor de la componente resistiva depende el valor de la corriente que produce la resonancia, siendo inversamente proporcional una respecto a la otra. Si la resonancia es en paralelo, el valor de la corriente crece a valores que el sistema no puede manejar, por las tensiones tan altas que provoca, cuyo efecto compromete aislamientos de cables, devanados y dieléctricos de capacitores. Para encontrar las frecuencias de resonancia se usa (19).

$$hr = \sqrt{\frac{KvA_{\text{corto circuito}}}{KvAR_{\text{banco de capacitores}}}} \quad (19)$$

5.7.1.6. Interferencias con sistemas de protección

Las armónicas afectan de muchas y variadas formas el funcionamiento de los dispositivos electrónicos y electromecánicos de control, en los que frecuentemente la operación depende de la determinación exacta del cruce de la tensión por cero, o de otros aspectos de la forma de onda de tensión. La distorsión armónica puede mover el cruce por cero de la forma de onda de tensión, lo cual ocasiona una operación errónea de los dispositivos de control con todos los problemas consecuentes. También las armónicas pueden distorsionar y degradar las características de operación de los relevadores de protección. En la mayoría de los casos, los cambios de las características de operación son pequeños y no presentan problema. Las pruebas que se han efectuado indican que la mayoría de los tipos de relevadores no se afectan significativamente con niveles de tensiones armónicas del 20 % [21]. En forma general se mencionan los efectos principales de las armónicas sobre los relevadores de protección:

- Los relevadores tienden a operar más lentos y/o con mayores valores que los nominales.
- Dependiendo del fabricante, los relevadores de sobretensión y sobrecorriente cambian sus características de operación.
- Dependiendo del contenido armónico, los torques de operación se pueden invertir.
- Los tiempos de operación pueden variar ampliamente dependiendo del contenido armónico.
- Las armónicas pueden alterar la velocidad de operación de los relevadores diferenciales.

- Los relevadores de impedancia pueden operar arriba o abajo de su calibración.

5.7.1.7. Interferencia en las comunicaciones

La presencia de tensiones y corrientes armónicas cerca de los circuitos de comunicación pueden producir campos eléctricos y magnéticos que causan ruido en los sistemas de comunicaciones. A bajos niveles el ruido causa molestia, a altos niveles se degrada la calidad de la transmisión y se puede perder parte de la información, en casos extremos el ruido obstruye completamente la comunicación.

Tres factores se combinan para producir el problema de ruido en las líneas de comunicación, estos son [21]:

- Influencia del sistema de potencia. Esto depende de la fuente de audiofrecuencia del sistema de potencia y la magnitud relativa de las corrientes y tensiones armónicas en el circuito de potencia en la vecindad de los circuitos de comunicación.
- Acoplamiento de los circuitos de comunicación. Este es el acoplamiento de las corrientes y tensiones que interfieren con el sistema de comunicación.
- Efecto en los circuitos de comunicación. Lo cual depende de las características de los circuitos y aparatos utilizados en la red de comunicación.

Capítulo 6

6. Efectos de los armónicos en los transformadores y cambios generados en su construcción.

6.1. Efectos de la distorsión armónica en transformadores de distribución.

Cuando la tensión o la corriente de un sistema eléctrico tienen deformaciones con respecto a la forma de onda senoidal, se dice que la señal está distorsionada. Puede deberse a fenómenos transitorios (arranque de motores, conmutación de capacitores, efectos de tormentas o fallas por cortocircuito entre otras) o condiciones permanentes (están relacionadas con armónicas de estado estable) [20].

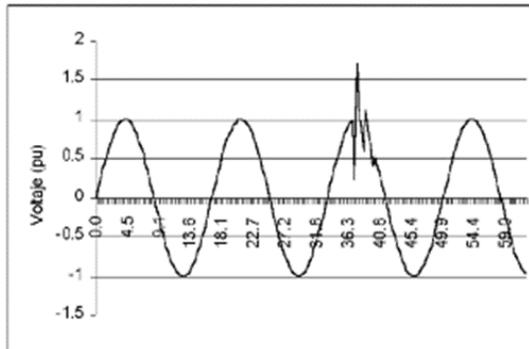


Figura 31 [20]. Efecto en la tensión por un fenómeno transitorio.

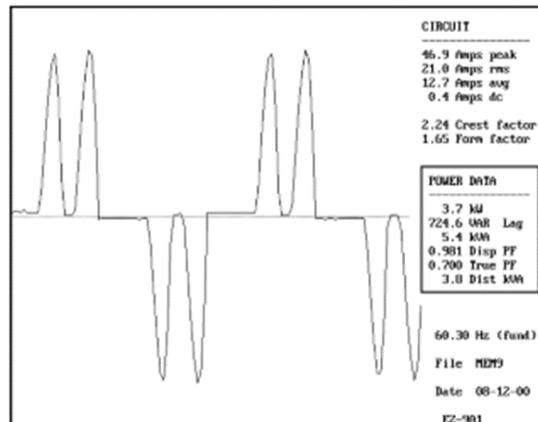


Figura 32 [20]. Efecto en la tensión por una condición permanente.

Actualmente toda red eléctrica está expuesta a una cantidad grande de armónicos, ya sea en una zona industrial, donde destacan por su aportación de armónicos los hornos de arco, variadores de velocidad de motores, iluminación no incandescente, y los mismos motores, o en zonas residenciales, llenas de equipos basados en semiconductores, como televisores, computadoras, equipos de audio e iluminación balastrada, etcétera.

Por lo tanto, los transformadores que son piezas importantes en las líneas eléctricas están siempre expuestos a distorsión. Si la distorsión llega a saturar al transformador ésta se convierte en una fuente de armónicos. Estos armónicos son peligrosos porque causan sobrecalentamiento en el neutro del sistema, particularmente los de secuencia cero [20].

Se debe recalcar que las pérdidas en transformadores causados por tensiones y corrientes armónicas, son dependientes de la frecuencia, las pérdidas aumentan con el aumento en la frecuencia y, por lo tanto, las componentes armónicas con alta frecuencia pueden provocar mayor calentamiento de transformadores que componentes armónicas de frecuencia baja.

Aunque los transformadores son dimensionados para la operación con cargas a 60 Hz, cuando estos alimentan cargas no lineales evidencian un incremento notable en sus pérdidas; tanto en el núcleo como en el cobre, las corrientes armónicas de frecuencias más altas provocan pérdidas en el núcleo incrementadas en proporción al cuadrado de la corriente de carga RMS y en proporción al cuadrado de frecuencia debido al efecto peculiar, el incremento en las pérdidas en el cobre, se debe a la circulación de corrientes armónicas de secuencia positiva y negativa transportadas en los conductores de fase provenientes de cargas generadoras de armónicos monofásicos y trifásicos, y a la circulación de las corrientes armónicas triples de secuencia cero que son transportadas en los conductores del neutro desde las cargas no lineales generadoras de armónicos.

Los armónicos triples de secuencia cero se suman algebraicamente en el neutro y pasan a través del sistema de distribución hasta que alcanzan un transformador conectado en delta-estrella, cuando las corrientes de neutro de armónicos triples alcanzan un transformador delta-estrella la misma es reflejada dentro del devanado primario en delta, donde circula y causa sobrecalentamiento y fallas. El sobrecalentamiento es muy perjudicial para los transformadores, pues acortan su vida útil significativamente. Por esta razón, con el correr del tiempo el diseño de los transformadores ha evolucionado al punto de ser uno de los equipos que menos se ven afectados por los armónicos. Incluso si hay ambientes con distorsión armónica tan intensa, que requiere un tipo de transformador, llamado transformador tipo K , diseñados para uso casi exclusivo para alimentar cargas no lineales y tienen como principal característica el uso del blindaje electrostático y que soportan hasta 200% de la corriente nominal en uso continuo, sin sobrecalentarse [20].

La mayoría de los transformadores están diseñado para trabajar con corriente alterna a una frecuencia fundamental de 60 Hz , lo que implica que operando en condiciones de carga nominal y con una temperatura no mayor a la temperatura ambiente especificada, el transformador debe de ser capaz de disipar el calor producido por sus pérdidas sin sobrecalentarse ni deteriorar su vida útil.

