

**DISEÑO ELÉCTRICO: LINEAMIENTOS PARA SATISFACER EL REQUISITO  
DE ANÁLISIS DE CARGA Y CONTENIDO DE ARMÓNICOS PARA EL SISTEMA  
DE DISTRIBUCIÓN, DEFINIDO EN EL ARTÍCULO 10.1 DEL RETIE 2013.**

**LINA JANID GÓMEZ MARÍN  
DIEGO FERNANDO DÍAZ PRADA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA  
BUCARAMANGA  
2016**

**DISEÑO ELÉCTRICO: LINEAMIENTOS PARA SATISFACER EL REQUISITO  
DE ANÁLISIS DE CARGA Y CONTENIDO DE ARMÓNICOS PARA EL SISTEMA  
DE DISTRIBUCIÓN, DEFINIDO EN EL ARTÍCULO 10.1 DEL RETIE 2013.**

**LINA JANID GÓMEZ MARÍN  
DIEGO FERNANDO DÍAZ PRADA**

**Monografía presentada como requisito parcial para optar por el título de  
Especialista en Sistemas de Distribución de la Energía Eléctrica**

**Director  
GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA  
PhD en Ingeniería Industrial**

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

**2016**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN.....	16
1. GENERALIDADES .....	18
1.1 CARGAS LINEALES.....	18
1.2 CARGAS NO LINEALES .....	19
1.3 DISTORSIÓN ARMÓNICA .....	20
1.4 DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL.....	21
1.5 DISTORSIÓN DE LA DEMANDA TOTAL .....	21
1.6 FACTOR DE DIVERSIDAD (FD) .....	22
1.7 FACTOR DE ATENUACIÓN (FA).....	23
1.8 COMPONENTES ARMÓNICAS DE TENSIÓN Y DE CORRIENTE.....	23
1.9 COMPONENTES ARMÓNICAS EN EL SISTEMA ELÉCTRICO .....	24
1.10 CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA .....	26
1.11 SISTEMA ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN.....	27
2. CARACTERIZACIÓN DE CARGAS.....	28
2.1 CLASIFICACIÓN DE CARGAS LINEALES:.....	28
2.2 CLASIFICACIÓN DE CARGAS NO LINEALES: .....	29
2.3 CONTENIDO DE COMPONENTES ARMÓNICAS EN LAS CARGAS NO LINEALES .....	31
3. NORMATIVIDAD Y LÍMITES DEL CONTENIDO DE LAS COMPONENTES ARMÓNICAS.....	37
3.1. IEEE 519 - 2014: PRÁCTICA RECOMENDADA Y REQUISITOS PARA EL CONTROL DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA. ....	37

3.2. IEC 61000-3-2: LÍMITES PARA EMISIONES DE CORRIENTES ARMÓNICAS (EQUIPOS CON ENTRADA DE CORRIENTE IGUAL O MENOR A 16 A POR FASE).....	40
3.3. IEC 61000-3-4: LÍMITES PARA EMISIONES DE CORRIENTES ARMÓNICAS (EQUIPOS CON ENTRADA DE CORRIENTE SUPERIOR A 16 A POR FASE)...	45
4. MÉTODOS PARA MITIGAR EL IMPACTO DE LAS COMPONENTES ARMÓNICAS EN EL SISTEMA ELÉCTRICO. ....	50
4.1 CONTENIDO DE ARMÓNICOS EN EL PUNTO DE CONEXIÓN. ....	51
4.2 CÁLCULO DE CAPACIDAD DE CORRIENTE EN LÍNEAS Y NEUTROS TENIENDO EN CUENTA LA DISTORSIÓN DE LA CORRIENTE. ....	57
4.3 CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO Y SELECCIÓN DE TRANSFORMADORES. ....	64
4.4 USO DE FILTROS PARA CONTROL DE ARMÓNICOS. ....	66
4.4.1 Selección de filtros.....	67
5. FUENTES DE ENERGÍAS RENOVABLES Y SU IMPACTO EN LA GENERACIÓN DE COMPONENTES ARMÓNICAS.....	77
5.1 GENERACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA.....	77
5.2 GENERACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA.....	81
5.3 METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DE NUEVAS FUENTES ARMÓNICAS.....	84
6. ANÁLISIS DE CASOS EXPERIMENTALES.....	86
6.1 ANÁLISIS DE UN SISTEMA ELÉCTRICO MONOFÁSICO CON CARGAS LINEALES Y NO LINEALES.....	86
6.2 TRANSFORMADOR EN SECTOR PÚBLICO.....	92
6.3 ESTUDIO DE CARGAS EN UN EDIFICIO DE AULAS ACADÉMICAS.....	93
6.4 TRANSFORMADOR PARA USO RESIDENCIAL.....	96
6.5 SISTEMA DE COMUNICACIONES.....	97
7. ASPECTOS A CONSIDERAR CON RELACIÓN A LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA ETAPA DEL DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA.....	100

