



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**INFLUENCIA DE LAS CARGAS NO LINEALES EN LOS BANCOS DE TRANSFORMACIÓN
DE HOSPITALES, INDUSTRIAS, AGROINDUSTRIAS Y SOLUCIONES**

Mynor Raúl Chivichón Herrera
Asesorado por el Ing. Alex Vicente Girón Castillo

Guatemala, marzo de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**INFLUENCIA DE LAS CARGAS NO LINEALES EN LOS BANCOS DE TRANSFORMACIÓN
DE HOSPITALES, INDUSTRIAS, AGROINDUSTRIAS Y SOLUCIONES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MYNOR RAÚL CHIVICHÓN HERRERA
ASESORADO POR EL ING. ALEX VICENTE GIRÓN CASTILLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, MARZO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Fernando Alfredo Moscoso Lira
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
EXAMINADOR	Ing. Jorge Luis Pérez Rivera
SECRETARIA	Inga. Gilda Marina Castellanos Baiza

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

INFLUENCIA DE LAS CARGAS NO LINEALES EN LOS BANCOS DE TRANSFORMACIÓN DE HOSPITALES, INDUSTRIAS, AGROINDUSTRIAS Y SOLUCIONES

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería de Mecánica Eléctrica, con fecha 3 de mayo de 2011.



Mynor Raúl Chivichón Herrera

Guatemala, 27 de febrero de 2,012.


Ing. Romeo López
Coordinador Área de Electrotecnia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Su despacho

Respetable Ing. López:

Al saludarle, me dirijo a usted para informarle que ha sido concluido satisfactoriamente el trabajo de graduación, **INFLUENCIA DE LAS CARGAS NO LINEALES EN LOS BANCOS DE TRANSFORMACIÓN DE HOSPITALES, INDUSTRIAS, AGROINDUSTRIAS. Y SOLUCIONES**, elaborado por el estudiante Mynor Raúl Chivichon Herrera, tema para el cual fui asignado como asesor.

Considero que se han cumplido las metas propuestas al inicio del trabajo, por lo que recomiendo se apruebe en el entendido de que el autor y el suscrito son los responsables de lo tratado y de las conclusiones del mismo.

Atentamente,


-Ing. Alex Vicente Giron Castillo
Colegiado No. 8044
ASESOR

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Ref. EIME 58.2012.
Guatemala, 10 de octubre 2012.


Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**INFLUENCIA DE LAS CARGAS NO LINEALES EN LOS
BANCOS DE TRANSFORMACIÓN DE HOSPITALES,
INDUSTRIAS, AGROINDUSTRIAS Y SOLUCIONES,** del
estudiante **Mynor Raúl Chivichón Herrera,** que cumple con los
requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Romeo Nestali López Orozco
Coordinador Área Electrotécnica



RNLO/sro



REF. EIME 63. 2012.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; MYNOR RAÚL CHIVICHÓN HERRERA titulado: INFLUENCIA DE LAS CARGAS NO LINEALES EN LOS BANCOS DE TRANSFORMACIÓN DE HOSPITALES, INDUSTRIAS, AGROINDUSTRIAS Y SOLUCIONES, procede a la autorización del mismo.


Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



GUATEMALA, 9 DE NOVIEMBRE 2,012.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **INFLUENCIA DE LAS CARGAS NO LINEALES EN LOS BANCOS DE TRANSFORMACIÓN DE HOSPITALES, INDUSTRIAS, AGROINDUSTRIAS Y SOLUCIONES**, presentado por el estudiante universitario **Mynor Raúl Chivichón Herrera**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, marzo de 2013



/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser la base fundamental en mi vida.
Mis padres	Carlos Alberto Chivichón Reyes e Ilda Yolanda Herrera Hidalgo, que a través de su esfuerzo nos han dado un futuro mejor a mis hermanos y a mí. Siendo unos padres que me han enseñado valores y principalmente el temor a Dios que es la base de la sabiduría.
Mis hermanos	Wilbert Alberto y Gustavo Adolfo Chivichón Herrera, por ser parte fundamental en mi vida y por su apoyo incondicional.
Mis amigos	Carlos Morales y Raúl Casasola, por ser impulsores y apoyarme en este sueño.
Mis compañeros de estudio	Byron Villatoro, Erick Berganza, Edgar Chaj.
Mis compañeros de trabajo	Marco García, Byron Ochoa, Luis Chen, Omar Urizar, quienes con su amistad, experiencia y conocimientos contribuyeron a realizar este sueño.

AGRADECIMIENTOS A:

**La Universidad de
San Carlos de
Guatemala**

Por ser el medio que contribuyó a mi formación.

**Claustro de
catedráticos de la
Escuela de Ingeniería
Mecánica Eléctrica**

Por su dedicación en la enseñanza y apoyo hacia mi persona y formación profesional.

Mi asesor

Por su ayuda incondicional y su apoyo en la realización del mismo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XIII
GLOSARIO.....	XV
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XXIII
1. CALIDAD DE ENERGÍA.....	1
1.1. Concepto de calidad de energía.....	1
1.2. Tipos de cargas.....	2
1.2.1. Cargas lineales.....	2
1.2.2. Cargas no lineales.....	4
1.3. Los equipos eléctricos y su importancia.....	8
1.4. Parámetros para definir la calidad de energía.....	9
1.4.1. Frecuencia.....	9
1.4.2. Voltaje.....	9
1.4.3. Flicker.....	11
1.4.4. Factor de potencia.....	11
1.4.4.1. Factor de potencia verdadero, (<i>true</i>)....	13
1.4.5. Corriente.....	15
1.4.6. Desbalance de voltaje.....	15
1.4.7. Distorsión armónica total.....	16
1.5. Distorsión armónica.....	18
1.5.1. Armónicos de corriente.....	22
1.5.2. Armónicas de tensión.....	23

1.6.	Principales generadores de armónicos	25
1.7.	Alcance de un estudio de calidad de energía	28
1.8.	Normativos que rigen la calidad de energía en Guatemala	29
1.8.1.	Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD)	29
1.8.2.	Ley General de Electricidad, Decreto No. 93-96 del Congreso de la República de Guatemala.....	31
2.	INFLUENCIA DE CARGAS NO LINEALES EN LOS BANCOS DE TRANSFORMACIÓN.....	33
2.1.	Límites de distorsión armónica.....	33
2.2.	Estándar para el control de armónicas Standard IEEE 519 – 1992	36
2.2.1.	Lineamientos para clientes individuales.....	37
2.2.2.	Limites de inyección de corriente armónica	39
2.3.	Desclasificación de transformadores.....	41
2.4.	Factor K	42
2.5.	Transformadores de factor K.....	48
2.6.	El factor K de las cargas	50
3.	CÓMO EVITAR ARMÓNICO	51
3.1.	Implementación de las cargas perturbadoras al inicio de la red.....	51
3.2.	Agrupando cargas perturbadoras	52
3.3.	Separando fuentes.....	53
3.4.	Filtros pasivos	54
3.4.1.	Tipos de filtros pasivos de potencia	56
3.4.2.	Filtros pasivos de potencia serie.....	57
3.4.3.	Filtro pasivo de potencia <i>shunt</i> o paralelo.....	59

3.4.4.	Problemas del filtro pasivo de potencia.....	65
3.4.5.	Ventajas del filtro pasivo de potencia	65
3.5.	Filtros activos.....	66
3.5.1.	Filtros activos de potencia serie	68
3.5.2.	Filtro activo de potencia paralelo.....	69
3.5.3.	Análisis electrotécnico del filtro activo de potencia paralelo.....	70
3.5.4.	Ventajas de los filtros activos de potencia.....	72
3.6.	Uso de transformadores con conexiones especiales	72
4.	INFLUENCIA DE CARGAS NO LINEALES EN HOSPITALES.....	75
4.1.	Descripción del proyecto.....	75
4.2.	Tipos de conexiones utilizados en los bancos de transformación de hospitales	76
4.3.	Tipos de cargas en hospitales	78
4.4.	Análisis de armónicos.....	81
4.5.	Límites de distorsión armónica	84
4.6.	Cálculo de factor K	85
4.7.	Cálculo de la desclasificación del transformador	89
4.8.	Cálculo de penalizaciones por armónicos de corriente	93
4.9.	Cálculo de pérdidas por armónicos de corriente	97
4.10.	Ejemplo práctico y presentación de soluciones.....	99
4.10.1.	Cálculo de filtro	102
5.	INFLUENCIA DE CARGAS NO LINEALES EN EL BANCO DE TRANSFORMACIÓN DE INDUSTRIAS.....	109
5.1.	Tipos de conexión utilizados en bancos de transformación de las instalaciones industriales.....	109
5.1.1.	Bancos de transformación tipo <i>pad mounted</i>	111

5.2.	Tipos de cargas en industrias.....	111
5.3.	Análisis de armónicos	112
5.4.	Límites de distorsión armónica.....	114
5.5.	Cálculo de factor K.....	116
5.6.	Cálculo de la desclasificación del transformador	118
5.7.	Cálculo de penalizaciones por armónicos de corriente.....	121
5.8.	Cálculo de pérdidas por armónicos en los bancos de transformación	123
5.9.	Ejemplo práctico y presentación de soluciones	125
5.9.1.	Cálculo de filtro.....	128
6.	INFLUENCIA DE CARGAS NO LINEALES EN EL BANCO DE TRANSFORMACIÓN DE AGROINDUSTRIAS	133
6.1.	Tipos de conexiones utilizados en estas instalaciones	133
6.2.	Tipos de cargas agroindustriales.....	135
6.3.	Análisis de armónicos	135
6.4.	Limites de distorsión armónica	138
6.5.	Calculo de factor K.....	139
6.6.	Cálculo de la desclasificación del transformador	141
6.7.	Cálculo de penalizaciones por armónicos de corriente.....	145
6.8.	Cálculo de pérdidas por armónicos en los bancos de transformación	147
6.9.	Ejemplo práctico y presentación de soluciones	147
6.9.1.	Cálculo de filtro.....	150
7.	CÓMO EVITAR ARMÓNICOS.....	155
7.1.	Caracterizaciones de los armónicos por el tipo instalaciones	155
7.2.	Filtros activos	157
7.3.	Filtros pasivos	158

7.4.	Algunos tipos de conexiones de transformadores.....	162
7.5.	Alternativas de solución propuestas al problema de distorsión armónica en hospitales, industrias y agroindustrias.....	162
7.6.	Criterios para el diseño de un filtro	164
8.	ANÁLISIS ECONÓMICO.....	167
8.1.	Análisis económico de soluciones por Valor Presente Neto...	168
8.2.	Análisis económico de soluciones por TIR.....	170
8.3.	Análisis económico de soluciones por beneficio/costo	171
	CONCLUSIONES.....	173
	RECOMENDACIONES.....	177
	BIBLIOGRAFÍA.....	179
	APÉNDICE	183

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Consumo de un calefactor de 1 kW	3
2.	Consumo de un motor monofásico de 1/6 HP	4
3.	Dispositivo de corriente y voltaje	5
4.	Voltaje en la fuente del dispositivo de control de corriente y voltaje	6
5.	Corriente del dispositivo de control de corriente y voltaje	7
6.	Voltaje en la carga del dispositivo de control de corriente y voltaje	7
7.	Triángulo de potencia.....	12
8.	Descomposición de Fourier de la señal eléctrica de tensión	21
9.	Descomposición de Fourier de la señal eléctrica de corriente	21
10.	Imagen de una onda senoidal deformada	23
11.	Esquema unifilar general de conexión de un cliente de media tensión	26
12.	Esquema del circuito equivalente de la red de alta tensión, media tensión y baja tensión	27
13.	Armónicos de corriente y tensión en el PCC	38
14.	Desclasificación típica del transformador (para cargas no lineales) ...	45
15.	Cálculo de factor K.....	45
16.	Conexión aguas arriba de cargas no-lineales (esquema recomendado).....	52
17.	Reagrupación de cargas no-lineales y alimentación lo más aguas arriba posible	53
18.	Alimentación de cargas perturbadoras con transformador separado..	54

19.	Posibles combinaciones de elementos pasivos que pueden formar parte de un arreglo de un filtro pasivo.....	55
20.	Arreglo de filtro pasivo de potencia.....	55
21.	Funciones matemáticas para elementos pasivos utilizados en sistemas de energía alterna.....	56
22.	Circuito monofásico con implementación de un filtro pasivo de potencia serie	57
23.	Arreglo de una sola rama de un filtro pasivo de potencia serie	58
24.	Circuito monofásico con la implementación de un filtro pasivo de potencia paralelo	60
25.	Arreglo de una sola rama de un filtro pasivo de potencia paralelo	60
26.	a) Filtro sintonizado simple b) Comportamiento en frecuencia.....	63
27.	a) Filtro pasa alto b) Comportamiento de la frecuencia.....	64
28.	Diagrama general del filtro activo de corriente	64
29.	Representación de la operación de un filtro activo.....	67
30.	a) Bosquejo de la conexión de un filtro activo de potencia paralelo b) Bosquejo de la conexión de un filtro activo de potencia serie	67
31.	Representación gráfica de la acción de un filtro activo de potencia serie	68
32.	Representación gráfica de la acción de un filtro activo de potencia paralelo.....	69
33.	Configuración eléctrica de un filtro activo de potencia paralelo	70
34.	La utilización de un transformador delta-estrella-delta previene la propagación de armónicos de órdenes 5 y 7 aguas arriba de la red de distribución.	73
35.	Configuración de transformadores triangulo-estrella.....	73
36.	Conexión de banco de transformación trifásico estrella-delta	76
37.	Conexión de banco de transformación trifásico estrella- estrella	77
38.	Transformador <i>pad mounted</i>	78

39.	Circuito típico de alimentación de hospitales.....	80
40.	Gráfico de armónicos con mayor presencia en instalaciones hospitalarias.....	83
41.	Vida útil del transformador en función de THDI.....	97
42.	Distorsión armónica total de voltaje medida en hospital estudiado.....	99
43.	Distorsión armónica total de corrientes medidas en hospital estudiado	100
44.	Gráfico de armónicos individuales característico en el hospital estudiado	101
45.	Gráfico de factor de potencia medido en el hospital estudiado.....	102
46.	Triángulo de potencia realizado para cálculo de filtro y corrección de factor de potencia.....	103
47.	Factores a tomar en cuenta para la fabricación de inductancias en filtros	107
48.	Conexión de transformadores en estrella – estrella con neutro aterrizado por medio de resistencia	110
49.	Estrella-estrella con neutro sólidamente aterrizado, para las cargas monofásicas	110
50.	Estrella-delta con neutro flotante.....	111
51.	Armónicos con mayor presencia en instalaciones industriales estudiadas.....	114
52.	Vida útil del transformador en función de THDI.....	123
53.	Distorsión armónica total de voltaje medido en la industria estudiada	126
54.	Distorsión armónica total de corriente en la industria estudiada	127
55.	Armónicos individuales medidos en industria estudiada.....	127
56.	Triángulo de potencia para cálculo de filtro y corrección de factor de potencia	129
57.	Conexión de banco de transformación trifásico estrella-delta.....	133

58.	Conexión de banco de transformación trifásico estrella-estrella	134
59.	Armónicos con mayor presencia en instalaciones agroindustriales estudiadas	137
60.	Distorsión armónica total de voltaje para caso estudiado	148
61.	Distorsión total de armónicas de corriente caso agroindustrial	149
62.	Armónicos individuales característicos de agroindustria estudiada...	149
63.	Triángulo de potencia para cálculo de filtro y corrección de factor de potencia caso agroindustrial	151

TABLAS

I.	Ejemplos de verdadero factor de potencia PF_{true}	14
II.	Tolerancias para desbalance de tensión según NTSD	15
III.	Coeficientes de fourier de acuerdo con la simetría	20
IV.	Principales receptores que perturban los armónicos	25
V.	Tolerancias para los armónicos de voltaje según las NTSD	34
VI.	Tolerancias para armónicos de corriente según las NTSD	35
VII.	Límites en la distorsión de la corriente para condiciones con duración superior a una hora. Para períodos más cortos el límite aumenta un 50%	39
VIII.	Límites de corriente armónica para carga no lineal en el punto común de acoplamiento con otras cargas, para voltajes entre 69 000 – 161 000 voltios.....	40
IX.	Límites de corriente armónica para carga no lineal en el punto común de acoplamiento con otras cargas, para voltajes > 161 000 v.....	40
X.	Hospitales estudiados.....	82
XI.	Espectro de armónicos industrias estudiadas (3ª a la 21ª)	84
XII.	Espectro de armónicos industrias estudiadas (23ª a la 39ª)	84
XIII.	Cálculo de factor K caso hospitalario.....	87

XIV.	Resultados de cálculos de factor K en hospitales estudiados.	89
XV.	Cálculo de desclasificación del transformador caso hospitalario	90
XVI.	Desclasificación del transformador para los hospitales estudiados.....	93
XVII.	Indemnizaciones por exceder los límites de tolerancia en los armónicos de corriente.....	96
XVIII.	Industrias estudiadas	113
XIX.	Espectro de armónicos industrias estudiadas (3 ^a a la 21 ^a).....	115
XX.	Espectro de armónicos industrias estudiadas (23 ^a a la 39 ^a)	115
XXI.	Cálculo de factor K caso industrial	116
XXII.	Factor K de industrias estudiadas	118
XXIII.	Cálculo de desclasificación de transformadores.....	119
XXIV.	Desclasificación en industrias estudiadas	121
XXV.	Indemnizaciones por exceder los límites de tolerancia en los armónicos de corriente.....	122
XXVI.	Agroindustrias estudiadas	136
XXVII.	Espectro de armónicos agroindustrias estudiadas (3 ^a a la 21 ^a).....	138
XXVIII.	Espectro de armónicos industrias estudiadas (23 ^a a la 39 ^a)	138
XXIX.	Cálculo de factor K caso agroindustrial	139
XXX.	Cálculo de factor K para las agroindustrias estudiadas	141
XXXI.	Cálculo de desclasificación de transformadores en caso agroindustrial	142
XXXII.	Desclasificación de transformadores en agroindustrias estudiadas.....	145
XXXIII.	Indemnizaciones por exceder los límites de tolerancia en los armónicos de corriente.....	146
XXXIV.	Valor Presente Neto toma de decisiones	170

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
BT	Baja tensión
CT	Centro de transformación de MT a BT
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica
CENS	Costo de energía no suministrada
CP	Costo de pérdidas
ΔDTD	Desbalance de tensión
THD	Distorsión armónica total
TDD	Distorsión total de la demanda
US\$	Dólar de los Estados Unidos de América
NA	Elemento de corte o seccionamiento normalmente abierto
NC	Elemento de corte o seccionamiento normalmente cerrado
f.p.	Factor de potencia
FU	Factor de utilización
FC	Flujo de carga
INIG	Indemnización para ser distribuida globalmente entre los usuarios
I	Interés mensual a plazo fijo
KVA	Kilo voltios amperios
kWh	Kilovatios hora
KV	Kilovoltio
MT	Media tensión

NTSD	Normas Técnicas del Servicio de Distribución
%	Porcentaje
PCC	Punto de acoplamiento común, punto de conexión entre la red de distribución eléctrica y la red de distribución del cliente
Q	Quetzal, moneda de la República de Guatemala
Rur	Rural
SMT	Salida de media tensión
SE	Subestación
SSEE	Subestación eléctrica
N	Tiempo de recuperación de capital
TTIK	Tiempo medio de interrupción por KVA
T.T.	Transformador de tensión 20 000-15 000/220 V
Urb	Urbano
VP	Valor Presente
P/A	Valor presente a partir de un valor futuro
VPN	Valor Presente Neto

GLOSARIO

Alta tensión	Nivel de tensión superior o igual a 69 000 voltios.
Baja tensión	Nivel de tensión menor o igual a mil voltios (1 000 V).
Beneficio de una distribuidora	Cambio a favor en el estado de las condiciones económicas de una distribuidora.
Cliente o usuario	Persona individual o jurídica que recibe el servicio de energía eléctrica del distribuidor, en media o baja tensión.
Distorsión de voltaje	Deformación de la onda senoidal de voltaje por presencia de armónicos
Distribuidora	Ente privado o estatal que se dedica a la distribución de la energía eléctrica.
Empresa distribuidora	Empresa que se dedica a suministrar la energía eléctrica al usuario final.
Indicador de calidad	Índices normados por la CNEE para determinar la calidad del servicio técnico de una distribuidora.

Índices de calidad de energía	Valores normados por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica para medir la calidad del servicio de una empresa.
ITHD	Distorsión armónica total de corriente.
Factor de potencia	Coseno del ángulo que existe entre la potencia activa y la potencia aparente.
Media tensión	Nivel de tensión superior a mil voltios (1 000 V) y menor o igual a sesenta mil voltios (60 000 V).
Monofásico	Sistema compuesto por una fase de voltaje y corriente alterna.
Penalización	Sanción que se aplica al distribuidor por haber sobrepasado los límites de los indicadores de calidad.
Potencia	Trabajo o transferencia de energía por unidad de tiempo.
Transformador de distribución	Componente de las instalaciones eléctricas de una empresa distribuidora cuya función es la de convertir el voltaje a niveles comerciales de consumo.

Requerimiento

Necesidad documentada sobre el contenido, forma o funcionalidad de un producto o servicio. La fase del desarrollo de requerimientos puede estar precedida por una de análisis conceptual del proyecto. Esta fase puede dividirse en recolección de requerimientos de los inversores, análisis de consistencia e integridad, definición en términos descriptivos para los desarrolladores y un esbozo de especificación, previo al diseño completo.

Sistema

Conjunto de elementos interrelacionados e interactuantes entre sí. El concepto tiene dos usos muy diferenciados, que se refieren respectivamente a los sistemas de conceptos y a los objetos reales más o menos complejos y dotados de organización.

RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se abordaron los efectos que tienen las cargas no lineales en los bancos de transformación de los hospitales, industrias y agroindustrias con el fin de encontrar soluciones factibles a los problemas que estos generan.

En el primer capítulo se encuentra lo relacionado a conceptos generales de calidad de energía, en donde se presenta los orígenes y causas que provocan las perturbaciones en los diferentes parámetros eléctricos y cómo interactúan entre sí para afectar los distintos elementos que componen una instalación eléctrica o una red eléctrica.

En el segundo capítulo se presentan los efectos y la forma como los armónicos pueden desclasificar un transformador disminuyendo su capacidad nominal, su vida útil y aumentando las pérdidas en el mismo, lo que se puede traducir en pérdidas económicas.

En el tercer capítulo se muestran algunas soluciones utilizadas para mitigar los efectos de los armónicos en los bancos de transformación, las soluciones planteadas dependen de las cargas conectadas a los bancos de transformación. Entre las soluciones se describen los filtros activos y los filtros pasivos, estos elementos cada día son más utilizados debido al incremento de cargas no lineales en las instalaciones eléctricas.

En el cuarto, quinto y sexto capítulo se describe de una forma más específica los efectos de las cargas no lineales en los bancos de transformación

para las distintas instalaciones estudiadas. En cada una se determinó que existe una armónica predominante para las cuales se tienen soluciones diferentes. Al conocer los efectos y las armónicas predominantes por tipo de instalación, la distribuidora de energía podrá solicitar a los clientes los filtros de armónicos necesarios.

En el capítulo séptimo se plasman los resultados obtenidos del análisis de los efectos de los armónicos en los bancos transformación y algunas soluciones viables.

En el octavo capítulo se analiza la rentabilidad de de aplicar las soluciones al problema de armónicos, se cuantifica la inversión, se comparan las distintas opciones para encontrar los ahorros que se trasladarán a dinero, con los datos de inversión y beneficios se trasladan a valores presentes para encontrar el tiempo de recuperación de la inversión.

OBJETIVOS

General

Determinar los efectos de las cargas no lineales en los bancos de transformación de hospitales, industrias, agroindustrias y sus soluciones.

Específicos

1. Identificar qué elementos son los más afectados en los bancos de transformación.
2. Plantear soluciones para los efectos dañinos al banco de transformación.
3. Identificar que cargas producen más perturbaciones.
4. Identificar los efectos de los armónicos en las instalaciones de los hospitales, industrias alimenticias y agroindustrias.
5. Describir los beneficios económicos que tendría al realizar el filtrado de las perturbaciones.
6. Describir las nuevas herramientas y equipos utilizados en la actualidad en el análisis de armónicos.
7. Identificar el procedimiento de análisis de armónicos

INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha existido un interés creciente sobre los efectos de las cargas no lineales en los sistemas eléctricos de potencia.

Las cargas no lineales son todas aquellas que generan corrientes no sinusoidales, es decir, corrientes que además de la componente fundamental tienen otras que son múltiplos enteros de la fundamental y que se conocen como armónicos.

Este tipo de cargas ha existido en los sistemas eléctricos desde el principio, principalmente eran de tipo magnético, como las corrientes de excitación de los transformadores y los balastos magnéticos de luminarias tipo fluorescente. Su influencia era escasa.

La aparición de la electrónica ha mejorado mucho las propiedades de los productos pero ha traído consigo, entre otros problemas, la generación de armónicos.

Por lo cual este estudio pretende clasificar los tipos de instalaciones por hospitales, industrias y agroindustrias con el fin de definir que cargas son las que causan mayores efectos en los bancos de transformación de estas instalaciones.

Se realizarán mediciones de calidad y se consultarán bases de datos de mediciones en distintas instalaciones (hospitales, industrias y agroindustrias) analizando las corrientes armónicas y sus efectos.

Se analizarán por medio de mediciones de calidad de energía realizadas en los siguientes tipos de instalaciones.

- Hospitales
- Industrias alimenticias
- Agroindustrias

Se analizarán los efectos de las cargas no lineales característicos de cada uno de los tipos de instalaciones, en los bancos de transformación.

Una vez analizados los impactos se propondrán escenarios para mitigar los efectos dañinos a las instalaciones de los usuarios.

Ya planteado los escenarios se rentabilizarán, para ver los beneficios que obtendrían los usuarios.

1. CALIDAD DE ENERGÍA

Para garantizar el buen funcionamiento de los equipos eléctricos se requiere que la energía que los alimenta tenga las características adecuadas, por este motivo la calidad de energía constituye en la actualidad un factor crucial para la competitividad de todos los sectores industriales y de servicios. A continuación se presentarán los conceptos que definen la calidad de energía.

1.1. Concepto de calidad de energía

Es el análisis de los orígenes y causas, conjuntamente con las medidas correctivas que pueden provocar perturbaciones en los diferentes parámetros que forman parte de un sistema eléctrico, y que pueden producir un ineficiente y/o riesgoso funcionamiento de los componentes del sistema.

El término calidad de energía se utiliza para describir la variación de la tensión, corriente, y frecuencia en el sistema eléctrico en un momento dado.

En Guatemala las Normas Técnicas del Servicio de Distribución o NTSD por sus siglas, las cuales fueron emitidas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica mediante la Resolución CNEE 09-99, publicadas en el Diario de Centroamérica el 7 de abril de 1999, contemplan los parámetros y tolerancias correspondientes a la calidad de energía dividiéndose de la siguiente forma:

- Calidad del producto suministrado por el distribuidor
 - Regulación de tensión
 - Desbalance de tensión en servicios trifásicos
 - Distorsión armónica
 - *Flicker*

- Incidencia del usuario en la calidad del producto
 - Distorsión armónica
 - *Flicker*
 - Factor de potencia

- Calidad del servicio técnico
 - Interrupciones

1.2. Tipos de cargas

Existen distintos tipos de cargas dependiendo de los dispositivos que se conecten a la fuente, siendo estos los descritos en los apartados siguientes.

1.2.1. Cargas lineales

Son aquellas que alimentadas por una tensión senoidal, demandan una corriente senoidal.

Para estudiar las características de los sistemas eléctricos, es usual considerarlos como resultado de la interconexión de diferentes bloques básicos:

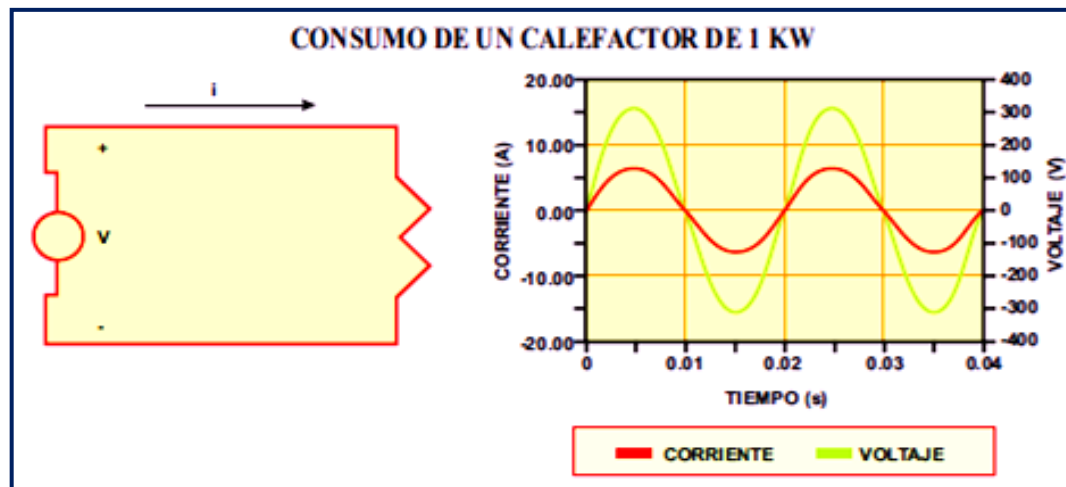
- La fuente de alimentación: usualmente un voltaje sinusoidal
- El consumo: usualmente constituido por resistencias, inductancias y condensadores de valores fijos.

Algunos ejemplos de cargas lineales son:

Cuando el consumo es un calefactor eléctrico de 1 000 W y el voltaje es 220 V efectivos, el voltaje y la corriente tendrán la forma de la figura 1; si el consumo es un motor de 1/6 HP, rendimiento 80%, factor de potencia 0,85, el voltaje y la corriente tendrán la forma de la figura 2.

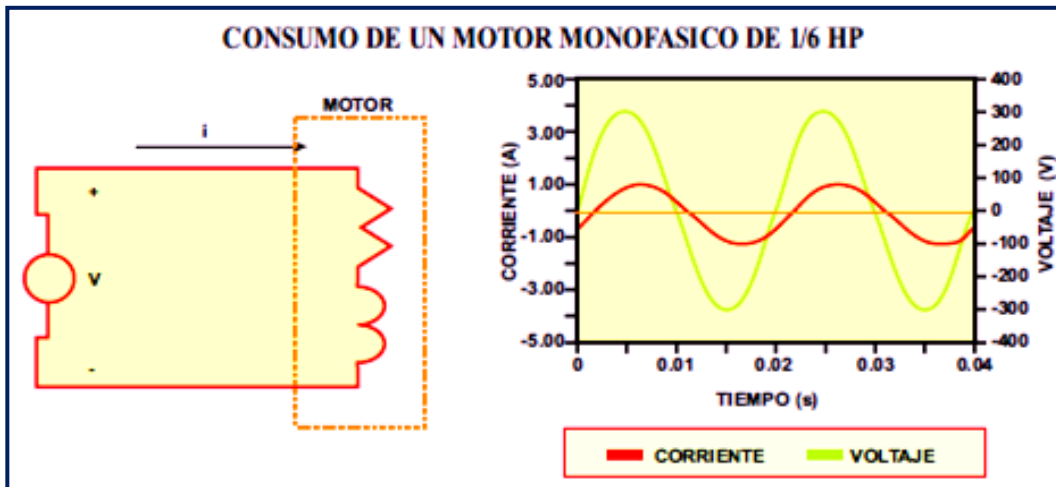
En resumen, si el voltaje es sinusoidal la corriente también lo es y, en general, existe un desfase entre ellos.

Figura 1. **Consumo de un calefactor de 1 kW**



Fuente: Procobre S.A. *Revista Calidad de Energía*. p. 12.

Figura 2. Consumo de un motor monofásico de 1/6 HP



Fuente: Procobre S.A. *Revista Calidad de Energía*. p. 13.

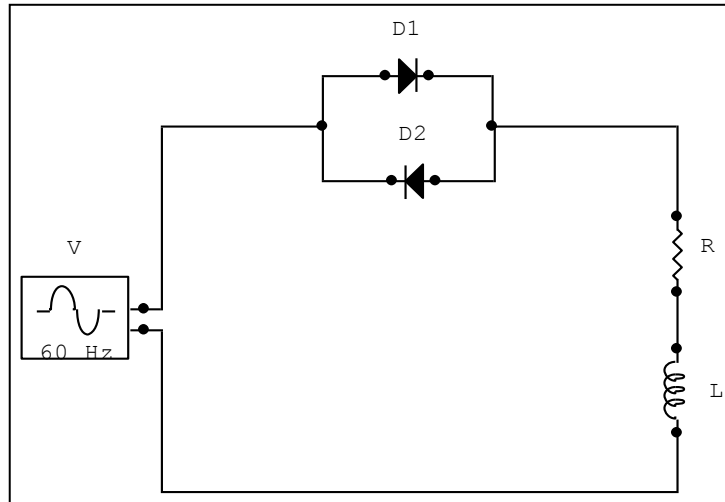
1.2.2. Cargas no lineales

La electrónica de potencia puso a disposición de los hogares y las empresas productivas, diversos equipos capaces de controlar el producto final: iluminación variable, velocidad ajustable, etc. Así, aproximadamente un 50% de la energía eléctrica pasa por un dispositivo de electrónica de potencia antes que ésta sea finalmente aprovechada. La electrónica de potencia hace uso de diodos, transistores y tiristores entre otros.

Al resultar corrientes no sinusoidales se habla de distorsión armónica y de consumos no-lineales.

Todos ellos trabajan en el modo de interrupción o *switching*. Esto significa que trabajan esencialmente en 2 estados:

Figura 3. **Dispositivo de corriente y voltaje**



Fuente: elaboración propia.

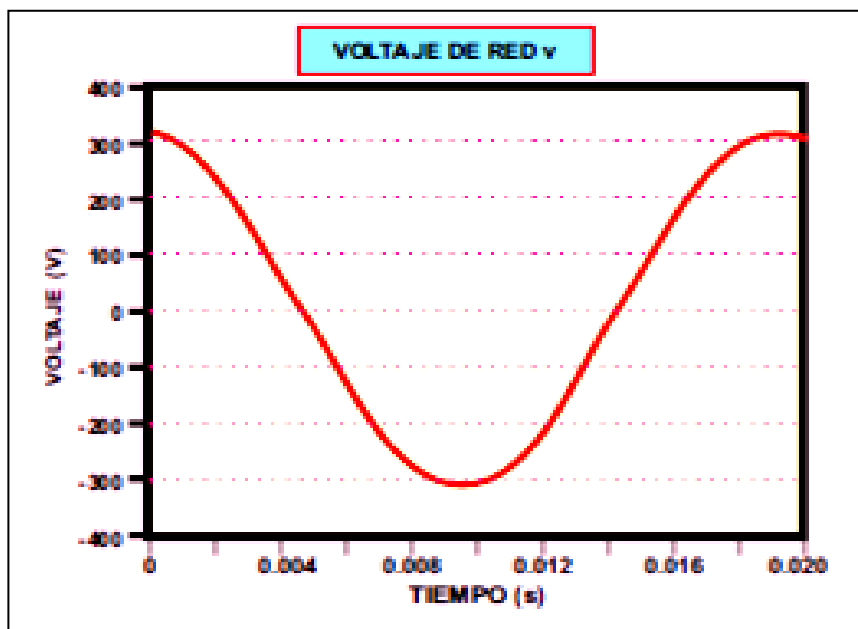
- Estado de conducción: corresponde a un interruptor cerrado. La corriente por el dispositivo puede alcanzar valores elevados, pero el voltaje es nulo y, por tanto, la disipación de potencia en él es muy pequeña.
- Estado de bloqueo: corresponde a un interruptor abierto. La corriente por el dispositivo es muy pequeña y el voltaje es elevado; así la disipación de potencia en el dispositivo es también pequeña en este estado.

Todos los semiconductores de potencia pasan rápidamente de un estado a otro, mediante circuitos que consumen usualmente menos de 5 W y que realizan el control de estos dispositivos.

La figura 3 muestra un dispositivo para controlar la corriente en un consumo lineal, constituido por una inductancia y una resistencia. El voltaje de la figura 4 es interrumpido por los semiconductores y deja de ser sinusoidal; la

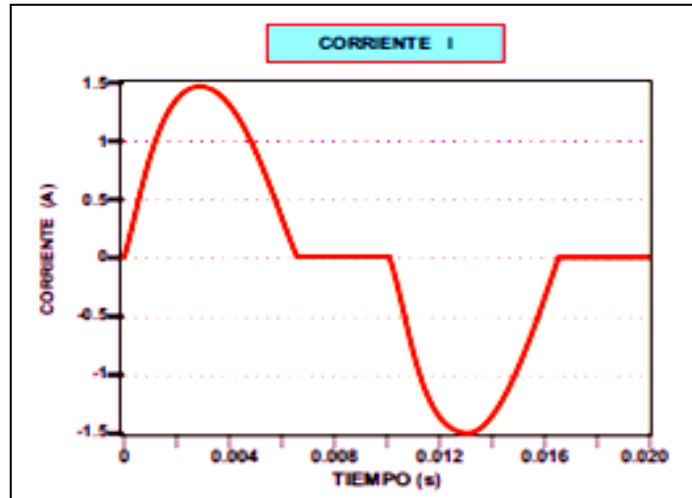
corriente es nula en determinados intervalos de tiempo como se ve en la figura 5. El usuario puede controlar los instantes de conducción y por tanto variar el voltaje como se observa en la figura 6 y la corriente en la figura 5.