Las pérdidas en los transformadores consisten en pérdidas sin carga o de núcleo y pérdidas con carga, que incluyen las pérdidas I^2R , pérdidas por corrientes de Eddy y pérdidas adicionales en el tanque, sujetadores, u otras partes del hierro.

En resumen, los efectos de las armónicas en los transformadores son:

- Reducción de la eficiencia provocada tanto por el incremento en la corriente eficaz como por las corrientes de Eddy que son función del cuadrado de la frecuencia.
- Incremento en los costos de operación.
- Capacidad de operación reducida con relación a su nominal.
- Inversión en capital adicional.
- Incremento en la temperatura, pudiendo exceder los límites de elevación sobre la temperatura ambiente, provocando fallas prematuras.
- Incremento en los costos de mantenimiento por servicio y por reemplazo.
- Reducción de la productividad de la empresa por paros inesperados [20].

6.1.1. Elevación de Temperatura

La mayoría de los transformadores están diseñados con corriente alterna a una frecuencia a 60 ciclos por segundo, lo que implica que un transformador trabajando a valores nominales y a una temperatura no mayor a la de referencia, debe ser capaz de disipar el calor debido a sus pérdidas sin necesidad de sobrecalentarse ni deteriorar su vida útil [25].

En un transformador expuesto a armónicos el diseño de los devanados debe ser capaz de soportar tensiones mecánicas / térmicas debidas a la distribución de la temperatura más desigual que con corriente sinusoidal única ("efecto final"). Los puntos calientes localizados se deben evitar y cada arrollamiento necesita ser analizado por separado. El aumento de la temperatura debido al aumento de las pérdidas a causa de las componentes armónicas debe estar dentro de los límites especificados para el aumento de la corriente de carga real, incluyendo las pérdidas debidas a los armónicos. Existe margen en el aumento de la temperatura con la corriente sinusoidal [25].

directa del cable y la corriente está dada por el producto de la densidad de corriente por el área transversal del conductor. A medida que aumenta la frecuencia de la corriente que transporta el cable (manteniendo su valor R_{ms} igual al valor de corriente directa) disminuye el área efectiva por donde ésta circula puesto que la densidad de corriente crece en la periferia exterior (Figura 34), lo cual se refleja como un aumento en la resistencia efectiva del conductor [25].



Figura 34 .Densidades de corriente en un mismo conductor, (a) a corriente directa y (b) a corriente de alta frecuencia.

Por lo tanto, la resistencia a corriente alterna de un conductor es mayor que su valor a corriente directa y aumenta con la frecuencia, por ende, también aumentan las pérdidas por calentamiento. A frecuencia de 60 Hz , este efecto se puede despreciar, no porque no exista, sino porque este factor se considera en la manufactura de los conductores. Sin embargo, con corrientes distorsionadas, las pérdidas por efecto Joule son mayores por la frecuencia de las componentes armónicas de la corriente.

La Tabla 12 muestra la razón entre la resistencia de alterna y la de directa producida por el efecto piel en conductores redondos, a frecuencias de 60 Hz y 300 Hz .

Tamaño del conductor	Resistencia AC / Resistencia DC	
	60 Hz	300 Hz
300 MCM	1.01	1.21
450 MCM	1.02	1.35
600 MCM	1.03	1.50
750 MCM	1.04	1.60

Tabla 11 [25]. Efecto piel en los conductores.

En general si la corriente de carga contiene componentes armónicas, entonces estas pérdidas también aumentarán por el efecto piel.

6.1.2.2. Efecto en las pérdidas por corrientes de Eddy ó parasitas

Estas pérdidas a frecuencia fundamental son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga y al cuadrado de la frecuencia, razón por la cual se puede tener un aumento excesivo de éstas en los devanados que conducen corrientes de carga no senoidal (y por lo tanto también en su temperatura) [25].

6.1.2.3. Pérdidas sin carga o de núcleo

Producidas por la tensión de excitación en el núcleo. La forma de onda de tensión en el primario es considerada senoidal independientemente de la corriente de carga, por lo que no se considera que aumentan para corrientes de carga no senoidales. Aunque la corriente de magnetización consiste de armónicas, éstas son muy pequeñas comparadas con las de la corriente de carga, por lo que sus efectos en las pérdidas totales son mínimos [25].

6.1.2.4. Efectos en las pérdidas adicionales

Estas pérdidas aumentan la temperatura en las partes estructurales del transformador, y dependiendo del tipo de transformador contribuirán o no en la temperatura más caliente del devanado. Se considera que varían con el cuadrado de la corriente y la frecuencia [25].

6.2. Construcción de los transformadores expuestos a armónicos

Con el constante aumento de cargas no lineales, se han llevado a cabo estudios para disminuir la capacidad nominal de los transformadores ya instalados que, Además, en el caso de transformadores que operarán bajo condiciones de carga no lineal, es conveniente en lugar de sobredimensionar el transformador, utilizar un transformador con un factor K mayor a 1 [14s]. Estos transformadores son aprobados por UL (Underwriter's Laboratory) para su operación bajo condiciones de carga no senoidal, puesto que operan con menores pérdidas a las frecuencias armónicas. Entre las modificaciones con respecto a los transformadores normales están [24]:

- El tamaño del conductor primario se incrementa para soportar las corrientes armónicas "triple-N" circulantes. Por la misma razón se dobla el conductor neutro.

- Se diseña el núcleo magnético con una menor densidad de flujo normal, utilizando acero de mayor grado.
- Utilizando conductores secundarios aislados de menor calibre, devanados en paralelo y transpuestos para reducir el calentamiento por el efecto piel.

El factor K se define como un factor opcional que puede ser utilizado en transformadores y que indica la capacidad que tiene un transformador para manejar corrientes no sinusoidales (IEEE, 1998). El factor K se puede encontrar mediante un análisis armónico de la corriente de la carga o del contenido armónico estimado de la misma. La ecuación que lo define es:

$$\text{factor } K = \sum_{h=1}^{\infty} I_h (pu)^2 h^2 \quad (20)$$

$I_h(pu)$ es la corriente *RMS*, Para la armónica de orden h (en por unidad) y h corresponde al orden de la componente armónica. Los principales efectos de las corrientes no sinusoidales y sus consiguientes componentes armónicas en los transformadores de distribución son los siguientes, pérdidas por corrientes armónicas por el efecto I^2R ; pérdidas por corrientes de Eddy, las cuales aumentan proporcionalmente con el cuadrado de las corriente de carga y al cuadrado de la frecuencia, y pérdidas parásitas por efecto de corrientes armónicas en el núcleo, abrazaderas y elementos estructurales de los transformadores que aumentan proporcionalmente con el cuadrado de la corriente de carga. La tabla 11 muestra el factor K adecuado para transformadores de distribución según el tipo de carga que alimentan [24].

Tipo de carga	Factor K
Lámparas incandescentes (sin <i>dimers</i> de estado sólido), calefactores eléctricos resistivos (sin controles de calor de estado sólido), motores (sin controladores de estado sólido), transformadores de control, dispositivos electromagnéticos de control, motor generador (sin controladores de estado sólido).	$K-1$
Lámparas de descarga, UPS con filtros de entrada opcional, equipos de calefacción inductivos, PLC y controladores de estado sólido	$K-4$
Equipos de telecomunicaciones, UPS sin filtros de entrada.	$K-13$
Servidores de computadores, controladores de estado sólido (variadores de frecuencia), conectores multiconductor para instalaciones de salud, escuelas, etc., conectores multiconductor para alimentadores en equipos de inspección o prueba o para líneas de producción.	$K-20$
Conectores multiconductor para circuitos industriales, médicos y laboratorios educacionales, conectores multiconductor para circuitos comerciales en oficinas, pequeños servidores.	$K-30$
Otras cargas identificadas como productores de grandes cantidades de armónicos.	$K-40$

Tabla 12 [24]. Factor K del transformador en base al tipo de carga no lineal que alimenta.