8. CONCLUSIONES .....	103
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105
BIBLIOGRAFÍA.....	110
ANEXOS .....	115

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Curvas de tensión y corriente en cargas lineales .....	19
Figura 2. Curvas de tensión y corriente en cargas no lineales .....	19
Figura 3. Flujograma para clasificar los tipos de equipos de acuerdo a la norma IEC 61000-3-2 .....	42
Figura 4. Ubicación de filtros en las instalaciones eléctricas .....	68
Figura 5. Filtro con inductor en serie. ....	69
Figura 6. Diagrama de eléctrico de filtro resonante comercial en paralelo .....	70
Figura 7. Diagrama de eléctrico de filtro resonante comercial en serie. ....	72
Figura 8. Neutral current blocking filter. ....	73
Figura 9. Conexión transformador zig-zag. ....	75
Figura 10. Filtro activo con conexión en serie y paralelo. ....	76
Figura 11. THDI, THDV, FP .....	78
Figura 12. THDI vs irradiancia .....	79
Figura 13. Armónicos 1°, 3° y 5° Vs Irradiación .....	80
Figura 14. Generación de turbina Vs. velocidad del viento. ....	82
Figura 15. Forma de onda de la señal de corriente a velocidad de viento de 9,2 m/s .....	82
Figura 16. Forma de onda de la señal de tensión a velocidad de viento de 9,2 m/s .....	83
Figura 17. Espectro de las componentes armónicas de la corriente en la turbina. ....	83
Figura 18. Espectro de las componentes armónicas de la tensión en la turbina. ..	84
Figura 19. Tensión del sistema eléctrico de la referencia [11]. ....	87
Figura 20. Corriente del sistema eléctrico de la referencia [11]. ....	88
Figura 21. THDV del sistema eléctrico de la referencia [11]. ....	89

Figura 22. THDI del sistema eléctrico .....89

Figura 23. Factor de potencia del sistema eléctrico .....90

Figura 24. Espectro de armónicos de la tensión del sistema. ....91

Figura 25. Espectro de armónicos de la corriente del sistema. ....91

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Diferencias entre cargas eléctricas lineales y no lineales .....	20
Tabla 2. Componente armónicas de la corriente en televisores LCD .....	31
Tabla 3. Componente armónicas de la corriente en lavadoras en su ciclo de enjuague.....	32
Tabla 4. Componente armónicas de la corriente en refrigeradoras .....	32
Tabla 5. Componente armónicas de la corriente en hornos microondas .....	33
Tabla 6. Componente armónicas de la corriente en computadores de torre .....	33
Tabla 7. Componente armónicas de la corriente en lámparas ahorradoras no dimerizables .....	34
Tabla 8. Componente armónicas de la corriente de un equipo de aire acondicionado de 24000 BTU con variador de frecuencia .....	35
Tabla 9. Límites de la distorsión armónica de tensión para diferentes niveles de tensión.....	38
Tabla 10. Límites de la distorsión armónica de corriente para sistemas eléctricos con tensiones entre 120 V hasta 69 kV.....	39
Tabla 11. Límite del valor eficaz de las componentes armónicas de la corriente para equipos clase A .....	43
Tabla 12. Límite del valor eficaz de las componentes armónicas de la corriente para equipos clase C .....	44
Tabla 13. Límite del valor eficaz de las componentes armónicas de la corriente para equipos clase D .....	44
Tabla 14. Valores límites de emisión para equipos de $I > 16A$ cuando $S_{equ} \leq S_{sc} / 33$ .....	46