Figura 4. **Voltaje en la fuente del dispositivo de control de corriente y voltaje**



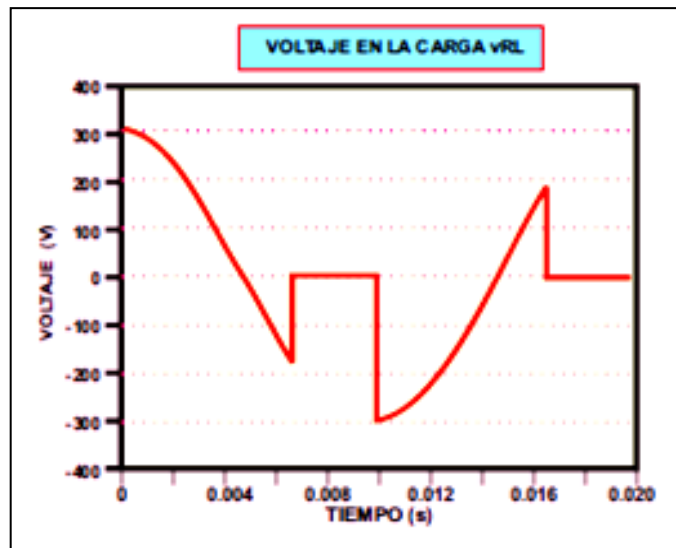
Fuente: Pro cobre S.A. *Revista Calidad de Energía*. p. 14.

Figura 5. **Corriente del dispositivo de control de corriente y voltaje**



Fuente: Revista Calidad de Energía Procobre. p. 14.

Figura 6. **Voltaje en la carga del dispositivo de control de corriente y voltaje**



Fuente: Revista Calidad de Energía Procobre. p. 14.

1.3. Los equipos eléctricos y su importancia

Dada la importancia que los equipos eléctricos tienen dentro del proceso de suministro de energía eléctrica, el monitoreo de las condiciones a las que se ve expuesto, calidad de energía y adecuado mantenimiento, se convierten en herramientas claves para apegarse a las exigencias del mercado actual.

La energía eléctrica se ha convertido en un elemento fundamental para la supervivencia de la sociedad moderna.

La demanda de grandes potencias de energía para abastecer los centros de consumos industriales y urbanos, requieren de un gran número de equipos eléctricos para su eficiente utilización.

La actividad económica moderna requiere de una continuidad y calidad de suministro del fluido eléctrico, donde los equipos, componentes e instalaciones son indispensables.

Los equipos eléctricos y electrónicos, como cualquier otra máquina creada por el hombre, requieren de cuidados apropiados para asegurar su buena operación, seguridad y durabilidad.

Equipos, componentes e instalaciones eléctricas en buenas condiciones, ayuda de manera importante a proporcionar las condiciones de desarrollo de cualquier sociedad moderna.

1.4. Parámetros para definir la calidad de energía

Son variados y cada uno tiene características propias y diferentes que requieren un trato especial para cada uno, entre estos es posible encontrar:

1.4.1. Frecuencia

Número de veces que se repite una señal eléctrica por unidad de tiempo. Frecuencia fundamental: es la frecuencia más baja de todos los componentes sinusoidales de una onda de tensión o corriente.

1.4.2. Voltaje

La tensión eléctrica o diferencia de potencial es una magnitud física que cuantifica la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos. También se puede definir como el trabajo por unidad de carga ejercido por el campo eléctrico sobre una partícula cargada para moverla entre dos posiciones determinadas.

Si dos puntos que tienen una diferencia de potencial se unen mediante un conductor, se producirá un flujo de electrones. Parte de la carga que crea el punto de mayor potencial se trasladará a través del conductor al punto de menor potencial y, en ausencia de una fuente externa (generador), esta corriente cesará cuando ambos puntos igualen su potencial eléctrico (ley de Henry). Este traslado de cargas es lo que se conoce como corriente eléctrica.

Cuando se habla sobre una diferencia de potencial en un sólo punto, o potencial, se refiere a la diferencia de potencial entre este punto y algún otro donde el potencial sea cero.

Este parámetro eléctrico se analiza en función de su valor eficaz (RMS), factor de cresta, valor pico, rangos de variación nominales, su forma de onda y distorsión, melladuras y picos, continuidad de servicio, intermitencias (*flicker*), frecuencia.

La diferencia de potencial entre los terminales de un componente pasivo depende de las características del componente y de la intensidad de corriente eléctrica.

Se puede expresar la tensión entre los bornes de una resistencia en función de la intensidad de corriente y la resistencia existentes entre ellos, tal como indica la ley de Ohm:

Ecuación 1. Ley de Ohm

$$V = R \cdot I$$

Tensión en un capacitor

Ecuación 2. Voltaje en un capacitor

$$V = \frac{1}{C} \cdot q = \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i \cdot dt + q_0$$

Tensión en una bobina

Ecuación 3. Voltaje en una Bobina

$$V = L \cdot \frac{di}{dt}$$

1.4.3. Flicker

Es una variación rápida y cíclica de la tensión, que causa una fluctuación correspondiente en la luminosidad de las lámparas a una frecuencia detectable por el ojo humano.

El *flicker* o centelleo de la iluminación es una sensación visible molesta. En general, la forma de solución conduce a alimentar estas cargas, de variación rápida, mediante circuitos exclusivos o bien sobredimensionar cables y transformadores de alimentación.

1.4.4. Factor de potencia

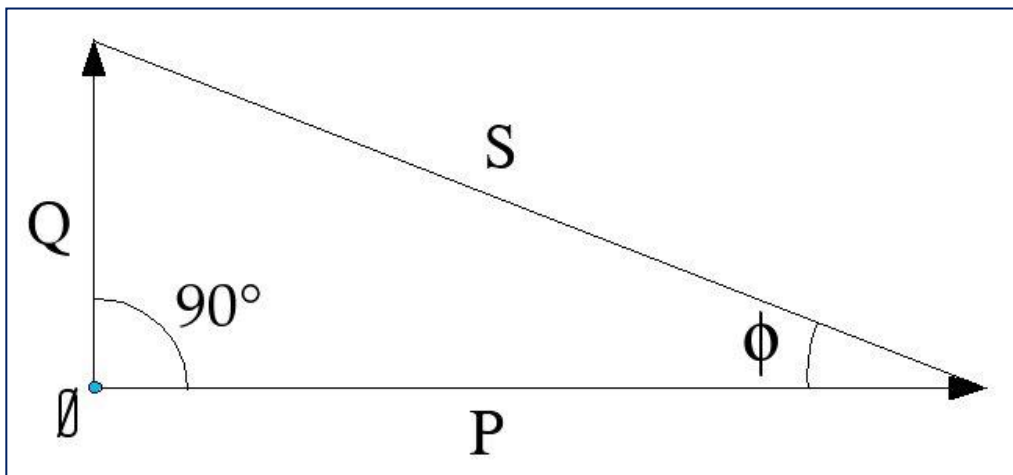
Se define factor de potencia, (f.d.p.), de un circuito de corriente alterna, como la relación entre la potencia activa, P, y la potencia aparente, S. (Ver ecuación 4).

El factor de potencia será igual a $\cos \phi$ o como el coseno del ángulo que forman los fasores de la corriente y la tensión, designándose en este caso como $\cos\phi$, siendo ϕ el valor de dicho ángulo. De acuerdo con el triángulo de potencias (ver figura 7):

Ecuación 4. Factor de potencia

$$f.d.p. \equiv \cos \phi = \frac{P}{S}$$

Figura 7. Triángulo de potencia



Fuente: elaboración propia.

El valor ideal del factor de potencia es 1, esto indica que toda la energía consumida por los aparatos ha sido transformada en trabajo.

Por el contrario, un factor de potencia menor a la unidad significa un mayor consumo de energía necesaria para producir un trabajo útil.

Un f.d.p. bajo comparado con otro alto, origina, para una misma potencia, una mayor demanda de corriente, lo que implica la necesidad de utilizar cables de mayor sección.

La potencia aparente es tanto mayor cuanto más bajo sea el f.d.p., lo que origina una mayor dimensión de los generadores.

1.4.4.1. Factor de potencia verdadero, (*true*)

Con el propósito de examinar el impacto de las armónicas en el factor de potencia, es necesario considerar el verdadero factor de potencia que se define como:

$$pf_{\text{true}} = \frac{P_{\text{prom}}}{V_{\text{rms}} I_{\text{rms}}}$$

En situaciones sinusoidales (ecuación 5) se reduce al familiar factor de potencia de desplazamiento (fundamental).

Ecuación 5. Verdadero factor de potencia forma fasorial

$$pf_{\text{true}} = pf_{\text{disp}} = \frac{P_{\text{prom}}}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{\frac{V_1 I_1 \cos(\delta_1 - \theta_1)}{\sqrt{2} \sqrt{2}}}{\frac{V_1 I_1}{\sqrt{2} \sqrt{2}}} = \cos(\delta_1 - \theta_1)$$

Donde pf_{disp} es comúnmente conocido como el factor de potencia de desplazamiento y $(\delta_1 - \theta_1)$ es conocido como el ángulo de factor de potencia. Por lo tanto, en las situaciones sinusoidales, hay solamente un factor de potencia porque factor de potencia verdadero y factor de potencia de desplazamiento son iguales.

El factor de potencia verdadero cuando las armónicas están presentes, puede ser expandido como:

$$pf_{true} = \frac{P_{1prom} + P_{2prom} + P_{3prom} + \dots}{V_{1,rms} \sqrt{1 + THD_V^2} * I_{1,rms} \sqrt{1 + THD_I^2}}$$

En muchas instancias la potencia armónica es menor comparado con la fundamental, y la distorsión del voltaje es menor que el 10%. Por eso la siguiente simplificación es importante y es generalmente válida.

Ecuación 6. Verdadero factor de potencia

$$pf_{true} \approx \frac{P_{1prom}}{V_{1,rms} I_{1,rms} \sqrt{1 + THD_I^2}} = \frac{pf_{disp}}{\sqrt{1 + THD_I^2}} = pf_{disp} * pf_{dist}$$

Donde pf_{dist} , es el factor de potencia de distorsión.

Es evidente en la ecuación 6, que el verdadero factor de potencia de cargas no lineales está limitado por I THD. Por ejemplo el verdadero factor de potencia de una PC con I THD =100% nunca puede exceder 0,707, aunque el factor de potencia de desplazamiento sea bueno.

Tabla I. Ejemplos de verdadero factor de potencia PF_{true}

Tipo de carga y potencia nominal	THDi (%)	pf_{disp}	pf_{dist}	pf_{true}
Ventilador (120)	2,13	0,66	1	0,66
Horno microondas (1520)	26,92	0,921	0,966	0,88
Computadora (100)	108,18	0,999	0,682	0,68
Televisión (50)	118,35	0,962	0,645	0,62
2 lámparas fluorescentes con reactor magnético	35,53	0,942	0,904	0,85

Fuente: Universidad Nacional de Asunción, Facultad Politécnica. *Análisis y propuesta de solución al problema de alta distorsión armónica*. p. 52.

1.4.5. Corriente

La corriente o intensidad eléctrica es el flujo de carga por unidad de tiempo que recorre un material. Se debe a un desplazamiento de los electrones en el interior del material. En el sistema internacional de unidades se expresa en C/s (culombios sobre segundo), unidad que se denomina amperio

Este parámetro eléctrico se analiza en función de su valor eficaz (RMS), factor de cresta, valor pico, rangos de variación nominales, su forma de onda y distorsión, transitorios, frecuencia.

1.4.6. Desbalance de voltaje

En un sistema trifásico, es una condición en la cual los valores eficaces de las tensiones de fase o los ángulos entre fases consecutivas no son iguales.

Perturbaciones estables en el tiempo con una magnitud que está entre 0,5 y el 2% del valor nominal del voltaje (valor máximo), se deben a desequilibrio de cargas, mal funcionamiento de componentes, fallos, etc. La tolerancia definida para el desbalance de tensión según las Normas Técnicas del Servicio de Distribución son:

Tabla II. **Tolerancias para desbalance de tensión según NTSD**

TENSIÓN	DESBALANCE DE TENSIÓN, □ DTD, EN %
BAJA Y MEDIA	3
ALTA	1

Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *Normas NTSD*. p. 25.

Ecuación 7. Cálculo de desbalance de tensión

$$(\text{DTD}(\%)) = [(3 * (V_{i\text{max}} - V_{i\text{min}})) / ((V_{1(a)} + V_{1b} + V_{1c}))] * 100$$

Donde:

- $\Delta\text{DTD} (\%)$ = Porcentaje de desbalance de tensión por parte del distribuidor.
- V_{max} = Es la tensión máxima de cualquiera de las fases, registrada en el Intervalo de medición k
- V_{min} = Es la tensión mínima de cualquiera de las fases, registrada en el Intervalo de medición k
- V_a = Es la tensión de la fase a, registrada en el intervalo de medición k
- V_b = Es la tensión de la fase b, registrada en el intervalo de medición k
- V_c Es la tensión de la fase c, registrada en el intervalo de medición k

1.4.7. Distorsión armónica total

Se define a la distorsión armónica total, como una medida de la similitud entre la forma de onda y su componente fundamental. También representa una medida del valor eficaz.

De acuerdo a la NTSD, matemáticamente es expresada por:

Ecuación 8. Distorsión armónica total de voltaje

$$\text{THD}_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1}$$

Donde:

THD_v= distorsión armónica total de tensión

V_h = valor eficaz del componente sinusoidal de frecuencia ($60 \cdot h$ Hz) de la onda distorsionada de la tensión

V_1 = componente fundamental de la forma de onda de tensión

Para encontrar la distorsión total de corriente (THD_i) se aplica la siguiente ecuación:

Ecuación 9. Distorsión armónica total de corriente

$$\text{THD}_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{V_1}$$

Para los voltajes trifásicos balanceados se utilizan los voltajes línea-neutro en la forma indicada. En el caso desbalanceado habrá un THD para cada fase.

La distorsión armónica total permite calcular la deformación de una señal cualquiera respecto de la señal sinusoidal fundamental (ecuación 8 y 9).

En la mayoría de los casos, el efecto de los armónicos de rango superior a 40 sobre la distorsión armónica total (ecuaciones 8 y 9) es despreciable, sin

embargo el efecto que estas armónicas superiores a la armónica 40 es notable en las instalaciones eléctricas.

Un documento importante sobre normativos de calidad de energía y el tema de los armónicos es la Norma IEEE 519, como complemento de la normativa del país.

1.5. Distorsión armónica

La distorsión se define como una deformación de una señal, basada en su forma pura o nominal; por otro lado, armónico es cualquiera de las componentes sinusoidales de una señal, cuya frecuencia sea un múltiplo entero de la frecuencia fundamental.

Una señal periódica no sinusoidal se puede representar como una combinación de una serie de señales sinusoidales, llamadas armónicas, aplicando el teorema de Fourier.

El proceso de calcular la magnitud y la fase de una onda, periódica fundamental y sus armónicas en un periodo T se denomina análisis de armónicas.

El teorema de Fourier declara que toda oscilación periódica compleja $f(t)$ se puede representar en forma de una suma de oscilaciones armónicas simples con frecuencias cíclicas múltiples de la frecuencia cíclica fundamental.

$\omega = 2\pi/T$, donde T es el periodo de las oscilaciones, por lo tanto una función $f(t)$ es periódica, si se verifica:

$$f(t) = F(t \pm kT)$$

Donde k es una constante que puede valer 0, 1, 2 y T el periodo de la señal y además, satisface las dos condiciones de Dirichlet:

Tener un número finito de discontinuidades, de máximos y de mínimos en un periodo T.

Y para cualquier t_0 , la integral $\int_{t_0}^{t_0+T} |f(t)| dt$ existe, entonces, la señal puede representarse como:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t)$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt$$

Donde:

- ω_0 = frecuencia angular
- a_0, a_n, b_n = coeficientes de Fourier
- n = orden de armónica
- T = periodo de la señal

En forma exponencial:

$$f(t) = \sum_{n=-1}^{\infty} c_n e^{-jn\omega_0 t}$$

$$c_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{-jn\omega_0 t} dt$$

De acuerdo con las características de cada función, la ecuación con las ecuaciones anteriores puede simplificarse las expresiones utilizando la tabla III.

Tabla III. **Coefficientes de Fourier de acuerdo con la simetría**

Simetría: f (t)	C _n
Impar	$\frac{-j^2}{T} \int_0^T f(t) \text{sen}(n\omega_0 t) dt$
Par	$\frac{2}{T} \int_0^T f(t) \text{cos}(n\omega_0 t) dt$

Fuente: Universidad Nacional de Asunción, Facultad Politécnica, *Análisis y propuesta de solución al problema de alta distorsión armónica*. p. 56.

- $v_0 =$ valor medio de la señal de tensión (componente d.c.)
- $i_0 =$ valor medio de la señal de corriente (componente d.c.)
- $V_k =$ valor eficaz de la componente k de la señal de tensión
- $I_k =$ valor eficaz de la componente k de la señal de corriente
- $\theta_{vk} =$ ángulo de desfase de la k componente de tensión
- $\theta_{ik} =$ ángulo de desfase de la k componente de corriente

Usando la descomposición de Fourier, las señales eléctricas de tensión y de corriente se pueden describir como:

Figura 8. **Descomposición de Fourier de la señal eléctrica de tensión**

$$v(t) = v_0 + \sum_{k=1}^n \sqrt{2}V_k \cos(k\omega t + \theta_{vk})$$

Fuente: Universidad Nacional de Asunción, Facultad Politécnica, *Análisis y propuesta de solución al problema de alta distorsión armónica*. p. 52.

Figura 9. **Descomposición de Fourier de la señal eléctrica de corriente**

$$i(t) = i_0 + \sum_{k=1}^n [\sqrt{2}I_k \cos(k\omega t + \theta_{vk})]$$

Fuente: Universidad Nacional de Asunción, Facultad Politécnica, *Análisis y propuesta de solución al problema de alta distorsión armónica*. p. 53.

De las ecuaciones en la tabla III se puede observar que cada una de los componentes de armónicas está caracterizado por tres parámetros: frecuencia, amplitud y ángulo de fase.

Los valores eficaces de las señales son:

$$V = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}$$

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}$$

1.5.1. Armónicos de corriente

Las armónicas son creadas por cargas no lineales que absorben corrientes en impulsos bruscos en vez de hacerlo suavemente en forma sinusoidal. Estos impulsos crean ondas de corrientes distorsionadas que originan a su vez corrientes armónicas de retorno hacia otras partes del sistema de alimentación.

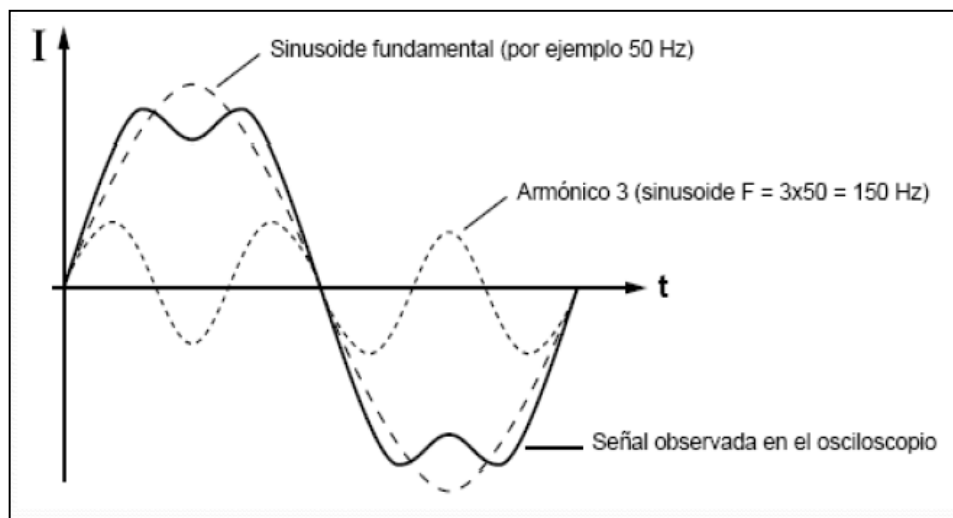
Este fenómeno se manifiesta especialmente en los equipos provistos de fuentes de alimentación de entrada con condensadores y diodos, tales como, ordenadores personales, UPS's y material electro-médico.

Estos equipos están diseñados para absorber corrientes durante solo una fracción controlada de la onda de tensión de alimentación, esto provoca armónicas de la corriente de carga y con ello el sobrecalentamiento de transformadores, conductores neutros y el disparo de interruptores automáticos.

Las causas eléctricas del fenómeno son que la tensión alterna de entrada, una vez rectificadas por los diodos, se utiliza para cargar un condensador de gran capacidad.

Normalmente, las fuentes de alimentación con condensadores y diodos que llevan incorporados los equipos de oficina son cargas monofásicas no lineales. Por el contrario en las plantas industriales, las causas más frecuentes de corrientes armónicas son cargas trifásicas no lineales, como motores de accionamiento controlados electrónicamente y UPS's

Figura 10. **Imagen de una onda senoidal deformada**



Fuente: TOBÍAS, Guty. *Calidad de energía, armónicos y factor de potencia*. p. 36.

La variación en función del tiempo, de las magnitudes eléctricas de corriente y tensiones alternas en las redes industriales, agroindustriales y hospitalarias se aparta bastante de una sinusoidal pura.

1.5.2. **Armónicas de tensión**

La relación entre la corriente armónica absorbida por las cargas no lineales y la impedancia de la fuente del transformador de alimentación se rige por la ley de Ohm, por lo que provoca armónicas de tensión. La impedancia de fuente la constituye el transformador de alimentación y los componentes del circuito.

La propia red de alimentación puede ser una fuente indirecta de armónicas de tensión. Todas las cargas que comparten un transformador o un ramal con fuerte carga armónica podrían resultar afectadas por las armónicas de tensión

producidas. En un ambiente de oficinas, los ordenadores personales son particularmente sensibles a las armónicas de tensión.

El rendimiento de la fuente de alimentación con condensadores y diodos depende críticamente de la magnitud de la tensión de pico. Las armónicas de tensión pueden provocar un achatamiento de los máximos de amplitud de la onda de tensión, reduciendo de este modo la tensión de pico. En el peor de los casos se puede producir un *reset* del ordenador a causa del fallo en la alimentación.

En el entorno industrial, agroindustrial y hospitales, los motores de inducción y capacitores para la corrección del factor de potencia también pueden resultar gravemente afectados por las armónicas de tensión.

Los condensadores de corrección de factor de potencia pueden formar un circuito resonante con las partes inductivas de un sistema de distribución de corriente.

Si la frecuencia resonante está cerca de la tensión armónica, la corriente armónica resultante podría aumentar considerablemente, sobrecargando los condensadores y quemando los fusibles de éstos. La salida de condensador por falla, desintoniza el circuito y la resonancia desaparece.

1.6. Principales generadores de armónicos

Dentro de los equipos y aparatos que constituyen los principales generadores de armónicos en un sistema eléctrico, destacan:

- Onduladores, convertidores directos de corriente continua
- Puentes rectificadores: electrolisis, grupos de soldadura, etc.
- Hornos de arco
- Hornos de inducción
- Arrancadores electrónicos
- Variadores de velocidad para motores de corriente continua
- Convertidores de frecuencia para motores asíncronos y síncronos
- Televisores, computadoras, lámparas de descarga, tubos fluorescentes
- Circuitos magnéticos saturados (transformadores)

Tabla IV. **Principales receptores que perturban los armónicos**

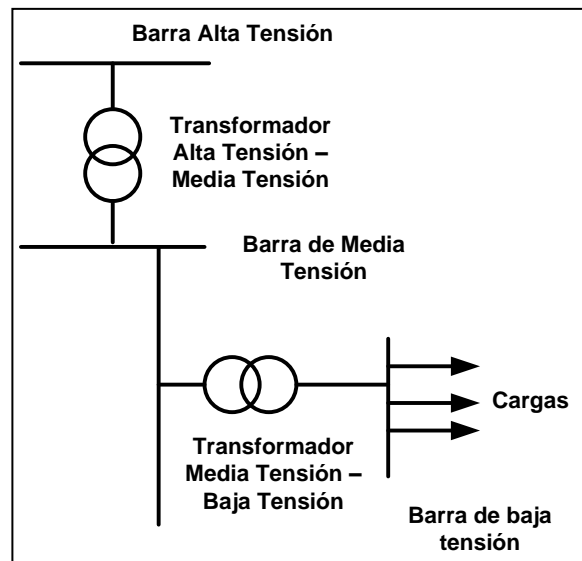
Receptores	Resultado de la perturbación
Motores síncronos	Calentamientos suplementarios
Transformadores	Pérdidas y calentamientos suplementarios. Riesgos de saturación si se producen armónicos pares.
Motores	Calentamientos suplementarios, principalmente en motores de jaula, pares pulsatorios, vibraciones
Conductores	Aumento de las pérdidas resistivas y dieléctricas
Ordenadores	Problemas de funcionamiento provocados, por ejemplo, por distorsión de voltaje.
Electrónica de potencia	Problemas relacionados con la forma de onda: conmutación, sincronización.
Condensadores	Calentamiento, envejecimiento, resonancia del circuito.
Reguladores, relés, contactores	Mediciones falseadas, funcionamiento intempestivo, pérdida de precisión.

Fuente: TOBÍAS, Guty. *Calidad de energía, armónicos y factor de potencia*. p. 42.

- Fluctuaciones de tensión o intermitencia: las variaciones de tensión son un aumento o disminución de la tensión provocada normalmente por variaciones de carga.

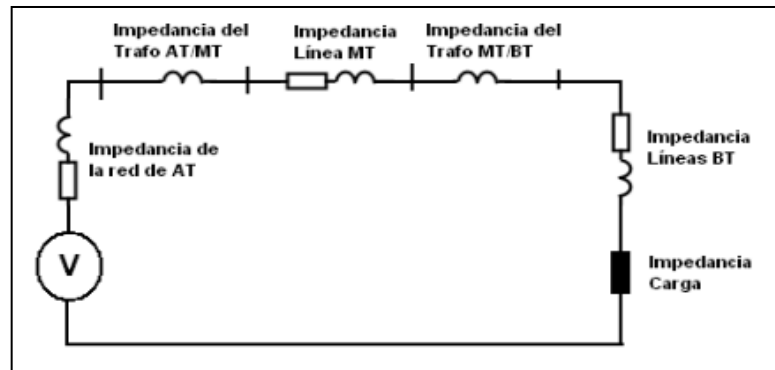
Si el sistema eléctrico no tuviese cargas, las tensiones en cada punto de la red dependerían únicamente de las relaciones de transformación de los transformadores que existieran en la red. Sin embargo, la conexión de cargas a la red eléctrica produce una circulación de corriente. Es precisamente esta corriente la que produce caídas de tensión, al circular por ella cada una de las impedancias del sistema, debido a las características de las líneas y transformadores. Por otra parte, si la carga fuera constante la caída de tensión en la red también lo sería y en consecuencia no se producirían fluctuaciones de tensión.

Figura 11. **Esquema unifilar general de conexión de un cliente de media tensión**



Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Esquema del circuito equivalente de la red de alta tensión, media tensión y baja tensión**



Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en el esquema anterior, si la carga fuera constante, las respectivas caídas de tensión serían constantes y tan solo dependerían de la tensión de la red de alta tensión.

Pero las cargas no son constantes. Se producen fuertes variaciones de consumo a lo largo del tiempo. El consumo en verano no es igual que en el invierno y no es lo mismo de día que de noche o en días laborales o festivos. La situación en sistemas industriales empeora, ya que las variaciones se producen entre los distintos períodos productivos y pueden durar segundos, por arranque de motores, u horas en caso de procesos largos.

En la red eléctrica las variaciones de tensión suelen ser debidas al conjunto de las cargas, ya que rara vez una carga individual representa una potencia importante respecto a la tensión. Cuando se refiere a grandes variaciones de carga en un cliente concreto, es muy importante tener en cuenta que cuanto menor es el tamaño del transformador mayor es su impedancia.

Por su parte, las líneas presentan más impedancia cuanto menor es su tensión, esto quiere decir que las impedancias dentro de un cliente, representadas en la figura 12 de forma simplificada como impedancia del transformador del cliente, son mucho mayores que las de la red, debido a su menor nivel de tensión y dimensiones de la carga. En consecuencia, se producen grandes variaciones de tensión dentro de los clientes, que se suman a las que provienen de la red.

1.7. Alcance de un estudio de calidad de energía

Para su correcta elaboración, un estudio de calidad de energía requiere como mínimo, contener los siguientes análisis:

- Inspección y análisis de cada caso en particular, lo cual comprende: problemas o fallos previos, inspecciones de rutina, mantenimientos o ampliaciones en sistemas, instalaciones o equipos, para definir los puntos de medición y captura de información, estrategia y razón de muestreo, intervalos de medición, parámetros eléctricos a medir y detectar, etc.
- Correcta instalación y programación de los equipos adecuados de análisis de calidad de energía, para cada caso en particular, a fin de obtener la información de interés de manera precisa, fiable y completa.
- Desarrollo de la ingeniería para el análisis e interpretación de la información recabada por los equipos y en campo, para obtener los resultados esperados del estudio, es decir establecer la correlación causas-efectos, en base al *expertise* del analista, presentando al final conclusiones y recomendaciones viables técnica y económicamente.

Este estudio está enfocado en mostrar los efectos de las cargas no lineales en los bancos de transformación, aplicando los tres principios básicos descritos anteriormente.

1.8. Normativos que rigen la calidad de energía en Guatemala

Existen diversas normas y reglamentos relativos a la calidad de energía en Guatemala, pero se hará énfasis en las emitidas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE).

1.8.1. Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD)

El 7 de abril de 1999 considerando que el Decreto 93-96 del Congreso de la República de Guatemala, Ley General de Electricidad, establece que la Comisión Nacional de energía Eléctrica goza de independencia funcional para el ejercicio de sus atribuciones y considerando que es función de esta Comisión, velar por el cumplimiento de las obligaciones de los adjudicatarios y concesionarios y emitir las normas técnicas relativas al subsector eléctrico, con respecto a la Calidad del Servicio de distribución de energía eléctrica.

Considerando que de conformidad con lo establecido en el artículo 78, inciso b, del Acuerdo Gubernativo 256-97, Reglamento de la Ley General de Electricidad, corresponde a la Comisión Nacional de Energía Eléctrica la elaboración de las Normas Técnicas del Servicio de Distribución.

Considerando que el servicio eléctrico de distribución debe prestarse a la población, con calidad, continuidad y sin distorsiones que menoscaben la calidad del servicio al usuario final, debiéndose en todo caso actualizar las

normas de calidad que han de exigirse, para que se cumpla con estos requerimientos.

La Comisión Nacional de Energía Eléctrica en ejercicio de las funciones que le confiere el artículo 4 de la Ley General de Electricidad, Decreto número 93-96 del Congreso de la República resolvió emitir las Normas Técnicas del Servicio de Distribución.

El objetivo de estas normas es establecer derechos y obligaciones de los prestatarios y usuarios del servicio eléctrico de distribución, índices o indicadores de referencia para calificar la calidad con que se proveen los servicios de energía eléctrica, tanto en el punto de entrega como en el punto de utilización de tales servicios, tolerancias permisibles, métodos de control, Indemnizaciones, sanciones y/o multas, respecto de los siguientes parámetros:

- Calidad del producto suministrado por el distribuidor
 - Regulación de tensión
 - Desbalance de tensión en servicios trifásicos
 - distorsión armónica
 - *Flicker*

- Incidencia del usuario en la calidad del producto
 - Distorsión armónica
 - *Flicker*
 - Factor de potencia

- Calidad del servicio técnico
 - Interrupciones (disponibilidad de la energía para los usuarios)
- Calidad del servicio comercial
 - Calidad del servicio comercial del distribuidor
 - Calidad de la atención al usuario

El alcance de las Normas Técnicas de Servicio de Distribución será de aplicación obligatoria para todos los participantes que hacen uso de los sistemas de distribución de energía eléctrica.

1.8.2. Ley General de Electricidad, Decreto No. 93-96 del Congreso de la República de Guatemala

La Ley General de Electricidad norma el desarrollo del conjunto de actividades de generación, transporte, distribución y comercialización de electricidad, de acuerdo con los siguientes principios y enunciados:

- Es libre la generación de electricidad y no se requiere para ello autorización o condición previa por parte del Estado, más que las reconocidas por la Constitución Política de la República de Guatemala y las leyes del país.
- Es libre el transporte de electricidad, cuando para ello no sea necesario utilizar bienes de dominio público; también es libre el servicio de distribución privada de electricidad.

- En los términos a que se refiere la ley, el transporte de electricidad que implique la utilización de bienes de dominio público y el servicio de distribución final de electricidad, estarán sujetos a autorización;
- Son libres los precios por la prestación del servicio de electricidad, con la excepción de los servicios de transporte y distribución sujetos a autorización. Las transferencias de energía entre generadores, comercializadores, importadores y exportadores, que resulten de la operación del mercado mayorista, estarán sujetos a regulación en los términos a que se refiere la ley.

Las normas de la Ley General de Electricidad son aplicables a todas las personas que desarrollen las actividades de generación, transporte, distribución y comercialización de electricidad, sean estas individuales o jurídicas, con participación privada, mixta o estatal, independientemente de su grado de autonomía y régimen de constitución. Salvo lo que en la Ley General de Electricidad se expresa, el Ministerio de Energía y Minas, es el órgano del Estado responsable de formular y coordinar las políticas, planes de Estado, programas indicativos relativos al subsector eléctrico y aplicar esta ley y su reglamento para dar cumplimiento a sus obligaciones.

2. INFLUENCIA DE CARGAS NO LINEALES EN LOS BANCOS DE TRANSFORMACIÓN

Las cargas no lineales que son conectadas a los bancos de transformación, generan un impacto diferente al de otras cargas en el comportamiento del voltaje, corriente y frecuencia del sistema, es por esta razón que se aborda dicho tema en el presente capítulo.

2.1. Límites de distorsión armónica

En Guatemala, los límites de distorsión que se definieron para la distorsión armónica, tanto de voltaje originados por la fuente o distribuidor, como de corriente originados por la carga o usuarios, están definidos en las Normas Técnicas del Servicio de Distribución emitidas por la CNEE. El índice de calidad de la distorsión armónica de la tensión está dado por la distorsión armónica de la tensión, expresado como un porcentaje y se calcula utilizando las ecuaciones indicadas a continuación:

Ecuación 10. Distorsión armónica total de tensión

$$DATT(\%) = \left(\sqrt{\sum \frac{V_{i2}}{V_{12}}} \right) * 100$$

Ecuación 11. Distorsión armónica individual de tensión

$$DAIT(\%) = \left(\frac{V_i}{V_1} \right)$$

Donde:

DATT= distorsión armónica total de tensión

DAIT= distorsión armónica individual de tensión

V_i = componente de tensión de la armónica de orden i

V_1 = componente de tensión de la frecuencia fundamental (60 Hz)

En el artículo 32 de las NTSD se definen las tolerancias para la distorsión armónica de tensión.

Tabla V. Tolerancias para los armónicos de voltaje según las NTSD

ORDEN DE LA ARMÓNICA (n)	DISTORSIÓN ARMÓNICA INDIVIDUAL DE TENSIÓN, DAIT [%]	
	BAJA Y MEDIA TENSIÓN $V \leq 60$ kV	ALTA TENSIÓN $60 \text{ kV} < V \leq 230$ kV
IMPARES NO MÚLTIPLOS DE 3		
5	6,0	2,0
7	5,0	2,0
11	3,5	1,5
13	3,0	1,5
17	2,0	1,0
19	1,5	1,0
23	1,5	0,7
25	1,5	0,7
> 25	$0,2 + 1,3 \cdot 25/n$	$0,1 + 0,6 \cdot 25/n$
IMPARES MÚLTIPLOS DE 3		
3	5,0	2,0
9	1,5	1,0
15	0,3	0,3
21	0,2	0,2
> 21	0,2	0,2
PARES		
2	2,0	2,0
4	1,0	1,0
6	0,5	0,5
8	0,5	0,4
10	0,5	0,4
12	0,2	0,2
> 12	0,2	0,2
DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL DE TENSIÓN, DATT, EN %	8	3

Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica. NTSD. p. 27.

En el artículo 42 de las NTSD se definen las tolerancias para la distorsión armónica de la corriente de carga. La distorsión armónica de tensión producida por una fuente de corriente armónica dependerá de la potencia del usuario, del nivel de tensión al cual se encuentra conectado, y del orden de la armónica, por lo que en la tabla VI se establecen las tolerancias de corrientes armónicas individuales para distintos niveles de tensión, potencia máxima demandada y orden de armónica.

Tabla VI. Tolerancias para armónicos de corriente según las NTSD

ORDEN DE LA ARMÓNICA (n)	P ≤ 10 kW V ≤ 1kV	P >10kW 1kV < V ≤ 60kV	P >50kW v >60kV
	INTENSIDAD ARMÓNICA MÁXIMA (AMP)	DISTORSION ARMÓNICA INDIVIDUAL DE CORRIENTE DAII, EN %	
IMPARES NO MÚLTIPLOS DE 3			
5	2,28	12,0	6,0
7	1,54	8,5	5,1
11	0,66	4,3	2,9
13	0,42	3,0	2,2
17	0,26	2,7	1,8
19	0,24	1,9	1,7
23	0,20	1,6	1,1
25	0,18	1,6	1,1
> 25	4,5/n	0,2 + 0,8*25/n	0,4
IMPARES MÚLTIPLOS DE 3			
3	4,60	16,6	7,5
9	0,80	2,2	2,2
15	0,30	0,6	0,8
21	0,21	0,4	0,4
> 21	4,5/n	0,3	0,4
PARES			
2	2,16	10,0	10,0
4	0,86	2,5	3,8
6	0,60	1,0	1,5
8	0,46	0,8	0,5
10	0,37	0,8	0,5
12	0,31	0,4	0,5
> 12	3,68/n	0,3	0,5
DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL DE CORRIENTE DATI, EN %	--	20	12

Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica. NTSD. p. 28.