El criterio UL1561 para establecer la clasificación es el siguiente: Inicialmente se prueba al transformador con una corriente sinusoidal de $60Hz$ para determinar las pérdidas en los devanados y en el núcleo. Del total de las pérdidas en los

arrollamientos se restan las debidas al I^2R , calculadas a 60Hz, y de este modo se deducen las pérdidas de dispersión que se consideran fundamentalmente producidas por corrientes de Foucault. Si el transformador es adecuado para un factor K determinado, las pérdidas por dispersión se Multiplican por ese factor K y se suman a las debidas al efecto Joule a 60Hz.

Si la elevación de la temperatura media en los devanados no supera la nominal, el transformador es marcado en su placa como válido para trabajar con cualquier carga no linear de ese o menor factor K ."

Las corrientes armónicas elevan las pérdidas adicionales en los bobinados, barras de conexión, bridas del núcleo y paredes del tanque principal, que pueden conducir a problemas térmicos como el envejecimiento prematuro del transformador. Grado de severidad depende del tipo de unidad rectificadora, de carga y el diseño del transformador. El diseño de los devanados debe ser capaz de soportar tensiones mecánicas / térmicas debidas a la distribución de la temperatura más desigual que con corriente sinusoidal única ("efecto final"). Los puntos calientes localizados se deben evitar y cada arrollamiento necesita ser analizado por separado. El aumento de la temperatura debido al aumento de las pérdidas a causa de las componentes armónicas debe estar dentro de los límites especificados para el aumento de la corriente de carga real [24].

Los transformadores bajo presencia de armónicos deben diseñarse especialmente bajo cualquiera de estas dos normas:

- IEC 61378-1 Converter transformers, Part 1 Transformers for Industrial Applications.
- IEEE C57.18.10 IEEE standard Practices for Semiconductor Power Rectifier Transformers" (IEC no hace requerimientos sobre nivel de aislamiento (BIL) IEEE si lo hace).

Los diseños deben cubrir incremento dieléctrico en el lado del rectificador, tensiones de modo común, Alto DU/dt, Corrientes Armónicas, Compatibilidad Electromagnética EMC.

6.2.1. Diseño del núcleo bajo armónicos

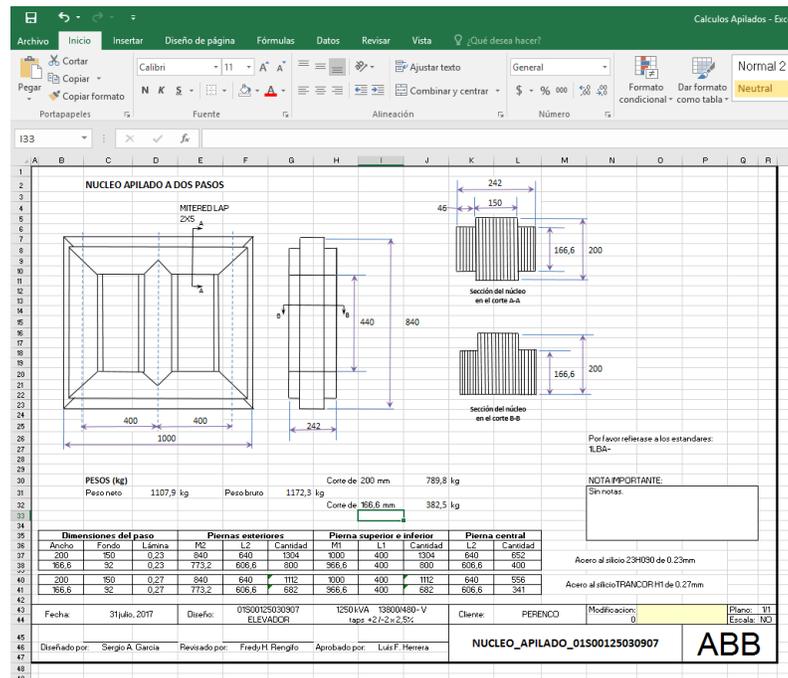


Figura 35 .Hoja de cálculo de diseño de núcleo ABB.

Por razones económicas, los transformadores se construyen aprovechando, al máximo las propiedades magnéticas del material del núcleo. Esto significa que, normalmente, un transformador con núcleo de acero de grano orientado se diseña para operar en la zona de la característica de magnetización de 1,6 a 1,7 T . Si un transformador, que funciona con este tipo de núcleo, es sometido a una sobretensión del 30%, su material magnético pasará a una inducción de 2 a 2,2 T , lo que producirá un alto nivel de saturación; ésta es, especialmente, importante en transformadores conectados a grandes rectificadores cuando se desconecta la carga, ya que su sobretensión puede alcanzar un valor de hasta el 40% del nominal. Al desconectar el transformador queda en el núcleo una inducción residual B_r ; cuando se vuelve a conectar, la inducción puede alcanzar valores de hasta $2B_{max} + B_r$, casi tres veces el valor nominal, dando lugar a valores de pico de la inducción del orden de 4 a 4,7 T . Este efecto da lugar a corrientes magnetizantes de 5 a 10 veces la nominal. El amortiguamiento de la corriente de conexión con el tiempo depende, principalmente, de la resistencia del bobinado primario y, en el caso de grandes transformadores, debido a su pequeño valor, esta corriente puede durar mucho tiempo. Si el transformador se conecta a una carga, la corriente de excitación sólo contiene armónicas impares, siempre que no se genere un componente de corriente continua; en caso contrario la característica de magnetización se hace asimétrica y, consecuentemente, las ondas de flujo y corriente magnetizante pierden la simetría de media onda; en estas condiciones de desequilibrio, la corriente de excitación contiene armónicas pares e impares. Por tanto, la presencia

de un flujo de valor medio distinto de cero, implica la existencia de un componente de continua en la excitación; éste puede ser debido al circuito en sí, como en el caso de un transformador que alimenta a un rectificador de media onda, o al régimen de funcionamiento, como en el caso de un convertidor trifásico con encendidos desequilibrados.

Se ha comprobado que la magnitud de los componentes armónicos de órdenes bajos en la corriente de excitación, aumenta -casi linealmente- con el contenido de corriente continua en el secundario del transformador. Además, los armónicos generados por el transformador como consecuencia del contenido de corriente continua de la corriente magnetizante son, casi completamente, independientes del nivel de la excitación de alterna; bajo este punto de vista no se justifican la fabricación de transformadores con núcleos sobredimensionados [13].

6.2.2. Diseño de la bobina bajo armónicos

Las bobinas bajo armónicos se ven afectadas especialmente en su tamaño, ya que deben incluir una pantalla electrostática (expuesta más adelante) y deben usarse aislamientos extendidos de acuerdo al BIL, al factor k y la prueba de tensión aplicada [11].

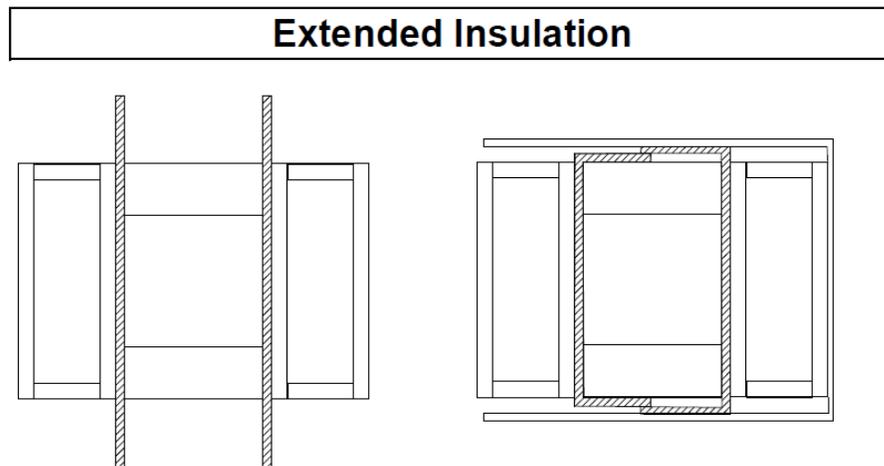


Figura 36 [11]. Aislamiento extendido para bobinas bajo armónicos ABB.