Tabla 15. Límites de emisión para equipos monofásicos o trifásicos desequilibrados con $R_{sce} > 33$ .....	48
Tabla 16. Corriente admisible según el armónico para sistemas trifásicos balanceados. ....	49
Tabla 17. Límites de armónicos de tensión a usuarios individuales .....	52
Tabla 18. Límites para instalaciones eléctricas con demanda máxima $\leq 10$ kW ..	55
Tabla 19. Factor de reducción para cables que conduce corrientes distorsionadas .....	59
Tabla 20. Los valores típicos de cargas monofásicas no lineales. ....	62
Tabla 21. Valores eficaces de corriente (mínima, máxima y promedio) .....	95
Tabla 22 Valores de distorsión armónica total de tensión (THDV) .....	95

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. cálculo de capacidad de corriente en líneas y neutros teniendo en cuenta el contenido de armónicos. ....	115
ANEXO B. Método para calcular la carga a instalar en transformadores secos e inmersos en aceite.....	119

## RESUMEN

**TÍTULO:** DISEÑO ELÉCTRICO: LINEAMIENTOS PARA SATISFACER EL REQUISITO DE ANÁLISIS DE CARGA Y CONTENIDO DE ARMÓNICOS PARA EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN, DEFINIDO EN EL ARTÍCULO 10.1 DEL RETIE 2013.\*

**AUTORES:** DIEGO FERNANDO DÍAZ PRADA\*\*  
LINA JANID GÓMEZ MARÍN

**PALABRAS CLAVES:** Componentes armónicas, cargas lineales, cargas no lineales, caracterización de cargas, cargas futuras, distorsión armónica total, factor de potencia.

### DESCRIPCIÓN:

La implementación de rectificadores de onda en los diferentes equipos que son instalados en complejos residenciales, comerciales, entre otros, conlleva a que cada vez se generen más distorsiones de onda en las instalaciones eléctricas internas, y en las redes de distribución, y aunque la distorsión generada por un solo equipo no es significativa, la sumatoria de las distorsiones de todos los equipos instalados en un complejo puede ocasionar impactos en el sistema de distribución, tales como sobrecalentamiento de equipos, sobrecalentamiento de conductores, accionamiento de protección, etc, de ahí que el reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE), exija que en los diseños eléctricos se realice un estudio de distorsiones armónicas previo a la ejecución del proyecto.

Este trabajo se enfoca en la realización de una guía donde se encuentren aspectos relevantes a tener en cuenta en el diseño de instalaciones eléctricas, orientado al análisis de la distorsión de ondas debido a la instalación de cargas no lineales. Contiene la caracterización de cargas eléctricas con el fin de conocer el orden y la magnitud de las armónicas generadas, y métodos de mitigación de estas distorsiones.

El propósito de este documento es el de establecer pautas y procedimientos para mitigar las componentes armónicas en determinada instalación eléctrica, por lo tanto se realiza una caracterización de cargas a diferentes equipos de uso común, mediante la compilación de información de análisis en casos prácticos, con el fin de conocer el comportamiento de las distorsiones de ondas en cada uno de ellos o a determinada instalación eléctrica. Además es necesario considerar la normatividad vigente la cual regula la calidad de la potencia para definir los límites de distorsiones permitidos.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánica. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Especialización en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica. Director: Gabriel Ordóñez Plata, PhD en Ingeniería Industrial

## ABSTRACT

**TITLE:** ELECTRIC DESIGN: GUIDELINES TO SATISFY THE REQUIREMENT OF LOAD ANALYSIS AND HARMONICS CONTENT FOR DE DISTRIBUTION SYSTEM DEFINED IN THE ARTICLE 10.1 OF RETIE 2013\*

**AUTHORS:** DIEGO FERNANDO DÍAZ PRADA\*\*  
LINA JANID GÓMEZ MARÍN

**KEYWORDS:** Harmonic components, load characterization, harmonic distortion.

### DESCRIPTION:

The Implementation of wave rectifiers in the different equipments that are installed in residential, commercials, and others complexes; brings that every time are generated more wave distortions in electrical internal installation, and in distribution networks, and though the distortion generated by one equipment is not significant, the sumatoria of the distortions of all the equipments installed in a complex can cause impacts in the distribution system, impacts like overheating of equipments, overheating of conductors, operation of protections, etc, therefore the “Reglamento técnico de instalaciones eléctricas” (RETIE) demands that in electric designs a study of harmonics distortions must be included.