Se considerará que la energía eléctrica es de mala calidad cuando en un lapso de tiempo mayor al cinco por ciento, del empleado en las mediciones en el período de medición, dichas mediciones muestran que la distorsión armónica de la corriente de carga ha excedido el rango de tolerancias establecidas.

Adicional a esta normativa, también se tienen de referencia otras normas internacionales, entre estas se hace mención a la más importante, la IEEE 519:

2.2. Estándar para el control de armónicas Standard IEEE 519 – 1992

Las normas estadounidenses con respecto a las armónicas han sido agrupadas por la IEEE Std 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems (IEEE recomendaciones prácticas y requerimientos para el control de armónicas en sistemas eléctricos de potencia).

Existe un efecto combinado de todas las cargas no lineales sobre el sistema de distribución la cual tienen una capacidad limitada para absorber corrientes armónicas. Adicionalmente, las compañías de distribución tienen la responsabilidad de proveer alta calidad de abastecimiento en lo que respecta al nivel del voltaje y su forma de onda. IEEE 519 hace referencia no solo al nivel absoluto de armónicas producida por una fuente individual sino también a su magnitud con respecto a la red de abastecimiento.

Se debe tomar en cuenta que la IEEE 519 está limitada por tratarse de una colección de recomendaciones prácticas que sirven como guía tanto a consumidores como a distribuidores de energía eléctrica. Donde existan problemas, a causa de la inyección excesiva de corriente armónica o distorsión

del voltaje, es obligatorio para el suministrador y el consumidor, resolver estos problemas.

El propósito de la IEEE 519 es el de recomendar límites en la distorsión armónica según dos criterios distintos, específicamente:

- Existe una limitación sobre la cantidad de corriente armónica que un consumidor puede inyectar en la red de distribución eléctrica.
- Se establece una limitación en el nivel de voltaje armónica que una compañía de distribución de electricidad puede suministrar al consumidor.

2.2.1. Lineamientos para clientes individuales

El límite primario de los clientes individuales es la cantidad de corriente armónica que ellos pueden inyectar en la red de distribución. Los límites de corriente se basan en el tamaño del consumidor con respecto al sistema de distribución. Los clientes más grandes se restringen más que los clientes pequeños.

El tamaño relativo de la carga con el respecto a la fuente se define como la relación de cortocircuito (SCR, *short circuit ratio*), al punto de acoplamiento común (PCC).

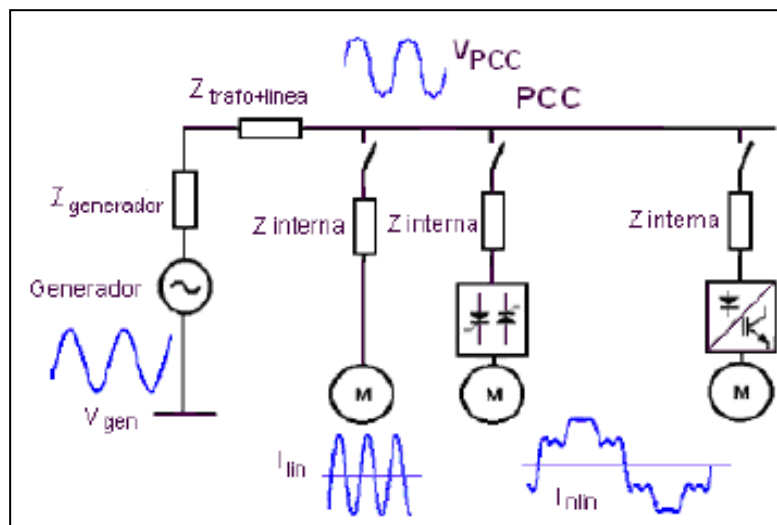
El tamaño del consumidor es definido por la corriente total de frecuencia fundamental en la carga I_L , que incluye todas las cargas lineales y no lineales. El tamaño del sistema de abastecimiento es definido por el nivel de la corriente de cortocircuito I_{SC} , al PCC. Estas dos corrientes definen el SCR.

Ecuación 12. Relación de corto circuito

$$SCR = \frac{(\text{corto circuito MVA})}{\text{Carga MW}} = \frac{I_{SC}}{I_L}$$

Una relación alta (barra fuerte) significa que la carga es relativamente pequeña y que los límites aplicables no serán tan estrictos como los que corresponden cuando la relación es más baja (barra débil). Esto se observa en la tabla VII donde se recomiendan los niveles máximos de distorsión armónica en función del valor de SCR y el orden de la armónica. La tabla también identifica niveles totales de distorsión armónica. Todos los valores de distorsión de corriente se dan en base a la máxima corriente de carga (demanda) I_L , calculado como la corriente promedio de la máxima demanda durante los doce meses previos. La distorsión total está en términos de la distorsión total de la demanda (TDD) en vez del término más común THD.

Figura 13. Armónicos de corriente y tensión en el PCC



Fuente: Procobre S.A. *Revista Calidad de Energía*. p. 26.

2.2.2. Límites de inyección de corriente armónica

En las tablas VII, VIII, IX se muestran los límites de corrientes para componentes de armónicas individuales así como también la distorsión armónica total. Es importante notar que los componentes individuales de las corrientes armónicas no se suman directamente para que todas las armónicas características no puedan estar a su límite máximo individual sin exceder el TDD.

Tabla VII. **Límites en la distorsión de la corriente para condiciones con duración superior a una hora. Para períodos más cortos el límite aumenta un 50%**

I_{sc} / I_L	<11	11≤h<17	17≤h<23	23h≤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

Donde I_{sc} = corriente máxima de cortocircuito en el PCC
 I_L = máxima demanda de la corriente de carga (a frecuencia fundamental) en el PCC
TDD= distorsión Total de la demanda en % de la demanda máxima.

Las armónicas pares se limitan al 25% de los límites de las armónicas impares mostradas anteriormente
* Todo equipo de generación se limita a estos valores independientemente del valor de I_{sc} que presenta

Fuente: Institute of Electrical and Electronical Engineers. *IEEE 519-1992. p. 5.*

Tabla VIII. **Límites de corriente armónica para carga no lineal en el punto común de acoplamiento con otras cargas, para voltajes entre 69 000 – 161 000 voltios**

I_{sc} / I_L	<11	11≤h<17	17≤h<23	23h≤35	35≤h	TDD
<20*	2,00	1,00	0,75	0,30	0,15	2,50
20<50	3,50	1,75	1,25	0,50	0,25	4,00
50<100	5,00	2,25	2,00	0,75	0,35	6,00
100<1000	6,00	2,75	2,50	1,00	0,50	7,50
>1000	7,00	3,50	3,00	1,25	0,70	10,00

Donde I_{sc} = corriente máxima de cortocircuito en el PCC
 I_L = máxima demanda de la corriente de carga (a frecuencia fundamental) en el PCC
TDD= distorsión Total de la demanda en % de la demanda máxima.

Las armónicas pares se limitan al 25% de los límites de las armónicas impares mostradas anteriormente
* Todo equipo de generación se limita a estos valores independientemente del valor de I_{sc} que presenta

Fuente: Institute of Electrical and Electronical Engineers. *IEEE 519-1992. p. 6.*

Tabla IX. **Límites de corriente armónica para carga no lineal en el punto común de acoplamiento con otras cargas, para voltajes > 161 000 V**

I_{sc} / I_L	<11	11≤h<17	17≤h<23	23h≤35	35≤h	TDD
<50	2,00	1,00	0,75	0,30	0,15	2,50
>50	3,00	1,50	1,15	0,45	0,22	3,75

Donde I_{sc} = corriente máxima de cortocircuito en el PCC
 I_L = máxima demanda de la corriente de carga (a frecuencia fundamental) en el PCC
TDD= distorsión Total de la demanda en % de la demanda máxima.

Las armónicas pares se limitan al 25% de los límites de las armónicas impares mostradas anteriormente
* Todo equipo de generación se limita a estos valores independientemente del valor de I_{sc} que presenta

Fuente: Institute of Electrical and Electronical Engineers. *IEEE 519-1992. p. 5.*

Es importante notar que las tres tablas (ingresar correlativo) muestran únicamente los límites para armónicas impares. La Norma IEEE 519 da lineamientos para los armónicas pares limitándolos al 25% de los impares,

dentro de la misma gama. La armónica par es el resultado de una onda de corriente asimétrica (con forma diferente a la positiva y negativa) que puede contener componentes DC que saturarán los núcleos magnéticos.

Para equipos de generación de energía eléctrica, IEEE 519 no discrimina en el tamaño. Los límites son más estrictos por el hecho de que los límites de inyección de armónicas son menores que los mostrados en la tabla.

Por último, los límites de distorsión dados arriba son permitidos con tal que el transformador utilizado por el usuario no se someta a armónicas que sobrepasen el 5% de la corriente nominal del transformador como lo establece la Norma ANSI/IEEE C57.110 –1986.

2.3. Desclasificación de transformadores

En los últimos años se observa un interés creciente sobre los efectos de las cargas no lineales en los sistemas eléctricos de potencia.

Este tipo de cargas ha existido en los sistemas eléctricos desde el principio, principalmente eran de tipo magnético, como las corrientes de excitación de los transformadores y los balastos magnéticos de luminarias tipo fluorescente. Su influencia era escasa.

La aparición de la electrónica ha mejorado mucho las propiedades de los productos pero ha traído consigo, entre otros problemas, la generación de armónicos.

Los fabricantes de variadores de frecuencia de motores de inducción explican cómo estos equipos mejoran la eficiencia de las máquinas permitiendo

variar la velocidad de funcionamiento según las necesidades de la aplicación, pero advierten que éstos producen armónicos de orden 5, 7, 11 y 13.

Los balastos electrónicos también se presentan como una importante mejora, tanto para la eficiencia como para la vida útil del equipo. Sólo tienen el pequeño problema del aumento en contenido de armónicos.

Equipos como hornos de arco, cargadores de baterías, son también productores de armónicos, pero los mayores causantes de problemas son grupos de pequeñas cargas electrónicas monofásicas como: ordenadores, impresoras, fotocopiadoras, faxes, etc., conectadas entre fase y neutro generalmente en un sistema triángulo-estrella 120/208.

2.4. Factor K

En los transformadores, reactancias, etc., las pérdidas en el hierro en caso de existir armónicas crecen muy significativamente, esto hace que deban sobredimensionarse los kVA nominales de forma notable. El factor que se suele emplear para ello es el llamado factor K de los transformadores que se define como:

$$K = \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 h^2$$

Donde:

I_h = valor efectivo de la corriente armónica h, en porcentaje del valor efectivo de la corriente nominal.

K = capacidad de un transformador para alimentar cargas no lineales sin sobrecalentarse. Aparecen entonces los transformadores de “factor K ” para evitar los problemas causados por armónicas, presentando algunas peculiaridades constructivas respecto a los convencionales, que son:

- Sobredimensionamiento de los conductores primarios para soportar las corrientes de circulación reflejadas de las armónicas *triplen*
- Las secciones del neutro y sus conexiones se dimensionan para una corriente doble del de línea,

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.

Las pérdidas por corrientes de Foucault en los conductores de los transformadores se pueden reducir empleando varios conductores paralelos aislados entre sí.

En Estados Unidos la asignación de K a un transformador lo realiza Underwriter Laboratories (UL), no el fabricante. Los valores comerciales de K para transformadores catalogados por U.L. son: 1, 4, 9, 13, 20, 30 y 40. El mejor es el que tiene mayor valor, sin embargo estos se diseñan para necesidades específicas de los clientes.

Cuando un transformador es afectado por las corrientes armónicas, no puede funcionar a su potencial nominal y debe o cambiarse por otro de mayor potencia o disminuirse la carga. El transformador se desclasifica, asociándose una potencia equivalente.

La potencia equivalente de un transformador es la correspondiente a la sinusoidal que provoque las mismas pérdidas que las producidas con la corriente no sinusoidal aplicada. Esta potencia equivalente es igual a la potencia basada en el valor eficaz de la corriente no sinusoidal multiplicada por el factor K.

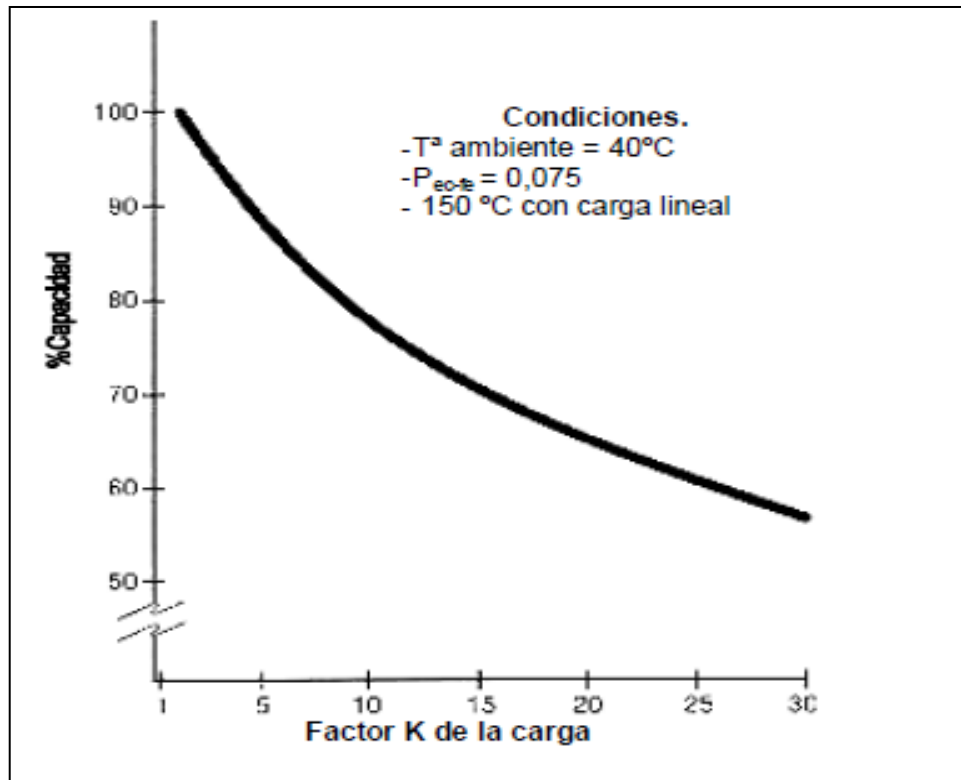
Este factor K se define como aquel valor numérico que representa los posibles efectos de calentamiento de una carga no lineal sobre el transformador. Inicialmente se consideró llamar a este número C, de constante, pero se temió que hubiese confusión con la unidad de grado centígrado y se optó por utilizar la letra K.

La potencia asignada del transformador que se use debe ser igual o mayor que la potencia equivalente.

En el caso en que un transformador en servicio se desee cargar posteriormente con corriente armónicas un factor reductor de $1/K$ debe ser aplicado a la potencia asignada.

La figura siguiente muestra la desclasificación de la capacidad de carga de un transformador en función del factor K de la carga.

Figura 14. **Desclasificación típica del transformador (para cargas no lineales)**



Fuente: <http://www.ul.com/global/spa/pages>. Consulta: mayo de 2012.

El factor K, según la Norma UNE, se obtiene por la siguiente fórmula.

Figura 15. **Cálculo de factor K**

$$K = \sqrt{1 + \frac{e}{1+e} \left(\frac{I_1}{I}\right)^2 \sum_{n=2}^{n=N} \left(n^q \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2\right)}$$

Fuente: <http://www.ul.com/global/spa/pages>. Consulta: mayo de 2012.

Donde:

e = pérdidas por corriente de Foucault debidas a la corriente sinusoidal a la frecuencia fundamental, divididas por las pérdidas debidas a una corriente continua igual al valor eficaz de la corriente sinusoidal, ambas a la temperatura de referencia. Este valor es proporcionado por el fabricante del transformador y suele valer 0,3

n = orden del armónico

I = valor eficaz de la corriente sinusoidal y, en otro caso, la de la corriente no sinusoidal, conteniendo todos los armónicos.

I_n = corriente del n -ésimo armónico (amplitud o valor eficaz)

I_1 = corriente fundamental (amplitud o valor eficaz)

q = es una constante exponencial que depende de los arrollamientos y de la frecuencia.

Pueden usarse los siguientes valores:

- Para transformadores con conductores redondos o rectangulares en los arrollamientos de baja y alta tensión, 1,7.
- Para transformadores con conductores de lámina en baja tensión, 1,5.

A veces distintas distribuciones de carga llevan a idénticos factores K.

Existen en el mercado analizadores de armónicos que proporcionan tanto la distorsión armónica como el factor K.

Este factor K varía en las instalaciones dependiendo si se ha tomado de día con un nivel de carga próximo al 100% o por la noche donde tan sólo suelen existir cargas de iluminación. Además, las industrias tienen ciclos estacionales,

provocando gran variación en la demanda. Aún es más complejo prever el contenido de armónicos en el caso de nueva instalación. En general la desclasificación es más frecuente en el caso de instalaciones existentes.

El diseño del transformador deberá realizarse para el peor caso registrado.

La Norma ANSI/IEEE C57.110-1996 proporciona una guía para la desclasificación en función del factor K de la carga y de las pérdidas de dispersión proporcionadas por el fabricante del transformador.

Este método de sobredimensionar el transformador tiene varios inconvenientes:

- La placa de características, habitualmente no se cambia. La próxima persona que lo visite no sabe que ha sido desclasificado y puede considerar que está trabajando muy por debajo de los valores nominales e incrementar de nuevo la potencia nominal hasta el valor indicado en placa.
- Los transformadores suponen la mayor parte de la impedancia de un circuito de distribución y su reactancia puede suponer una oposición considerable a la circulación de los armónicos de mayor frecuencia. Sobredimensionarlo supone reducir su impedancia y, por tanto, los armónicos circulan más fácilmente. Además, se eleva la intensidad de cortocircuito hasta valores que no permiten que la protección primaria saque la unidad fuera de la línea en caso de fallo.

Por contrario, un neutro sub-dimensionado, como ya se ha comentado, puede producir elevadas caídas de tensión y considerables diferencias de potencial respecto de tierra no aconsejables para cargas críticas.

Es deseable mantener la impedancia del transformador lo menor posible, pero suficientemente grande para que no ocurra lo anterior. Es decir, buscar una situación de compromiso.

Los transformadores desclasificados requieren mayor sección de conductores, mayor calibre en las protecciones y costos adicionales.

2.5. Transformadores de factor K

Aparecen entonces los transformadores de factor K para evitar los anteriores inconvenientes. Presentan algunas peculiaridades constructivas respecto de los convencionales.

- Sobredimensionamiento de los conductores primarios para soportar las corrientes de circulación reflejadas de los armónicos *triplen*.
- Las secciones del neutro y sus conexiones se dimensionan para corriente doble de la de línea.
- 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.
- Las pérdidas por corriente de Foucault en los conductores de los transformadores se pueden reducir empleando varios conductores

paralelos aislados entre sí. A veces se utilizan conductores de tipo fleje y otras técnicas de interpolación y transposición de conductores.

- Tienen una capacidad térmica especial.
 - La denominación K a un transformador, es realizada por un laboratorio de Estados Unidos llamado Underwrite Laboratories, no lo realiza el fabricante.
 - El criterio UL1561 para establecer la clasificación es el siguiente: Inicialmente se prueba al transformador con una corriente sinusoidal de 60 Hz para determinar las pérdidas en los devanados y en el núcleo. Del total de las pérdidas en los arrollamientos se restan las debidas a I^2R , calculadas a 60 Hz, 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 60 Hz.
 - Si la elevación de la temperatura media en los devanados no supera la nominal el transformador es marcado como válido para trabajar con cualquier carga no lineal de ese o menor factor K.
 - Los valores de K para transformadores catalogados por U.L. son: 1, 4, 9, 13, 20, 30, 40.
 - Muchos diseñadores e ingenieros de aplicaciones comparten el punto de vista de que el criterio empleado por U.L no representa

con precisión el calentamiento en los transformadores. Proponen, para ciertos transformadores que por cuestiones de diseño tienen una capacidad térmica especial, prescindir del factor K por sus posibles desajustes, y solo indicar la elevación de temperatura entre los 115 y 80 °C. Esto es especialmente indicado para aquellos construidos con materiales de 220 °C de aislamiento que pueden soportar sin riesgo puntos calientes y aumentos en la temperatura de los devanados de hasta 150 °C.

2.6. El factor K de las cargas

Habitualmente los transformadores se desclasifican o se eligen con un factor K correspondiente a la media ponderada del factor K de los distintos receptores.

Dicho valor suele valer entre 14 y 20. La práctica ha demostrado que al medir la K de varias ramas en paralelo el valor total de K se reduce considerablemente. Esto se debe a la cancelación de armónicos entre sí, especialmente los de elevadas frecuencias por los ángulos de desfase que hay entre ellos.

Determinar un factor K de los receptores realista es importante, porque, si no aparecen problemas similares a los conocidos por sobredimensionar el transformador.

3. CÓMO EVITAR ARMÓNICO

Desde hace algún tiempo atrás se han desarrollado varias técnicas y utilizado varios sistemas para la eliminación de la distorsión armónica, se ha propuesto diferentes alternativas que incluyen filtros de tipo pasivos, filtros de tipo activos, o también el uso de una combinación de filtros pasivos con filtros activos los cuales se conocen como filtros de tipo híbridos.

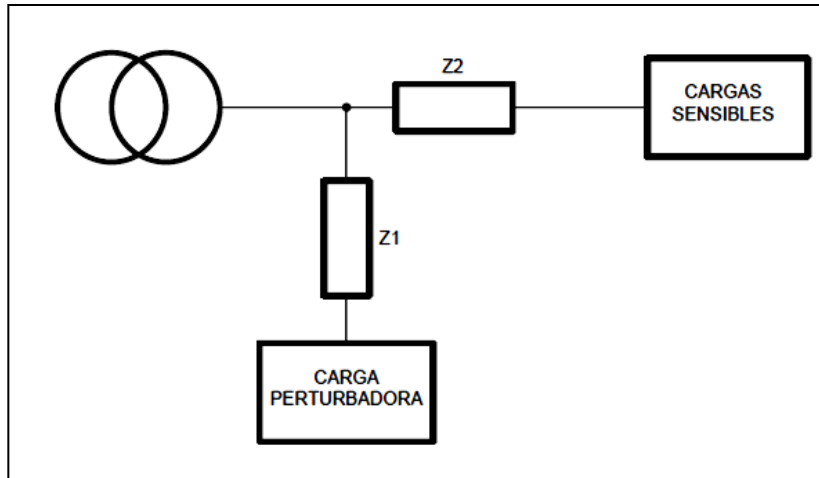
Cada uno de estos tipos de filtros antes mencionado poseen características particulares, las cuales influyen considerablemente para su aplicación.

Para limitar la propagación de los armónicos en las redes eléctricas, se deben tomar una serie de medidas, especialmente cuando se diseña una nueva instalación.

3.1. Implementación de las cargas perturbadoras al inicio de la red

La perturbación armónica global aumenta a medida que la potencia de cortocircuito disminuye. Dejando de lado las consideraciones económicas, es preferible conectar las cargas perturbadoras aguas arriba del resto de cargas como se muestra en la figura siguiente:

Figura 16. **Conexión aguas arriba de cargas no-lineales (esquema recomendado)**



Fuente: elaboración propia.

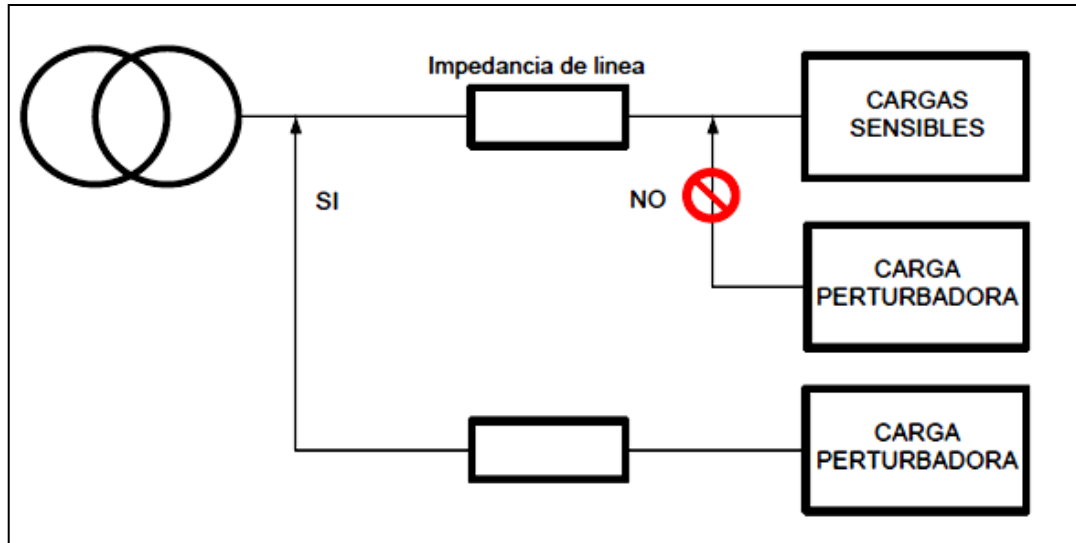
3.2. Agrupando cargas perturbadoras

Cuando se prepara el diagrama unifilar, se debe separar, en la medida de lo posible los equipos perturbadores de los otros (ver figura 27) en la práctica, se deberían alimentar las cargas perturbadoras y las no perturbadoras con juegos de barras diferentes.

Reagrupando las cargas perturbadoras, aumenta la posibilidad de recomposición angular. Esto es debido a que la suma vectorial de las corrientes armónicas es menor que su suma algebraica.

También se debe hacer un esfuerzo para evitar la circulación de corrientes armónicas en los cables, limitando las caídas de tensión y el aumento de temperatura en los cables.

Figura 17. **Reagrupación de cargas no-lineales y alimentación lo más aguas arriba posible**

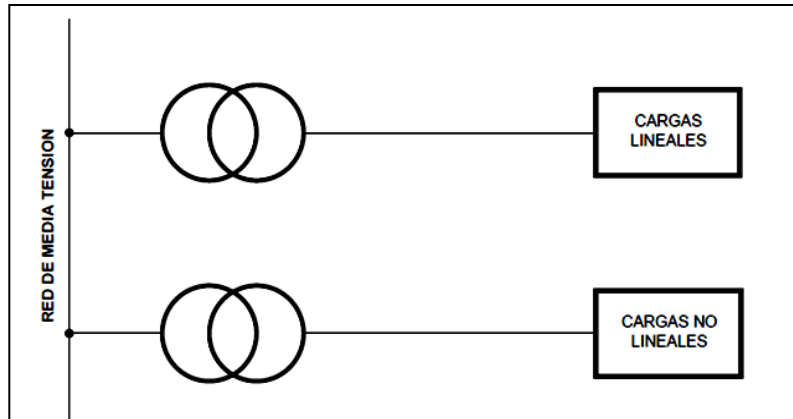


Fuente: elaboración propia.

3.3. Separando fuentes

Con el objetivo de evitar los armónicos, es posible obtener una mejora suplementaria al comportamiento de la red; esto se logra utilizando una configuración de transformadores que alimenten la carga, tal y como se muestra en la figura como se muestra en la figura 18:

Figura 18. **Alimentación de cargas perturbadoras con transformador separado**



Fuente: elaboración propia.

El inconveniente de esta solución es el aumento en el costo de la instalación.

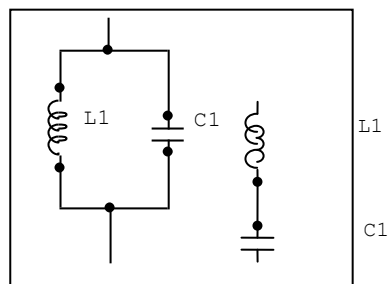
3.4. Filtros pasivos

El filtro pasivo de potencia es un sistema que ha sido utilizado en la industria con el objetivo de disminuir las perturbaciones en las redes eléctricas, se pueden utilizar el filtro pasivo de dos formas ya sea reduciendo la circulación de la perturbación que genera la carga no lineal en dirección de la fuente, o reduciendo la circulación de la perturbación desde la fuente hacia la carga en el caso de que la fuente ya posea problemas con la calidad de su energía.

Además, este sistema puede proveer a la red eléctrica toda o parte de la potencia reactiva que éste necesita.

El filtro pasivo de potencia se caracteriza por estar compuesto de elementos pasivos, pudiendo ser éstos arreglos diferentes combinaciones de tipo inductivo y capacitivo dependiendo de la necesidad.

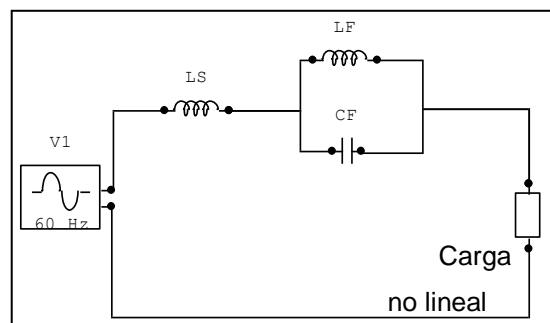
Figura 19. **Posibles combinaciones de elementos pasivos que pueden formar parte de un arreglo de un filtro pasivo**



Fuente: elaboración propia.

Cada arreglo de filtro pasivo de potencia puede poseer más de una rama de elementos pasivos ya que cada rama es sintonizada para suprimir la distorsión que ocasiona un solo armónico.

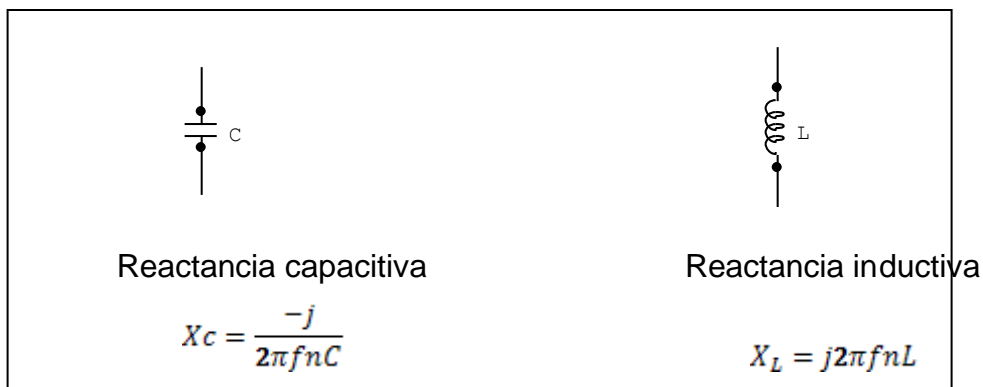
Figura 20. **Arreglo de filtro pasivo de potencia**



Fuente: elaboración propia.

Y como ya es sabido cuando los elementos capacitivos e inductivos pertenecen a un sistema eléctrico que trabaja con energía alterna estos presentan una impedancia particular al paso de la corriente en función de la frecuencia de la misma, esta impedancia se la conoce como reactancia.

Figura 21. **Funciones matemáticas para elementos pasivos utilizados en sistemas de energía alterna**



Fuente: elaboración propia.

3.4.1. Tipos de filtros pasivos de potencia

Dependiendo del tipo de distorsión armónica que se presente en nuestra red eléctrica ya sea si necesitamos suprimir los armónicos que genera alguna carga no lineal para que la distorsión que se encuentra ya en el voltaje de la fuente para que no afecte a las cargas que se necesitan conectar en la red eléctrica, existen dos configuraciones de filtro pasivo de potencia que ayudan a suprimir estos problemas.

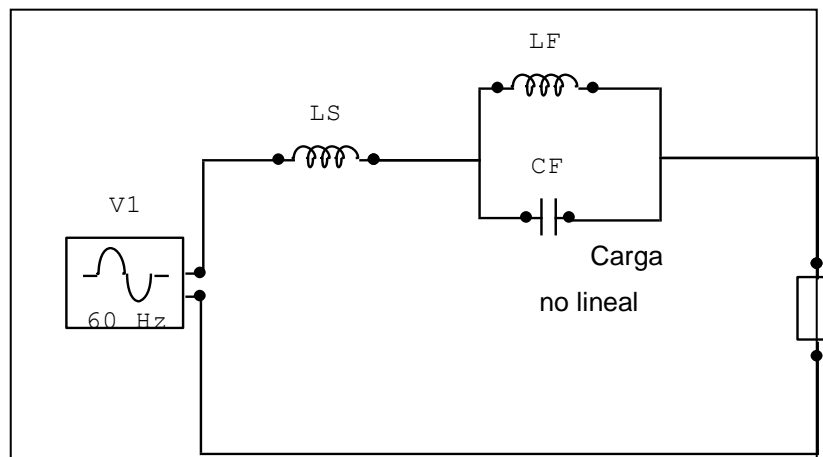
De acuerdo a la configuración del filtro y su aplicación, el filtro pasivo puede ser clasificado en dos tipos de acuerdo al propósito particular:

- Filtro serie
- Filtros *shunt* o paralelo

3.4.2. Filtros pasivos de potencia serie

Se le denomina filtro serie ya que la implementación en el circuito se realiza en serie a la carga no lineal.

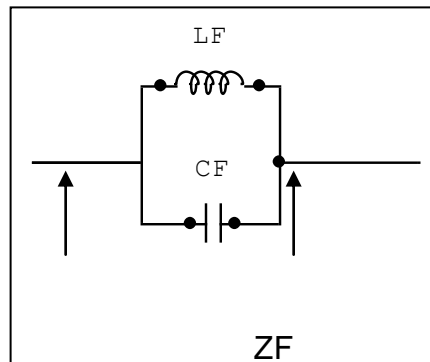
Figura 22. **Circuito monofásico con implementación de un filtro pasivo de potencia serie**



Fuente: elaboración propia.

La estructura de una rama del filtro serie consta de un elemento inductivo y un elemento capacitivo ambos conectados en paralelo.

Figura 23. **Arreglo de una sola rama de un filtro pasivo de potencia serie**



Fuente: elaboración propia.

El arreglo de la figura 22 presenta una impedancia ZF en sus terminales la cual está dada por la siguiente ecuación:

Ecuación 13. **Impedancia en las terminales del filtro pasivo de potencia serie**

$$ZF = \frac{X_{LF} * X_{CF}}{X_{LF} + X_{CF}}$$

Si el denominador de la ecuación es igualada a 0 el filtro presentaría en sus terminales un valor de impedancia infinito de esta forma podemos calcular nuestro filtro para que se comporte como un circuito abierto para la señal que tenga la frecuencia que iguale al denominador a 0 evitando así el paso de la perturbación, ecuación siguiente:

$$X_{LF} + X_{CF} = 0$$

De aquí llegamos a la ecuación para encontrar la frecuencia que hará resonar al filtro, para el caso del circuito LC paralelo resonará presentando una resistencia infinita en sus terminales, ecuación

$$\omega_n = 2 * \pi * f * n = \frac{1}{\sqrt{L * C}}$$

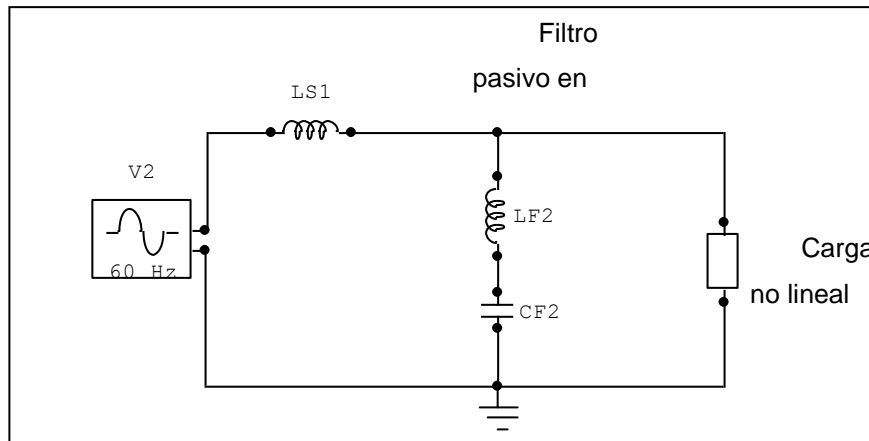
De esta forma el filtro serie evita el paso de la señal que esté compuesta por la frecuencia a la que el filtro se encuentre sintonizado disminuyendo la circulación de la perturbación de la señal que se encuentra en la fuente hasta la carga.

Los filtros series evitan el paso de una componente de frecuencia particular, desde el contaminante hacia alguna componente de la planta o parte del sistema de potencia, mediante la presencia de una gran impedancia serie a la frecuencia especificada. Éstos constan de un inductor y un capacitor en paralelo que se posicionan en serie a la parte de la red que se desea proteger.

3.4.3. Filtro pasivo de potencia *shunt* o paralelo

Se le denomina filtro *shunt* paralelo ya que la implementación en el circuito se realiza en paralelo con la carga no lineal.