Another Extended Insulation Option

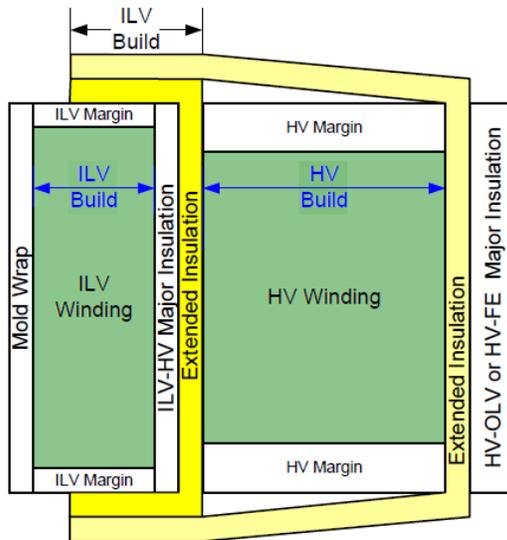


Figura 37 [11]. Otra opción para aislamiento extendido de bobinas bajo armónicos ABB.

Row	Column	Parameter	Value
1	A	DIMENSIONES BOBINA BAJA	
2	B	Espeor fleje	1,0
3	B	Ancho fleje	525
4	B	Numero de capas de fleje	13
5	B	Numero de capas de papel	12
6	B	Espeor papel entre capas	0,5
7	B	Espeor papel ultima capa	0,5
8	B	Espeor ductos	3,13
9	B	Ductos HV	2
10	B	Ductos Costados	2
11	B	Ductos LV	2
12	B	Espeor platina principio	10
13	B	Espeor platina fin	10
14	B	Factor de agrupación	1,0326
15			
16		Medida Perera	38,64
17		Medida BA	38,64
18		Diferencia	-0,58
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			
31			
32			
33			
34			
35			
36			
37			
38			
39			
40			
41			
42			
43			
44			
45			
46			
47			
48			
49			
50			
51			
52			
53			
54			
55			
56			

Figura 38. Programa cálculo diseño de bobinas ABB.

El anclaje de las fuentes de energía (generadores, transformadores, SAI's) implica su sobredimensionamiento. Los conductores deben ser dimensionados teniendo en cuenta la circulación de las corrientes armónicas. Debido a que las frecuencias de los armónicos son mayores que las de la fundamental, las impedancias que se presentan para estas mediciones son mayores para evitar excesivas pérdidas debidas al efecto joule, es necesario sobredimensionar los conductores. La circulación de corrientes armónicas en el conductor neutro implica su sobredimensionamiento, se pueden usar cables continuos transpuestos o trenzados en lugar de conductores sólidos y se deben ampliar el número de ductos de enfriamiento [11].

6.2.2.1. Conductores de neutro

En sistemas trifásicos balanceados sin contenido armónico, las líneas de corriente están desfasadas 120° , cancelándose unas con las otras resultando todo esto en una corriente muy pequeña. Sin embargo, cuando hay distorsión armónica en cualquiera de las fases, los armónicos de las corrientes aumentan y el efecto de cancelación es reducido. El resultado es típicamente una corriente de neutro que es significativamente mayor que lo planeado. Los armónicos "triple-N" (múltiplos de tres) son un aditivo en el neutro y pueden rápidamente causar un sobrecalentamiento peligroso. En teoría la corriente máxima que el neutro debe cargar es de 1.73 veces la corriente de fase. Si no es dimensionado correctamente, esto resultara en un sobrecalentamiento. Además, un valor de corriente de neutro mayor a la normal causará caídas de tensión entre neutro y tierra [11].

6.2.2.2. Materiales usados en las bobinas

La elección del material correcto para su utilización en la fabricación de los devanados de un transformador debe considerar cuáles de sus características resultan afectadas por esta elección, y no solamente el costo de fabricación de la unidad con cada material. Por lo tanto, es necesario verificar antes cómo se comportan estos materiales durante los ensayos exigidos para la aprobación del transformador, así como también durante la vida útil del equipo. Por ejemplo, se debe considerar el hecho de que el cable esmaltado de aluminio posee más fallas por metro que el cable de cobre, lo que puede conducir a un mayor índice de fallas debido a las descargas atmosféricas.

Propiedades	Unidad	Cobre	Aluminio
Resistividad a 75 °C	Ωm	$2,09 \times 10^{-8}$	$3,47 \times 10^{-8}$
Tensión de ruptura a 20 °C	kgf/mm ²	23	4,9
Límite de fluencia ($\sigma=0,2\%$)	kgf/mm ²	7,0	1,3
Módulo de elasticidad	kgf/mm ²	12.032	7.030
Densidad de masa	kg/dm ³	8,89	2,7
Coefficiente de expansión	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	$16,7 \times 10^{-6}$	$23,86 \times 10^{-6}$
Conductividad térmica	W/m $^{\circ}\text{C}$	398	210
Calor específico	J/kg $^{\circ}\text{C}$	384,6	904

Tabla 13 [26]. Características físicas de los materiales.

El cobre presenta características eléctricas más favorables a su utilización, así como también una resistividad 39% menor y una resistencia a la ruptura 4,7 veces mayor. Esto hace que el cobre sea un buen material para la utilización en grandes transformadores, que necesitan un material capaz de resistir a los transitorios electromagnéticos existentes en el sistema. La utilización indiscriminada del aluminio en lugar del cobre todavía genera dudas y, por lo tanto, existe la necesidad de investigar mejor qué características del transformador serán directamente afectadas por el cambio del material conductor, en caso de que no se consideren características mínimas de calidad, como por ejemplo las condiciones del aislamiento de los conductores. Las características que deben analizarse mejor son el comportamiento frente al cortocircuito y el comportamiento térmico, principalmente del punto más caliente del devanado. La utilización del aluminio también puede generar problemas futuros que afecten su eficiencia en campo, además de que puedan resultar en fallas operativas debido al posible problema de conexión del aluminio con otros materiales. La eficiencia puede perderse en caso de que las conexiones sean afectadas por las pérdidas por efecto Joule [26].

6.2.3. Construcción de Transformadores con pantalla EMC

Para reducir los efectos causados por los armónicos, los transformadores pueden fabricarse con una pantalla electrostática diseñada para atenuar las perturbaciones de Alta Frecuencia (Armónicos) [27].

Esta pantalla se utiliza igualmente para impedir la transmisión de señales de Alta Frecuencia del primario al secundario en condiciones de defecto o transitorios tales como:

- Ondas de choque tipo rayo.
- Interrupciones bruscas de la carga.

- Operaciones de reguladores en carga.
- Sobretensiones transitorias.

Con relación a la fabricación del transformador, estas pantallas aumentan las dimensiones del transformador y con relación a su instalación deberán tomarse precauciones especiales para que su conexión a tierra se realice de forma correcta con objeto de evitar que la pantalla adquiera potenciales elevados [27].

Debe tenerse en cuenta, que el régimen de neutro del centro de transformación juega también un papel importante en lo que se refiere a la transmisión de la onda de choque a la BT. En efecto, aparte de la transmisión capacitiva a través del transformador, la onda de corriente del rayo desarrolla en la impedancia de la toma de tierra una tensión tanto más importante cuanto más auto inductiva sea la misma.

La pantalla electrostática correctamente diseñada es una manera rentable de cumplir el requisito para el paquete rectificador-transformadora pantalla electrostática también protege contra los esfuerzos por tensión de modo común y del sistema de alimentación (rayo y conmutación).

Potencias superiores a algunos *MVA* con corrientes armónicas típicas, las pérdidas en la pantalla son importantes, el diseño para permitir su enfriamiento.

Transformadores de alimentación de VSD con conmutación de alta frecuencia en el lado de entrada (entrada activa), la pérdida en la pantalla puede ser dramático. El Tipo incorrecto de los cables de puesta a tierra de la pantalla puede hacer que la pantalla no sea funcional [27].