This work focuses in the realization of a guide, where can be found relevant aspects to consider in the design of electric installations oriented in the analysis of wave distortions caused by nonlinear loads. Contain the characterization of electric loads with the purpose of know de order and magnitude of the harmonics generated, and some methods of mitigation of the distortions.

The purpose of this document is to establish guidelines and procedures to mitigate the harmonics components in certain electric installation; therefore, a load characterization of different equipments of common use is done through the compilation of results of practical cases, to know the behavior of the wave distortions on each one of them or to determined electric installation. Besides is necessary to consider the valid normativity, which regulate the power quality, to define the limits of distortions allowed.

---

\* Degree work

\*\* Faculty of Physical Engineering Mechanics. School of Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications. Specialization in Distribution Systems Electric Power. Director: Gabriel Ordoñez Plata, PhD in Industrial Engineering

## INTRODUCCIÓN

A raíz del desarrollo tecnológico en los dispositivos eléctricos y electrónicos, se ha incrementado la instalación de equipos y artefactos de uso residencial y comercial que presentan un comportamiento no lineal. Estas cargas generan distorsiones en las señales de tensión y corriente. El incremento y la propagación de cargas no lineales afectan el comportamiento en las redes de distribución y traen consigo efectos que se evidencian en los diferentes elementos y dispositivos que hacen parte del sistema eléctrico.

Debido a lo anterior, en la resolución 90795 del 25 de julio del 2014 por la cual se aclara y se corrige unos yerros en el Reglamento Técnico de instalaciones eléctricas-RETIE, establecido mediante la Resolución 90708 de 2013 [34], en el artículo 10.1 “requerimientos generales de las instalaciones eléctricas”, obliga que todo diseño eléctrico debe contar con un análisis de carga considerando el contenido de las componentes armónicas de las señales distorsionadas, que pueden afectar tanto la red de suministro de energía eléctrica como las cargas que se conectan a ella.

Por lo tanto se hace necesario desde la etapa del diseño de las instalaciones eléctricas considerar y evaluar cada una de las causas y efectos que trae consigo la utilización de las diferentes cargas no lineales. De tal forma se requiere de una caracterización adecuada de los usuarios residenciales y/o comerciales para observar el comportamiento de las cargas conectadas simultáneamente al sistema eléctrico, con el fin de determinar el contenido total de las componentes armónicas que se evidencian en el punto de acoplamiento común, estableciendo los límites que no afectan el buen desempeño y funcionamiento del sistema eléctrico considerando los establecidos por normas internacionales como el estándar IEEE 519 – 2014 y la norma europea EN50160.

En este documento, se realiza el planteamiento de una guía práctica donde se consideran los efectos que producen las señales distorsionadas en el sistema eléctrico, analizando el contenido de las componentes armónicas, para proponer un procedimiento a partir de normas, conceptos y artículos científicos para evaluar y definir la distorsión total de armónicos en el punto de acoplamiento común; para establecer pautas y recomendaciones que orienten un adecuado diseño de las instalaciones de un sistema eléctrico, buscando un óptimo funcionamiento desde la etapa del diseño eléctrico.

## **1. GENERALIDADES**

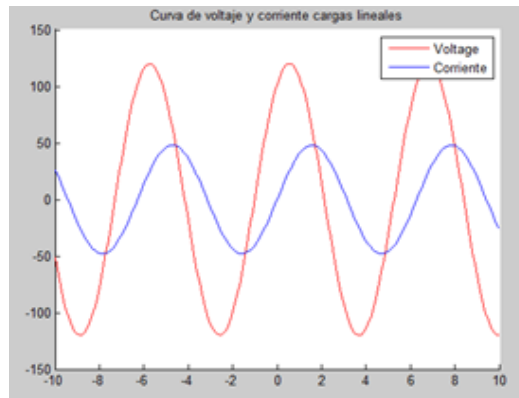
En los sistemas eléctricos, se encuentran diferentes tipos de cargas instaladas, las cuales pueden ser clasificadas en cargas lineales e invariantes en el tiempo, cargas no lineales y cargas variantes en el tiempo, estas dos últimas generan distorsiones en las señales de corriente y tensión, impactando el entorno en el cual se encuentren conectadas.