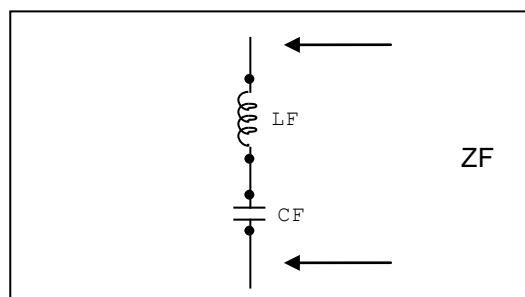
Figura 24. **Circuito monofásico con la implementación de un filtro pasivo de potencia paralelo**



Fuente: elaboración propia.

La estructura de una rama del filtro *shunt* paralelo consta de un elemento inductivo y un elemento capacitivo ambos conectados en serie.

Figura 25. **Arreglo de una sola rama de un filtro pasivo de potencia paralelo**



Fuente: elaboración propia.

El filtro *shunt* paralelo presenta una impedancia Z_F en sus terminales la cual está dada por la ecuación siguiente:

Ecuación 14. Impedancia en las terminales de un filtro pasivo en paralelo

$$Z_F = X_{LF} + X_{CF}$$

Como el objetivo del filtro *shunt* paralelo es servir como un camino de descarga hacia tierra para las señales armónicas la impedancia total del filtro debería ser 0, así tenemos la ecuación:

$$X_{LF} = X_{CF}$$

De aquí llegamos a la ecuación para encontrar la frecuencia que hará resonar el filtro, para el caso del circuito LC serie resonara presentando una resistencia mínima en sus terminales, ecuación:

$$\omega_n = 2 * \pi * f * n = \frac{1}{\sqrt{L * C}}$$

Para disminuir la perturbación de varias componentes armónicas se debe utilizar varias ramas, cada rama del filtro pasivo se debe sintonizar a una frecuencia de las corrientes armónicas que conforman la perturbación, de esta forma la rama presentara un camino de mínima impedancia para que la corriente armónica sea descargada hacia tierra, así la configuración del filtro *shunt* paralelo evita que las señales de perturbación viajen hacia la fuente, estas perturbaciones son conocidas como armónicas de corriente.

Los filtros *shunt* o paralelo proveen un paso alternativo de muy baja impedancia para las frecuencias armónicas, y consisten en una rama resonante

serie, compuesta por elementos RLC en conexión paralela con el sistema de alimentación, entre otros.

El filtro paralelo presenta mayores ventajas que el filtro serie porque: es más económico, sólo transporta las corrientes armónicas para las que fue sintonizado, proporciona una parte de la potencia reactiva al sistema.

Existe una gran variedad de configuraciones de filtros, pero las más utilizadas son los filtros sintonizados simples y los pasa altos.

El filtro sintonizado simple, elimina una armónica determinada; consiste en un banco de condensadores conectado en serie con un inductor. Para dimensionar los parámetros F C y F L del filtro se procede como sigue:

$$\omega_h = 2\pi fh$$

Donde, h es el armónico al cual se quiere sintonizar, ω es la frecuencia angular y f es la frecuencia fundamental.

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{|V|^2}{Q_c}$$

Donde, X_c es la reactancia capacitiva, Q_c es el valor de la potencia reactiva que el filtro va a suministrar en cada rama, V es la tensión nominal del sistema eléctrico del cliente.

$$C_F = \frac{1}{2\pi f X_c}$$

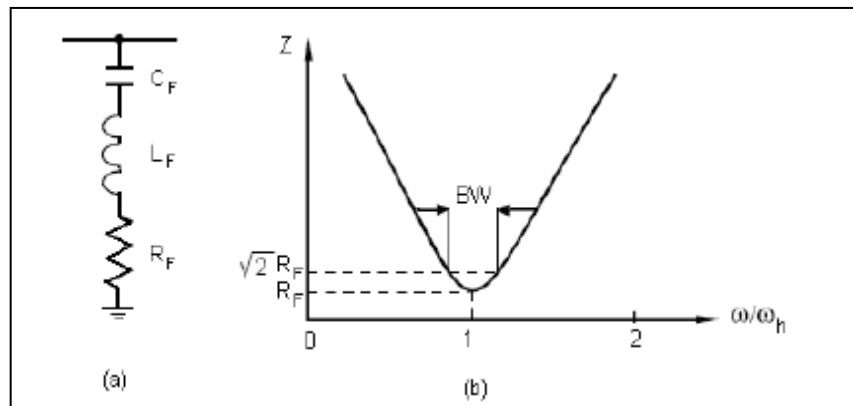
$$L_F = \frac{1}{4\pi^2 f^2 h^2 C_F}$$

$$X_{Lh} = \omega_h L_F$$

$$Q = \frac{X_{Lh}}{R_F}$$

Donde: C_F y L_F es la capacitancia e inductancia del filtro, Q es el factor de calidad del filtro, X_{Lh} es la reactancia a la frecuencia h, R_F la resistencia interna del inductor.

Figura 26. a) Filtro sintonizado simple b) Comportamiento en frecuencia



Fuente: Gers S.A. *Teoría y diseño de filtros de armónicos en sistemas eléctricos*. p. 12.

Por lo expuesto en a figura 25, un filtro pasivo en derivación está sintonizado a la frecuencia que iguala sus reactancias inductiva y capacitiva.

Como muestra la figura 25 (b), el ancho de banda de paso BW, es el grupo de frecuencias limitado por los puntos donde la reactancia iguala a la

resistencia, es decir, cuando el ángulo de la impedancia es de 45° y su módulo $2 R$.

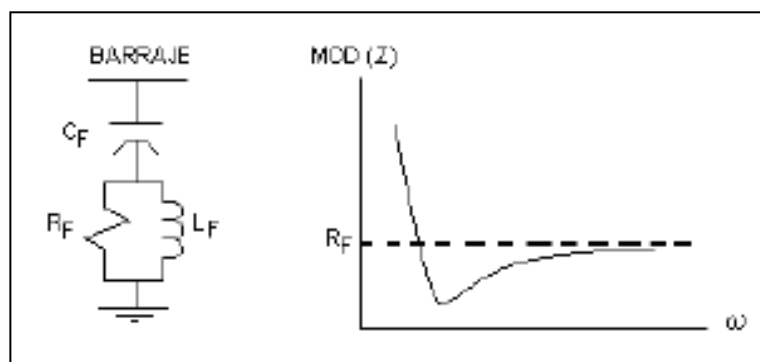
Otra forma de representar (la figura 26) es a través de la relación:

$$Q = \frac{\omega_h}{BW}$$

Siendo ω_h , la pulsación correspondiente a la frecuencia de sintonización; como muestra (figura 27) cuanto mayor es el factor de calidad, más reducido es el paso de banda. El factor de calidad del filtro, Q , determina la efectividad de la sintonización; los filtros de Q elevado están sintonizados a una armónica baja - como tercera o quinta-, siendo sus valores típicos de Q de 30 a 60.

Los filtros de Q reducido entre 0,5 y 5 presentan impedancias bajas para un gran ancho de banda y se les denomina Filtros Pasa Altos (pasa banda). La figura 26 muestra éste filtro, junto con su respuesta en frecuencia.

Figura 27. **a) Filtro pasa alto b) Comportamiento de la frecuencia**



Fuente: Gers S.A. *Teoría y diseño de filtros de armónicos en sistemas eléctricos*. p. 13.

Cuando la impedancia de la red sufre variaciones considerables, no es recomendable el uso de filtros de elevado factor de calidad; en su lugar, son aconsejables los de paso de banda, que poseen una mayor atenuación, aunque tienen el inconveniente de que aumentan las pérdidas a la frecuencia fundamental. De cualquier modo, un filtro pasivo está condicionado a la red externa, tanto a la carga como a la topología de la red de suministro- y, por tanto, un diseño ajustado a todos los regímenes de trabajo es muy difícil de lograr.

3.4.4. Problemas del filtro pasivo de potencia

El filtro pasivo no se adapta al circuito si la carga no lineal cambiara su comportamiento, produciéndose ineficiencias en la supresión de las corrientes armónicas.

El comportamiento del filtro pasivo es afectado por la impedancia de la fuente, la que cambia al variar la topología de la red, esto ocasiona cambios en la frecuencia de resonancia del filtro y hasta problemas ocasionado que el filtro se sintonice a 60 Hz, ecuación:

Ecuación 15. Frecuencia de resonancia de un filtro

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_s + L_F) * C}}$$

3.4.5. Ventajas del filtro pasivo de potencia

Los filtros pasivos tienen la tecnología simple, conocida y de costo razonable para la aplicación en las instalaciones eléctricas.

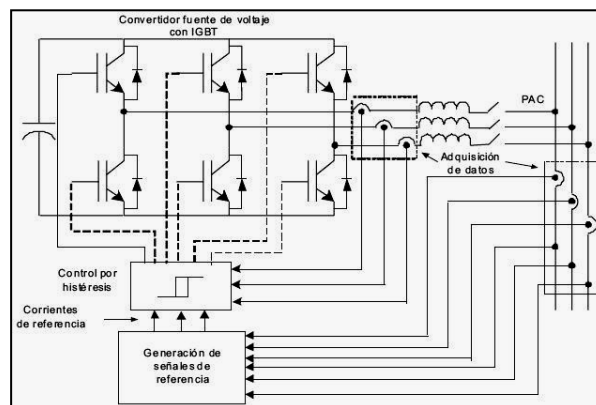
3.5. Filtros activos

Para contrarrestar una situación de una mayor contaminación de la red eléctrica se puede utilizar un sistema más eficiente que los filtros pasivos, un sistema muy efectivo utilizado cada vez más en la actualidad es el Filtro Activo de Potencia, el mismo que en los últimos años ha a tenido un gran desarrollo.

El filtro activo de potencia es un sistema compuesto por un generador de señales eléctricas comúnmente conocido como inversor, además forma parte del sistema de control electrónico que se encarga de indicar al inversor que forma de onda debe generar.

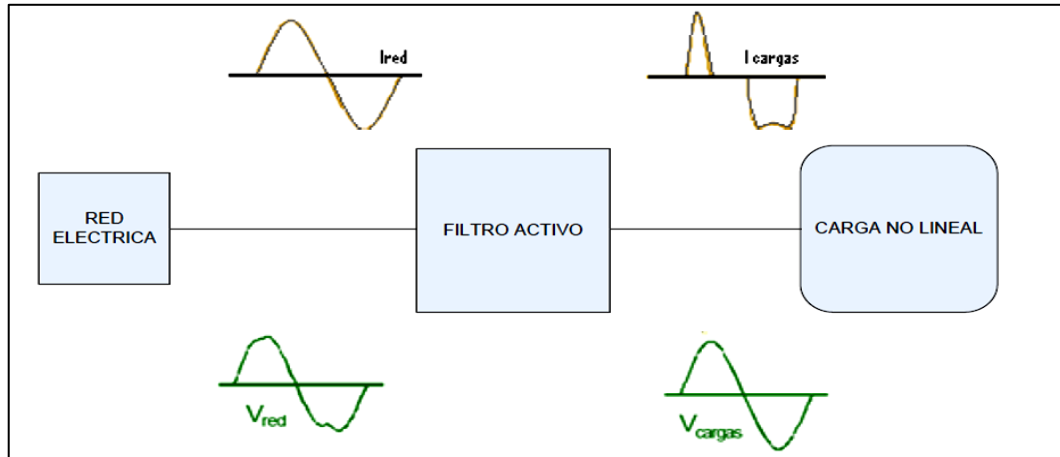
El propósito de un filtro activo es el de reducir los problemas de forma que la corriente que circule por la red eléctrica sea sinusoidal y que la tensión aplicada a las cargas también lo sea (filtro activo figura 27), mejorándose así la eficiencia del sistema eléctrico aguas arriba del punto de conexión del compensador.

Figura 28. Diagrama general del filtro activo de corriente



Fuente: <http://www.scielo.org.mx>. Consulta: junio de 2012.

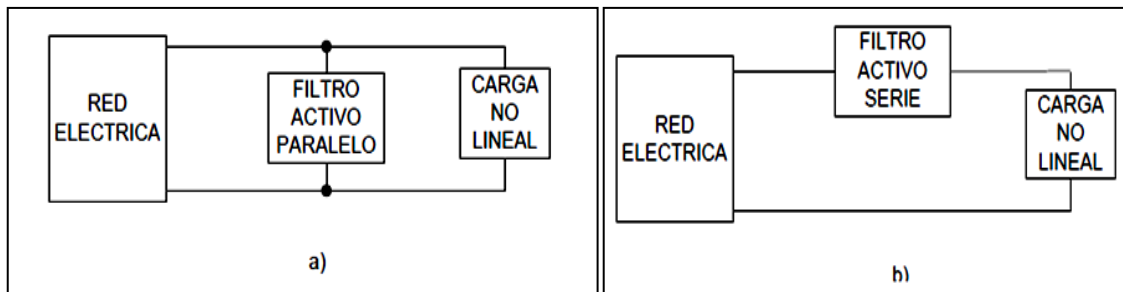
Figura 29. Representación de la operación de un filtro activo



Fuente: <http://www.scielo.org.mx>. Consulta: junio de 2012.

Al igual que los filtros pasivos los filtros activos también se pueden clasificar en filtros activos serie y filtros activos paralelo.

Figura 30. a) Bosquejo de la conexión de un filtro activo de potencia paralelo b) Bosquejo de la conexión de un filtro activo de potencia serie



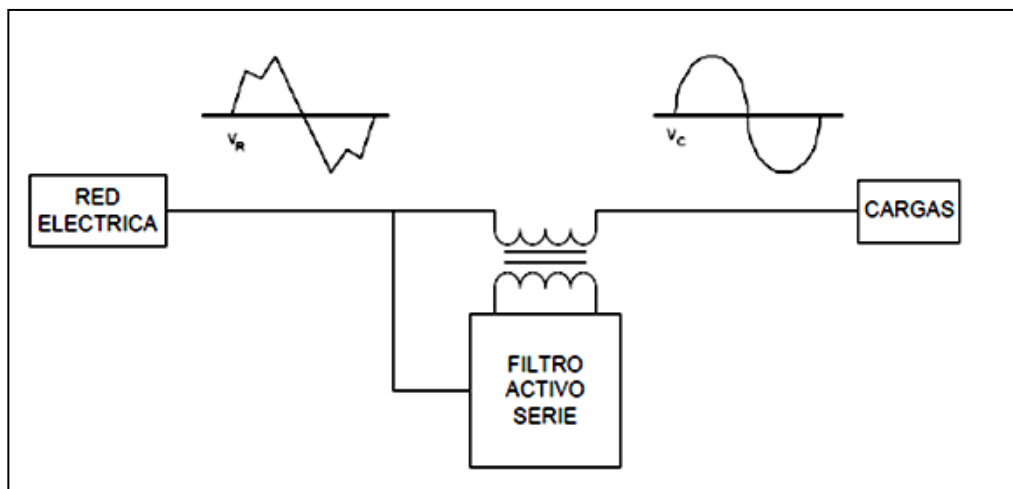
Fuente: <http://www.scielo.org.mx>. Consulta: junio de 2012.

Como se puede apreciar en el gráfico la denominación del filtro depende de si este se encuentra conectado en serie o en paralelo a la carga.

3.5.1. Filtros activos de potencia serie

Cuando en nuestra red eléctrica el voltaje está muy distorsionado causado por componentes armónicas lo recomendable es utilizar un filtro activo de tipo serie el cual compensara la red a la fuente de armónicos entregando a la carga un voltaje únicamente con la componente fundamental,

Figura 31. **Representación gráfica de la acción de un filtro activo de potencia serie**



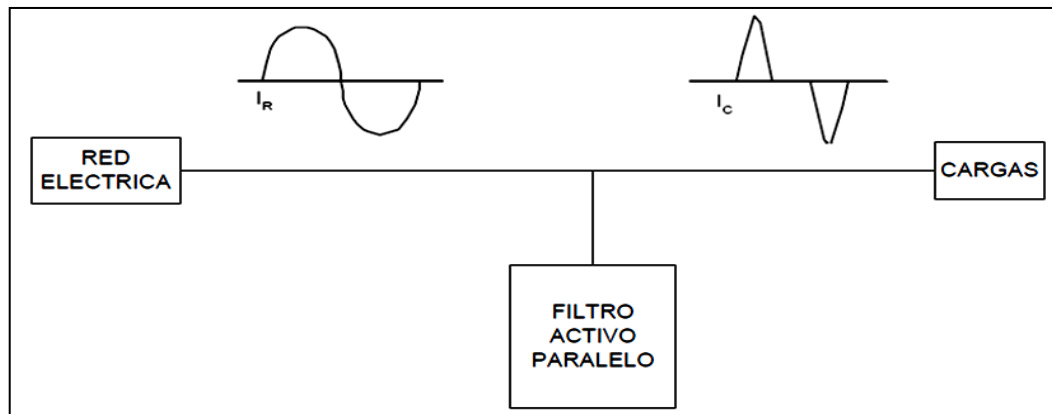
Fuente: <http://www.scielo.org.mx>. Consulta: junio de 2012..

Este filtro también posee la característica de bloquear el paso hacia la fuente de las corrientes armónicas que se generan en la carga.

3.5.2. Filtro activo de potencia paralelo

Cuando tenemos una carga no lineal que genera una distorsión armónica de corriente es necesario utilizar un filtro activo paralelo:

Figura 32. Representación gráfica de la acción de un filtro activo de potencia paralelo

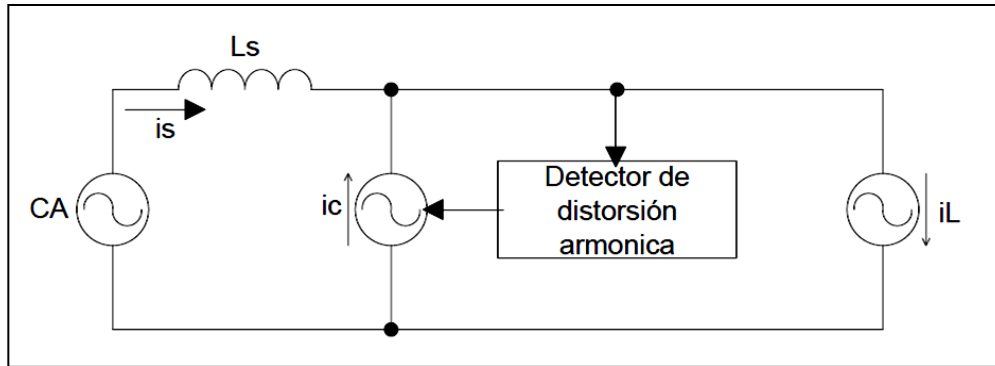


Fuente: <http://www.scielo.org.mx>. Consulta: junio de 2012.

Un sistema de filtro activo paralelo puede ser modelado como una fuente de corriente contratada que suministra una intensidad de compensación en paralelo con la carga.

Este tipo de filtro paralelo posee una etapa de control que toma una referencia de la intensidad no eficiente que es generada por la carga no lineal, esta señal de referencia es procesada inmediatamente para que controle un circuito de potencia que genere las corrientes de compensación.

Figura 33. Configuración eléctrica de un filtro activo de potencia paralelo



Fuente: <http://www.scielo.org.mx>. Consulta: junio de 2012.

Al generar las corrientes el compensador activo, evita así que dichas corrientes circulen por el resto del sistema eléctrico de distribución aumentando así la capacidad del mismo para transportar energía útil.

3.5.3. Análisis electrotécnico del filtro activo de potencia paralelo

La corriente en la carga i_L puede dividirse en 2 componentes, ecuación:

$$i_L = i_a(t) + i_b(t)$$

Donde:

$i_a(t)$ = componente activa y corresponde a la corriente sinusoidal que produce la potencia activa consumida por la carga.

Esta corriente está en fase con la tensión y por ello tiene la expresión, ecuación:

$$i_a(t) = \sqrt{2} * i_{aef} * \text{sen}(wt)$$

La corriente activa se calcula en base a la potencia activa de la carga, ecuación:

$$i_{aef} = \frac{P}{V_{sef}}$$

Por otra parte, $i_b(t)$ es la corriente de distorsión y representa a toda aquella componente de la corriente que no contribuye a la transferencia de energía neta hacia la carga. La situación más favorable para la red es cuando se cumple que:

$$i_s(t) = i_a(t)$$

Ya que en este caso la red entrega solamente potencia activa, lo que significa operación con factor de potencia unitario, teniendo la corriente que circula en la carga:

$$i_L(t) = i_s(t) + i_c(t)$$

Siendo la corriente que entrega el filtro activo de potencia igual a la corriente de distorsión que se produce en la carga no lineal:

$$i_c(t) = i_b$$

Cuando se cumple la relación anterior, el filtro activo inyecta la componente de distorsión de la corriente y la fuente de alimentación entrega solamente la componente activa, lo que equivale a que el conjunto del compensador más la carga, se comporte como una carga resistiva.

3.5.4. Ventajas de los filtros activos de potencia

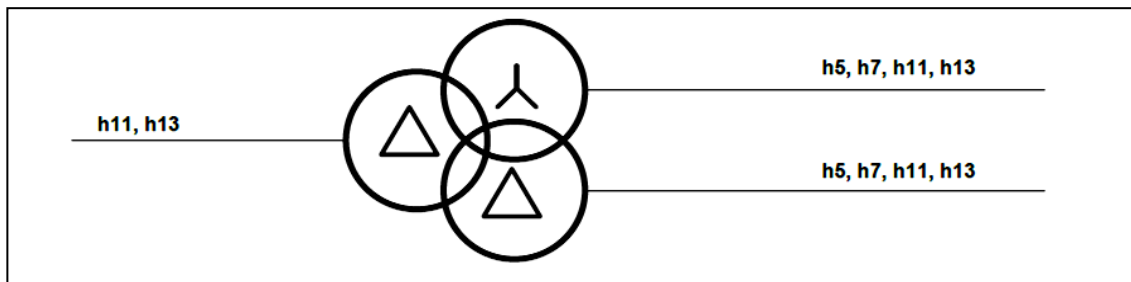
A diferencia de los filtros pasivo los filtros activos de potencia al estar compuestos por una fuente de corriente controlada pueden suministrar corrientes de cualquier amplitud, fase y frecuencia pudiendo adaptarse a las condiciones cambiantes de la carga y de la propia red eléctrica sin producir resonancia con el filtro.

3.6. Uso de transformadores con conexiones especiales

Para eliminar ciertos órdenes de armónicos, se utilizan algunos tipos de conexiones especiales en los transformadores. Los órdenes de armónicos eliminados dependen del tipo de conexión implementada.

- Una conexión delta-estrella-delta elimina los armónicos de orden 5 y 7
- Una conexión delta-zigzag elimina los armónicos de orden 5 (por retorno en el circuito magnético).

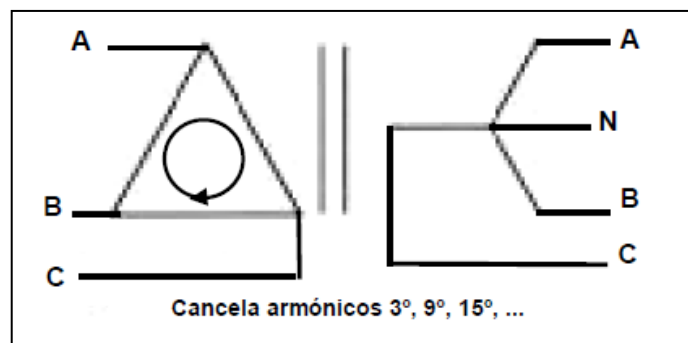
Figura 34. **La utilización de un transformador delta-estrella-delta previene la propagación de armónicos de órdenes 5 y 7 aguas arriba de la red de distribución**



Fuente: <http://www.scielo.org.mx>. Consulta: junio de 2012.

En los transformadores triángulo–estrella las corrientes *triplen* se suman en el conductor neutro. En el primario, los *triplen* de las cargas desequilibradas salen por los conductores y los de las cargas equilibradas quedan atrapados en los bobinados del triángulo. Aunque esto podría utilizarse para eliminar los *triplen* equilibrados, solo es válido en determinadas aplicaciones por los problemas que genera la recirculación por el triángulo de dichas corrientes.

Figura 35. **Configuración de transformadores triángulo – estrella**



Fuente: <http://www.scielo.org.mx>. Consulta: junio de 2012.

4. INFLUENCIA DE CARGAS NO LINEALES EN HOSPITALES

Luego de analizar de forma general el impacto de las cargas no lineales en los transformadores, se inicia en el presente capítulo el análisis específico de dichas cargas en hospitales.

4.1. Descripción del proyecto

Ante la alta distorsión armónica detectada en las cargas conectadas a la red de distribución, se vio la necesidad de estudiar la influencia que tienen las distintas cargas sobre los bancos de transformación, debida a una carga no lineal de gran porte y la consecuencia técnico-económica generada por la misma, surgió la necesidad de desarrollar un proyecto que contemple los siguientes puntos:

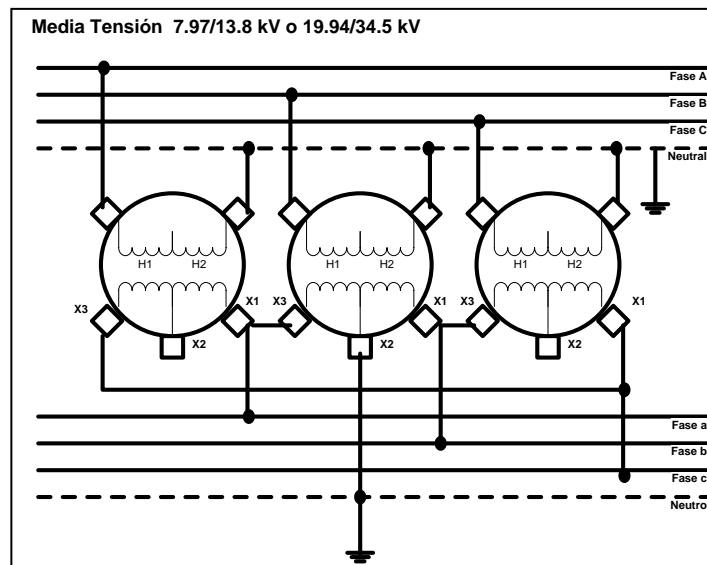
- Una base teórica previa para el entendimiento del fenómeno de distorsión armónica, las consecuencias y las técnicas de atenuación de los mismos, como también la comprensión de la filosofía de la normativa local que contempla los límites a los cuales debería mantenerse la distorsión armónica.
- Uno de los problemas principales de la calidad de potencia, son las armónicas. Una onda periódica puede expresarse como la suma de una serie infinita de señales senoidales. Los componentes de armónicas son señales de frecuencia, múltiplo de la frecuencia original.

- La presencia de altos índices de distorsión armónicas en la red produce varias consecuencias negativas como: sobrecalentamientos de transformadores, motores y cables, sobrecargas en el conductor neutro, impactos en las protecciones, equipos de maniobras y medidoras de energía, resonancia y también importantes pérdidas económicas y merma de productividad a ciertos sectores de la industria.

4.2. Tipos de conexiones utilizados en los bancos de transformación de hospitales

Las conexiones de transformadores generalmente utilizadas en las instalaciones Hospitalarias son: conexión trifásica estrella-delta, estrella-estrella, para las cargas trifásicas generalmente se utiliza un sistema estrella-delta (ver figura 36)

Figura 36. Conexión de banco de transformación trifásico estrella-delta



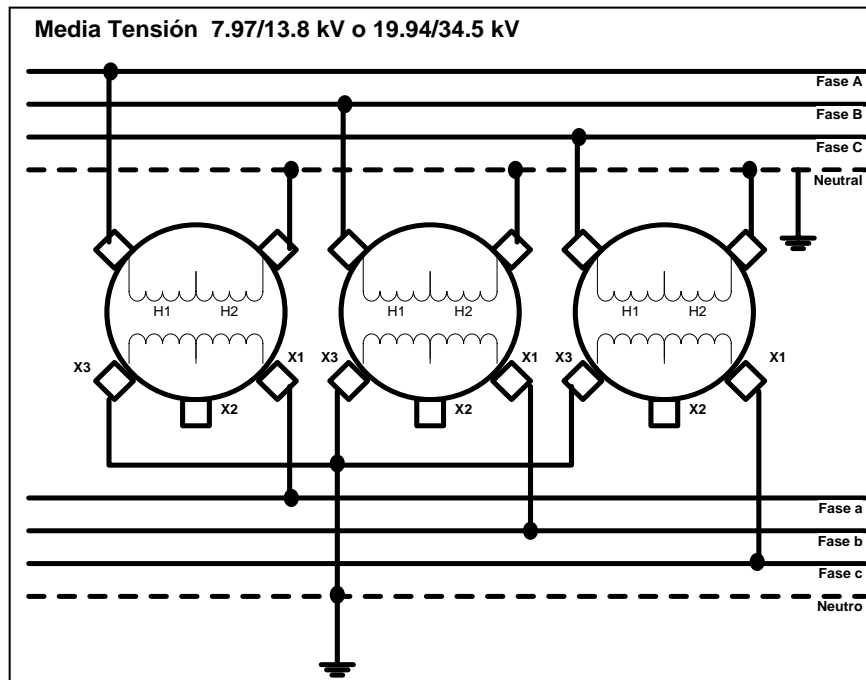
Fuente: elaboración propia con programa Visio.

Esta conexión se utiliza cuando la carga es predominantemente trifásica, con una componente moderada de carga monofásica y se utiliza usualmente en Instalaciones Industriales. De esta se obtienen los siguientes voltajes:

- $V_{ab} = V_{ac} = V_{bc} = 240 \text{ V}$
- $V_{an} = V_{bn} = 120 \text{ V}$
- $V_{cn} = 207 \text{ V}$

Para las cargas monofásicas generalmente se utiliza un sistema estrella-estrella (ver figura 37)

Figura 37. **Conexión de banco de transformación trifásico estrella-estrella**



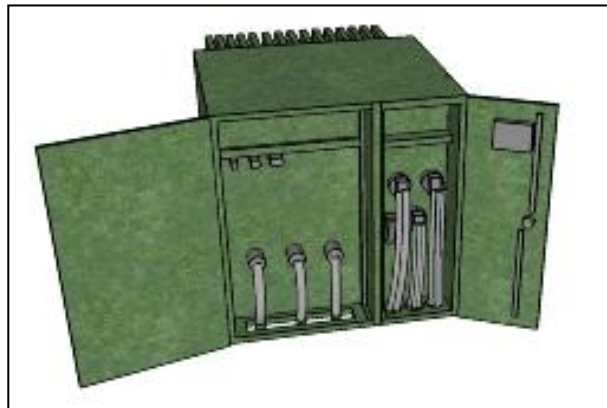
Fuente: elaboración propia con programa Visio.

Esta conexión se utiliza cuando la carga es predominantemente monofásica, con una componente moderada de carga trifásica. Ésta podría decirse que es la configuración más utilizada.

- $V_{ab} = V_{ac} = V_{bc} = 208 \text{ V}$
- $V_{an} = V_{bn} = V_{cn} = 120 \text{ V}$

En las instalaciones hospitalarias conectadas a la red de distribución, también son utilizados los transformadores tipo pad mounted con los voltajes y conexiones antes descritas. Estos transformadores tienen capacidad desde 75 kVA hasta 5 000 kVA, conectados en 13,8 kV y 34,5 kV.

Figura 38. **Transformador *pad mounted***



Fuente: <http://www.alfatransformer.com/pad.htm>. Consulta: junio de 2012

4.3. Tipos de cargas en hospitales

Para poder estudiar los efectos que las cargas tienen sobre los bancos de transformación, se necesita conocer que cargas están conectadas al banco de transformación.

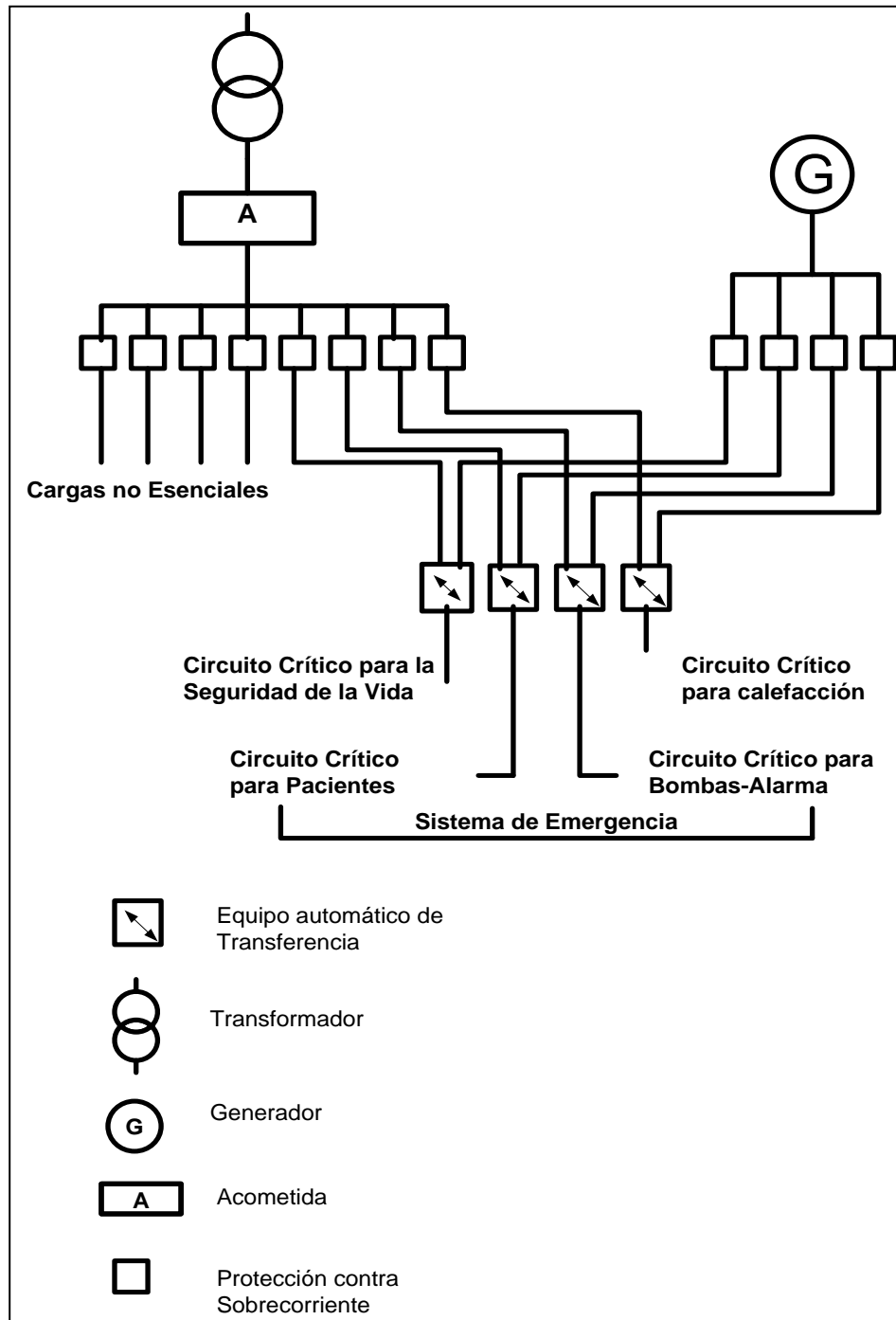
Los principales equipos consumidores de energía eléctrica en los hospitales son los siguientes:

- Equipo para medir signos vitales
- Equipo de cómputo
- Televisores
- Aires acondicionados
- Motores eléctricos (electrobombas, ascensores, compresoras, ventiladores, extractores, lavadoras, secadoras, calandrias, entre otros).
- Lámparas de iluminación (fluorescentes, incandescentes, de descarga, etc.).
- Calentadores de agua (termas, duchas, hervidores, etc.)
- Hornos eléctricos
- Cocinas eléctricas
- Equipos de frío (conservadoras, refrigeradoras)
- Esterilizadores
- Equipos electromédicos (rayos X, tomógrafos, artroscopio, etc.).

Se observa que las cargas conectadas en los hospitales, cuentan con cargas no lineales como lo son: los equipos electromédicos, lámparas de iluminación fluorescentes, lámparas de descarga, equipo de cómputo, estas generan armónicos los cuales se estudiarán en este capítulo.

En la figura 39 se observa el circuito típico de alimentación de un Hospital en el cual se observan los distintos elementos que lo conforman, estos sirven para mantener un servicio continuo, lo cual es muy importante en este tipo de instalaciones.

Figura 39. Circuito típico de alimentación de hospitales



Fuente: elaboración propia con programa Visio.

4.4. Análisis de armónicos

En función de la metodología desarrollada en este trabajo, consistente en la medición de campo, clasificación de las distintas armónicas dependiendo de las instalaciones de los clientes y la presentación de soluciones para los efectos que los armónicos producen. Con este tema se benefician todos aquellos estudiantes y profesionales interesados en la investigación de la calidad de energía, específicamente las armónicas, adicional a los beneficios que este le darán a las empresas distribuidoras de electricidad y a los propios usuarios en este caso los hospitales, ya que podrán mitigar los impactos de los armónicos en sus bancos de transformación.

El caso de análisis de armónicos en hospitales, representa un análisis importante para el constante crecimiento de las cargas con características no lineales, en cuanto a la distorsión armónica, y las consecuencias técnicas y económicas negativas generadas por los mismos. Esta experiencia nos demuestra la necesidad de establecer criterios de análisis y propuestas de solución económicamente viables, a futuros problemas del mismo ámbito a nivel hospitalario, como también de las distribuidoras locales de electricidad.

Para este estudio se realizaron mediciones de calidad de energía experimentales, en los bancos de transformación de hospitales que se localizan en varios departamentos de la República de Guatemala.