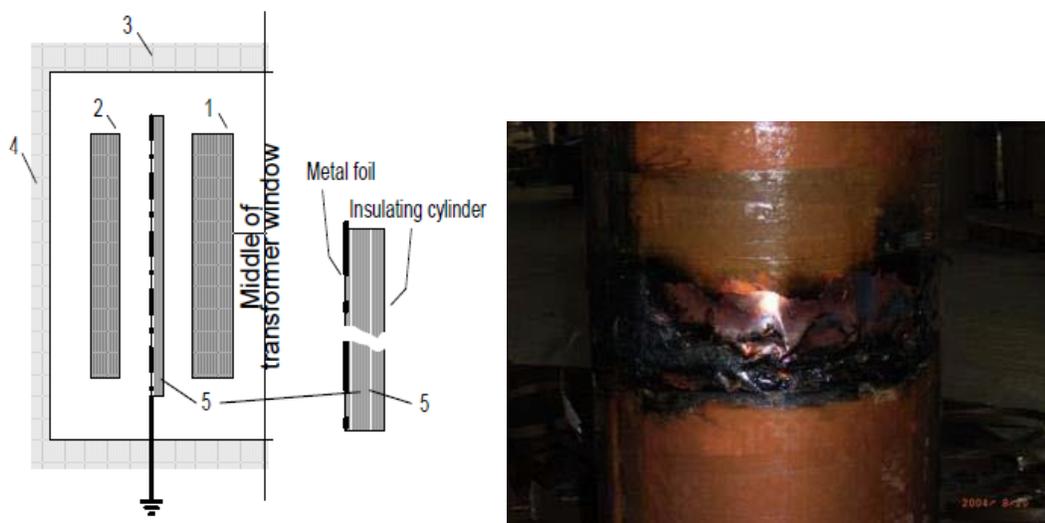


Figura 39 (a y b) [27]. Pantalla electrostática en transformadores bajo perturbaciones.

Indicación a: La anterior es la descripción general de la pantalla en la especificación del transformador, pero la fabricación real no es tan simple.

Indicación b: Esta es una foto de una pantalla de fabricación local de bajo costo para transformador VSD en el Lejano Oriente después de unas semanas de operación con el 25% de la carga con entrada activa y frecuencia de conmutación de 3.2 *kHz*.

6.2.4. Dimensionamiento del transformador expuesto a armónicos

A continuación, se muestran las características constructivas más significativas de un transformador expuesto a perturbaciones armónicas.

NÚCLEO

EFECTOS: Algunas cargas no lineales presentan una componente de corriente directa en la corriente de carga. Si este es el caso, esta componente aumentará las pérdidas en el núcleo ligeramente, pero incrementarán substancialmente la corriente de magnetización y el nivel de sonido audible por razones económicas, los transformadores se construyen aprovechando, al máximo las propiedades magnéticas del material del núcleo. Esto significa que, normalmente, un transformador con núcleo de acero de grano orientado se diseña para operar en la zona de la característica de magnetización de 1,6 a 1,7 T . Si un transformador, que funciona con este tipo de núcleo, es sometido a una sobretensión del 30%, su material magnético pasará a una inducción de 2 a 2,2 T , lo que producirá un alto nivel de saturación; al desconectar el transformador queda en el núcleo una inducción residual B_r ; cuando se vuelve a conectar, la inducción puede alcanzar valores de hasta $2B_{max} + B_r$, casi tres veces el valor nominal, dando lugar a valores de pico de la inducción del orden de 4 a 4,7 T . Este efecto da lugar a corrientes magnetizante de 5 a 10 veces la nominal. Si el transformador se conecta a una carga, la corriente de excitación sólo contiene armónicas impares, siempre que no se genere un componente de corriente continua; en caso contrario la característica de magnetización se hace asimétrica y, consecuentemente, las ondas de flujo y corriente magnetizante pierden la simetría de media onda; en estas condiciones de desequilibrio, la corriente de excitación contiene armónicas pares e impares. Por tanto, la presencia de un flujo de valor medio distinto de cero, implica la existencia de un componente de continua en la excitación; éste puede ser debido al circuito en sí, como en el caso de un transformador que alimenta a un rectificador de media onda, o al régimen de funcionamiento, como en el caso de un convertidor trifásico con encendidos desequilibrados.

DISEÑO: La mayoría de los transformadores están diseñados para operar con corriente alterna a una frecuencia fundamental (50 ó 60 Hz), lo que implica que operando en condiciones de carga nominal y con una temperatura no mayor a la temperatura ambiente especificada, el transformador debe ser capaz de disipar el calor producido por sus pérdidas sin sobrecalentarse ni deteriorar su vida útil. Las pérdidas en los transformadores consisten en pérdidas sin carga o en el núcleo y pérdidas con carga, que incluyen las pérdidas I^2R , pérdidas por corrientes de Eddy y pérdidas adicionales aunado a estas pérdidas, algunas cargas no lineales presentan una componente de corriente directa en la corriente de carga. Cuando la tensión aplicada al transformador es mayor a la nominal, el campo magnético se incrementa al punto donde el núcleo puede alcanzar la saturación. A un ligero incremento de tensión, el núcleo saturado produce un gran incremento en la corriente de excitación incrementándose abruptamente el contenido armónico de la misma, por esto debe diseñarse con una característica de saturación menor a la convencional. El núcleo está diseñado para una menor densidad de flujo. Se emplea menor cantidad de material, pero de mejor calidad, por ejemplo, acero magnético M6.

BOBINAS

EFFECTOS: Al circular corriente directa a través de un conductor se produce calentamiento como resultado de las pérdidas por efecto Joule, I^2R , donde R es la resistencia a corriente directa del cable y la corriente está dada por el producto de la densidad de corriente por el área transversal del conductor. A medida que aumenta la frecuencia de la corriente que transporta el cable (manteniendo su valor *rms* igual al valor de corriente directa) disminuye el área efectiva por donde ésta circula puesto que la densidad de corriente crece en la periferia exterior, lo cual se refleja como un aumento en la resistencia efectiva del conductor. Por lo tanto, la resistencia a corriente alterna de un conductor es mayor que su valor a corriente directa y aumenta con la frecuencia, por ende, también aumentan las pérdidas por calentamiento. A frecuencia de 60 Hz, este efecto se puede despreciar, no por que no exista, sino porque este factor se considera en la manufactura de los conductores Sin embargo con corrientes distorsionadas, las pérdidas por efecto Joule son mayores por la frecuencia de las componentes armónicas de la corriente.

DISEÑO: Las bobinas bajo efectos de armónicos deben diseñarse sobredimensionadas en sus aislamientos y especialmente con conductor de cobre, el cual presenta más resistencia a los fenómenos electromagnéticos del sistema. Se debe sobredimensionar los conductores primarios para soportar las corrientes de circulación reflejadas de las armónicas “triple-N”.

Los armónicos generan cambios constructivos y de las características en los conductores de cada bobinado tales como:

- El tamaño del conductor primario se incrementa para soportar las corrientes armónicas “triple-N” circulantes. Por la misma razón se dobla el conductor neutro.
- Utilizando conductores secundarios aislados de menor calibre, devanados en paralelo y transpuestos, para reducir el calentamiento por el efecto piel.

CONDUCTOR DE NEUTRO

EFFECTOS: Dado que este es el primer punto de unión de los neutros de las cargas monofásicas, en el caso balanceado, las corrientes (fundamental y armónicas) de secuencia positiva y negativa se cancelan aquí. Estas barras pueden llegar a sobrecargarse por el efecto de cancelación de las componentes armónicas de secuencia positiva y negativa entre los conductores del neutro que sirven diferentes cargas. En el caso de corrientes armónicas de secuencia cero (armónicas "triple-N"), estas no se cancelarán en el neutro aun con condiciones balanceadas, por lo que estas barras se pueden sobrecargar por el flujo de estas corrientes. En la realidad, las barras de neutros transportan corrientes de secuencia positiva y negativa producidas por el desbalance de cargas más las armónicas "triple-N" de secuencia cero generadas por éstas. Por esta razón las barras que están dimensionadas para soportar la misma corriente de fase pueden sobrecargarse fácilmente en presencia de cargas no lineales. En el caso de que se estén alimentando cargas no lineales, es recomendable que las barras de neutros tengan una capacidad de corriente igual al doble de la de las fases.