Las distorsiones armónicas afectan los equipos, componentes y dispositivos que se encuentran instalados en el sistema eléctrico, generando calentamiento en conductores y transformadores, disparo de los interruptores termo-magnéticos y distorsión en las señales de comunicaciones, entre otros.

### **1.1 CARGAS LINEALES**

Son aquellas cargas que son de tipo resistivo, inductivo, capacitivo o inductivo-capacitivo conectadas a una fuente de tensión alterna; en la cual la forma de onda de corriente tiene la misma forma de onda de tensión como se muestra en la Figura 1.

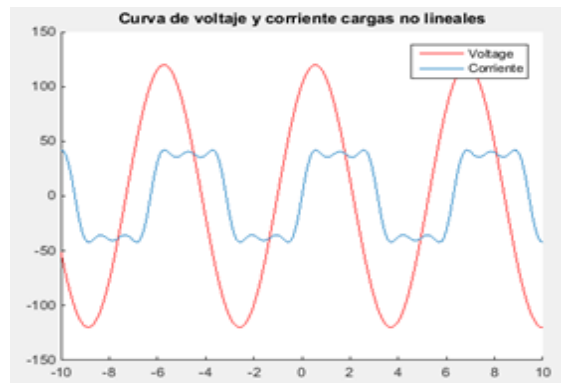
**Figura 1. Curvas de tensión y corriente en cargas lineales**



## 1.2 CARGAS NO LINEALES

Son aquellas cargas en las cuales se tiene algún dispositivo eléctrico o electrónico que controla el paso de la corriente, por lo tanto no se garantiza una relación de característica lineal entre su onda de tensión y de corriente como se muestra en la Figura 2.

**Figura 2. Curvas de tensión y corriente en cargas no lineales**



Las cargas no lineales distorsionan las señales de tensión y corriente. Para cuantificar la distorsión y sus efectos se obtienen las componentes armónicas para establecer como se afecta la instalación eléctrica y otras cargas eléctricas (lineales o no lineales) que se encuentren conectadas cerca de ellas.

En la Tabla 1 [32] se presentan las diferencias existentes entre las cargas lineales y no lineales.

**Tabla 1. Diferencias entre cargas eléctricas lineales y no lineales**

<b>CARGAS LINEALES</b>	<b>CARGAS NO LINEALES</b>
La señal de corriente de la carga es de la misma forma que la señal de tensión.	La señal de corriente de la carga no es de la misma forma que la señal de tensión (se distorsiona).
Si la señal de tensión es sinusoidal la señal de corriente también es sinusoidal.	Aun cuando la señal tensión es sinusoidal, la señal de corriente se distorsiona.
Las señales tensión no cambian su forma de onda y no se ven afectadas por las señales de corriente.	Las señales de tensión se distorsionan debido a la distorsión de las señales de corriente.

Fuente: Determinación de la potencia del transformador para alimentar cargas no lineales, tesis de grado. [32]

### **1.3 DISTORSIÓN ARMÓNICA**

Una señal se encuentra distorsionada cuando la señal de tensión y/o la señal de corriente de un sistema eléctrico tienen deformaciones con respecto a la forma de onda sinusoidal, estas distorsiones se producen por diferentes factores; ya sean por fenómenos transitorios o por condiciones permanentes (armónicos en estado estable) [1].

## 1.4 DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL

Es la relación entre el valor eficaz de las componentes armónicas de la señal (excluida la componente fundamental) con respecto al valor eficaz de la componente fundamental (primer componente armónica). Define el impacto que en el valor eficaz de la señal tiene la deformación de la onda. [1]

Distorsión armónica total de tensión:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} * 100\% \quad (1)$$

Distorsión armónica total de corriente:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} * 100\% \quad (2)$$

## 1.5 DISTORSIÓN DE LA DEMANDA TOTAL

Es la relación entre la corriente armónica y la demanda máxima de la corriente de carga [1].

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} * 100\% \quad (3)$$

*h*: Orden armónico.

*I<sub>h</sub>*: Magnitud de la armónica individual.

*I<sub>L</sub>*: Demanda máxima de la corriente fundamental de la carga.

## 1.6 FACTOR DE DIVERSIDAD (FD)

Debido a las diferencias de los parámetros del sistema de distribución y de la carga, se presenta la dispersión en el ángulo de fase de los armónicos de las cargas individuales; causando un efecto de disminución de las corrientes armónicas en la red.