Para realizar las mediciones se utilizaron equipos QNA 412 marca Circutor los cuales son utilizados por la distribuidora Energuate para medir la calidad de energía de los clientes conectados a su red de distribución. (En el apéndice B se encuentran las características técnicas de los equipos utilizados)

Tal como se estudió en el capítulo uno, las cargas no lineales producen armónicos de corriente, los cuales se estudiarán en el siguiente análisis, ya que el trabajo está orientado a los efectos que estos producen en los bancos de transformación.

Se analizarán los efectos de las cargas no lineales característicos de las instalaciones eléctricas en los bancos de transformación de 10 hospitales.

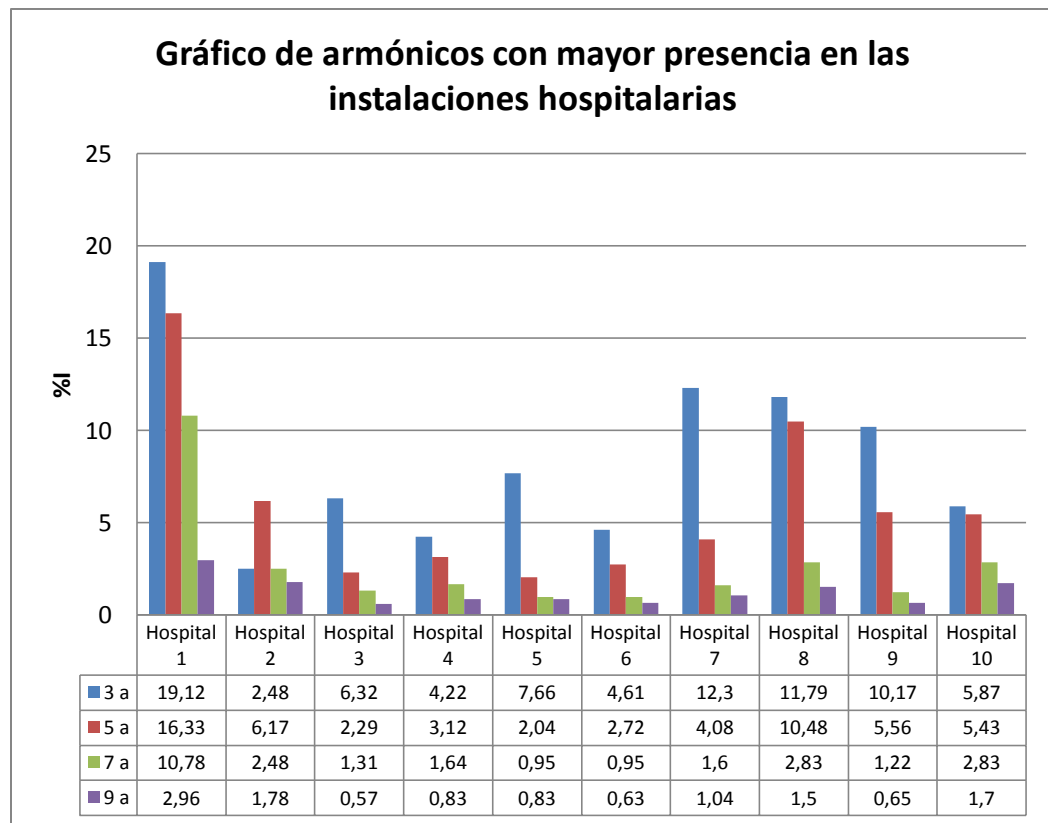
Tabla X. **Hospitales estudiados**

No.	Hospitales Estudiados
1	Hospital Médico Bethesda
2	Hospital Poptún
3	Hospital Sayaxche
4	Hospital de Escuintla
5	Hospital de Retalhuleu
6	Hospital Nacional Mazatenango
7	Hospital Nacional Felipe Flores
8	Hospital Nacional Santa Elena
9	Hospital Nacional Sololá
10	Hospital Nacional Uspantán

Fuente: elaboración propia.

En el apéndice A, se observan las gráficas de los armónicos de corriente promedio, para cada una de las instalaciones, de los cuales se obtuvo la figura 40.

Figura 40. **Gráfico de armónicos con mayor presencia en instalaciones hospitalarias**



Fuente: elaboración propia.

Al verificar los armónicos de este tipo de instalaciones podemos observar que la armónica de mayor presencia en estas instalaciones es el 3° armónico, seguido del 5°, 7° y 9°.

4.5. Límites de distorsión armónica

Luego de clasificar el contenido armónico de las mediciones realizadas en los hospitales, se procede a realizar las comparaciones respecto a los límites de tolerancia establecidos según la normativa vigente NTSD. En las tablas XI y XII se describen los armónicos medidos y los límites de tolerancia, con el fin de hacer un comparativo.

Tabla XI. Espectro de armónicos industrias estudiadas (3ª a la 21ª)

Hospital	3 a	5 a	7 a	9 a	11 a	13 a	15 a	17 a	19 a	21 a
Hospital 1	19,12	16,33	10,78	2,96	1,35	0,99	0,60	0,86	0,79	0,21
Hospital 2	2,48	6,17	2,48	1,78	1,58	1,25	0,54	0,35	0,35	0,40
Hospital 3	6,32	2,29	1,31	0,57	0,59	0,23	0,15	0,10	0,06	0,06
Hospital 4	4,22	3,12	1,64	0,83	0,66	0,68	0,32	0,20	0,19	0,17
Hospital 5	7,66	2,04	0,95	0,83	0,76	0,39	0,38	0,43	0,23	0,17
Hospital 6	4,61	2,72	0,95	0,63	0,32	0,23	0,14	0,06	0,05	0,04
Hospital 7	12,30	4,08	1,60	1,04	0,91	0,85	0,36	0,31	0,25	0,08
Hospital 8	11,79	10,48	2,83	1,50	1,02	0,77	0,46	0,28	0,21	0,18
Hospital 9	10,17	5,56	1,22	0,65	0,60	0,54	0,29	0,21	0,14	0,14
Hospital 10	5,87	5,43	2,83	1,70	1,17	0,75	0,59	0,50	0,42	0,37
Limites según NTSD	16,60	12,00	8,50	2,20	4,30	3,00	0,60	2,70	1,90	0,40

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. Espectro de armónicos industrias estudiadas (23ª a la 39ª)

Hospital	23 a	25 a	27 a	29 a	31 a	33 a	35 a	37 a	39 a	THDi
Hospital 1	0,47	0,11	0,06	0,11	0,01	0,01	0,06	0,02	0,01	30,07
Hospital 2	0,67	0,41	0,21	0,17	0,12	0,14	0,04	0,03	0,08	8,32
Hospital 3	0,04	0,04	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,34
Hospital 4	0,18	0,11	0,07	0,06	0,04	0,04	0,01	0,01	0,01	6,56
Hospital 5	0,15	0,14	0,08	0,05	0,07	0,04	0,01	0,01	0,01	8,62
Hospital 6	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	5,75
Hospital 7	0,09	0,12	0,04	0,05	0,03	0,01	0,02	0,02	0,00	13,97
Hospital 8	0,15	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	17,06
Hospital 9	0,10	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,02	12,05
Hospital 10	0,36	0,36	0,27	0,22	0,21	0,14	0,13	0,11	0,08	9,39
Limites según NTSD	1,60	1,6	0,3	0,89	0,85	0,30	0,77	0,74	0,30	20,00

Fuente: elaboración propia.

Al hacer el comparativo de las armónicas respecto a los límites de tolerancia; la armónica que se encuentra con mayor presencia es la 3° seguida de la 5° y 7° sin embargo se encuentran dentro de tolerancia para 9 de los 10 casos.

4.6. Cálculo de factor K

Existen varios procedimientos para seleccionar un transformador teniendo en cuenta las pérdidas adicionales. El primero, establecido en Estados Unidos por los fabricantes de transformadores de acuerdo con los Laboratorios Underwriters, consiste en calcular el factor de incremento de las pérdidas debidas a corrientes parásitas y diseñar el transformador de forma que se ajuste a él. Este factor de incremento es el que se conoce como el K-factor

$$K = \sum_{h=2}^{h=h_{max}} h^2 I_h^2$$

Donde:

h = Orden del armónico

I_h = Fracción de la corriente eficaz total de correspondiente al h-ésimo armónico

Muchos dispositivos de medida de calidad de la energía miden directamente el K-factor de la corriente de la carga. Una vez que se conoce el K-factor de la carga, resulta sencillo especificar un transformador que presente una clasificación del K-factor superior, tomada de entre las de la gama estándar: 4, 9, 13, 20, 30, 40, 50. Obsérvese que una carga lineal pura, aquella que produce una corriente sinusoidal tendría un K-factor igual a la unidad. Un

K-factor mayor indica que las pérdidas por corrientes parásitas en el transformador serán K veces mayor que el valor a la frecuencia fundamental.

Los transformadores con clasificación de K-factor están diseñados, por lo tanto, para tener unas pérdidas por corrientes parásitas muy bajas a la frecuencia fundamental.

- El factor K: el segundo método, utilizado en Europa, consiste en estimar cuánto debe desclasificarse un transformador estándar de modo que las pérdidas totales en la carga armónica no superen las pérdidas a la frecuencia fundamental para la cual se ha diseñado el transformador, en Guatemala actualmente no se le da importancia a este parámetro ya que no es muy conocido, sin embargo es de gran importancia. Esta magnitud es lo que se conoce como factor K y se calcula por la fórmula:

$$K = \sqrt{\left[1 + \frac{e}{1+e} \left(\frac{I_1}{I}\right)^2 \sum_{h=2}^{h_{max}} \left(h^q \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2\right)\right]}$$

- Pérdidas adicionales en presencia de armónicos de corriente: si se conoce el espectro de armónicos, o puede medirse, o predecirse, se pueden calcular con facilidad las pérdidas adicionales. En principio el proceso de cálculo es el siguiente:
 - Se determinan todas las componentes adicionales de pérdidas debidas a la presencia de armónicos.
 - Se determina el espectro de armónicos, bien sea por medio de mediciones o por estimación, teniendo en cuenta todos los

equipos generadores de armónicos esencialmente los convertidores electrónicos.

- Se calcula la contribución de cada armónico y se determina la pérdida adicional total.

En la tabla (XIII) se muestran las pérdidas adicionales calculadas para corrientes armónicas hasta el orden 39 para el banco de transformación del Hospital Bethesda, para el cual se tomaron los valores resultantes de la medición de calidad de energía que se muestran en la tabla (XI)

Tabla XIII. **Cálculo de factor K caso hospitalario**

Armónico n°	$\frac{I_h}{I_1}$	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$	$\frac{I_h}{I}$	$\left(\frac{I_h}{I}\right)^2$	$\left(\frac{I_h}{I}\right)^2 * h^2$
1	1	1	0,963940236	0,929180778	0,92918078
3	0,191177258	0,036548744	0,184283451	0,03396039	0,30564351
5	0,163347938	0,026682549	0,15745765	0,024792911	0,61982279
7	0,107814134	0,011623887	0,103926382	0,010800693	0,52923395
9	0,029634998	0,000878233	0,028566367	0,000816037	0,06609902
11	0,013536353	0,000183233	0,013048235	0,000170256	0,02060103
13	0,009907429	9,81571E-05	0,009550169	9,12057E-05	0,01541377
15	0,006020411	3,62454E-05	0,005803317	3,36785E-05	0,00757766
17	0,008600957	7,39765E-05	0,008290809	6,87375E-05	0,01986514
19	0,007869557	6,19299E-05	0,007585782	5,75441E-05	0,02077342
21	0,002073545	4,29959E-06	0,001998774	3,9951E-06	0,00176184
23	0,004713996	2,22218E-05	0,00454401	2,0648E-05	0,01092281
25	0,001120326	1,25513E-06	0,001079927	1,16624E-06	0,0007289
27	0,000591117	3,49419E-07	0,000569801	3,24673E-07	0,00023669
29	0,001148316	1,31863E-06	0,001106908	1,22525E-06	0,00103043
31	0,000117539	1,38155E-08	0,000113301	1,28371E-08	1,2336E-05
33	0,000144223	2,08004E-08	0,000139023	1,93273E-08	2,1047E-05
35	0,000598925	3,58712E-07	0,000577328	3,33308E-07	0,0004083
37	0,00018729	3,50774E-08	0,000180536	3,25932E-08	4,462E-05
39	0,00010706	1,14619E-08	0,0001032	1,06502E-08	1,6199E-05
	Σ1	1,07621684	---	Σ2	2,54939423

Fuente: elaboración propia.

Se encuentra la sumatoria de los cuadrados de las armónicas respecto a fundamental, columna 3.

$$\Sigma 1 = 1,07621$$

Cuando se tiene la sumatoria de los cuadrados de las armónicas respecto a la fundamental se procede a encontrar la raíz cuadrada, para encontrar la corriente eficaz.

$$I_{\text{eficaz total}} = \sqrt{1,0762} = 1,0374 = I$$

Con la corriente eficaz calculada se procede a sustituirla en la comuna 4, 5 y 6 de la tabla anterior, con lo cual la sumatoria de la columna 6 será el factor de desclasificación K.

$$K - \text{factor} = 2,5493$$

Como se menciona anteriormente para este ejemplo se podría decir que las perdidas por corrientes parásitas en el transformador de este hospital serán 2,54 veces superiores, en comparación a que si se estuviera trabajando con una corriente senoidal pura de 60 Hz.

Se realizó el mismo cálculo para los 10 hospitales quedando los resultados de las tablas siguientes:

Tabla XIV. **Resultados de cálculos de factor K en hospitales estudiados**

No.	Hospitales estudiados	K-factor
1	Hospital Médico Bethesda	2,54939423
2	Hospital Poptún	1,2544167
3	Hospital Sayaxché	1,05935372
4	Hospital de Escuintla	1,07382134
5	Hospital de Retalhuleu	1,08857529
6	Hospital Nacional Mazatenango	1,04305443
7	Hospital Nacional Felipe Flores	1,20535929
8	Hospital Nacional Santa Elena	1,44012323
9	Hospital Nacional Sololá	1,17536439
10	Hospital Nacional Uspantán	1,23211987

Fuente: elaboración propia.

4.7. Cálculo de la desclasificación del transformador

Para ejemplificar el cálculo se tomarán los datos de las tablas XI y XII vistas anteriormente, para encontrar el valor K de los bancos de transformación de los hospitales estudiados.

El primer paso para determinar el factor K (tabla XV) es encontrar el valor de (e) , la relación entre las pérdidas por corrientes parásitas y las pérdidas totales en la carga a la frecuencia fundamental. Este dato debe proporcionarlo el fabricante del transformador, en caso contrario, es probable que se encuentre entre 0,05 y 0,1. El valor del exponente (q) depende mucho de la construcción del transformador y también es un dato que debería ser proporcionado por el fabricante. Es probable que el valor de q se encuentre entre 1,5 y 1,7. Como en el caso anterior los cálculos están basados en los valores teóricos $e = 0,1$ y $q = 1,7$.

Tabla XV. **Cálculo de desclasificación del transformador caso hospitalario**

Armónico No.	$\frac{I_k}{I_1}$	$\left(\frac{I_k}{I_1}\right)^2$	h^q	$\left(\frac{I_k}{I_1}\right)^2 * h$
1	1	1	1	1
3	0,191177258	0,036548744	6,47300784	0,236580307
5	0,163347938	0,026682549	15,42584657	0,411600903
7	0,107814134	0,011623887	27,33170144	0,317700622
9	0,029634998	0,000878233	41,8998305	0,036797818
11	0,013536353	0,000183233	58,93422336	0,010798685
13	0,009907429	9,81571E-05	78,28953236	0,007684677
15	0,006020411	3,62454E-05	99,85162577	0,003619158
17	0,008600957	7,39765E-05	123,5273618	0,009138117
19	0,007869557	6,19299E-05	149,2385846	0,009242334
21	0,002073545	4,29959E-06	176,9183177	0,000760676
23	0,004713996	2,22218E-05	206,5082095	0,004588975
25	0,001120326	1,25513E-06	237,9567423	0,000298667
27	0,000591117	3,49419E-07	271,2179313	9,47687E-05
29	0,001148316	1,31863E-06	306,2503519	0,000403831
31	0,000117539	1,38155E-08	343,0163959	4,73895E-06
33	0,000144223	2,08004E-08	381,4816899	7,93497E-06
35	0,000598925	3,58712E-07	421,6146329	0,000151238
37	0,00018729	3,50774E-08	463,3860238	1,62544E-05
39	0,00010706	1,14619E-08	506,7687567	5,80856E-06
---	---	$\sum 1 = 1,0762$	---	$\sum 2 = 2,0494$

Fuente: elaboración propia.

Donde h es el valor del orden armónico elevado al valor de factor de construcción del transformador, este se encuentra entre 1,5 y 1,7, para este estudio se utilizará 1,7.

Se encuentra la sumatoria de los cuadrados de las armónicas respecto a fundamental, columna 3, tabla XV.

$$\sum 1 = 1,07621 \quad \text{este valor es adimensional}$$

Cuando se tiene la sumatoria de los cuadrados de las armónicas respecto a la fundamental se procede a encontrar la raíz cuadrada, para encontrar la corriente eficaz.

$$I_{\text{eficaz total}} = \sqrt{\sum I^2} = \sqrt{1,0762} = 1,0374 \text{ A}$$

Luego para continuar con el valor de desclasificación del transformador en porcentaje se procede a dividir la corriente eficaz dentro de la sumatoria de los cuadrados respecto a la fundamental columna 3 tabla XV, el resultado de esa operación se eleva al cuadrado:

$$\left(\frac{I_1}{I}\right)^2 = \left(\frac{1,0374}{1,0762}\right)^2 = 0,9291$$

Luego este valor se multiplica por la sumatoria que se encuentra en la columna 5 de la tabla XV.

$$\sum 2 * \left(\frac{I_1}{I}\right)^2 = 2,0494 * 0,9291 = 1,9043$$

Tal como se describe anteriormente se debe de encontrar el valor de e el cual será la relación entre las pérdidas por corrientes parásitas y las pérdidas totales en la carga a frecuencia fundamental 60 Hz. Generalmente este valor se encuentra entre 0,05 y 0,1, para nuestro estudio se tomará el peor de los casos el cual es $e = 0,1$.

$$\frac{e}{(1 + e)} = 0,091$$

Para encontrar los valores de la columna 4 de la tabla XV, el valor del exponente q depende de las características de la construcción del transformador, este dato lo debería de dar el fabricante, sin embargo cuando no se tiene este valor puede estar entre 1,5 y 1,7, por lo cual para este ejemplo se utilizará un $q = 1,7$.

Finalmente se procede al cálculo del porcentaje de desclasificación con los resultados de las ecuaciones anteriores.

$$K^2 = 1 + (0,091 * 1,90043) = 1,1729$$

$$K = \sqrt{1,1729} = 1,08318$$

$$\text{Desclasificación} = \frac{1}{1,08318} = 0,9233$$

En la práctica, sería necesario desclasificar el transformador al 92,33% de la potencia nominal, para este hospital.

Se realizó el mismo cálculo para los 10 hospitales quedando los resultados de las tablas siguientes:

Tabla XVI. **Desclasificación del transformador para los hospitales estudiados**

No.	Hospitales estudiados	Desclasificación
1	Hospital Médico Bethesda	92,32%
2	Hospital Poptún	95,19%
3	Hospital Sayaxché	95,59%
4	Hospital de Escuintla	95,57%
5	Hospital de Retalhuleu	95,52%
6	Hospital Nacional Mazatenango	95,63%
7	Hospital Nacional Felipe Flores	95,22%
8	Hospital Nacional Santa Elena	94,66%
9	Hospital Nacional Sololá	95,29%
10	Hospital Nacional Uspantán	95,22%

Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la tabla anterior todos los transformadores sujetos a cargas no lineales tienen cierto porcentaje de desclasificación, esto quiere decir que los armónicos disminuyen la capacidad del banco de transformación, respecto a su capacidad nominal.

4.8. Cálculo de penalizaciones por armónicos de corriente

En las Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD) se describe la metodología para el cálculo de las indemnizaciones, cuando se exceden límites de tolerancias de las cuales se habla en el capítulo II de este trabajo.

El artículo 44 de las NTSD dice: en los casos en que los distribuidores verifiquen que alguno de sus usuarios ha excedido las tolerancias

establecidas en el Artículo 42 de estas Normas para la distorsión armónica de la corriente de carga, el usuario deberá pagar al distribuidor una indemnización determinada en función a la distorsión penalizable individual de armónicas.

Se define como distorsión penalizable individual de armónicas (DPIAk) a la distorsión armónica de la corriente de carga, registrada en cada Intervalo de Medición k, que supere las tolerancias establecidas, según la siguiente expresión:

Ecuación 16. Cálculo de distorsión penalizable individual de armónicos

$$DPIAk = \text{Max} \left[0, \frac{D_{ATI(k)} - D_{ATI}}{D_{ATI}} \right] + \frac{1}{3} \sum_2^{40} \text{Max} \left[0, \frac{D_{AII_i(k)} - D_{AII_i}}{D_{ATI}} \right]$$

DPIAk = es la distorsión penalizable individual de armónicas para cada intervalo de medición k.

D_{ATI(k)} = es la distorsión armónica total de la corriente de carga, registrada en el intervalo de medición k, referida a la potencia contratada por el usuario.

D_{ATI} = es la tolerancia para la distorsión armónica total de la corriente de carga.

D_{AII_i(k)} = es la distorsión armónica individual de corriente de carga i, registrada en el intervalo de medición k, que inyecta el usuario en la red. las corrientes y las distorsiones medidas deben ser expresadas en valores absolutos de corrientes o en valores porcentuales con

respecto a la intensidad de carga correspondiente con la potencia contratada por el usuario, según corresponda.

D_{AII_i} = es la tolerancia para distorsión armónica individual de la corriente de carga i.

En el caso anterior, en cada intervalo (k) en donde se verifique un valor de DPIA mayor que cero, se utilizará el siguiente criterio para la valorización de la energía consumida en condiciones inadecuadas (Q/kWh) para el cálculo de la Indemnización:

$$\begin{array}{ll} 0 < \text{DPIAk} \leq 1 & \text{CENS} * \text{DPIAk}^2 & \text{Q/kWh} \\ 1 < \text{DPIAk} & \text{CENS} & \text{Q/kWh} \end{array}$$

En la ecuación 16 se describe el procedimiento para el cálculo del valor de la distorsión penalizable individual de armónicos DPIAk, en el párrafo anterior se describe que cuando el valor del DPIAk sea mayor a cero y este valor se encuentre entre 0 y 1, en el cálculo de la indemnización (ecuación 17) se deberá multiplicar el costo de la energía no suministrada (CENS) multiplicado por el DPIAk elevado al cuadrado y si el valor de DPIAk es mayor que 1 solo se deberá tomar el valor del costo de la energía no suministrada (CENS).

La indemnización se determina como:

Ecuación 17. Cálculo de indemnización por corrientes armónicas

$$\text{Indemnización} = \sum_{k:\text{DPIA}_k \leq 1} \text{CENS} * (\text{DPIA}_k)^2 * E(k) + \sum_{k:\text{DPIA}_k > 1} \text{CENS} * E(k)$$

Para los hospitales estudiados se realizó el cálculo de indemnización por Armónicos de corriente dando los siguientes resultados:

Tabla XVII. **Indemnizaciones por exceder los límites de tolerancia en los armónicos de corriente**

No	Hospitales estudiados	Registros fuera de tolerancia (%)	Indemnización
1	Hospital Médico Bethesda	29,07	Q. 64 208,58
2	Hospital Poptún	20,76	Q. 2 927,88
3	Hospital Sayaxché	0,00	Q. 0,00
4	Hospital de Escuintla	2,08	Q. 0,00
5	Hospital de Retalhuleu	5,25	Q. 130,23
6	Hospital Nacional Mazatenango	0,00	Q. 0,00
7	Hospital Nacional Felipe Flores	1,73	Q. 0,00
8	Hospital Nacional Santa Elena	14,51	Q. 2 420,24
9	Hospital Nacional Sololá	0,09	Q. 0,00
10	Hospital Nacional Uspantán	29,67	Q. 2 096,59

Fuente: elaboración propia.

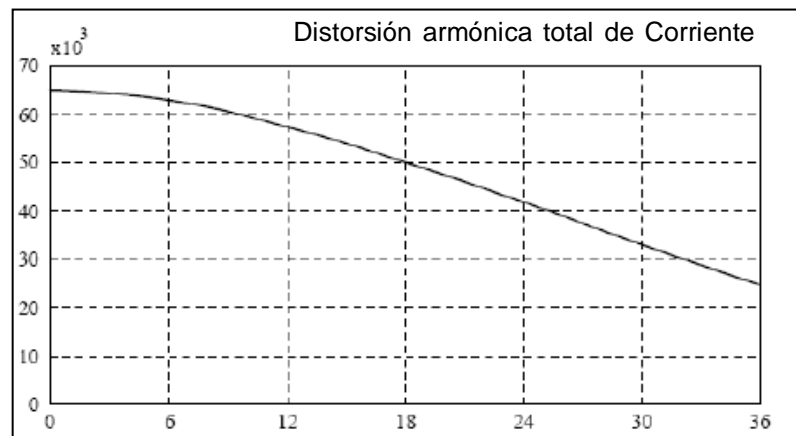
Como se observa todos los que tienen una cantidad de registros fuera de las tolerancias arriba del 5%, se les debe cobrar una penalización debido a la distorsión armónica que le están inyectando a la red de distribución.

Actualmente según la resolución 56-2003 de las NTSD, solo se está midiendo los *flicker* y los armónicos a los usuarios, sin que se cobren indemnizaciones. Sin embargo en los casos en los que se demuestre que los usuarios tienen armónicos fuera de los límites de tolerancias, la distribuidora por medio de la resolución antes mencionada le debe notificar al usuario del problema y el usuario deberá encontrar las soluciones pertinentes para la que los armónicos no lleguen a la red de distribución y así evitar perturbaciones de la forma de onda.

4.9. Cálculo de pérdidas por armónicos de corriente

Armónicas de tensión aumentan las pérdidas en el hierro, en cuanto que armónicas de corriente elevan las pérdidas en el cobre. La elevación de las pérdidas del cobre se debe principalmente al efecto pelicular, que implica una reducción del área efectiva conductora a medida que se eleva la frecuencia de la corriente. Como ilustración en la figura 41, se muestra el perfil de vida útil de un transformador.

Figura 41. Vida útil del transformador en función de THDI



Fuente: Underwriter Laboratories (UL).

Normalmente los componentes de armónicas poseen amplitud reducida, lo que colabora que no se torne excesiva la pérdida. En tanto, pueden surgir situaciones específicas (resonancias, por ejemplo) en que surgen componente de alta frecuencia y amplitud elevada. Además de eso el efecto de las reactancias de dispersión queda ampliado, una vez que su valor aumenta con la frecuencia.

Asociada a la dispersión existe además otro factor de pérdidas que se refiere a las corrientes inducidas por el flujo disperso. Esta corriente se manifiesta en los arrollamientos, en el núcleo, y en las piezas metálicas adyacentes a los arrollamientos. Estas pérdidas crecen proporcionalmente al cuadrado de la frecuencia y de la corriente.

Se tiene todavía una mayor influencia de las capacitancias parásitas (entre espiras y entre arrollamientos) que pueden realizar acoplamientos no deseados y, eventualmente producir resonancias en el propio dispositivo.

Las corrientes armónicas producen un incremento de las pérdidas. Particularmente en el interior del transformador, se producen dos pérdidas relevantes:

- Las pérdidas proporcionales a la resistencia de los enrollados y a la suma al cuadrado de las corrientes fundamentales y armónicas.
- Las pérdidas por corrientes parásitas (corrientes de Eddy) que son proporcionales al cuadrado de la corriente armónica y al cuadrado del orden de la armónica.

En cables y conductores de cobre sólo la primera de ellas está presente y, por tanto, es relativamente simple calcularlas con los procedimientos hasta ahora indicados.

Dadas las pérdidas adicionales en los devanados para condiciones nominales (PEC-R) las pérdidas adicionales para cualquier carga con corrientes no sinusoidales se puede expresar:

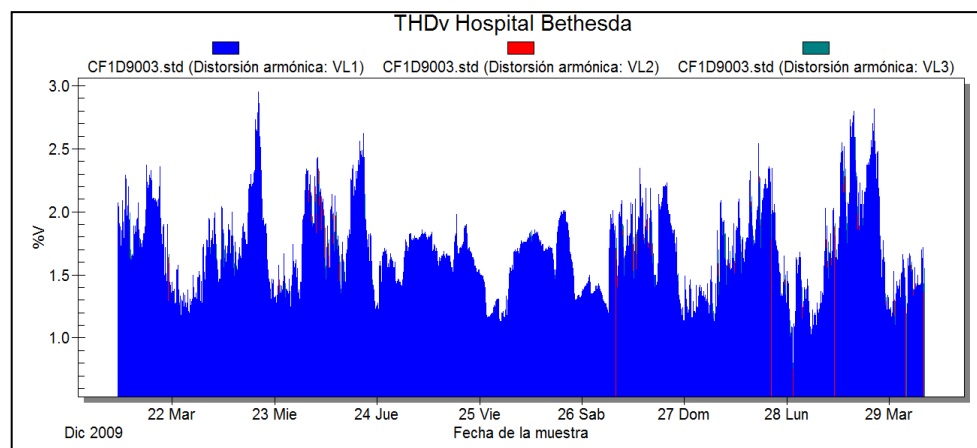
$$P_{EC} = P_{EC-R} \sum_{h=1}^{h=hmax} \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 h^2 = P_{EC-R} \left(1 + \sum_{h=2}^{h=hmax} \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 h^2 \right) (W)$$

Siendo I_h el valor eficaz de la corriente para la armónica "h", I_R el valor eficaz de la componente fundamental de la corriente para la frecuencia nominal y carga nominal en amperios.

4.10. Ejemplo práctico y presentación de soluciones

Resultados de las mediciones realizadas en base a las Normas Técnicas del Servicio de Distribución, las cuales tienen una duración de 8 días con intervalos de 10 minutos, muestran diferentes resultados de potencias activas y factores de potencia. Por lo tanto en este ejemplo se determinará a través de mediciones los problemas ya estudiados anteriormente y las soluciones planteadas.

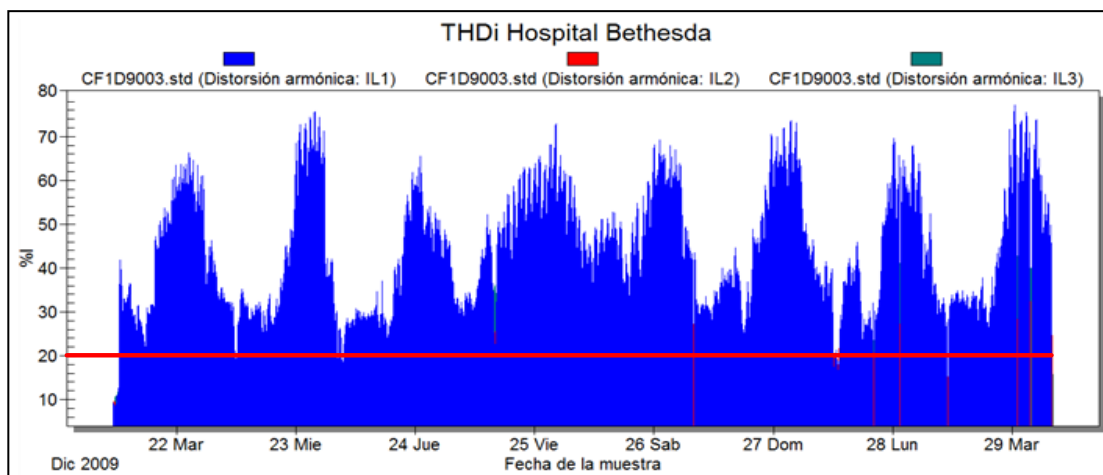
Figura 42. **Distorsión armónica total de voltaje medida en hospital estudiado**



Fuente: elaboración propia con programa Power Vision

Al observar los resultados en los armónicos de la medición se tiene para la figura 42 de distorsión armónica total de voltaje, como se vio en el capítulo II, el límite para estar dentro de tolerancia es 8% de THDv. Debido a que los armónicos de voltaje son atribuidos al distribuidor, se puede decir que este se encuentra proporcionando la energía dentro de los límites respecto a la distorsión armónica.

Figura 43. **Distorsión armónica total de corrientes medidas en hospital estudiado**

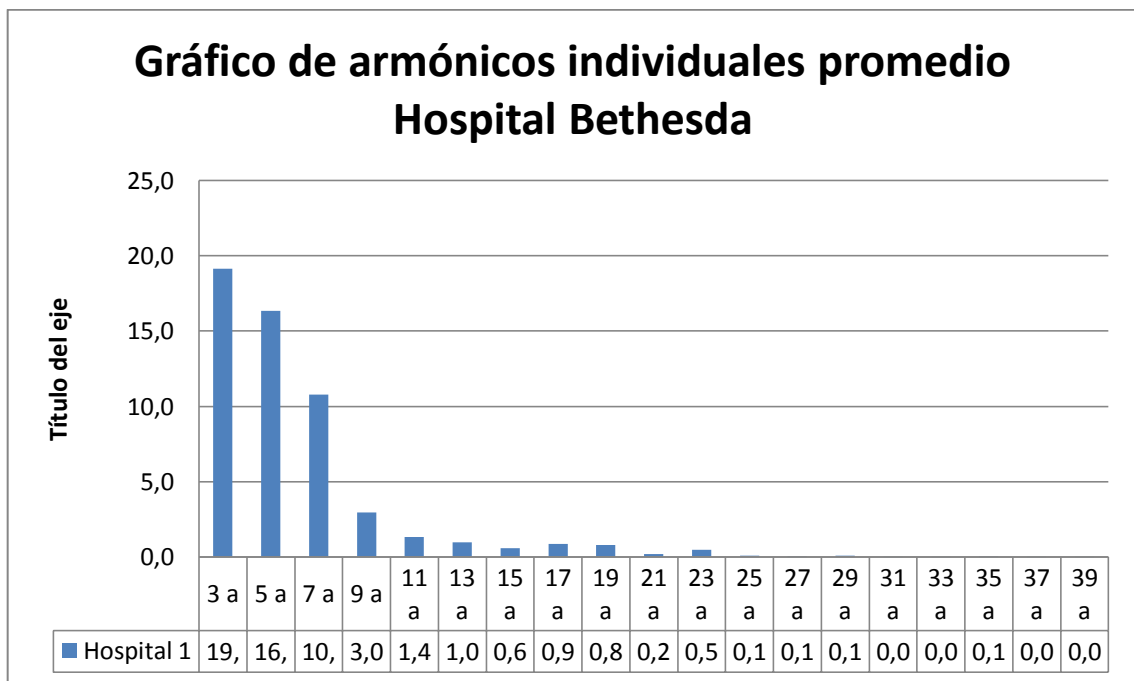


Fuente: elaboración propia con programa Power Vision

Al observar los resultados en los armónicos de la medición se tiene para la figura 44 de distorsión armónica total de corriente, como se vio en el capítulo II, el límite para estar dentro de tolerancia es 20% de THDi. Debido a que los armónicos de corriente son atribuidos al usuario y estos dependen de las cargas conectadas al banco de transformación tal como se vio en el capítulo I, se puede decir que el usuario cuenta con armónicos de corriente fuera de tolerancia.

En el gráfico que se muestra a continuación se pueden observar los armónicos individuales de corriente en las instalaciones del Hospital Bethesda, en este se observa que la armónica de mayor presencia es la tercera.

Figura 44. **Gráfico de armónicos individuales característico en el hospital estudiado**

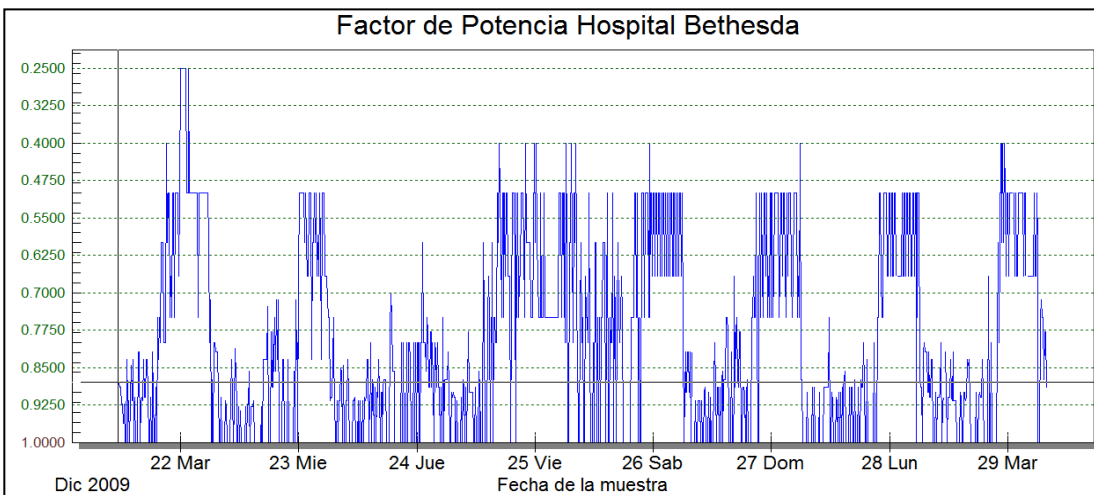


Fuente: elaboración propia con programa Excel.