DISEÑO: Estudios realizados demuestran que la armónica dominante, la tercera, se acumula en el hilo del neutro, originando fuertes corrientes en un conductor que debería tener una intensidad nula. Las secciones del neutro y sus conexiones se dimensionan para una corriente doble del de línea. El diseño de transformadores en el pasado había permitido un conductor neutro común, la lógica dentro de este diseño es que el conductor neutro cargaría solamente con la corriente. En muchos ejemplos el conductor neutro se disminuía en tamaño con respecto a los conductores de las bobinas por las mismas razones. Actualmente se recomienda que el conductor de neutro debe ir con el doble de sección que los conductores del bobinado primario.

<p style="text-align: center;">FACTOR K</p>	<p>Inicialmente se prueba al transformador con una corriente sinusoidal de 60Hz para determinar las pérdidas en los devanados y en el núcleo. Del total de las pérdidas en los arrollamientos se restan las debidas al I^2R, calculadas a 60Hz, y de este modo se deducen las pérdidas de dispersión que se consideran fundamentalmente producidas por corrientes de Foucault. Si el transformador es adecuado para un factor K determinado, las pérdidas por dispersión se Multiplican por ese factor K y se suman a las debidas al efecto Joule a 60Hz. Si la elevación de la temperatura media en los devanados no supera la nominal el transformador es marcado en su placa como válido para trabajar con cualquier carga no lineal de ese o menor factor K.". Las corrientes armónicas elevan las pérdidas adicionales en los bobinados, barras de conexión, bridas del núcleo y paredes del tanque principal, que pueden conducir a problemas térmicos como el envejecimiento prematuro del transformador. Grado de severidad depende del tipo de unidad rectificadora, de carga y el diseño del transformador. El diseño de los devanados debe ser capaz de soportar tensiones mecánicas / térmicas debidas a la distribución de la temperatura más desigual que con corriente sinusoidal única ("efecto final"). Los puntos calientes localizados se deben evitar y cada arrollamiento necesita ser analizado por separado. El aumento de la temperatura debido al aumento de las pérdidas a causa de las componentes armónicas debe estar dentro de los límites especificados para el aumento de la corriente de carga real [24].</p>
<p style="text-align: center;">PANTALLA ELECTROSTATICA</p>	<p>Para reducir los efectos causados por los armónicos, los transformadores pueden fabricarse con una pantalla electrostática diseñada para atenuar las perturbaciones de Alta Frecuencia (Armónicos) [27]. Con relación a la fabricación del transformador, estas pantallas aumentan las dimensiones del transformador y con relación a su instalación deberán tomarse precauciones especiales para que su conexión a tierra se realice de forma correcta con objeto de evitar que la pantalla adquiera potenciales elevados [27]. Debe tenerse en cuenta, que el régimen de neutro del centro de transformación juega también un papel importante en lo que se refiere a la transmisión de la onda de choque a la BT. En efecto, aparte de la transmisión capacitiva a través del transformador, la onda de corriente del rayo desarrolla en la impedancia de la toma de tierra una tensión tanto más importante cuanto más auto inductiva sea la misma. La pantalla electrostática correctamente diseñada es una manera rentable de cumplir el requisito para el paquete rectificador-transformadora. La pantalla electrostática también protege contra los esfuerzos por tensión de modo común y del sistema de alimentación (rayo y conmutación).</p>

6.2.5. Construcción del transformador expuesto a sobrecarga

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 20°C y con una sobreelevación de temperatura del punto caliente de 78°C (temperatura 98°C). Si este valor se supera debe esperarse una reducción de la vida. En esta condición de funcionamiento la temperatura del punto caliente excede en 13°C el valor de sobreelevación medio de temperatura de 65°C del arrollamiento (medido por variación de resistencia), adoptado en la guía IEC 354 para transformadores de distribución. En transformadores medianos y grandes, dependiendo del tipo de refrigeración, la guía fija para la sobre-elevación del arrollamiento, valores que son inferiores a los límites impuestos por la norma, aclarando que según sea el diseño, alcanzar los límites podría llevar a superar el valor de 78°C , correspondiente al punto caliente. Si se representa el ciclo de carga diario por medio de un diagrama equivalente simplificado de dos escalones, para distintos ciclos de carga, y valores de temperatura ambiente comprendidos entre -25°C y 40°C , la guía propone curvas (para carga cíclica normal) con consumo de vida normal, y tablas (para carga cíclica de emergencia) con un consumo de vida expresado en días equivalentes de funcionamiento a potencia nominal con temperatura ambiente de 20°C , que permiten determinar el pico de carga para una dada duración y una determinada carga inicial [28].

6.2.5.1. Valores Límites con Sobrecarga para Transformadores de Distribución.

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, la tabla 14 muestra a modo de ejemplo estos valores para un tipo de transformador. Utilizando las curvas y suponiendo que la tensión aplicada al transformador permanece constante, se puede también determinar la potencia nominal de un transformador (esperando un consumo de vida normal), para un perfil de carga rectangular definido por la relación entre el pico de carga y la carga inicial ($K2/K1$). Un cambio en las condiciones de carga se trata como una función escalón. El perfil rectangular de la carga, consiste en un escalón con una cierta duración seguido por un descenso también en escalón. Para una variación de carga continua, la función escalón se aplica para lapsos pequeños y el cálculo de la temperatura del punto caliente, consiste en un procedimiento repetitivo. Para determinar el incremento de temperatura del aceite durante un transitorio a partir de la temperatura inicial, se debe utilizar la constante de tiempo del aceite y conocer la temperatura final. El valor de la constante de tiempo depende del tipo de transformador, la guía adopta 3 horas para transformadores de distribución, 2.5 horas para transformadores de media y gran potencia con refrigeración natural en aceite y 1.5 horas para refrigeración forzada o dirigida. Cuando se tiene un aumento de la carga, la variación de la sobre

elevación de temperatura entre el devanado y el aceite se debe calcular utilizando la constante de tiempo característica del devanado, pero como normalmente este parámetro es muy pequeño (5 a 10 minutos), el incremento de temperatura del punto caliente se alcanza en forma casi instantánea (aún para cargas breves de alto valor). La guía considera nula la constante de tiempo de los devanados debido a que el tiempo de duración del pico de sobrecarga utilizado en las tablas es de 30 minutos o más [28].

	CÍCLICA NORMAL	EMERGENCIA LARGA DURACIÓN	EMERGENCIA CORTA DURACIÓN
Corriente	1.5	1.8	2.0
Punto Caliente y partes metálicas en contacto con aislantes (°C)	140	150	si la temperatura del punto caliente supera 140..160 (°C) puede resultar riesgoso
Aceite capa superior (°C)	105	115	

Tabla 14 [28]. Límite de corrientes y temperaturas con sobrecarga.

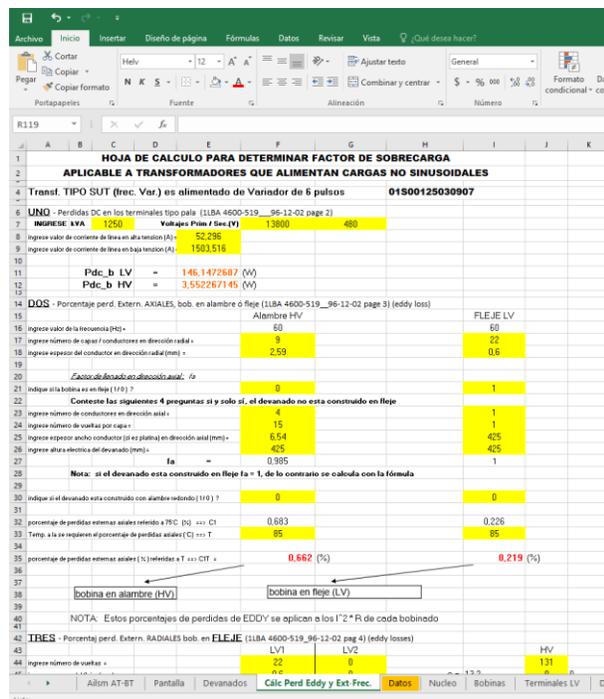


Figura 40. Cálculo de sobrecarga para transformadores de distribución ABB.