El factor de diversidad de corriente (FD<sub>k</sub>) se define para cualquier armónico *k* y un conjunto de *n* cargas conectadas en paralelo, como la magnitud del fasor de la corriente de red, dividido por la suma de magnitudes de las corrientes individuales, para el mismo orden de armónico [2]

$$FD_k = \frac{\left| \sum_{i=1}^n \vec{I}_{k(i)} \right|}{\sum_{i=1}^n |I_{k(i)}|} \quad (4)$$

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

## 1.7 FACTOR DE ATENUACIÓN (FA)

La atenuación es provocada por impedancia del sistema y por la distorsión de tensión que tiende a reducir las corrientes armónicas en la red.

Este factor se define como la magnitud de la corriente total del armónico  $k$  cuando  $n$  cargas idénticas están conectadas en paralelo, dividida por  $n$  veces la magnitud de la corriente de una única carga [2]. Expresada como:

$$FA_k = \frac{I_k(n)}{nI_k(1)} \quad (5)$$

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

## 1.8 COMPONENTES ARMÓNICAS DE TENSIÓN Y DE CORRIENTE

La relación que existe entre las componentes armónicas de las señales de corriente y tensión, se debe a la circulación de la corriente a través de las impedancias de la red interna generando una distorsión de onda en tensión.

Entre mayor sea la corriente generada por cargas no lineales, mayor será la caída de tensión en el sistema. Si adicionalmente, se instalan equipos sensibles (dispositivos electrónicos) cerca de cargas que producen tales distorsiones, se puede presentar un mal funcionamiento en estos equipos.

El flujo de las componentes armónicas de corrientes va desde las cargas no lineales hacia las impedancias más bajas. Por otra parte las componentes armónicas de alta frecuencia circulan hacia los condensadores (a frecuencias altas las reactancias capacitivas presentan impedancias bajas).

Es importante verificar si la distorsión de las componentes armónicas de la tensión es de origen externo (red eléctrica del operador de red), o de origen interno; con el fin de establecer criterios de diseño e instalación de equipos que mitiguen estas distorsiones.

## **1.9 COMPONENTES ARMÓNICAS EN EL SISTEMA ELÉCTRICO**

A continuación se describen los efectos que tiene la distorsión de las señales de corriente y tensión en diferentes dispositivos eléctricos:

- Efectos sobre los transformadores: Las componentes armónicas de la corriente generan un incremento en las pérdidas causadas por las corrientes de eddy la distorsión en tensión causa pérdidas adicionales en el núcleo pocos significativos. En los transformadores principales de distribución la reducción es menos severa debido a la cancelación de componentes armónicas entre diversas cargas [1].
- Efectos en los motores: Las componentes armónicas de la corriente reducen la eficiencia, cuando la tensión esta distorsionada, se generan pérdidas de potencia en los devanados incrementando su resistencia. La interacción de los torques mecánicos en el eje del motor de diferentes sentidos de giros y velocidades, pueden producir pares pulsantes, causando vibración y esfuerzos en las partes mecánicas del sistema, repercutiendo en su eficiencia.

- Efectos sobre los conductores: Una forma de onda de corriente con contenido de componentes armónicas, que fluye por un cable, genera el incremento de la temperatura, la cual eleva la resistencia, incrementando las pérdidas por efecto de Joule en el mismo.
- Efectos sobre los sistemas de protección: La distorsión de las señales de corrientes puede generar operaciones incorrectas en los fusibles, los interruptores termo magnéticos y los sistemas digitales de protección. Se pueden evidenciar formas de onda con picos agudos, mostrando cambios abruptos sin ser detectados, conllevando a la desprotección del equipo; o se puede tener una forma de onda sin las características adecuadas, que ocasione el accionamiento de las protecciones sin que el equipo a proteger este siendo sobre cargado (es decir un accionamiento indebido de protecciones eléctricas) [3].
- Efectos sobre los dispositivos de estado sólido (electrónicos): La distorsión debida a las componentes armónicas causan mal funcionamiento en estos dispositivos, debido a que estos dispositivos son sensibles al cruce por cero en la onda de tensión. Adicional al mal funcionamiento, se tiene inducción de errores en equipos de medición, disparo falso de relés e interruptores, interferencia sobre controladores de motores, entre otros.
- Efectos en equipos electromecánicos de medición de energía eléctrica: Estos aparatos son afectados por la presencia de distorsiones de las señales de tensión y corriente, generando un par electromagnético en el disco que causa operaciones erróneas, debido a que estos están diseñados para medir adecuadamente cuando las señales de tensión y corriente son sinusoidales.