Como se describió en el capítulo 1 las cargas no lineales afectan directamente el factor de potencia, el cual está relacionado con el THDi y el THDv, en la figura 44 se puede observar que el factor de potencia se ve afectado por las cargas no lineales conectadas al hospital estudiado, cuando se realizó la medición de calidad de energía a este cliente se le estaba penalizando por bajo factor de potencia con un valor de 0,79 según lo registrado

en un mes. Cuando se hizo la medición se observó que el factor de potencia oscila entre valores de 0,5 y 0,7.

Figura 45. **Gráfico de factor de potencia medido en el hospital estudiado**



Fuente: elaboración propia con programa Power Vision.

El objetivo de este ejemplo es mostrar la forma de disminuir los efectos de los armónicos en el banco de transformación y como se puede mejorar el factor de potencia, con el fin de evitar las pérdidas por armónicos y evitar las penalizaciones aplicadas por la distribuidora de electricidad. Con el análisis de espectro de armónicas individuales se determinó que la armónica de mayor presencia era la 3^o por lo cual el filtro estará diseñado para aislar esta.

4.10.1. Cálculo de filtro

Las mediciones realizadas durante 8 días muestran diferentes resultados de potencias activas y factores de potencia. Por lo tanto para el cálculo de los parámetros del filtro, se utilizará como base para ejemplificar la potencia

promedio de las instalaciones del Hospital Bethesda los cuales son 300 kW y el factor de potencia de 0,79.

$$kVA_{carga} = \frac{kW}{pf} = \frac{300}{0,79} = 379,74 \approx 380 \text{ kVA}$$

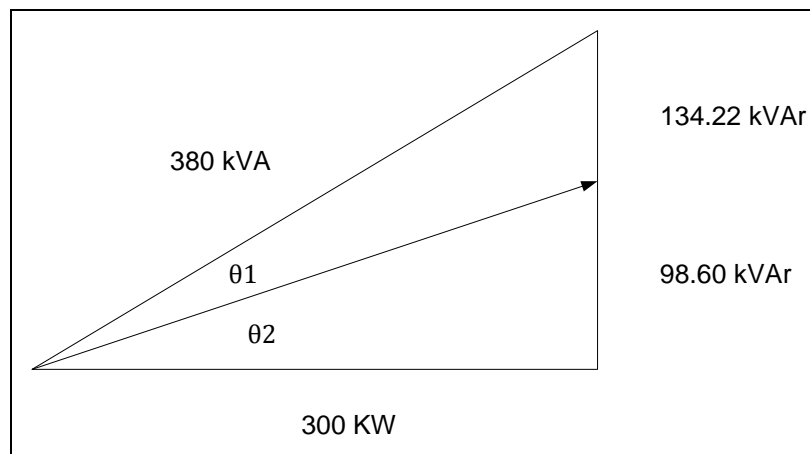
$$kVAr = kW(\tan(\cos^{-1}(pf))) = 300 * (\tan(\cos^{-1}(0,79))) = 300 * (0,776) = 232,8 \text{ kVAr}$$

Para corregir el factor de potencia a 0,95 por encima de lo requerido según la normativa NTSD.

$$\begin{aligned} kVAr &= kW * (\tan(\cos^{-1}(pf))) = 300 * (\tan(\cos^{-1}(0,95))) = 300 * (0,3286) \\ &= 98,60 \text{ kVAr} \end{aligned}$$

$$kVAr_{capacitor} = 232,82 - 98,60 = 134,22 \text{ kVAr}$$

Figura 46. **Triángulo de potencia realizado para cálculo de filtro y corrección de factor de potencia**



Fuente: elaboración propia.

$\theta_1 = \text{para factor de potencia } 0,79$

$\theta_2 = \text{para factor de potencia } 0,95$

En este caso utilizaremos un banco de capacitores de 150 kVAr para obtener un factor de potencia cercano a 0,95, ver figura anterior.

Se calcula un filtro pasivo para 3ª armónica debido a que es la que observamos que tiene mayor presencia en las instalaciones hospitalarias.

Para el cálculo del filtro pasivo del 3ª armónica; consideremos la potencia calculada del banco igual a 150 kVAr con una tensión de diseño de 480 V, por la disponibilidad comercial del mismo.

Empezando por calcular las impedancias del banco se tiene:

$$X_C = \frac{V^2}{Q} = \frac{480^2 V}{150 \text{ kVAr}} = 1.536 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2\pi * 60 * 1.536} = 1.72 \text{ mF}$$

El filtro debe estar sintonizado para una frecuencia próxima al armónico a eliminar. Se toma el 2,8 armónico, por debajo del 3º, para permitir tolerancias durante la construcción del filtro y para evitar resonancias cerca del 3º armónico.

$$X_L = \frac{X_C}{h^2} = \frac{1.53}{2.8^2} = 0.196 \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{0.195}{2\pi 60} = 519 \mu H$$

De tal forma a determinar el factor de calidad de sintonización procedemos a los siguientes cálculos; donde se considera 4% de desintonización. Teniendo en cuenta la relación:

$$Q = \frac{f_{res}}{\Delta\omega} = \frac{180}{(187.2 - 172.8)} = 12.5$$

Finalmente tomamos el valor de Q igual a 10, por tanto:

$$R = \frac{X_L}{Q} = \frac{0.17}{10} = 0.0196\Omega$$

Normalmente la relación X/R en un reactor varía entre 50 y 150. Para este caso se toma una relación de 50, por lo tanto, los parámetros preliminares encontrados para el filtro son:

$$R = 0,0196 \qquad L = 519 \mu H \qquad C = 1,72 \text{ mF}$$

De no encontrarse el inductor indicado en los cálculos para el filtro se puede realizar de forma manual siguiendo los principios siguientes:

El valor de la inductancia viene determinado exclusivamente por las características geométricas de la bobina y por la permeabilidad magnética del espacio donde se encuentra. Si el solenoide tiene un núcleo de permeabilidad distinta de vacío, la inductancia (en Henrios), de acuerdo con las ecuaciones de Maxwell, viene determinada por:

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l}$$

Donde μ es la permeabilidad absoluta del núcleo (el producto entre la permeabilidad del aire y la permeabilidad relativa del material) N es el número de espiras, A es el área de la sección transversal del bobinado (en metros cuadrados) y L la longitud de las bobina (en metros).

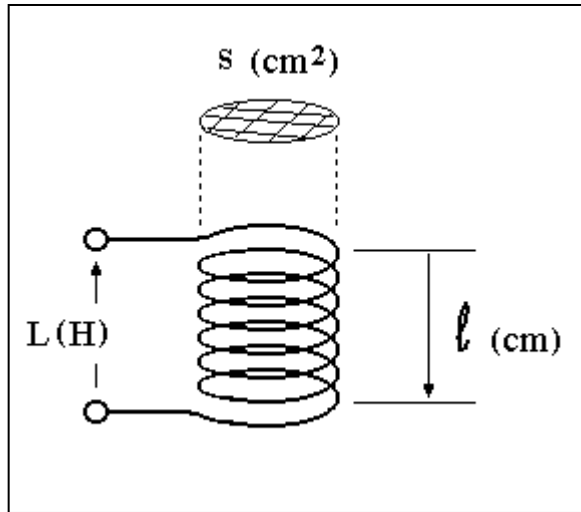
La permeabilidad del vacío, conocida también como constante magnética, se representa mediante el símbolo μ_0 y se define como:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$$

Para comparar entre sí los materiales, se entiende la permeabilidad magnética absoluta (μ) como el producto entre la permeabilidad magnética relativa (μ_r) y la permeabilidad magnética de vacío (μ_0):

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

Figura 47. Factores a tomar en cuenta para la fabricación de inductancias en filtros



Fuente: <http://electrocircuitchema.blogspot.com/p/inductor.html>. Consulta: julio de 2012.

5. INFLUENCIA DE CARGAS NO LINEALES EN EL BANCO DE TRASFORMACIÓN DE INDUSTRIAS

Luego del análisis de la influencia de las cargas no lineales en los hospitales y de forma general en los transformadores, en el presente capítulo se hará el análisis de la influencia en los bancos de transformación de industrias; este análisis se hará de forma más detallada.

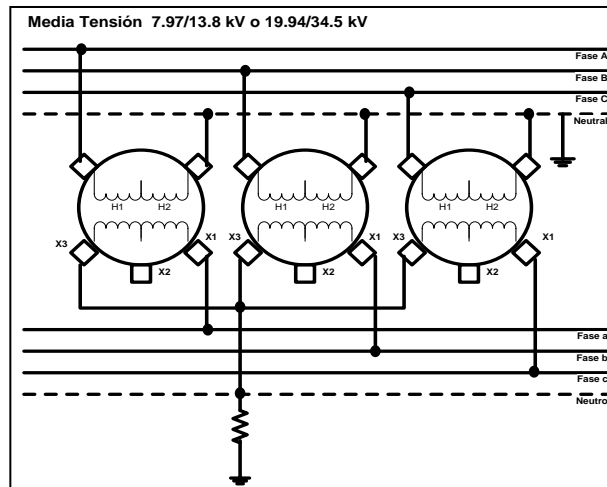
5.1. Tipos de conexión utilizados en bancos de transformación de las instalaciones industriales

Existen diferentes esquemas de conexión de transformadores, cada uno con sus características y particularidades, pero básicamente todos parten de la combinación de las 3 configuraciones básicas, la configuración delta, estrella y zigzag.

Las conexiones de transformadores generalmente utilizadas en las instalaciones Industriales son: conexión estrella-estrella con neutro aterrizado a través de resistencia y estrella-estrella con neutro sólidamente aterrizado, estrella-delta con neutro flotante.

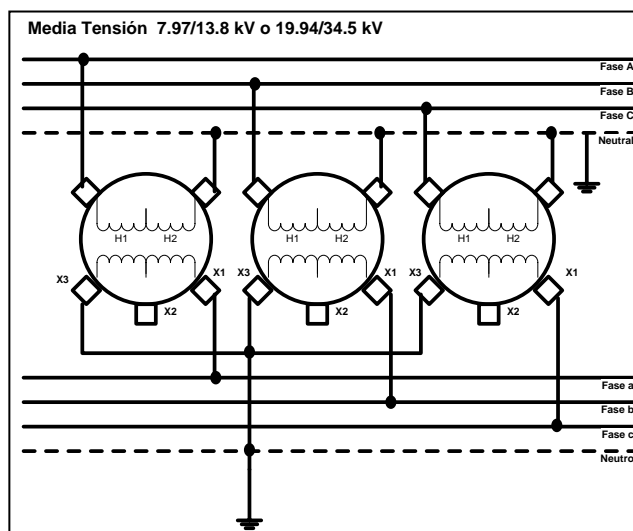
Para las cargas trifásicas generalmente se utiliza un sistema estrella-estrella con neutro aterrizado a través de resistencia (de 4 a 8 ohms), figura 48:

Figura 48. **Conexión de transformadores en estrella – estrella con neutro aterrizado por medio de resistencia**



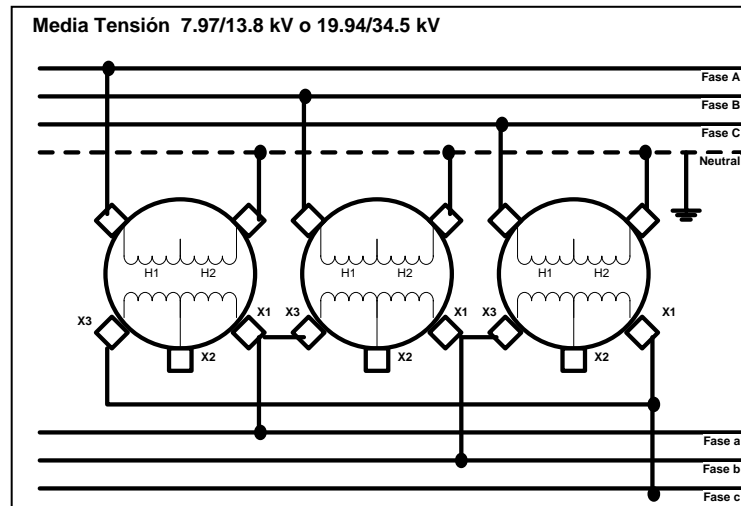
Fuente: elaboración propia con programa Visio.

Figura 49. **Estrella-estrella con neutro sólidamente aterrizado, para las cargas monofásicas**



Fuente: elaboración propia con programa Visio.

Figura 50. **Estrella-delta con neutro flotante**



Fuente: elaboración propia con programa Visio.

Esta conexión se utiliza cuando la carga es predominantemente trifásica, se utiliza usualmente en Instalaciones Industriales.

5.1.1. Bancos de transformación tipo *pad mounted*

En las instalaciones hospitalarias conectadas a la red de distribución de también son utilizados los transformadores tipo *pad mounted* con los voltajes y conexiones antes descritas. Estos transformadores tienen capacidad desde 75 kVA hasta 5 000 kVA, conectados en 13,8 kV y 34,5 kV.

5.2. Tipos de cargas en industrias

Los principales equipos consumidores de energía eléctrica en las industrias son los siguientes:

- Transformadores
- Motores de inducción
- Convertidores
- Motores en operación continua
- Reguladores de velocidad
- Aires acondicionados
- Equipo electrónico
- Soldadoras
- Hornos de inducción
- Balastos
- Alumbrado fluorescente

5.3. Análisis de armónicos

El análisis realizado en este capítulo es similar al capítulo IV en donde se analizaron los armónicos presentes en los bancos de transformación de los hospitales, en este capítulo se analizarán los armónicos presentes en los bancos de transformación de las Industrias.

El caso de análisis de armónicos en industrias, representa el interés de encontrar los efectos de la distorsión armónica, y las consecuencias técnicas y económicas negativas generadas por los mismos.

Esta experiencia demuestra la necesidad de establecer criterios de análisis y propuestas de solución económicamente viables, a futuros problemas del mismo ámbito a nivel industrial, como también de las distribuidoras locales de electricidad.

Para este estudio se tomaron las mediciones de calidad de energía en los bancos de transformación de una muestra de mediciones en industrias de distintos departamentos de la República de Guatemala.

Tal como se estudió en el capítulo uno, las cargas no lineales producen armónicos de corriente, los cuales se estudian para el caso de las industrias ya que el capítulo está orientado a los efectos que estos producen en los bancos de transformación.

Tabla XVIII. **Industrias estudiadas**

No.	Industrias estudiadas
1	Industria ABAS
2	Industria Alianza Fash
3	Industria Cartones
4	Industria Embotelladores Uni
5	Industria de Empaque Kal
6	Industria MB de Guatemala
7	Industria Neo Alimenta
8	Industria Procesadora San Antonio
9	Industria Rayo
10	Industria Sílice de Cen

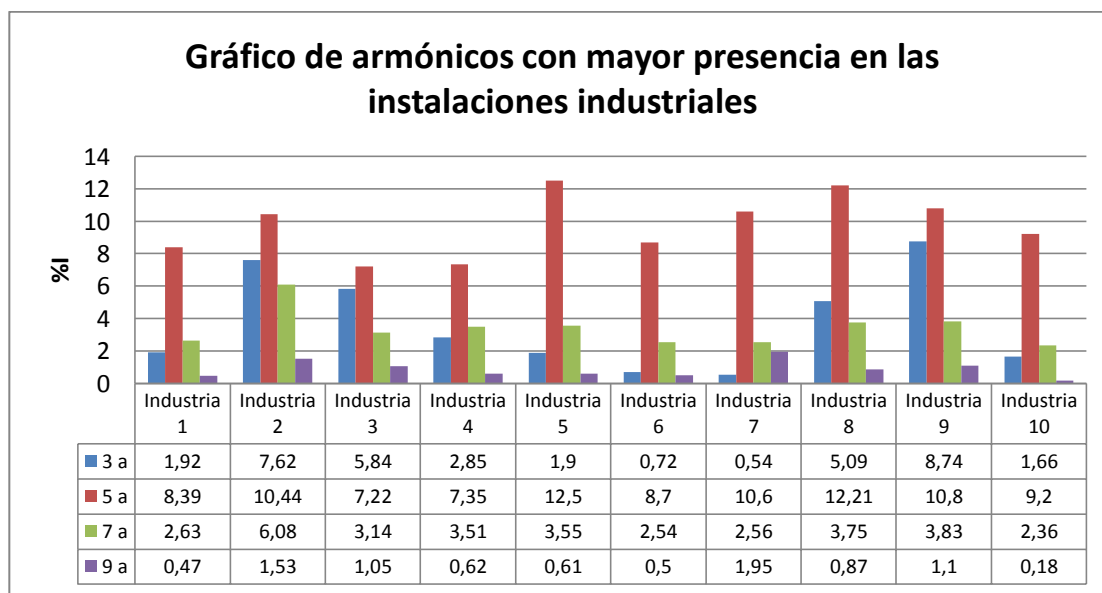
Fuente: elaboración propia.

En las mediciones de calidad de energía de las industrias estudiadas en este trabajo, se obtuvo el espectro de armónicos de corriente hasta el orden 40, tal como lo exige la normativa NTSD de la CNEE.

Como primer paso para determinar los efectos que las cargas no lineales tienen en los bancos de transformación, se procede a realizar la clasificación e identificación de las armónicas con mayor presencia en las instalaciones industriales.

Al analizar el espectro de armónico de las mediciones se determinó que las armónicas de mayor presencia en este tipo de instalaciones son las presentadas en la figura 51.

Figura 51. **Armónicos con mayor presencia en instalaciones industriales estudiadas**



Fuente: elaboración propia con programa Excel.

Al revisar la gráfica se observa que la armónica de mayor presencia en estas instalaciones es el 5° armónico, seguido del 7°, 3°.

5.4. Límites de distorsión armónica

Luego de clasificar el contenido armónico de las mediciones realizadas en las industrias, se procede a realizar las comparaciones respecto a los límites de tolerancia establecidos según la normativa vigente NTSD. En la tabla XIX se describen los armónicos medidos y los límites de tolerancia, con el fin de hacer

un comparativo e identificar que armónicos se encuentran fuera de tolerancia respecto al límite.

Tabla XIX. **Espectro de armónicos industrias estudiadas (3ª a la 21ª)**

Industria	3a	5ª	7ª	9a	11a	13a	15a	17ª	19a	21a
Industria 1	1,92	8,39	2,63	0,47	2,55	0,84	0,19	0,47	0,28	0,10
Industria 2	7,62	10,44	6,08	1,53	1,09	0,79	0,26	0,31	0,21	0,16
Industria 3	5,84	7,22	3,14	1,05	2,27	1,53	0,45	0,76	0,47	0,18
Industria 4	2,85	7,35	3,51	0,62	0,71	0,73	0,21	0,35	0,37	0,09
Industria 5	1,90	12,50	3,55	0,61	2,03	1,04	0,39	0,61	0,21	0,12
Industria 6	0,72	8,70	2,54	0,50	1,87	1,67	0,28	0,50	0,40	0,04
Industria 7	0,54	10,60	2,56	1,95	3,69	1,37	0,23	0,41	0,19	0,03
Industria 8	5,09	12,21	3,75	0,87	1,65	0,99	0,50	0,50	0,49	0,27
Industria 9	8,74	10,80	3,83	1,10	0,96	0,28	0,24	0,27	0,08	0,01
Industria 10	1,66	9,20	2,36	0,18	0,49	0,37	0,08	0,18	0,15	0,02
Límites según las NTSD	16,60	12,00	8,50	2,20	4,30	3,00	0,60	2,70	1,90	0,40

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Espectro de armónicos industrias estudiadas (23ª a la 39ª)**

Industrias	23ª	25ª	27a	29a	31ª	33a	35a	37a	39a	THDi
Industria 1	0,22	0,12	0,04	0,09	0,06	0,02	0,07	0,05	0,01	9,86
Industria 2	0,13	0,14	0,16	0,13	0,09	0,08	0,08	0,06	0,04	15,87
Industria 3	0,46	0,43	0,10	0,20	0,18	0,09	0,15	0,10	0,01	12,49
Industria 4	0,25	0,18	0,04	0,15	0,09	0,03	0,11	0,08	0,03	9,14
Industria 5	0,10	0,06	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	7,52
Industria 6	0,07	0,05	0,01	0,03	0,03	0,01	0,02	0,02	0,01	5,68
Industria 7	0,05	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,30
Industria 8	0,27	0,19	0,11	0,15	0,16	0,09	0,15	0,12	0,12	15,30
Industria 9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,04
Industria 10	0,10	0,08	0,01	0,04	0,03	0,01	0,03	0,03	0,01	8,47
Límites según las NTSD	1,60	1,6	0,3	0,89	0,85	0,30	0,77	0,74	0,30	20,00

Fuente: elaboración propia.

5.5. Cálculo de factor K

A continuación se verá el procedimiento de cálculo del factor K para las industrias estudiadas, este factor es un indicador de cómo los armónicos aumentan las pérdidas en los bancos de transformación.

En la tabla (XXI) se muestran las pérdidas adicionales calculadas para corrientes armónicas hasta el orden 39 para el banco de transformación de la industria procesadora San Antonio, para el cual se tomaron los valores resultantes de la medición de calidad de energía que se muestran en la tabla (XIX y XX).

Tabla XXI. Cálculo de factor K caso industrial

Armónico No.	$\frac{I_h}{I_1}$	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$	$\frac{I_h}{I}$	$\left(\frac{I_h}{I}\right)^2$	h	$\left(\frac{I_h}{I}\right)^2 * h^2$
1	1	1	0,99040839	0,98090878	1	0,98090878
3	0,05094862	0,00259576	0,05045994	0,00254621	6,47300784	0,02291585
5	0,12212828	0,01491532	0,12158913	0,01478392	15,4258466	0,36959789
7	0,03746843	0,00140388	0,03730302	0,00139152	27,3317014	0,06818424
9	0,00869105	7,5534E-05	0,00865268	7,4869E-05	41,8998305	0,00606438
11	0,01645254	0,00027069	0,01637991	0,0002683	58,9342234	0,03246447
13	0,00985688	9,7158E-05	0,00981336	9,6302E-05	78,2895324	0,01627505
15	0,00504498	2,5452E-05	0,0050227	2,5228E-05	99,8516258	0,0056762
17	0,0050029	2,5029E-05	0,00498082	2,4809E-05	123,527362	0,00716967
19	0,00486948	2,3712E-05	0,00484798	2,3503E-05	149,238585	0,00848456
21	0,00272504	7,4258E-06	0,00271301	7,3604E-06	176,918318	0,00324595
23	0,00266111	7,0815E-06	0,00264936	7,0191E-06	206,50821	0,00371311
25	0,00190243	3,6193E-06	0,00189403	3,5874E-06	237,956742	0,0022421
27	0,00110448	1,2199E-06	0,00109961	1,2091E-06	271,217931	0,00088146
29	0,0015194	2,3086E-06	0,00151269	2,2882E-06	306,250352	0,0019244
31	0,00158321	2,5066E-06	0,00157622	2,4845E-06	343,016396	0,00238758
33	0,00092053	8,4737E-07	0,00091646	8,399E-07	381,48169	0,00091465
35	0,00148897	2,217E-06	0,0014824	2,1975E-06	421,614633	0,00269195
37	0,00122911	1,5107E-06	0,00122368	1,4974E-06	463,386024	0,00204994
39	0,0012306	1,5144E-06	0,00122516	1,501E-06	506,768757	0,00228306
	$\Sigma 1$	1,01946278			$\Sigma 2$	1,54007531

Fuente: elaboración propia.

Se encuentra la sumatoria de los cuadrados de las armónicas respecto a fundamental (valor adimensional), columna 3 de la tabla XXI.

$$\Sigma 1 = 1,01946278$$

Cuando se tiene la sumatoria de los cuadrados de las armónicas respecto a la fundamental se procede a encontrar la raíz cuadrada, para encontrar la corriente eficaz.

$$I_{eficaz\ total} = \sqrt{1,0088809} = 1,0044342 = I\ A$$

Con la corriente eficaz calculada se procede a sustituirla en la comuna 4, 5 y 6 de la tabla anterior, con lo cual la sumatoria de la columna 6 será el factor de desclasificación K.

Donde h es el valor del orden armónico elevado al valor de factor de construcción del transformador, este se encuentra entre 1,5 y 1,7, para este estudio se utilizará 1,7.

$$K - factor = 1,31$$

Como se menciona anteriormente para este ejemplo se podría decir que las perdidas por corrientes parásitas en el transformador de esta industria serán 1,31 veces superiores, en comparación a que si se estuviera trabajando con una corriente senoidal pura de 60 Hz

Se realizó el mismo cálculo para las 10 industrias quedando los resultados de las tablas siguientes:

Tabla XXII. **Factor K de industrias estudiadas**

No.	Industrias estudiadas	K-factor
1	Industria 1	1,30989364
2	Industria 2	1,53926242
3	Industria 3	1,3720471
4	Industria 4	1,23207077
5	Industria 5	1,19461777
6	Industria 6	1,15701183
7	Industria 7	1,27271083
8	Industria 8	1,54007531
9	Industria 9	1,32799708
10	Industria 10	1,30950993

Fuente: elaboración propia.

5.6. Cálculo de la desclasificación del transformador

Para ejemplificar el cálculo se tomarán los mismos datos del ejemplo anterior de los armónicos de la medición realizada en la Industria Procesadora San Antonio.

El primer paso consiste en calcular el valor eficaz de la corriente total I , después de lo cual se pueden calcular los cuadrados de los valores proporcionales de cada armónico de corriente, con lo que se llega al valor de K .

El segundo paso para determinar la desclasificación por factor K (tabla XXIII) es encontrar el valor de e , la relación entre las pérdidas por corrientes parásitas y las pérdidas totales en la carga a la frecuencia fundamental. Este dato debe proporcionarlo el fabricante del transformador, en caso contrario, es probable que se encuentre entre 0,05 y 0,1. El valor del exponente q depende mucho de la construcción del transformador y también es un dato que debería ser proporcionado por el fabricante. Es probable que el valor de q se encuentre entre 1,5 y 1,7. Como en el caso anterior los cálculos están basados en los valores teóricos $e = 0,1$ y $q = 1,7$.

Tabla XXIII. Cálculo de desclasificación de transformadores

Armónico No.	$\frac{I_h}{I_1}$	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$	h	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 * h$
1	1	1	1	1
3	0,05094862	0,00259576	6,47300784	0,01680239
5	0,12212828	0,01491532	15,4258466	0,23008138
7	0,03746843	0,00140388	27,3317014	0,03837051
9	0,00869105	7,5534E-05	41,8998305	0,00316488
11	0,01645254	0,00027069	58,9342234	0,01595267
13	0,00985688	9,7158E-05	78,2895324	0,00760645
15	0,00504498	2,5452E-05	99,8516258	0,0025414
17	0,0050029	2,5029E-05	123,527362	0,00309177
19	0,00486948	2,3712E-05	149,238585	0,00353872
21	0,00272504	7,4258E-06	176,918318	0,00131377
23	0,00266111	7,0815E-06	206,50821	0,00146239
25	0,00190243	3,6193E-06	237,956742	0,00086123
27	0,00110448	1,2199E-06	271,217931	0,00033085
29	0,0015194	2,3086E-06	306,250352	0,000707
31	0,00158321	2,5066E-06	343,016396	0,00085979
33	0,00092053	8,4737E-07	381,48169	0,00032326
35	0,00148897	2,217E-06	421,614633	0,00093474
37	0,00122911	1,5107E-06	463,386024	0,00070004
39	0,0012306	1,5144E-06	506,768757	0,00076743
		$\sum 1 = 1,0194627$		$\sum 2 = 1,3294106$

Fuente: elaboración propia.

Se encuentra la sumatoria de los cuadrados de las armónicas respecto a fundamental valor adimensional, columna 3 (tabla XXIII).

$$\sum 1 = 1,0194627$$

Cuando se tiene la sumatoria de los cuadrados de las armónicas respecto a la fundamental se procede a encontrarle la raíz cuadrada, para encontrar la corriente eficaz.

$$I_{eficaz\ total} = \sqrt{1,0194627} = 1,0096845\ A = I$$

Luego para continuar con el valor de desclasificación del transformador en porcentaje se procede a dividir la corriente eficaz dentro de la sumatoria de los cuadrados respecto a la fundamental columna 3 (tabla XXIII), elevado al cuadrado

$$\left(\frac{I_1}{I}\right)^2 = \left(\frac{1,0096845}{1,0194627}\right)^2 = 0,980908$$

Luego este valor se multiplica por la sumatoria que se encuentra en la columna 5 de la tabla XXIII.

$$\Sigma 2 * \left(\frac{I_1}{I}\right)^2 = 1,3294106 * 0,980908 = 1,304030$$

Tal como se describe anteriormente se debe de encontrar el valor de e el cual será la relación entre las pérdidas por corrientes parásitas y las pérdidas totales en la carga a frecuencia fundamental 60 Hz. Generalmente este valor se encuentra entre 0,05 y 0,1, para nuestro estudio se tomará el peor escenario el cual es $e = 0,1$.

$$\frac{e}{(1 + e)} = 0,091$$

Para encontrar los valores de la columna 4, el valor del exponente q depende de las características de la construcción del transformador, este dato lo debería de dar el fabricante, sin embargo cuando no se tiene este valor puede estar entre 1,5 y 1,7, por lo cual para este ejemplo se utilizará un $q = 1,7$.

Finalmente se procede al cálculo del porcentaje de desclasificación con los resultados de las ecuaciones anteriores.

$$K^2 = 1 + (0,091 * 1,304030) = 1,118666$$

$$K = \sqrt{1,118666} = 1,057670$$

$$\text{Desclasificación} = \frac{1}{1,057670} = 0,9454$$

En la práctica, sería necesario desclasificar el transformador al 94,54% de la potencia nominal del mismo, para esta industria, debido a los efectos de los armónicos sobre el banco de transformación

Se realizó el mismo cálculo para las 10 industrias quedando los resultados de las tablas siguientes:

Tabla XXIV. **Desclasificación en industrias estudiadas**

No.	Industrias estudiadas	Desclasificación
1	Industria 1	95.06%
2	Industria 2	94.53%
3	Industria 3	94.96%
4	Industria 4	95.22%
5	Industria 5	94.58%
6	Industria 6	95.05%
7	Industria 7	94.61%
8	Industria 8	94.54%
9	Industria 9	94.73%
10	Industria 10	95.18%

Fuente: elaboración propia.

5.7. Cálculo de penalizaciones por armónicos de corriente

En las Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD) se describe la metodología para el cálculo de las indemnizaciones, cuando se exceden límites de tolerancias de las cuales se habla en el capítulo II de este trabajo.

El artículo 44 de las NTSD dice: en los casos en que los distribuidores verifiquen que alguno de sus usuarios ha excedido las tolerancias establecidas en el artículo 42 de estas normas para la distorsión armónica de la corriente de carga, el usuario deberá pagar al distribuidor una indemnización determinada en función a la distorsión penalizable individual de armónicas.

Las fórmulas utilizadas para el cálculo se encuentra en el capítulo IV en el apartado 4.8.

Para las industrias estudiadas se realizó el cálculo de indemnización por Armónicos dando los resultados de la tabla XXV.

Tabla XXV. Indemnizaciones por exceder los límites de tolerancia en los armónicos de corriente

No.	Hospitales estudiados	Registros fuera de tolerancia (%)	Indemnización
1	Industria 1	10,71	Q. 1 067,83
2	Industria 2	15,24	Q. 247,96
3	Industria 3	12,35	Q. 6 259,39
4	Industria 4	4,78	Q. 0,00
5	Industria 5	14,73	Q. 5 924,34
6	Industria 6	11,60	Q. 3 199,66
7	Industria 7	21,25	Q. 18 015,03
8	Industria 8	29,99	Q. 36 862,44
9	Industria 9	2,75	Q. 0,00
10	Industria 10	22,16	Q. 17 401,72

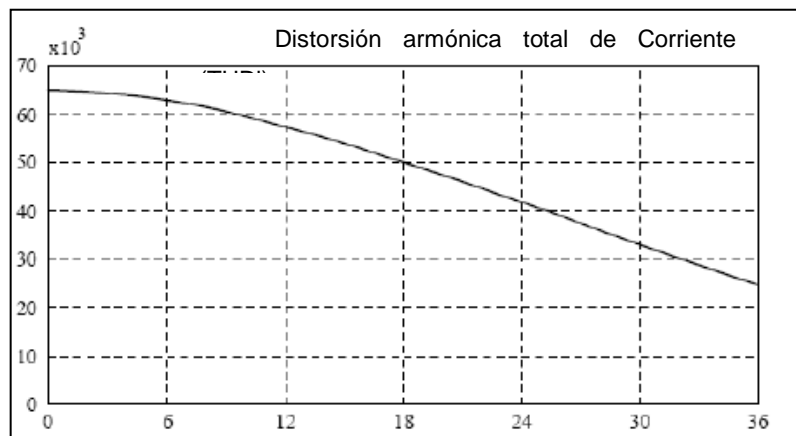
Fuente: elaboración propia.

Como se observa todos los que tienen una cantidad de registros fuera de las tolerancias arriba del 5%, se les debe cobrar una penalización debido a la distorsión armónica que le están inyectando a la red de distribución.

5.8. Cálculo de pérdidas por armónicos en los bancos de transformación

Armónicas de tensión aumentan las pérdidas en el hierro, en cuanto que armónicas de corriente elevan las pérdidas en el cobre. La elevación de las pérdidas del cobre se debe principalmente al efecto pelicular, que implica una reducción del área efectiva conductora a medida que se eleva la frecuencia de la corriente. Como ilustración en la figura 52 se muestra el perfil de vida útil de un transformador.

Figura 52. Vida útil del transformador en función de THDI



Fuente: Underwriter Laboratories (UL).

Normalmente los componentes de armónicas poseen amplitud reducida, lo que colabora que no se torne excesiva la pérdida. En tanto, pueden surgir situaciones específicas (resonancias, por ejemplo) en que surgen componente de alta frecuencia y amplitud elevada. Además de eso el efecto de las reactancias de dispersión queda ampliado, una vez que su valor aumenta con la frecuencia.

Asociada a la dispersión existe además otro factor de pérdidas que se refiere a las corrientes inducidas por el flujo disperso. Esta corriente se manifiesta en los arrollamientos, en el núcleo, y en las piezas metálicas adyacentes a los arrollamientos. Estas pérdidas crecen proporcionalmente al cuadrado de la frecuencia y de la corriente.

Se tiene todavía una mayor influencia de las capacitancias parásitas (entre espiras y entre arrollamientos) que pueden realizar acoplamientos no deseados y, eventualmente producir resonancias en el propio dispositivo.

Las corrientes armónicas producen un incremento de las pérdidas. Particularmente en el interior del transformador, se producen dos pérdidas relevantes:

- Las pérdidas proporcionales a la resistencia de los enrollados y a la suma al cuadrado de las corrientes fundamentales y armónicas.
- Las pérdidas por corrientes parásitas (*eddy currents*) que son proporcionales al cuadrado de la corriente armónica y al cuadrado del orden de la armónica.

En cables y conductores de cobre sólo la primera de ellas está presente y, por tanto, es relativamente simple calcularlas con los procedimientos hasta ahora indicados.

Dadas las pérdidas adicionales en los devanados para condiciones nominales (PEC-R) las pérdidas adicionales para cualquier carga con corrientes no sinusoidales se puede expresar:

$$P_{EC} = P_{EC-R} \sum_{h=1}^{h=hmax} \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 h^2 = P_{EC-R} \left(1 + \sum_{h=2}^{h=hmax} \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 h^2 \right) (W)$$

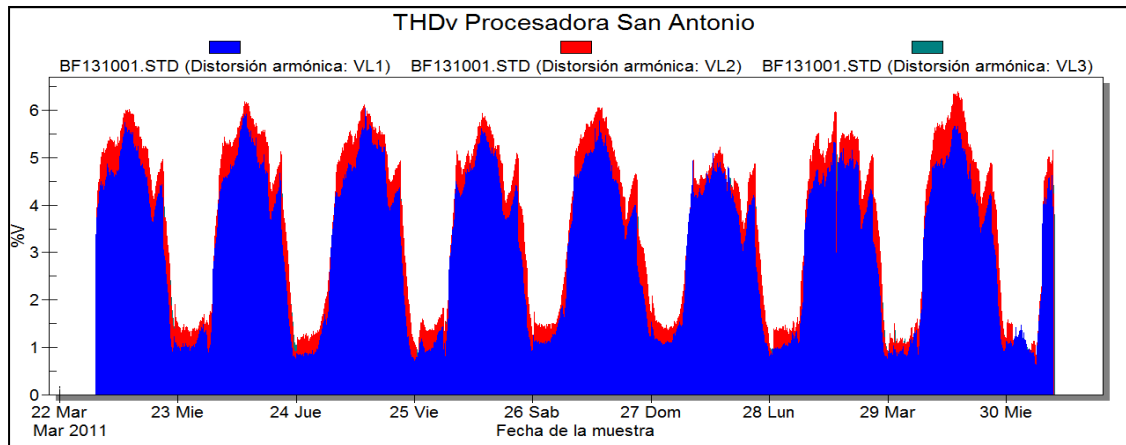
Siendo I_h el valor eficaz de la corriente para la armónica "h", I_R el valor eficaz de la componente fundamental de la corriente para la frecuencia nominal y carga nominal en (A).

5.9. Ejemplo práctico y presentación de soluciones

Resultados de las mediciones realizadas en base a las Normas Técnicas del Servicio de Distribución, las cuales tienen una duración de 8 días con intervalos de 10 minutos, muestran diferentes resultados de potencias activas y factores de potencia. Por lo tanto al igual que el caso de los hospitales, en este ejemplo se determinará a través de mediciones en industrias, los problemas y las soluciones planteadas.