6.2.5.2. Sobrecarga de Transformadores Secos

La siguiente tabla indica los límites de temperatura del punto caliente en función de la clase del sistema aislante, para un consumo de vida normal (φC) y el límite máximo (φCC). φCC [28].

TEMPERATURA SISTEMA AISLANTE (°C)	TEMPERATURA PUNTO CALIENTE DEL DEVANADO (°C)		SOBRE ELEVACIÓN MEDIA DEVANADO (K)
	Nominal (φC)	Máximo (φCC)	
105 (A)	95	140	60
120 (E)	110	155	75
130 (B)	120	165	80
155 (F)	145	190	100
180 (H)	175	220	125
220 (C)	210	250	150

Tabla 15 [28]. Límites de Temperatura en transformadores secos.

También para transformadores secos se proponen, para las distintas clases de aislamiento, curvas de carga que indica la corriente de carga permisible para un consumo de vida normal.

Estas curvas son aplicables tanto para servicio continuo como para cargas cíclicas con distintas temperaturas del aire de refrigeración. Se supone que la refrigeración del transformador es adecuada y que el incremento de carga no afecta la temperatura del ambiente en que se encuentra el transformador. Las curvas se presentan para constante de tiempo de 0.5 y 1 hora. Esta guía es aplicable con las siguientes limitaciones [28]:

- La corriente no debe superar 1.5 veces la nominal para un ciclo de carga normal.
- Para cada clase de aislamiento el punto caliente no debe superar el valor máximo (φCC) indicado en la tabla.
- Se desprecia la influencia de las pérdidas en el hierro en la sobre elevación de temperatura de los devanados.

6.2.5.3. Tipos de sobrecargas

En condiciones de explotación, se admiten dos tipos de sobrecarga, de emergencia y sistemáticas [29].

- **Sobrecargas de Emergencia.**

Para transformadores con sistemas de enfriamiento por aceite, se puede admitir (aparte de la dependencia de la duración de la carga precedente, temperatura del medio refrigerante y localización del transformador) una sobrecarga de corta duración. Esta capacidad de sobrecarga la da el fabricante. En su defecto, se puede determinar en correspondencia con la curva presentada en la Figura 41. En dependencia del estado de carga precedente, la sobrecarga admisible puede ser mayor. Así, en aquellos casos en que la carga anterior no sobrepase el 93% de la potencia de placa, el transformador se puede sobrecargar durante 5 días en un 40%,

siempre que ese estado no exceda 6 horas cada día, ya sea en forma consecutiva o a intervalos [29].

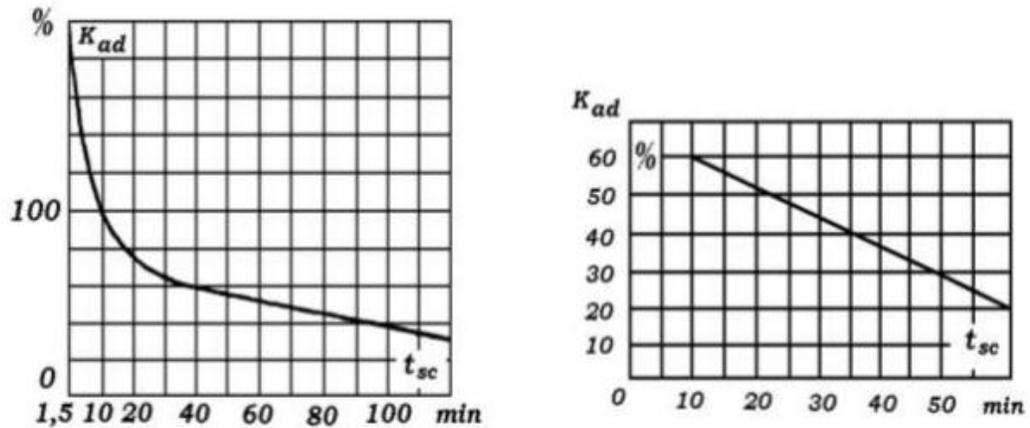


Figura 41 [29]. Curvas para la determinación de la sobrecarga de emergencia a). Transformador con enfriamiento por aceite. b). Transformador seco.

- **Sobrecarga sistemática.**

Se debe determinar la sobrecarga que puede soportar el transformador cada día en las horas de máxima carga. De cualquier forma, la sobrecarga no debe exceder el 30% [29].

$$S_p < 1,3 S_N \quad (21)$$

Donde: S_N = Potencia Nominal del Transformador (kVA).

La capacidad de sobrecarga sistemática de un transformador depende de las particularidades del gráfico de carga, el cual está caracterizado por el coeficiente de llenado de éste, según la ecuación siguiente:

$$K_{LL} = \frac{P_m}{P_M} \quad (22)$$

Dónde: K_{LL} : Factor de llenado, P_m : Potencia activa media en el gráfico de carga (kW), P_M : Potencia activa máxima en el gráfico de carga (kW).

Entonces sí:

$K_{LL} < 0.5$ Se deben instalar dos transformadores.

$K_{LL} > 0.5$ Se debe instalar un solo transformador.

Esto se debe a que un factor de carga bajo, es un indicativo que la carga durante muchos periodos de tiempo es muy baja, y solamente durante periodos cortos es alta. Por lo tanto, durante los periodos de carga alta se utilizan dos transformadores y durante los periodos de carga baja solo se utiliza uno. De esta forma se evita tener un transformador de gran potencia funcionando descargado durante periodos de

tiempo largos. De otro lado, un factor de carga alto indica que la carga permanece muy cercana a la nominal durante la mayoría del tiempo y por ello no se justifica instalar varios transformadores. Resulta muy usual que el periodo de tiempo se tome igual al ciclo (día, turno, etc.) más cargado. En los casos de bajo coeficiente de llenado, en que se utilizan dos transformadores, es necesario emplear desconectivos adecuados para las actividades de operación (por el personal de servicio o automáticamente), buscando el régimen de trabajo más económico [29].

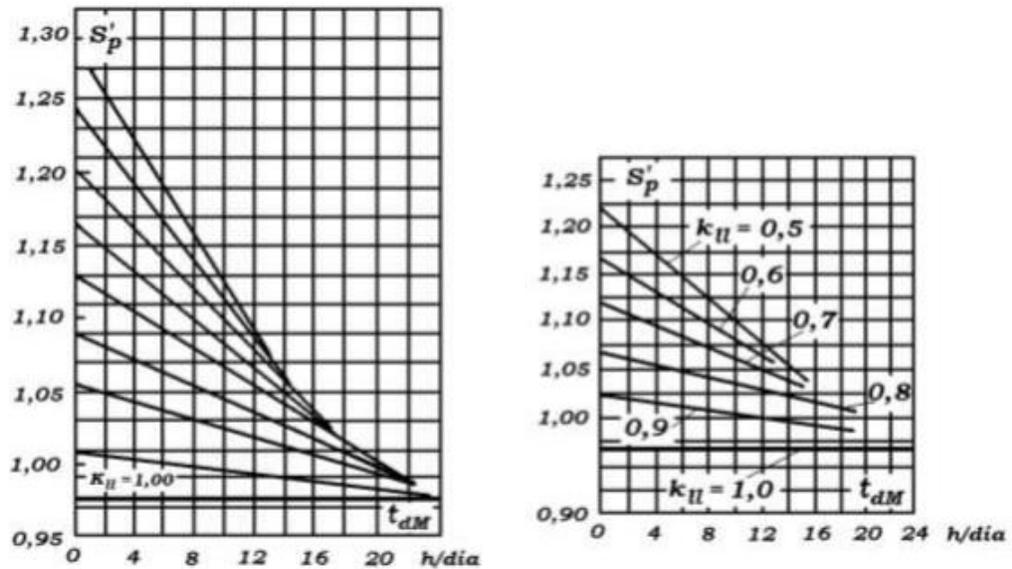


Figura 42 [29]. Curvas para la determinación de la sobrecarga sistemática admisible a). Transformador con enfriamiento por aceite. b). Transformador seco.