- Efectos en comunicaciones: La distorsión de la señal de tensión causa problemas en circuitos que alimentan sistemas de comunicación, provocando mal funcionamiento en los equipos cuya fuente de alimentación está compuesta por sistemas rectificadores de tipo diodo-condensador que depende del valor máximo de entrada. Además en los sistemas de comunicaciones se genera ruido, el cual se define como aquellas señales indeseables que penetran en los equipos y que provocan que la información no llegue con claridad o se distorsione en el interior del sistema, siendo su naturaleza aleatoria y difícil de tratar. Una de las causas es la distorsión no lineal. La presencia de componentes armónicas entre el 9 y el 21 orden, son las que generalmente causan interferencias con los sistemas de comunicaciones

## **1.10 CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA**

Es la normalización del suministro eléctrico mediante reglas que fijan los niveles, parámetros básicos, forma de onda, armónicos, niveles de distorsión armónica, interrupciones entre otros.

Para este estudio, la norma que se utilizará para evaluar la calidad de la energía eléctrica con relación a los límites de distorsión en tensión y los límites de distorsión en corriente es la IEEE 519 del 2014.

Otra norma relacionada con la problemática de la distorsión de las señales de tensión y corriente es la IEC 61000-3-2, el cual se proponen los límites para las emisiones de corrientes armónicas para equipos con valor eficaz de la corriente hasta 16 A.

Es importante considerar la resolución sobre la cual se está evaluando la presente monografía, la RESOLUCIÓN 90795 DE JULIO 25 DE 2014 [33] por la cual se aclara y se corrige unos yerros en el Reglamento Técnico de instalaciones eléctricas-RETIE, establecido mediante la Resolución 90708 de 2013.

La Resolución 90795 en el artículo 3 se observa que se modifica el numeral 10.1; exponiendo el ítem “10.1.1 Diseño detallado” los incisos a evaluar para un diseño eléctrico y que para nuestro estudio se analizarán los referentes al estudio del comportamiento de las distorsiones de señales en tensión y en corriente.

### **1.11 SISTEMA ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN**

Un sistema de distribución de energía eléctrica es el medio para distribuir esta energía desde los bloques de suministro hasta los puntos de utilización, conformado por el conjunto de equipos y elementos necesarios para realizar el proceso de transformación, protección, monitorización y control de la red de distribución.

En estos sistemas se encuentran conectadas múltiples cargas no lineales que distorsionan las señales de corrientes, y estas a su vez producen perturbaciones en la tensión de alimentación. Estas componentes armónicas de tensión afectan la calidad del servicio en el sistema de distribución.

## **2. CARACTERIZACIÓN DE CARGAS.**

En los sistemas de distribución de baja tensión, una de las principales fuentes de distorsión, son las cargas residenciales y comerciales. Aunque los equipos instalados en estas áreas, como televisores, computadoras, lámparas fluorescentes, entre otros, presentan un efecto que por sí solo no es significativo en la red, la conexión de grandes cantidades de estos equipos presenta un efecto acumulativo de distorsiones de la corriente en el sistema [7].

### **2.1 CLASIFICACIÓN DE CARGAS LINEALES:**

La impedancia de cargas es esencialmente, en algunos casos constante; independientemente de la tensión de suministro. Para sistemas de corriente alterna, la corriente se incrementa proporcionalmente con el incremento de la tensión y decrece proporcionalmente con la disminución del mismo.

Las cargas residenciales se clasifican en dos grandes grupos:

- Configuración RL en serie: en las cuales se consideran los siguientes artefactos: Plancha, cafetera, secador de cabello, bombilla incandescente, licuadora. En este modelo se considera que el valor de la resistencia no cambia con la frecuencia.
- Configuración RL-C en paralelo: Lavadora, nevera de 5, 12, 18 ft<sup>3</sup>, secador de cabello, ventilador de máxima y mínima velocidad.