Al observar los resultados en los armónicos de la medición se tiene para la figura 53 de distorsión armónica total de voltaje, como se vio en el capítulo II, el límite para estar dentro de tolerancia es 8% de THDv. Debido a que los armónicos de voltaje son atribuidos al distribuidor, se puede decir que este se encuentra proporcionando la energía dentro de los límites respecto a la distorsión armónica.

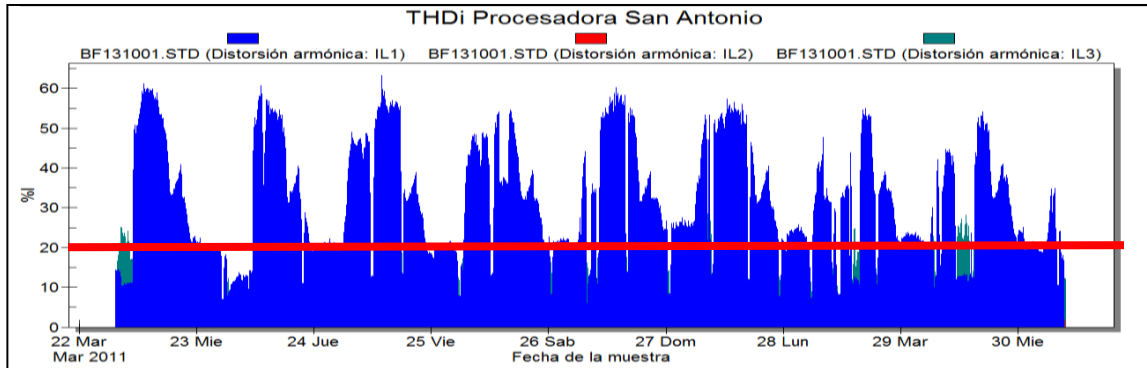
Figura 53. **Distorsión armónica total de voltaje medido en la industria estudiada**



Fuente: elaboración propia con programa Power Vision.

Al observar los resultados en los armónicos de la medición se tiene para la gráfica no. 53 de Distorsión Armónica total de Corriente, como se vio en el capítulo II, el límite para estar dentro de tolerancia es 20% de THDi. Debido a que los armónicos de voltaje son atribuidos al usuario ya que estos dependerán de las cargas conectadas tal como se vio en el capítulo I, se puede decir que el usuario cuenta con armónicos de corriente fuera de tolerancia.

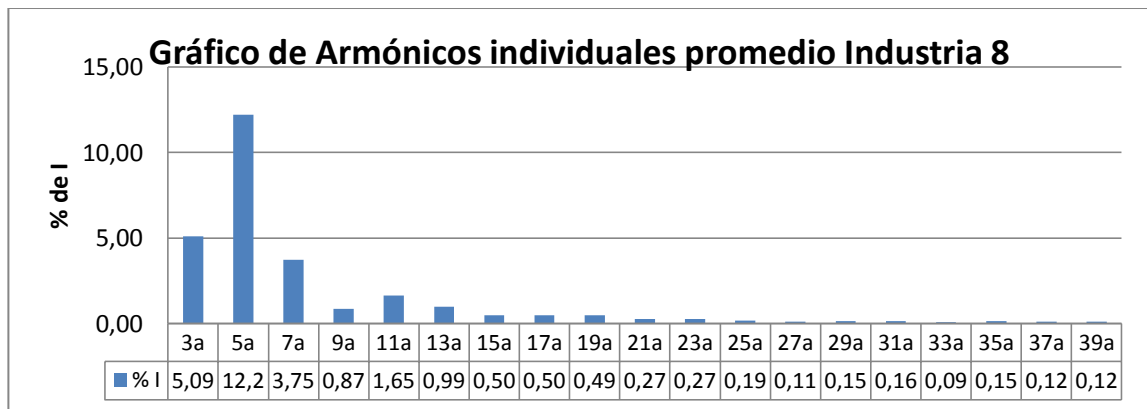
Figura 54. **Distorsión armónica total de corriente en la industria estudiada**



Fuente: elaboración propia con programa Power Vision.

En la figura 55 que se muestra a continuación, es posible observar los armónicos individuales de corriente en las instalaciones de la planta industrial de Procesadora San Antonio, en este se observa que la armónica de mayor presencia es 5°.

Figura 55. **Armónicos individuales medidos en industria estudiada**



Fuente: elaboración propia con programa Excel.

Para el caso de Industria Procesadora San Antonio ya existía un banco de capacitores para compensar la energía reactiva y con esto mantener el factor de potencia dentro de las tolerancias exigidas por la NTSD, el cual es 0,90 para usuarios como este que sobrepasan los 11 kW.

El objetivo de este ejemplo es mostrar la forma de disminuir los efectos de los armónicos en el banco de transformación, la diferencia del ejemplo presentado en el capítulo IV es que en este ya existe un banco de capacitores para corregir factor de potencia el cual puede estar amplificando los armónicos al entrar en resonancia. Para evitar este efecto se puede adaptar cierta inductancia y resistencia con el fin de diseñar un filtro para evitar las pérdidas por armónicos y evitar las perturbaciones de la forma de onda en la red de la distribuidora de electricidad. Con el análisis de espectro de armónicas individuales se determinó que la armónica de mayor presencia era la 5° por lo cual el filtro estará diseñado para aislar esta.

5.9.1. Cálculo de filtro

Las mediciones realizadas durante 8 días muestran diferentes resultados de potencias activas y factores de potencia. Por lo tanto para el cálculo de los parámetros del filtro, se utilizará como base para ejemplificar la potencia promedio de las instalaciones de Procesadora San Antonio los cuales son 265 kW y el factor de potencia de 0,94. El banco de capacitores con el que cuenta esta industria es de 100 kVAr.

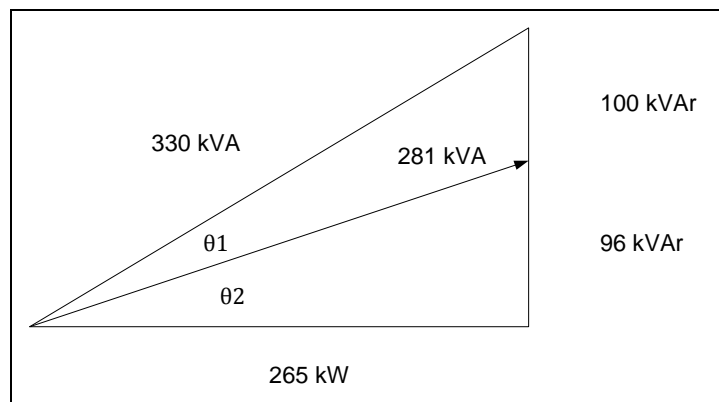
$$kW_{Carga} = 265 \text{ kW}$$

$$kW_{Capacitor} = 100 \text{ kW}$$

$$kVA_{carga} = \frac{kW}{pf} = \frac{281}{0,94} = 281 \text{ kVA}$$

$$kVA_{sistema} = \tan(\cos^{-1}(fp)) * kW_{carga} = \tan(\cos^{-1}(0,94)) * 265 = 96 \text{ kVA}$$

Figura 56. **Triángulo de potencia para cálculo de filtro y corrección de factor de potencia**



Fuente: elaboración propia.

$$\theta_2 = \text{para factor de potencia } 0,94$$

En esta industria ya existía un banco de capacitores de 100 kVAr para obtener un factor de potencia cercano a 0,94.

Se diseñará un filtro pasivo para 5^a armónica debido a que es la que observamos que tiene mayor presencia en las instalaciones industriales.

Para el diseño del filtro pasivo del 5^a armónica; consideremos la potencia calculada del banco igual a 100 kVAr con una tensión de diseño de 480 V, por la disponibilidad comercial del mismo.

Empezando por calcular las impedancias del banco se tiene:

$$X_C = \frac{V^2}{Q} = \frac{480^2 V}{100 \text{ kVA}_r} = 2.304 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2\pi * 60 * 2.304} = 1.1513 \text{ mF}$$

El filtro debe estar sintonizado para una frecuencia próxima al armónico a eliminar. Se toma el 4,7 armónico, por debajo del 5°, para permitir tolerancias durante la construcción del filtro y para evitar resonancias cerca del 5° armónico.

$$X_L = \frac{X_C}{h^2} = \frac{2.304}{4.7^2} = 0.1043 \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{0.1043}{2 * \pi * 60} = 277 \mu H$$

De tal forma a determinar el factor de calidad de sintonización se procede a los siguientes cálculos; donde se considera 4% de desintonización. Teniendo en cuenta la relación:

$$Q = \frac{f_{res}}{\Delta\omega} = \frac{300}{(312 - 288)} = 12.5$$

Normalmente la relación X/R en un reactor varía entre 10 y 60. Para este caso se toma una relación de 10, por lo tanto:

$$R = \frac{X_L}{Q} = \frac{0.1043}{10} = 0.01043 \Omega$$

Por tanto, los parámetros preliminares encontrados para el filtro son:

$$R = 0,01043 \quad L = 277 \mu\text{H} \quad C = 1,1513 \text{ mF}$$

De no encontrarse el inductor indicado en los cálculos para el filtro se puede realizar de forma manual siguiendo los principios descritos en el capítulo IV en el apartado 4.10.1

La construcción del filtro implica el cálculo y la fabricación de los inductores, los cuales están fabricados con acero al silicio de grano orientado, de acuerdo con los cálculos se requiere realizar un maquinado al laminado de acero al silicio de grano orientado, formando con el maquinado un entrehierro magnético, este entrehierro produce una disminución de la permeabilidad magnética del núcleo laminado del inductor y también, como es conocido, evita que el núcleo llegue a la saturación magnética.

6. INFLUENCIA DE CARGAS NO LINEALES EN EL BANCO DE TRANSFORMACIÓN DE AGROINDUSTRIAS

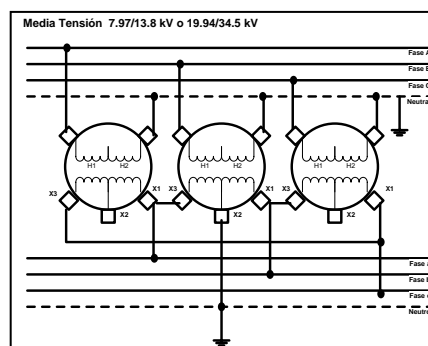
Existen diferentes esquemas de conexión de transformadores, cada uno con sus características y particularidades, pero básicamente todos parten de la combinación de las 3 configuraciones básicas, la configuración delta, estrella y zigzag.

6.1. Tipos de conexiones utilizados en estas instalaciones

Las conexiones de transformadores generalmente utilizadas en las instalaciones agroindustriales son similares a las utilizadas en las instalaciones hospitalarias, conexión estrella-delta y estrella-estrella.

Para las cargas trifásicas generalmente se utiliza un sistema estrella-delta como se muestra en la figura 57.

Figura 57. Conexión de banco de transformación trifásico estrella-delta



Fuente: elaboración propia con programa Visio.

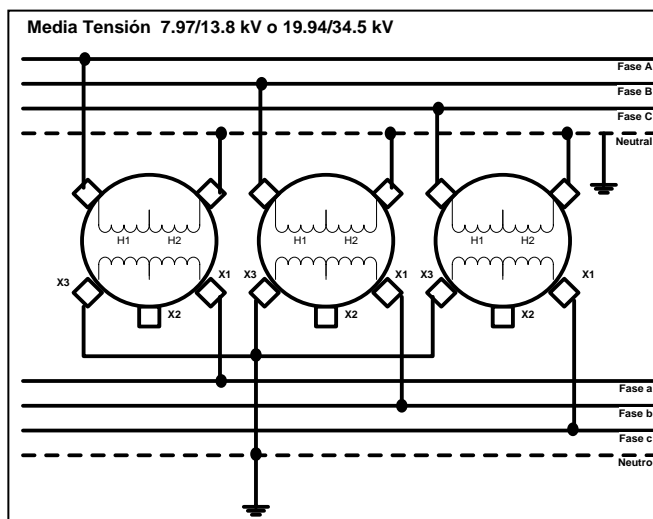
Esta conexión se utiliza cuando la carga es predominantemente trifásica, con una componente moderada de carga monofásica.

Se obtienen los siguientes voltajes:

- $V_{ab} = V_{ac} = V_{bc} = 240 \text{ V}$
- $V_{an} = V_{bn} = 120 \text{ V}$
- $V_{cn} = 207 \text{ V}$

Para cargas monofásicas se utiliza un banco de transformación trifásico estrella-estrella, figura 58.

Figura 58. **Conexión de banco de transformación trifásico estrella-estrella**



Fuente: elaboración propia con programa Visio.

Esta conexión se utiliza cuando la carga es predominantemente monofásica, con una componente moderada de carga trifásica. Esta podría decirse que es la configuración más utilizada.

- $V_{ab} = V_{ac} = V_{bc} = 208 \text{ V}$
- $V_{an} = V_{bn} = V_{cn} = 120 \text{ V}$

6.2. Tipos de cargas agroindustriales

- Transformadores
- Motores de inducción
- Motores en operación continua
- Variadores de Frecuencia
- Aires acondicionados
- Balastos
- Alumbrado fluorescente
- Equipo de refrigeración
- Variadores de velocidad de motores

6.3. Análisis de armónicos

Como es de esperarse cada tipo de carga tiene ciertas características respecto al contenido armónicos, en este capítulo similar al capítulo IV y V en donde se analizaron los armónicos presentes en los bancos de transformación de los hospitales e industrias, en este se analizarán los armónicos presentes en los bancos de transformación de las agroindustrias de Guatemala y sus efectos en estos.

El caso de análisis de armónicos en agroindustrias, representa el interés de la distribuidora de electricidad en encontrar los efectos de la distorsión armónica, y las consecuencias técnicas y económicas negativas generadas por este tipo de carga.

Para este estudio se tomaron las mediciones de calidad de energía en los bancos de transformación de una muestra de mediciones en agroindustrias de distintos departamentos de la República de Guatemala.

Tal como se estudió en el capítulo uno, las cargas no lineales producen armónicos de corriente, los cuales se estudian para el caso de las agroindustrias ya que el capítulo está orientado a los efectos que estos producen en los bancos de transformación.

Tabla XXVI. **Agroindustrias estudiadas**

No.	Agroindustrias estudiadas
1	Agroindustria COE
2	Agroindustria Caoba
3	Agroindustria Intros
4	Mangos de Zac
5	Agroindustria Pulve
6	Foragros
7	Avícola El Rob
8	Industria Guatemalteca de Macad
9	Semilla
10	Agroindustrias Huleras

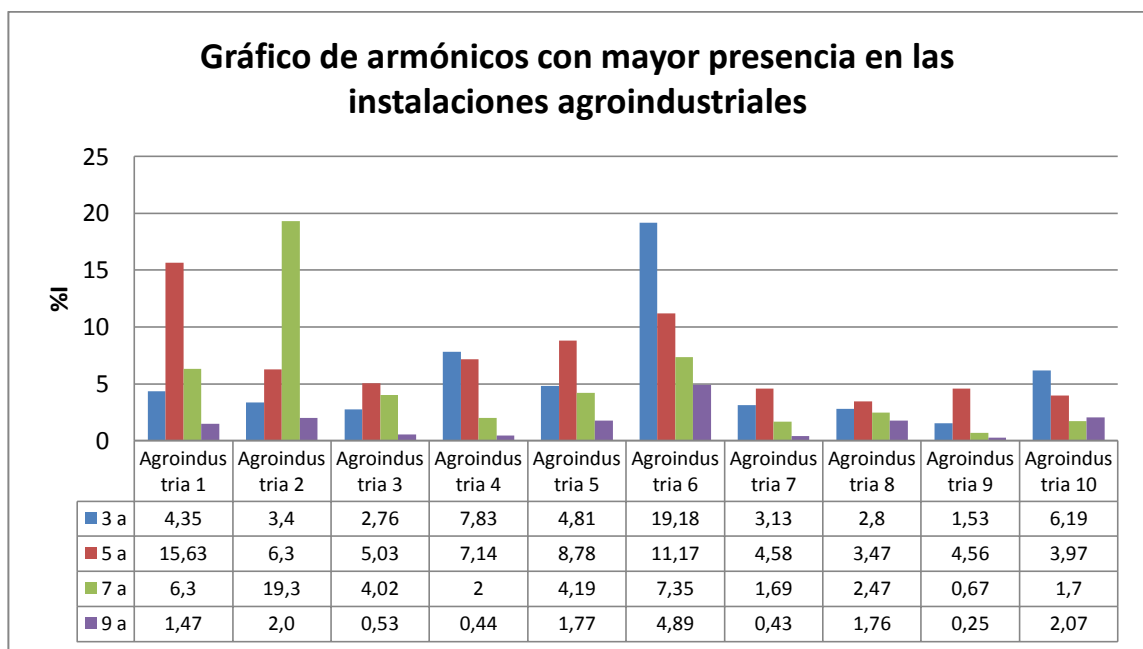
Fuente: elaboración propia.

En las mediciones de calidad de energía de las agroindustrias estudiadas en este trabajo, se obtuvo el espectro de armónicos de corriente hasta el orden 40, tal como lo exige la normativa NTSD de la CNEE.

Como primer paso para determinar los efectos que las cargas no lineales tienen en los bancos de transformación, se procede a realizar la clasificación e identificación de las armónicas con mayor presencia en las instalaciones industriales.

Al analizar el espectro de armónicos de las mediciones se determinó que las armónicas de mayor presencia en este tipo de instalaciones son las presentadas en la figura 59:

Figura 59. **Armónicos con mayor presencia en instalaciones agroindustriales estudiadas**



Fuente: elaboración propia con programa Excel.

Para las instalaciones agroindustriales a diferencia de los dos casos anteriores presentados en los capítulos IV y V en los cuales predominaba una armónica sobre las demás; en las instalaciones agroindustriales se puede observar que no hay una armónica predominante por lo cual para estos casos se deberá de hacer un estudio más detallado para determinar el tipo de solución, ya que no se puede caracterizar una armónica predominante como en los casos anteriores.

6.4. Límites de distorsión armónica

Luego de clasificar el contenido armónico de las mediciones realizadas en las agroindustrias se procede a realizar las comparaciones respecto a los límites de tolerancia establecidos según la normativa vigente NTSD. En la tabla siguiente se describen los armónicos medidos y los límites de tolerancia, con el fin de hacer un comparativo e identificar que armónicos se encuentran fuera de tolerancia respecto al límite.

Tabla XXVII. Espectro de armónicos agroindustrias (3ª a la 21ª)

Agroindustria	3ª	5ª	7ª	9ª	11ª	13ª	15ª	17ª	19ª	21ª
Agroindustria 1	4,35	15,63	6,30	1,47	3,86	3,52	1,02	2,29	2,97	0,74
Agroindustria 2	3,38	6,27	19,32	2,02	4,34	2,13	1,02	1,56	1,19	0,54
Agroindustria 3	2,76	5,03	4,02	0,53	1,95	1,04	0,12	0,19	0,11	0,03
Agroindustria 4	7,83	7,14	2,00	0,44	0,96	0,16	0,03	0,01	0,00	0,00
Agroindustria 5	4,81	8,78	4,19	1,77	4,64	1,84	0,42	0,55	0,86	0,16
Agroindustria 6	19,18	11,17	7,35	4,89	3,18	1,54	1,04	1,03	0,86	0,71
Agroindustria 7	3,13	4,58	1,69	0,43	0,48	0,51	0,16	0,28	0,23	0,10
Agroindustria 8	2,80	3,47	2,47	1,76	2,01	1,52	0,75	1,11	0,52	0,17
Agroindustria 9	1,53	4,56	0,67	0,25	2,72	3,66	0,64	1,98	2,49	0,34
Agroindustria 10	6,19	3,97	1,70	2,07	3,28	1,55	1,46	0,85	0,72	2,58
Límites según las NTSD	16,60	12,00	8,50	2,20	4,30	3,00	0,60	2,70	1,90	0,40

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. Espectro de armónicos industrias (23ª a la 39ª)

Agroindustria	23ª	25ª	27ª	29ª	31ª	33ª	35ª	37ª	39ª	THDi
Agroindustria 1	1,01	0,62	0,10	0,11	0,07	0,01	0,01	0,00	0,00	19,30
Agroindustria 2	0,34	0,23	0,11	0,09	0,08	0,03	0,03	0,01	0,01	22,99
Agroindustria 3	0,06	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,45
Agroindustria 4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,06	0,05	0,01	0,00	12,72
Agroindustria 5	0,66	0,36	0,02	0,10	0,05	0,00	0,01	0,00	0,00	16,67
Agroindustria 6	0,52	0,44	0,38	0,31	0,26	0,19	0,18	0,18	0,13	27,75
Agroindustria 7	0,18	0,18	0,04	0,09	0,15	0,12	0,08	0,01	0,00	6,63
Agroindustria 8	0,30	0,20	0,08	0,07	0,04	0,01	0,06	0,04	0,00	6,93
Agroindustria 9	0,61	0,54	0,02	0,10	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	8,98
Agroindustria 10	0,48	0,47	0,48	0,22	0,20	0,19	0,19	0,24	0,27	11,23
Límites según las NTSD	1,60	1,6	0,3	0,89	0,85	0,30	0,77	0,74	0,30	20,00

Fuente: elaboración propia.

Al hacer el comparativo respecto a los límites de tolerancia la armónica que se encuentra con mayor presencia son la 3ª, 5ª y 7ª por lo cual como se mencionaba no para los casos estudiando no se puede determinar una armónica predominante.

6.5. Cálculo de factor K

Al igual que en el capítulo IV en el índice 4.6, en este se verá el procedimiento de cálculo del factor K para las industrias estudiadas, este factor es un indicador de cómo los armónicos aumentan las pérdidas en los bancos de transformación.

En la tabla (XXIX) se muestran las pérdidas adicionales calculadas para corrientes armónicas hasta el orden 39 para el banco de transformación de la agroindustria con el nombre Caobanal, para el cual se tomaron los valores resultantes de la medición de calidad de energía que se muestran en la tabla (XXVII y XVIII).

Tabla XXIX. Cálculo de factor K caso agroindustrial

Armónico No.	$\frac{I_h}{I_1}$	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$	$\frac{I_h}{I}$	$\left(\frac{I_h}{I}\right)^2$	h	$\left(\frac{I_h}{I}\right)^2 * h^2$
1	1	1	0,97790412	0,95629647	1	0,95629647
3	0,0338162	0,00114354	0,033069	0,00109356	6,47300784	0,00984203
5	0,06273146	0,00393524	0,06166297	0,00380232	15,4258466	0,09505805
7	0,19323999	0,03734169	0,1899486	0,03608047	27,3317014	1,76794301
9	0,02022075	0,00040888	0,01987634	0,00039507	41,8998305	0,03200058
11	0,04338731	0,00188246	0,04264831	0,00181888	58,9342234	0,22008429
13	0,0212534	0,00045171	0,0208914	0,00043645	78,2895324	0,07376013
15	0,01017323	0,00010349	0,00999995	9,9999E-05	99,8516258	0,02249979
17	0,01556167	0,00024217	0,01529661	0,00023399	123,527362	0,06762207
19	0,01192768	0,00014227	0,01172452	0,00013746	149,238585	0,0496246
21	0,00544931	2,9695E-05	0,00535649	2,8692E-05	176,918318	0,01265317
23	0,00337561	1,1395E-05	0,00331811	1,101E-05	206,50821	0,00582422
25	0,00234409	5,4947E-06	0,00230416	5,3091E-06	237,956742	0,00331822
27	0,00105344	1,1097E-06	0,0010355	1,0723E-06	271,217931	0,00078168

Continuación de la tabla XXIX.

29	0,00091874	8,4409E-07	0,0009031	8,1558E-07	306,250352	0,0006859
31	0,00079207	6,2737E-07	0,00077858	6,0618E-07	343,016396	0,00058254
33	0,00029884	8,9306E-08	0,00029375	8,6289E-08	381,48169	9,3969E-05
35	0,00033532	1,1244E-07	0,00032961	1,0864E-07	421,614633	0,00013309
37	6,022E-05	3,6264E-09	5,9194E-05	3,5039E-09	463,386024	4,7969E-06
39	9,4593E-05	8,9478E-09	9,2982E-05	8,6456E-09	506,768757	1,315E-05
	$\Sigma 1$	1,04570082			$\Sigma 2$	3,31882175

Fuente: elaboración propia.

Se encuentra la sumatoria de los cuadrados de las armónicas respecto a fundamental cuyo valor es adimensional, columna 3 de la tabla XXIX.

$$\Sigma 1 = 1,04570082$$

Cuando se tiene la sumatoria de los cuadrados de las armónicas respecto a la fundamental se procede a encontrar la raíz cuadrada, para encontrar la corriente eficaz.

$$I_{eficaz\ total} = \sqrt{1,04570082} = 1,02259514\ A$$

Con la corriente eficaz calculada se procede a sustituirla en la comuna 4, 5 y 6 de la tabla anterior, con lo cual la sumatoria de la columna 6 de la tabla XXIX será el factor de desclasificación K.

Donde h es el valor del orden armónico elevado al valor de factor de construcción del transformador, este se encuentra entre 1,5 y 1,7, para este estudio se utilizará 1,7.

$$K - factor = 3,32$$

Para este ejemplo se puede decir que las pérdidas por corrientes parásitas en el transformador de esta agroindustria serán 3,32 veces superiores, en comparación a que si se estuviera trabajando con una corriente senoidal pura de 60 Hz

Se realizó el mismo cálculo para los 10 agroindustrias quedando los resultados de la tabla XXX:

Tabla XXX. **Cálculo de factor K para las agroindustrias estudiadas**

No.	Agroindustrias estudiadas	K-factor
1	Agroindustria 1	2,73352288
2	Agroindustria 2	3,31882175
3	Agroindustria 3	1,20513607
4	Agroindustria 4	1,19866261
5	Agroindustria 5	1,67830541
6	Agroindustria 6	2,32335853
7	Agroindustria 7	1,09217187
8	Agroindustria 8	1,23624515
9	Agroindustria 9	1,73203041
10	Agroindustria 10	1,71934606

Fuente: elaboración propia.

6.6. Cálculo de la desclasificación del transformador

Para ejemplificar el cálculo se tomarán los mismos datos del ejemplo anterior de los armónicos de la medición realizada en la Agroindustria Caobanal.

El primer paso consiste en calcular el valor eficaz de la corriente total I , después de lo cual se pueden calcular los cuadrados de los valores proporcionales de cada armónico de corriente, con lo que se llega al valor de K.

El segundo paso para determinar el factor K (tabla XXXI) es encontrar el valor de e , la relación entre las pérdidas por corrientes parásitas y las pérdidas totales en la carga a la frecuencia fundamental. Este dato debe proporcionarlo el fabricante del transformador, en caso contrario, es probable que se encuentre entre 0,05 y 0,1.

El valor del exponente q , depende mucho de la construcción del transformador y también es un dato que debería ser proporcionado por el fabricante. Es probable que el valor de q se encuentre entre 1,5 y 1,7. Como en el caso anterior los cálculos están basados en los valores teóricos $e = 0,1$ y $q = 1,7$.

Tabla XXXI. **Cálculo de desclasificación de transformadores en caso agroindustrial**

Armónico No.	$\frac{I_k}{I_1}$	$\left(\frac{I_k}{I_1}\right)^2$	h	$\left(\frac{I_k}{I_1}\right)^2 * h$
1	1	1	1	1
3	0,0338162	0,001143535	6,47300784	0,007402113
5	0,06273146	0,003935235	15,4258466	0,060704339
7	0,19323999	0,037341694	27,3317014	1,020612027
9	0,02022075	0,000408879	41,8998305	0,017131953
11	0,04338731	0,001882459	58,9342234	0,110941253
13	0,0212534	0,000451707	78,2895324	0,03536393
15	0,01017323	0,000103495	99,8516258	0,010334107
17	0,01556167	0,000242166	123,527362	0,029914078
19	0,01192768	0,000142269	149,238585	0,021232093
21	0,00544931	2,9695E-05	176,918318	0,005253582
23	0,00337561	1,13947E-05	206,50821	0,002353104
25	0,00234409	5,49474E-06	237,956742	0,001307509
27	0,00105344	1,10974E-06	271,217931	0,000300982
29	0,00091874	8,44091E-07	306,250352	0,000258503
31	0,00079207	6,27372E-07	343,016396	0,000215199
33	0,00029884	8,93057E-08	381,48169	3,40685E-05
35	0,00033532	1,12442E-07	421,614633	4,74073E-05
37	6,022E-05	3,62641E-09	463,386024	1,68043E-06
39	9,4593E-05	8,94785E-09	506,768757	4,53449E-06
		$\sum 1 = 1,045701$		$\sum 2 = 2,323412$

Fuente: elaboración propia.

Donde h es el valor del orden armónico elevado al valor de factor de construcción del transformador, este se encuentra entre 1,5 y 1,7, para este estudio se utilizará 1,7.

Se encuentra la sumatoria de los cuadrados de las armónicas respecto a fundamental valor adimensional, columna 3 de la tabla XXXI.

$$\Sigma 1 = 1,045701$$

Cuando se tiene la sumatoria de los cuadrados de las armónicas respecto a la fundamental se procede a encontrar la raíz cuadrada, para encontrar la corriente eficaz.

$$I_{eficaz\ total} = \sqrt{\Sigma 1} = \sqrt{1,045701} = 1,022595\ A$$

Luego para continuar con el valor de desclasificación del transformador en porcentaje se procede a dividir la corriente eficaz dentro de la sumatoria de los cuadrados respecto a la fundamental columna 3, esto elevado al cuadrado

$$\left(\frac{I_1}{I}\right)^2 = \left(\frac{1,022595}{1,045701}\right)^2 = 0,956296$$

Luego este valor se multiplica por la sumatoria que se encuentra en la columna 5 de la tabla anterior.

$$\Sigma 2 * \left(\frac{I_1}{I}\right)^2 = 2,323412 * 0,956296 = 2,221871$$

Tal como se describe anteriormente se debe de encontrar el valor de e el cual será la relación entre las pérdidas por corrientes parásitas y las pérdidas totales en la carga a frecuencia fundamental 60 Hz. Generalmente este valor se encuentra entre 0,05 y 0,1, para nuestro estudio se tomará el peor de los casos el cual es $e = 0,1$.

$$\frac{e}{(1 + e)} = 0,091$$

Para encontrar los valores de la columna 4, el valor del exponente q depende de las características de la construcción del transformador, este dato lo debería de dar el fabricante, sin embargo cuando no se tiene este valor puede estar entre 1,5 y 1,7, por lo cual para este ejemplo se utilizará un $q = 1,7$.

Finalmente se procede al cálculo del porcentaje de desclasificación con los resultados de las ecuaciones anteriores.

$$K^2 = 1 + (0,091 * 2,221871) = 1,202190$$

$$K = \sqrt{1,202190} = 1,096444$$

$$\text{Desclasificación} = \frac{1}{1,08318} = 0,9120$$

En la práctica, sería necesario desclasificar el transformador al 91,20% de la potencia nominal, para esta agroindustria.

Se realizó el mismo cálculo para los 10 agroindustrias quedando los resultados de la tabla XXXII:

Tabla XXXII. **Desclasificación de transformadores en agroindustrias estudiadas**

No.	Agroindustrias estudiadas	Desclasificación
1	Agroindustria 1	92.43%
2	Agroindustria 2	91.20%
3	Agroindustria 3	95.28%
4	Agroindustria 4	95.25%
5	Agroindustria 5	94.34%
6	Agroindustria 6	92.97%
7	Agroindustria 7	95.53%
8	Agroindustria 8	95.26%
9	Agroindustria 9	94.42%
10	Agroindustria 10	94.45%

Fuente: elaboración propia.

6.7. Cálculo de penalizaciones por armónicos de corriente

En las Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD) se describe la metodología para el cálculo de las indemnizaciones, cuando se exceden límites de tolerancias de las cuales se habla en el capítulo II de este trabajo.

El artículo 44 de las NTSD dice: en los casos en que los distribuidores verifiquen que alguno de sus usuarios ha excedido las tolerancias establecidas en el Artículo 42 de estas normas para la distorsión armónica de la corriente de carga, el usuario deberá pagar al distribuidor una indemnización determinada en función a la distorsión penalizable individual de armónicas.

Para las agroindustrias estudiadas se realizó el cálculo de indemnización por armónicos dando los resultados de la tabla XXXIII:

Tabla XXXIII. **Indemnizaciones por exceder los límites de tolerancia en los armónicos de corriente**

No.	Agroindustrias estudiadas	Registros fuera de tolerancia (%)	Indemnización
1	Agroindustria 1	23,35	Q. 19 298,31
2	Agroindustria 2	4,53	Q. 0,00
3	Agroindustria 3	15,28	Q. 8 830,87
4	Agroindustria 4	12,94	Q. 133 170,37
5	Agroindustria 5	35,95	Q. 18 504,35
6	Agroindustria 6	14,04	Q. 15 197,27
7	Agroindustria 7	19,52	Q. 22 585,36
8	Agroindustria 8	42,51	Q. 3 530,92
9	Agroindustria 9	30,67	Q. 62 897,72
10	Agroindustria 10	0,00	Q. 0,00

Fuente: elaboración propia.

Como se observa todos los que tienen una cantidad de registros fuera de las tolerancias arriba del 5%, se les debe cobrar una penalización debido a la distorsión armónica que le están inyectando a la red de distribución.

Actualmente según la resolución 56-2003 de las NTSD, solo se está midiendo los *flicker* y los armónicos a los usuarios, sin que se cobren indemnizaciones. Sin embargo en los casos en los que se demuestre que los usuarios tienen armónicos fuera de los límites de tolerancias, la distribuidora por medio de la resolución antes mencionada le debe notificar al usuario del problema y el usuario deberá encontrar las soluciones pertinentes para la que los armónicos no lleguen a la red de distribución y así evitar perturbaciones de la forma de onda.

Al realizar el cálculo de indemnización para este usuario se determinó por medio de las formulas antes expuestas que la indemnización asciende a la cantidad de Q. 36 800,00.

6.8. Cálculo de pérdidas por armónicos en los bancos de transformación

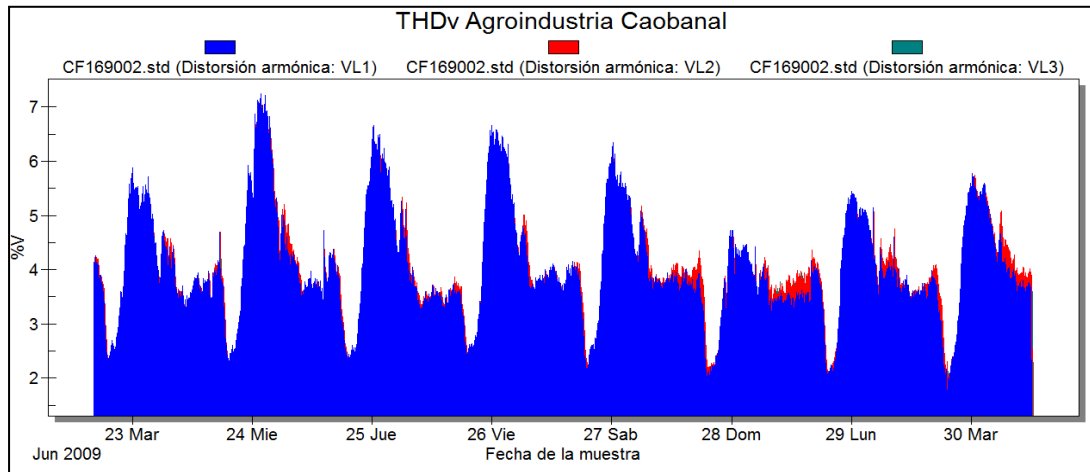
Las armónicas de tensión aumentan las pérdidas en el hierro, en cuanto que armónicas de corriente elevan las pérdidas en el cobre. La elevación de las pérdidas del cobre se debe principalmente al efecto pelicular, que implica una reducción del área efectiva conductora a medida que se eleva la frecuencia de la corriente. Como ilustración en la figura se muestra el perfil de vida útil de un transformador. La gráfica en donde se relaciona la vida útil del transformador respecto a la distorsión armónica se encuentra en el capítulo IV en el apartado 4.9, así también en este apartado aparecen las fórmulas para el cálculo de las pérdidas en el transformador por las corrientes armónicas.

6.9. Ejemplo práctico y presentación de soluciones

Resultados de las mediciones realizadas en base a las Normas Técnicas del Servicio de Distribución, las cuales tienen una duración de 8 días con intervalos de 10 minutos, muestran diferentes resultados de potencias activas y factores de potencia. Por lo tanto al igual que el caso de los hospitales e industria, en este ejemplo se determinará a través de mediciones en agroindustrias, los problemas y las soluciones planteados.

Al observar los resultados en los armónicos de la medición se tiene para la figura 60 de distorsión armónica total de voltaje, como se vio en el capítulo II, el límite para estar dentro de tolerancia es 8% de THDv. Debido a que los armónicos de voltaje son atribuidos al distribuidor, se puede decir que este se encuentra proporcionando la energía dentro de los límites respecto a la distorsión armónica.