Conclusiones

Las perturbaciones generadas en la red que poseen frecuencias diferentes a la fundamental, son fenómenos que cada día se vuelven más frecuentes en instalaciones eléctricas tanto comerciales como residenciales, debido a equipos electrónicos y a cargas no lineales en general, que cada día son más utilizadas. Por este motivo se le debe de dar una alta importancia a este fenómeno en la etapa de diseño de las instalaciones, para que su afectación a la red sea lo más mínima posible.

Es de gran importancia conocer los aspectos principales de los armónicos, comenzando por su definición, sus causas y su afectación a la red, todo esto con el fin de mostrar como la distorsión armónica afecta seriamente la operación de los sistemas eléctricos de potencia, ya que introduce pérdidas adicionales a los componentes de la red especialmente a los transformadores de distribución, disminuyendo la eficiencia de los sistemas y provocando la mala operación de los equipos y sus protecciones.

Se puede decir que todo el marco teórico revisado, arroja una misma conclusión, la construcción del transformador se ve seriamente afectada cuando este está expuesto a armónicos, generando una mayor cantidad de pérdidas, elevadas considerablemente con respecto a las generadas por un transformador convencional, el calentamiento del transformador puede llegar a ser 20% superior al calentamiento normal y la vida útil del transformador se ve seriamente disminuida.

Los transformadores expuestos a perturbaciones armónicas, presentan afectaciones graves en su vida útil, el calentamiento excesivo generado por el aumento en las pérdidas, provoca que su funcionamiento sea menor al 100% de lo previsto en el diseño. Para garantizar un óptimo funcionamiento y evitar daños irreversibles dentro de las redes comerciales, industriales y 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 armónicos, se debe diseñar inicialmente teniendo en cuenta el cálculo del factor K , el cual se define con base a la cantidad de sobrecorrientes y sobrecargas asumidas como las perturbaciones a las cuales se va a exponer durante su vida útil.

Para impedir la transmisión de señales de Alta Frecuencia del primario al secundario en presencia de armónicos, o transitorios o sobretensiones, se instala en el transformador 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 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 subconductores, 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.

Las corrientes armónicas generan gran deterioro en los conductores por fase y en mayor grado sobre el conductor del neutro. El tamaño del conductor primario se incrementa para soportar las corrientes armónicas “triple-N” circulantes, por la misma razón se dobla el conductor del neutro y además se utilizan conductores secundarios aislados de menor calibre, devanados en paralelo y transpuestos, para reducir el calentamiento por el efecto piel. Se recomienda el uso de conductores en cobre por su mayor resistencia a los efectos generados por las armónicas.

Por todo lo expuesto durante el desarrollo de esta monografía podemos concluir que, los transformadores diseñados especialmente para instalaciones que presentan cargas generadoras de armónicos, son mucho más robustos y costosos, y aunque sean dimensionados correctamente para su operación, cuando estos alimentan un elevado índice de cargas no lineales evidencian igualmente, incrementos en sus pérdidas tanto en núcleo como en el cobre.

Referencias

- [1]. Mayra Alejandra Perdomo García, "Implementación de pruebas de rutina para el diagnóstico de *THD* en transformadores con cargas armónicas", 2016.
- [2]. Oscar Rosales Padilla, "Estudio de frecuencias armónicas", 1995.
- [3]. G. Lemieux, "Power System Harmonic Resonance - A Documented Case," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 26, NO. 3, pp. 483-488, Mayo./Junio, 1990.
- [4]. Pineda Espinosa Ulises Martín, "Mitigación de efectos producidos en los transformadores de distribución por el uso de cargas eléctricas", 2008.
- [5]. M.C. Esparza González Mario Salvador, M.C. Mata Guerrero Jesús Alejandro, M.C. Castañeda Ramos Luis Antonio, "Las cargas no Lineales, su Repercusión en las Instalaciones Eléctricas y sus Soluciones", Conciencia Tecnológica, núm. 32, julio-diciembre, 2006.
- [6]. Strack Jorge Luis, Suárez Juan Antonio, Di Mauro Guillermo Fabián, Jacob Susana Beatriz, "Impacto de la iluminación residencial eficiente en la calidad de la energía de una red de distribución", INGE CUC, Vol. 10, N° 2, pp 9-19, diciembre, 2014.
- [7]. H. Harlow James, "Electrical power transformer engineering", ISBN 0-8493-1704-5 Electric transformers. I. Harlow, James H. II. title. III. Series. 2004.
- [8]. "Electrotecnia. Transformadores de potencia y distribución. Terminología", NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 317, 1998-11-25.
- [9]. "Transformadores de distribución tipo seco encapsulado al vacío", Catalogo ABB, 2004.
- [10]. Serrano, Víctor. "Electricidad y magnetismo", estrategias para la resolución de problemas y aplicaciones, editora Novedades SA, Tomo II ,2001.
- [11]. "Liquid-filled, wound-core design manual Coil Design", BA Distribution Transformers, TECHNICAL STANDARD 1LBA 2004-607 Septiembre 28, 2016.
- [12]. L. W. Pierce, "Transformer Design and Application Consideration for Nonsinusoidal Load Currents," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, NO. 3, pp. 633-645, Mayo/Junio, 1996.

- [13]. "Liquid-filled, wound-core design manual Core Design", BA Distribution Transformers, TECHNICAL STANDARD 1LBA 2004-605 Noviembre 10, 2011.
- [14]. "liquid-filled, wound-core design manual Core-Coil Configurations", BA Distribution Transformers, TECHNICAL STANDARD 1LBA 2004-604 Noviembre 10, 2011.
- [15]. "Accesorios para transformadores monofásicos de distribución", NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 1490, 2008-03-26.
- [16]. "Transformadores de Distribución de Alta Potencia, ($> 2000 \text{ kVA}$, hasta $72,5 \text{ kV}$)", Catalogo ABB, enero 2005.
- [17]. Philippe Ferracci "La Calidad de la Energía Eléctrica", Cuaderno Técnico N° 199, Schneider Electric, octubre 2004.
- [18]. Collombet Chistian, Lupin Jean Marc, Schonek Jacques, "Los armónicos en las redes perturbadas y su tratamiento" Cuaderno Técnico N° 152, Schneider Electric, diciembre 2000.
- [19]. Martínez Fredy H, "El fenómeno de distorsión armónica en redes eléctricas", Con-Ciencias.
- [20]. Abundis Couoh Arturo, "Causas y efectos de armónicos en sistemas eléctricos de potencia", Universidad Nacional Autónoma de México, facultad de Ingeniería, Cd. Mx., 2016.
- [21]. Reyes Calderon Gilberto "Armónicas en Sistemas de Distribución de Energía eléctrica", Universidad Autónoma de Nuevo Leon, Facultad de ingeniería Mecánica y Eléctrica, julio de 1996.
- [22]. J. A. Suárez, G. F. Di Mauro, D. Anaut y C. Agüero, "Análisis de la distorsión armónica y los efectos de atenuación y diversidad en áreas residenciales" IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, Vol. 3, NO. 5, diciembre 2005.
- [23]. "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Systems" IEEE Industry Applications Society/Power Engineering Society, IEEE Std. 519-1992, NewYork: IEEE Press, 1993.
- [24]. Gómez Astorga, J. M., Aróstica Córdova, R. A., & Iriarte Salinas, Y. A., "Estimación del factor k en transformadores de distribución usando modelos de regresión lineal", 2016.

- [25]. "Code for liquid – immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers", American National Standards Institute, IEEE Standard test, ANSI,2007. 82p. IEEE Std C57.12.90-2006.
- [26]. Galvan, J.C.O., León F., Georgilakis, P.S., Pérez, R. E., Selection of copper against aluminum windings for distribution transformers, IET. 2009 IEEE.
- [27]. J. K. Phipps, J. P. Nelson and P. K. Sen, "Power Quality and Harmonic Distortion on Distribution Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 30, NO. 2, pp. 476-484, Marzo. /Abril. 1994.
- [28]. Cuellar Luciano, Oviedo Elmer, "Manejo Eficiente de la Energía Aplicada en Transformadores", Tesis Universidad Autónoma de occidente Cali, junio de 2007.
- [29]. Percy R. Viego, "Ahorro de Energía Eléctrica en Instalaciones Industriales", Modulo IV, mayo 1999.