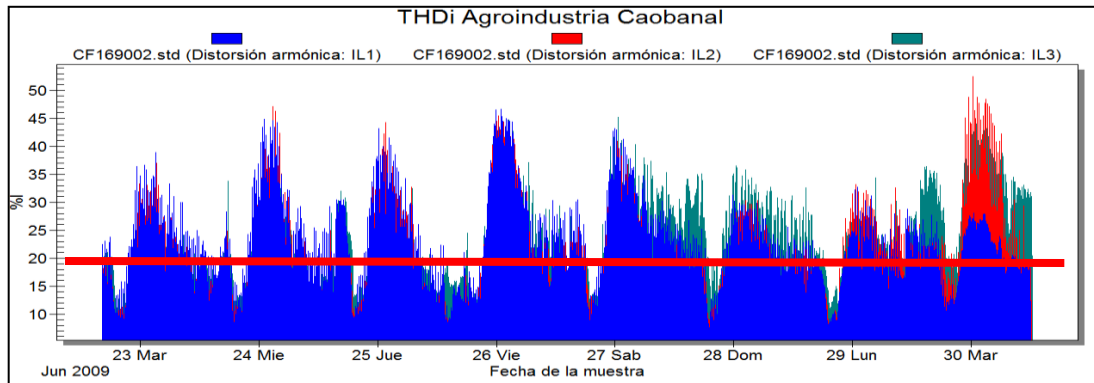
Figura 60. **Distorsión armónica total de voltaje para caso estudiado**



Fuente: elaboración propia con programa Power Vision.

Al observar los resultados en los armónicos de la medición se tiene para la figura 62 de distorsión armónica total de corriente, como se vio en el capítulo II, el límite para estar dentro de tolerancia es 20% de THDi. Debido a que los armónicos de voltaje son atribuidos al usuario ya que estos dependerán de las cargas conectadas tal como se vio en el capítulo I, se puede decir que el usuario cuenta con armónicos de corriente fuera de tolerancia.

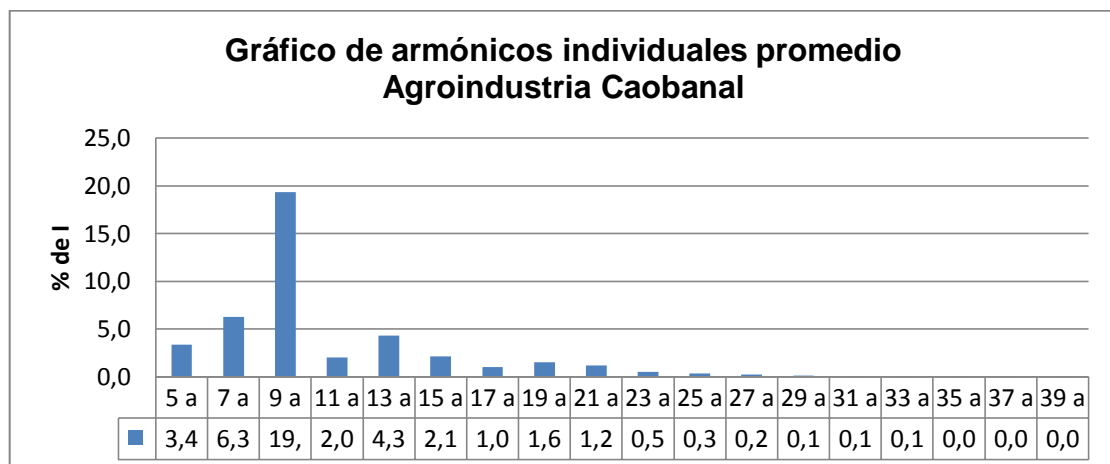
Figura 61. **Distorsión total de armónicas de corriente caso agroindustrial**



Fuente: elaboración propia con programa Power Vision.

En la figura 62 que se muestra a continuación se pueden observar los armónicos individuales de corriente en las instalaciones de agroindustria Caobanal, en este se observa que la armónica de mayor presencia es 7°.

Figura 62. **Armónicos individuales característicos de agroindustria estudiada**



Fuente: elaboración propia con programa Excel.

Como se describió en el capítulo 1 las cargas no lineales afectan directamente el factor de potencia, el cual está relacionado con el THDi y el THDv, en la figura siguiente se puede observar que el factor de potencia se ve afectado por las cargas no lineales conectadas al estudiado, cuando se realizó la medición de calidad de energía a este cliente se le estaba penalizando por bajo factor de potencia con un valor de 0,70 según lo registrado en un mes. Cuando se hizo la medición se observó que el factor de potencia oscila entre valores de 0,5 y 0,7.

Con el análisis de espectro de armónicas individuales se determinó que la armónica de mayor presencia era la 7° por lo cual el filtro estará diseñado para aislar esta.

6.9.1. Cálculo de filtro

Las mediciones realizadas durante 8 días muestran diferentes resultados de potencias activas y factores de potencia. Por lo tanto para el cálculo de los parámetros del filtro, se utilizará como base para ejemplificar la potencia promedio de las instalaciones agroindustria Caobanal los cuales son 90 kW y el factor de potencia de 0,70.

$$kVA_{carga} = \frac{KW}{pf} = \frac{90}{0,70} = 128,5 \approx 129 \text{ kVA}$$

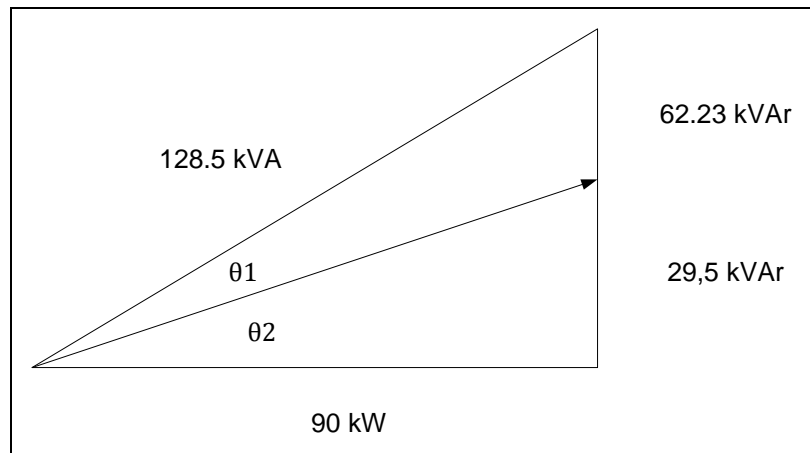
$$kVAr = kW(\tan(\cos^{-1}(pf))) = 90 * (\tan(\cos^{-1}(0,7))) = 90 * (1,02) = 91,81 \text{ kVAr}$$

Para corregir el factor de potencia a 0,95 por encima de lo requerido según la normativa NTSD.

$$kVAr = kW * (\tan(\cos^{-1}(fp))) = 90 * (\tan(\cos^{-1}(0,95))) = 90 * (0,3286) = 29,5 \text{ kVAr}$$

$$kVAr_{capacitor} = 91,81 - 29,5 = 62,23 \text{ KVA}$$

Figura 63. **Triángulo de potencia para cálculo de filtro y corrección de factor de potencia caso agroindustrial**



Fuente: elaboración propia.

$$\theta_1 = \text{para factor de potencia } 0,7$$

$$\theta_2 = \text{para factor de potencia } 0,95$$

En este caso utilizaremos un banco de capacitores de 60 kVAr para obtener un factor de potencia cercano a 0,95, ver figura anterior.

Se diseñará un filtro pasivo para 7ª armónica debido a que es la que observamos que tiene mayor presencia en las instalaciones de agroindustria Caobanal.

Para el diseño del filtro pasivo del 7ª armónica; consideremos la potencia calculada del banco igual a 60 kVAr con una tensión de diseño de 240 V, por la disponibilidad comercial del mismo.

Empezando por calcular las impedancias del banco se tiene:

$$X_C = \frac{V^2}{Q} = \frac{240^2 V}{60 \text{ kVA}r} = 0.96 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2\pi * 60 * 0.96} = 2.76 \text{ mF}$$

El filtro debe estar sintonizado para una frecuencia próxima al armónico a eliminar. Se toma el 6,8 armónico, por debajo del 7°, para permitir tolerancias durante la construcción del filtro y para evitar resonancias cerca del 7° armónico.

$$X_L = \frac{X_C}{h^2} = \frac{0.96}{6.8^2} = 0.021 \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{0.021}{2 * \pi * 60} = 55 \mu H$$

De tal forma a determinar el factor de calidad de sintonización procedemos a los siguientes cálculos; donde se considera 4% de desintonización. Teniendo en cuenta la relación:

$$Q = \frac{f_{res}}{\Delta\omega} = \frac{420}{(403.2 - 436.8)} = 12.5$$

Finalmente se toma el valor de Q igual a 10, por tanto:

$$R = \frac{X_L}{Q} = \frac{0.021}{10} = 0.0021 \Omega$$

Por tanto, los parámetros preliminares encontrados para el filtro son:

$$R = 0,0021 \quad L = 55 \mu\text{H} \quad C = 2,76 \text{ mF}$$

De no encontrarse el inductor indicado en los cálculos para el filtro se puede realizar de forma manual siguiendo los principios descritos en el capítulo IV en el apartado 4.10.1.

La construcción del filtro implica el cálculo y la fabricación de los inductores, los cuales están fabricados con acero al silicio de grano orientado, de acuerdo con los cálculos se requiere realizar un maquinado al laminado de acero al silicio de grano orientado, formando con el maquinado un entrehierro magnético, este entrehierro produce una disminución de la permeabilidad magnética del núcleo laminado del inductor y también, como es conocido, evita que el núcleo llegue a la saturación magnética.

7. CÓMO EVITAR ARMÓNICOS

En los capítulos IV, V, VI se estudió los armónicos de mayor presencia en las instalaciones de hospitales, industrias y agroindustrias

En este capítulo se concluirá los efectos que tienen los armónicos en los bancos de transformación y las soluciones planteadas a los mismos.

7.1. Caracterizaciones de los armónicos por el tipo instalaciones

Las instalaciones estudiadas comprenden hospitales, industrias y agroindustrias, es por tal motivo que se realizará la caracterización de las mismas por separado.

- Instalaciones hospitalarias: en las instalaciones hospitalarias se pudo observar que la armónica predominante es la 3era armónica.
 - Derivado de los estudios del factor de desclasificación del transformador, por la presencia de armónicos se determinó que en las instalaciones hospitalarias estudiadas el factor k se encuentra en un rango entre 1,05 y 2,54.
 - Los armónicos presentes en las instalaciones hospitalarias hicieron que la capacidad de los bancos de transformación disminuyera a valores entre 92% y 95%.

- Instalaciones industriales: en las instalaciones industriales se pudo observar que la armónica de mayor presencia en estas instalaciones es la 5ta armónica.
 - Derivado de los estudios del factor de desclasificación del transformador, por la presencia de armónicos se determinó que en las instalaciones industriales estudiadas el factor k se encuentra en un rango entre 1,16 y 1,54.
 - Los armónicos presentes en las instalaciones industriales hicieron que la capacidad de los bancos de transformación disminuyera a valores entre 94% y 95%.

- Instalaciones agroindustriales: en las instalaciones agroindustriales se pudo observar que no se cuenta con una armónica que sea predominante en estas, sin embargo se pudo observar que existían armónicas fuera de tolerancia, entre las cuales se encontraban la 5ta y la 7ma armónica.
 - Derivado de los estudios del factor de desclasificación del transformador, por la presencia de armónicos se determinó que en las instalaciones agroindustriales estudiadas el factor k se encuentra en un rango entre 1,09 y 3,32.
 - Los armónicos presentes en las instalaciones agroindustriales hicieron que la capacidad de los bancos de transformación disminuyera a valores entre 91% y 95%.

7.2. Filtros activos

Los filtros activos según lo visto en el capítulo III son la mejor opción para el filtrado de armónicos sin embargo estos tienen un costo elevado, que muchas veces los usuarios de las distribuidoras de electricidad no están dispuestos a pagarlos.

- Cuando utilizarlo: el filtro activo es idóneo para todas aquellas aplicaciones que presentan una gran variación de carga, un amplio espectro de armónicos a compensar y una distribución de cargas no lineales muy repartidas en forma de pequeñas cargas en la red, de forma que no es posible el uso de filtros pasivos individuales. Las aplicaciones más habituales son:
 - Líneas de alumbrado
 - Líneas de ordenadores

Líneas con diferentes tipos de cargas (alumbrado, ordenadores, variadores de velocidad) es decir, la utilización más habitual se encuentra en los edificios de oficinas, hospitales e industrias.

Los filtros activos son la mejor opción porque resuelven problemas de armónicos en el lado de las cargas restituyendo la forma de onda de la tensión a una forma senoidal. Los filtros activos resuelven problemas de armónicos en el lado de la red haciendo que la corriente absorbida sea senoidal. Pueden compensar también desequilibrio y el factor de potencia.

Entre sus funciones están:

- Reducción de los armónicos de corriente que circulen por la red
- Reducción de la corriente por el neutro. Si este existe la amplitud de los armónicos de corriente múltiplos de tres se suman a través del neutro.
- Reducción de los armónicos de tensión en los puntos de conexión de las cargas.
- Corrección del factor de potencia
- Equilibrado de la corriente que circula por las distintas fases
- Equilibrado de la tensión entre fases y con el neutro
- Regulación de la tensión y reducción del *flicker*

La combinación de filtros activos y pasivos permite reducir el tamaño, y por lo tanto el coste de los filtros activos manteniendo las ventajas que presentan estos últimos frente a los filtros pasivos.

7.3. Filtros pasivos

Supone un pequeño esfuerzo adicional y unos costes muy reducidos atenuar los armónicos dominantes con la compensación de energía reactiva fundamental, ya que la compensación se ha de realizar de todos modos y la mayoría de los compensadores actuales ya utilizan reactores de-sintonizadores. En la mayoría de los casos se evita deliberadamente la sintonización de las frecuencias de resonancia de un sistema a cualquier posible frecuencia armónica presente en el sistema de energía. Puede obtenerse un mayor beneficio realizando el proyecto considerando la resonancia, las corrientes

armónicas se reducen con mayor eficacia, y el riesgo de sobrecarga en el compensador no es tan alto como se supone generalmente. Como es natural debe instalarse cierto grado de reserva. Esto no supone un problema, ya que esto conlleva un mejor efecto de limpieza y una mayor eficiencia energética con un coste adicional muy pequeño.

Es de vital importancia mantener baja la impedancia del sistema, más incluso si existen filtros instalados que si no los hay. En caso contrario los efectos de los filtros pueden ser catastróficos.

Las corrientes armónicas causan más problemas para la red de suministro que las corrientes reactivas, por lo que es previsible que las distribuidoras de electricidad comiencen a incluir en la factura la eliminación de los armónicos así como la potencia reactiva fundamental, no tiene sentido facturar la potencia reactiva fundamental y no hacerlo con los armónicos.

En el desarrollo de este trabajo se determinó que los filtros pasivos pueden diseñarse para cada una de las instalaciones dependiendo de las características de los armónicos de cada carga.

Para las cargas hospitalarias se determinó que un filtro de tercera armónicas es el adecuado para estas instalaciones, por ser la armónica predominante.

Cuando existen problemas por corrientes armónicas se determinó que para las cargas industriales un filtro de quinta armónica es el adecuado para estas instalaciones, debido a que la armónica de mayor presencia es la quinta.

Cuando existen problemas por corrientes armónicas dentro de las agroindustrias se determinó que para este tipo de instalaciones no se observó una armónica particular, por lo cual en estas instalaciones se podría utilizar varios filtros para disminuir el efecto de las corrientes armónicas.

Los pasos para diseñar un filtro armónico usando las relaciones básicas que permitan una operación confiable pueden ser sintetizados como sigue:

- Calcular la capacitancia necesaria para mejorar el factor de potencia y eliminar cualquier penalización por la compañía del suministro eléctrico. La compensación del factor de potencia es generalmente aplicada para elevar el factor de potencia alrededor del 0,95 o mayor.
- Elegir un reactor para cambiar el capacitor serie a la frecuencia armónica deseada.
- Calcular la tensión pico en las terminales del capacitor y la corriente rms del reactor.
- Elegir componentes comerciales para el filtro y verificar el desempeño del filtro para asegurar que los componentes del capacitor operan entre los límites recomendados por la norma NTSD. Esto podría requerir de un número de iteraciones hasta que la reducción deseada de los niveles armónicos sea lograda.

El diseño de filtros usualmente ofrece un mecanismo robusto que provee una menor acción de filtración para una fracción de otras corrientes armónicas cuyo orden está cercano al cambio de frecuencia que no provee cambio del filtro a las frecuencias existentes.

La impedancia del filtro debe ser más pequeña que la presentada por el sistema al cambio de frecuencia. En sistemas de baja tensión en el cual la relación es pequeña, un filtro individual será suficiente para proveer la atenuación necesaria. Algunas veces una componente resistiva serie es incluida para el control de la corriente máxima permitida a través del filtro.

El estudio de la respuesta de los filtros sintonizados proporciona los siguientes aspectos relevantes:

- Los filtros sintonizados actúan como un camino de baja impedancia, absorbiendo efectivamente las corrientes armónicas para la cual fueron sintonizados.
- Es importante estar consciente que estos filtros pueden tomar corrientes de frecuencias vecinas, por lo tanto, será importante evaluar el impacto de esas corrientes adicionales en los parámetros operacionales del filtro.
- Para un consumo de potencia comercial hay un pronunciado incremento de la impedancia antes de la frecuencia de sintonización en los filtros serie LC de frecuencia cambiante. Este es un resultado de una condición de resonancia paralela entre el capacitor del filtro y la inductancia de la fuente.
 - Disminución de la corriente que circula por el neutro
 - Reducción de la distorsión armónica total, logrando de esta manera un aumento en el factor de potencia.

- Permite operar al transformador en condiciones cercanas a su capacidad nominal, la cual está definida sin considerar la presencia de componentes armónicas.
- Evita problemas a otras cargas susceptibles a la presencia de armónicas.

Como siguiente paso en este desarrollo, se tiene pensado utilizar reactores de alta calidad en la construcción del filtro.

7.4. Algunos tipos de conexiones de transformadores

Para este trabajo se determinó que la forma de conectar los transformadores puede servir para filtrar los armónicos entre el usuario y la red del distribuidor, sin embargo las distintas conexiones en los transformadores no elimina el efecto en los mismos.

7.5. Alternativas de solución propuestas al problema de distorsión armónica en hospitales, industrias y agroindustrias

Ya teniendo un modelo representativo del sistema eléctrico, es necesario proponer una solución para la atenuación del problema de distorsión armónica en los bancos de transformación de hospitales, industrias y agroindustrias, existen varias alternativas que técnicamente son posibles, pero no debemos olvidar que un estudio económico juega un papel muy importante para determinar que alternativa es la más conveniente.

A continuación se citan las alternativas que fueron analizadas y descartadas finalmente para la atenuación de la distorsión armónica:

- Limitar la potencia de las fuentes generadoras de armónicas. Esta solución no puede ser aplicable para la atenuación, ya que el proceso industrial no contempla una indisponibilidad de potencia del horno.
- Limitar el número de fuentes generadoras de armónicas que operan simultáneamente. Esta alternativa no es aplicable en establecimientos donde el principal generador de armónicos es fundamental en la operativa.
- Conectar en forma equilibrada cargas monofásicas en sistemas trifásicos
- Modificación de la instalación. No aplicable, ya que el elemento no lineal debe abastecerse en forma independiente.
- Instalación de un transformador con factor K. El transformador con factor K soportaría las consecuencias de la distorsión, sin embargo no estaremos evitando la inyección de corrientes armónicas aguas arriba del sistema corriéndose el riesgo de; bajo factor de potencia, peligros de resonancia, no cumplimiento con las normas NTSD.
- Cambiar conexiones del transformador, ésta es una buena opción
- Filtros activos de potencia: por las características de trabajo este tipo de filtro es muy efectivo, pero el alto costo sigue siendo el limitante de esta aplicación.

Por las razones expuestas arriba se consideró el diseño de un filtro pasivo tipo *shunt* para la mitigación del problema ya que el mismo ofrece las posibilidades de:

- Mejorar el factor de potencia
- Reducir la presencia de armónicas
- Minimizar el impacto sobre los transformadores de alimentación
- Aumentar la potencia disponible

7.6. Criterios para el diseño de un filtro

El objetivo de un filtro de armónicas es corregir el factor de potencia y proporcionar una trayectoria de baja impedancia para las armónicas de tensión o corriente, con el fin de prevenir su propagación en el resto del sistema. En este sentido, los filtros deben ser ubicados lo más cerca posible del nodo donde se generan los armónicas; sin embargo, esto no siempre es lo más conveniente por diversos aspectos técnicos y económicos.

El tamaño de un filtro se define en razón de la potencia reactiva de los condensadores a la frecuencia fundamental. Normalmente, la potencia del condensador utilizado se determina de los requisitos de potencia reactiva de la carga.

Los demás elementos se seleccionan para proporcionar al filtro la respuesta de frecuencia deseada. Los filtros sintonizados son utilizados para la eliminación de armónicas individuales de bajo orden con magnitudes considerables, mientras que los filtros amortiguados pasa-alto se utilizan normalmente para eliminar conjuntos de armónicas, generalmente de orden superior ($>13^{\circ}$).

El criterio ideal de diseño es eliminar completamente la distorsión producida por la carga. Sin embargo, dicho criterio no resulta práctico desde el punto de vista técnico y económico debido a la magnitud y costos de los filtros finalmente requeridos.

Un criterio más práctico consiste en diseñar un filtro para reducir las distorsiones a niveles aceptables, a partir de una normativa, que para el caso de Guatemala son las Normas Técnicas del Servicio de Distribución.

8. ANÁLISIS ECONÓMICO

Derivado de las propuestas de solución ya analizadas técnicamente para evitar el efecto que tienen las armónicas en los bancos de transformación, como todo proyecto se debe analizar económicamente si la implementación de este es viable.

Una empresa suele comparar diferentes alternativas para comprobar si un proyecto le conviene o no. Las principales alternativas que se tienen y que se evaluarán en este trabajo son:

- La implementación de filtros pasivos
- La implementación de filtros activos

Los efectos de las armónicas en los transformadores son:

- Incremento en las pérdidas del cobre
- Incremento en las pérdidas del hierro
- Posible resonancia entre las bobinas del transformador y la capacitancia de la línea.
- Esfuerzos de aislamiento y por consiguiente disminución de la vida útil, en los transformadores.

Derivado de los incisos anteriormente expuestos, los armónicos representan pérdidas en dinero, para los hospitales, industrias y agroindustrias.

También habrá otros efectos derivados de los armónicos que representarán un gasto adicional:

- Daño de equipos
- Paros en la producción
- Disminución del factor de potencia y por consiguiente, penalizaciones por parte del distribuidor

Tal como se vio en el capítulo 7, existen soluciones para filtrar las armónicas, las cuales pueden de acuerdo al valor de los mismos como cualquier proyecto pueden ser evaluados económicamente para determinar la viabilidad de la instalación de los mismos. Los métodos de evaluación se proponen en el capítulo 8.

Normalmente la alternativa con el VAN más alto suele ser la mejor para la entidad; pero no siempre tiene que ser así. Hay ocasiones en las que una empresa elige un proyecto con un VAN más bajo debido a diversas razones como podrían ser la imagen que le aportará a la empresa, por motivos estratégicos u otros motivos que en ese momento interesen a dicha entidad.

8.1. Análisis económico de soluciones por Valor Presente Neto

Es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión. La metodología consiste en descontar al momento actual (es decir, actualizar mediante una tasa) todos los flujos de caja futuros del proyecto. A este valor se le resta la inversión inicial, de tal modo que el valor obtenido es el valor actual neto del proyecto.

El método de valor presente es uno de los criterios económicos más ampliamente utilizados en la evaluación de proyectos de inversión. Consiste en determinar la equivalencia en el tiempo 0 de los flujos de efectivo futuros que genera un proyecto y comparar esta equivalencia con el desembolso inicial.

Cuando dicha equivalencia es mayor que el desembolso inicial, entonces, es recomendable que el proyecto sea aceptado.

La fórmula que nos permite calcular el Valor Actual Neto es:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_0$$

Donde:

V_t = representa los flujos de caja en cada periodo t

I_0 = es el valor del desembolso inicial de la inversión

N = es el número de períodos considerado

El tipo de interés es k. Si el proyecto no tiene riesgo, se tomará como referencia el tipo de la renta fija, de tal manera que con el VAN se estimará si la inversión es mejor que invertir en algo seguro, sin riesgo específico. En otros casos, se utilizará el coste de oportunidad.

Tabla XXXIV. **Valor Presente Neto toma de decisiones**

Valor	Significado	Decisión a tomar
VAN > 0	La inversión produciría ganancias por encima de la rentabilidad exigida (r)	El proyecto puede aceptarse.
VAN < 0	La inversión produciría ganancias por debajo de la rentabilidad exigida (r)	El proyecto debería rechazarse.
VAN = 0	La inversión no produciría ni ganancias ni pérdidas	Dado que el proyecto no agrega valor monetario por encima de la rentabilidad exigida (r), la decisión debería basarse en otros criterios, como la obtención de un mejor posicionamiento en el mercado u otros factores.

Fuente: elaboración propia.

El valor actual neto es muy importante para la valoración de inversiones en activos fijos, a pesar de sus limitaciones en considerar circunstancias imprevistas o excepcionales de mercado. Si su valor es mayor a cero, el proyecto es rentable, considerándose el valor mínimo de rendimiento para la inversión.

8.2. Análisis económico de soluciones por TIR

La Tasa Interna de Retorno o Tasa Interna de Rentabilidad (TIR) de una inversión, está definida como la tasa de interés con la cual el valor actual neto o Valor Presente Neto (VAN o VPN) es igual a cero. El VAN o VPN es calculado a partir del flujo de caja anual, trasladando todas las cantidades futuras al presente. Es un indicador de la rentabilidad de un proyecto, a mayor TIR, mayor rentabilidad.

Se utiliza para decidir sobre la aceptación o rechazo de un proyecto de inversión. Para ello, la TIR se compara con una tasa mínima o tasa de corte, el coste de oportunidad de la inversión (si la inversión no tiene riesgo, el coste de

oportunidad utilizado para comparar la TIR será la tasa de rentabilidad libre de riesgo). Si la tasa de rendimiento del proyecto (expresada por la TIR) supera la tasa de corte, se acepta la inversión; en caso contrario, se rechaza.

8.3. Análisis económico de soluciones por beneficio/costo

Contrario al VAN, cuyos resultados están expresados en términos absolutos, este indicador financiero expresa la rentabilidad en términos relativos. La interpretación de tales resultados es en centavos por cada euro o dólar que se ha invertido.

Para el cómputo de la relación beneficio costo (B/C) también se requiere de la existencia de una tasa de descuento para su cálculo.

En la relación de beneficio/costo, se establecen por separado los valores actuales de los ingresos y los egresos, luego se divide la suma de los valores actuales de los costos e ingresos.

Situaciones que se pueden presentar en la relación beneficio costo:

- Relación $B/C > 0$: índice que por cada quetzal de costos se obtiene más de un quetzal de beneficio. En consecuencia, si el índice es positivo o cero, el proyecto debe aceptarse.
- Relación $B/C < 0$: índice que por cada dólar de costos se obtiene menos de un dólar de beneficio.

Entonces, si el índice es negativo, el proyecto debe rechazarse.

El valor de la relación beneficio/costo cambiará según la tasa de actualización seleccionada, o sea, que cuanto más elevada sea dicha tasa, menor será la relación en el índice resultante.

La fórmula que se utiliza es:

$$B/C = \frac{\sum_{i=0}^n \frac{V_i}{(1+i)^n}}{\sum_{i=0}^n \frac{C_i}{(1+i)^n}}$$

Dónde:

B/C = relación beneficio / costo

V_i = valor de la producción (beneficio bruto)

C_i = egresos ($i = 0, 2, 3, 4, \dots, n$)

i = tasa de descuento

CONCLUSIONES

1. Los principales efectos que tienen las cargas no lineales en los bancos de transformación según el estudio realizado es la disminución de la capacidad del transformador dependiendo de la cantidad de armónicos presentes en el mismo.
2. Derivado que los armónicos en el banco de transformación producen calentamiento, esto conlleva la reducción de la vida útil del transformador el cual dependerá de la distorsión total de corriente en el mismo.
3. En las instalaciones hospitalarias se pudo observar que la armónica predominante es la 3era armónica.
4. Derivado de los estudios del factor de desclasificación del transformador, por la presencia de armónicos se determinó que en las instalaciones hospitalarias estudiadas el factor k se encuentra en un rango entre 1,05 y 2,54.
5. Los armónicos presentes en las instalaciones hospitalarias hicieron que la capacidad de los bancos de transformación disminuyera a valores entre 92% y 95%.
6. En las instalaciones industriales se pudo observar que la armónica de mayor presencia en estas instalaciones es la 5ta armónica.

7. Derivado de los estudios del factor de desclasificación del transformador, por la presencia de armónicos se determinó que en las instalaciones hospitalarias estudiadas el factor k se encuentra en un rango entre 1,16 y 1,54.
8. Los armónicos presentes en las instalaciones industriales hicieron que la capacidad de los bancos de transformación disminuyera a valores entre 94% y 95%.
9. En las instalaciones agroindustriales se pudo observar que no se cuenta con una armónica que sea predominante en estas, sin embargo se pudo observar que existían armónicas fuera de tolerancia según las Normas Técnicas del Servicio de Distribución, entre las cuales se encontraban la 5ta y la 7ma armónica.
10. Derivado de los estudios del factor de desclasificación del transformador, por la presencia de armónicos se determinó que en las instalaciones agroindustriales estudiadas el factor k se encuentra en un rango entre 1,09 y 3,32.
11. Los armónicos presentes en las instalaciones agroindustriales hicieron que la capacidad de los bancos de transformación disminuyera a valores entre 91% y 95%.
12. Los elementos más afectados en el banco de transformación son los devanados y los aislamientos del transformador, ya que estos sufren mayor calentamiento por lo cual el aislamiento y su vida útil disminuye, entre mayor sea la distorsión armónica total de corriente menor será la vida útil del transformador.

13. Para las instalaciones hospitalarias la armónica de mayor presencia era la 3ra, por lo cual un filtro pasivo de la tercera armónica, esto reduciría la distorsión armónica a niveles dentro de tolerancia y mejoraría el factor de potencia.
14. Para instalaciones industriales se determinó que la armónica de mayor presencia es la 5ta armónica, por lo cual un filtro pasivo de quinta armónica reduciría la distorsión armónica a valores dentro de tolerancia y mejoraría el factor de potencia.
15. Para las instalaciones agroindustriales no se observó un comportamiento típico o una armónica predominante por lo cual se deber realizar el estudio y la medición de calidad de energía para determinar que filtro y para que armónica deber realizarse.
16. Derivado de las cargas características para cada tipo de instalaciones hay cargas que se determinó son las que tienen mayor impacto en la distorsión armónica como lo son: arrancadores electrónicos, variadores de velocidad para motores de corriente continua, convertidores de frecuencia para motores asíncronos y síncronos, circuitos magnéticos saturados (transformadores), lámparas flourecentes, todas estas cargas generan corrientes armónicas.
17. Los beneficios económicos al filtrar los armónicos son: la reducción de costos de operación debido a que las pérdidas en el transformador por corrientes parásitas y por efecto de Joule disminuirán.

18. Con la utilización de filtros se evitará pagar la penalización por bajo factor de potencia al distribuidor y se evitará pagar las indemnizaciones establecidas en las NTSD si se cuenta con armónicos de corriente fuera de tolerancia.
19. Al filtrar los armónicos la vida útil de los equipos será mayor, pues los fenómenos que los afectan son controlados y el diseño de la calidad de energía garantiza la operación bajo diversas condiciones de fabricación.
20. Con la implementación de filtros de armónicos no habrá paros en los procesos de producción generados por las perturbaciones armónicas, por consiguiente no habrá pérdidas económicas para el caso de las industrias.
21. En el caso de los hospitales se requiere confiabilidad en la calidad de energía por la criticidad de los equipos utilizados, por lo cual la utilización de filtros de armónicos mejorará la calidad de energía y evitará el daño de los equipos por perturbaciones armónicas.

RECOMENDACIONES

1. Que toda empresa de distribución de energía eléctrica debe velar por la calidad de producto suministrada a los clientes.
2. Que los clientes cumplan con evitar provocar perturbaciones que afecten la calidad de producto en la red de distribución.
3. Las empresas de distribución eléctrica no solo deben monitorear la presencia de armónicos fuera de tolerancia en las instalaciones de los usuarios, sino que también se penalicen a los usuarios que tienen problemas de armónicos de corriente, para así lograr que los usuarios se preocupen por realizar las acciones correctivas y así evitar las perturbaciones de la forma de onda en la red de distribución, ya que en la actualidad la CNEE solo establece que los armónicos deben medirse y monitorearse pero no se ha establecido que se cobre la penalización a los usuarios según Resolución CNEE 56-2003.
4. Que las empresas distribuidoras antes de conectar grandes usuarios a la red de distribución, verifique que tipo de cargas y determinar por medio de la mismas las componentes armónicas que estarán presentes en las instalaciones del nuevo cliente y así condicionarlo a que coloque los filtros correspondiente para las armónicas de mayor presencia.

5. Tanto para el caso agroindustria como para los casos de hospitales e industrias debe realizarse la medición de calidad de energía para determinar los armónicos predominantes y proponer la solución correspondiente.

6. Que el profesional en la rama eléctrica que se desenvuelve en el negocio de la distribución de energía eléctrica, conozca el impacto que tienen los índices de calidad y así lograr una mejor comprensión e importancia de priorizar las instalaciones y el beneficio de una correcta ejecución de la actividad de mantenimiento.

BIBLIOGRAFÍA

1. AMORÓS, Eduardo. *Comportamiento organizacional: en busca del desarrollo de ventajas competitivas*. Perú: Escuela de Economía, USAT 2009. 76 p.
2. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *Resolución CNEE-49-99, Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD)*. Diario de Centro América 18 de noviembre de 1999, Guatemala. 25 p.
3. GENTILEZA, Clas. *Calidad de suministro de energía eléctrica* [en línea]. [http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1765&edi=92&xit=calidad - del- suministro-de-la - energia- eléctrica - 40parte - i41](http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1765&edi=92&xit=calidad%20-%20del%20-%20suministro-de-la%20-%20energia-%20el%C3%A9ctrica%20-%2040parte%20-%20i41). [Consulta: 28 de enero de 2012].
4. Institute of Electrical and Electronics Engineers. *IEEE STANDARD 519-1992, recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems*. Estados Unidos de América: IEEE. 1992. 25 p.
5. Procobre. *Calidad de energía eléctrica* [en línea]. [http://www.procobre.org/archivos/peru/calidad _ de _energia .pdf](http://www.procobre.org/archivos/peru/calidad_de_energia.pdf). [Consulta: 10 de febrero de 2012].

6. SAGRADO, Carlos. *Efecto de Armónicos en la Industria* [en línea]. <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=567&edi=7&xit=conceptos-basicos-de-armonicas>. [Consulta: 6 de marzo de 2012].
7. SARMIENTO, Jadán. *Fundamentos de la calidad de energía* [en línea]. <http://www.watergymex.org/contenidos/rtecnicos/Optimizando%20la%20Operacion%20y%20el%20Mantenimiento/Calidad%20de%20la%20Energia.pdf>. [Consulta: 10 de marzo de 2012].
8. Scielo, ingeniería, investigación y tecnología. [en línea]. *Aplicación de un filtro activo de corriente para mejorar la calidad de la energía en un sistema eléctrico industrial*. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-77432010000400003&script=sci_arttext. [Consulta: 10 de enero del 2012].
9. TEJADA, Llamas. *Efecto de los armónicos en los sistemas eléctricos*. [en línea]. <http://www.mty.itesm.mx/etie/deptos/ie/rofesores/allamas/cursos/ueee/armonicas/07Efectarm.PDF>. [Consulta: 25 de febrero de 2012].
10. TÉLLEZ RAMÍREZ, Eugenio. *Calidad de energía* [en línea]. <http://www.watergymex.org/contenidos/rtecnicos/Optimizando%20la%20Operacion%20y%20el%20Mantenimiento/Calidad%20de%20la%20Energia.pdf>. [Consulta: 15 de marzo de 2012].

11. Universidad Nacional de Asunción, Facultad Politécnica. *Análisis y propuesta de solución al problema de alta distorsión armónica*. [en línea]. [http:// upload. wikimedia. org/ wikipedia /commons /0/09/ Analisis_de_Armonicos.pdf](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/09/Analisis_de_Armonicos.pdf). [Consultado: 15 de febrero del 2012]

APÉNDICE

Características técnicas del equipo utilizado para realizar las mediciones de calidad de energía

Para realizar las mediciones se utilizaron equipos QNA 412 marca Circutor, los cuales son utilizados por la distribuidora Energuate para medir la calidad de energía de los clientes conectados a su red de distribución.

El analizador de calidad QNA-412 es un equipo especialmente diseñado para el análisis de la calidad de suministro eléctrico según las especificaciones de la norma IEC 61000-430.

Además de las entradas de tensión (aisladas mediante transformadores), dispone de 4 entradas de corriente (3 fases+neutro). Esto hace que además del cálculo de la calidad de suministro, el QNA- 412 sea utilizado como analizador de redes.

La batería interna del equipo permite realizar medidas frente a cualquier evento de caída de tensión (interrupción o hueco).

El QNA-412 dispone de tres entradas de tensión de c.a. que permiten analizar simultáneamente la tensión de las tres fases y la frecuencia de una determinada red (calidad de suministro).

Continuación del apéndice.

Para realizar el análisis de la calidad de suministro eléctrico según la norma IEC 61000-4-30, el QNA-412 utiliza un DSP a través del cual se analizan todos los ciclos de las tres fases de tensión y comprueba si se produce alguna incidencia (hueco, interrupción, sobretensión). Realizando también el cálculo de los armónicos y *flicker* según la norma IEC61000-4-7 y 61000-4-15 respectivamente la cual es coherente con las Normas Técnicas del Servicio de Distribución utilizadas en Guatemala.

El analizador de calidad QNA-412



Fuente: elaboración propia