## 2.2 CLASIFICACIÓN DE CARGAS NO LINEALES:

El aumento de las cargas no lineales en los sistemas eléctricos provoca altos niveles de distorsión de las señales de corriente, afectando las condiciones de operación del sistema.

### CARGAS NO LINEALES CLÁSICAS:

- Transformadores: La corriente de magnetización pronuncia un valle y una cresta que al obtener el modelo matemático mediante la serie de Fourier presenta un alto contenido de componentes armónicas, predominando la componente del tercer armónico. También se puede presentar la ferromagnetización debida a la impedancia del transformador, especialmente en el encendido de estos equipos.
- Máquinas eléctricas: La distorsión de las señales de tensión y corriente afecta la Fuerza magneto-motriz de la componente fundamental.

Un generador síncrono trifásico es común que genere una corriente armónica de tercer orden de 30% con respecto a la componente fundamental, mientras que en los motores monofásicos la distorsión armónica generada por ellos puede variar dependiendo de las características técnicas del motor [5] [6].

- Lámparas Fluorescentes: Debido a la utilización de los balastos magnéticos en las lámparas se produce el efecto flicker o parpadeo, Sus formas de onda de corriente son ligeramente pronunciadas y presentan otro pico adicional. Las componentes armónicas dominantes del modelo matemático son las de orden 3, en el orden de 15 – 20 % de la componente fundamental [6].

## CARGAS ELECTRÓNICAS DE POTENCIA

- Convertidores de fuente de tensión eléctrica: Se emplean moduladores de ancho de pulso con interruptores de encendido y apagado en el lado del motor, en su gran mayoría se utilizan para los dispositivos de variadores de velocidad. [6]
- Fuentes de alimentación conmutadas: Son muy útiles en sistemas de 120 V, en PC's y equipos de entretenimiento casero. Normalmente, tienen un puente rectificador de onda completa con cuatro rizados; desafortunadamente, cuando se tienen pocos rizados, el sistema de CA carga a los capacitores solo por una fracción de cada medio ciclo, produciendo que la forma de onda de la corriente presente picos pronunciados en cortos espacios de tiempo [6].

## OTRAS CARGAS NO LINEALES:

- Los cicloconvertidores los cuales convierten la frecuencia de entrada a una frecuencia de uso, tales como hornos microondas.
- Los compensadores estáticos de VARs, tales como controladores de factor de potencia de motores.
- Dispositivos de ahorro de energía donde se tiene los balastos electrónicos de las lámparas fluorescentes dimerizables.
- Futuras fuentes: Fuentes de energía no convencionales como paneles solares, turbinas eólicas, autos eléctricos, debido a que requieren de ciclo convertidores, bancos de baterías y dispositivos de conversión de energía de corriente continua en alterna, generando distorsiones en las señales de tensión y corriente del sistema eléctrico.

## 2.3 CONTENIDO DE COMPONENTES ARMÓNICAS EN LAS CARGAS NO LINEALES

A continuación se describen algunas de las cargas no lineales típicas en edificios residenciales y comerciales, y el espectro de corrientes armónicas que son generadas por ellos.

### Televisores LCD:

Existen diversos tipos de televisores, tales como LCD, plasma, televisores de tubos de rayos catódicos, entre otros, para este caso, se toman los televisores LCD por ser una de las tecnologías más usada actualmente en el mundo.

La distorsión de la corriente eléctrica de estos equipos presenta en promedio (según la referencia 27) el contenido de las componentes armónicas mostrado en la Tabla 2.

**Tabla 2. Componente armónicas de la corriente en televisores LCD**

		1 <sup>er</sup> armónico	3 <sup>er</sup> armónico	5 <sup>o</sup> armónico	7 <sup>o</sup> armónico
Televisores LCD	%	100,00%	42,03%	5,44%	4,76%
	[A]	0,6	0,252	0,033	0,029

Fuente: Experimental Measurements and Computer Simulations of Home Appliances loads for Harmonic Studies [27].

### Lavadora:

Las lavadoras producen diferentes contenidos de armónicos dependiendo del ciclo de trabajo: llenado de agua, lavado, enjuague y secado, se tiene que para el ciclo de enjuague se presenta la mayor cantidad de armónicos, obteniendo los datos mostrado en la Tabla 3 [27].

**Tabla 3. Componente armónicas de la corriente en lavadoras en su ciclo de enjuague**

		1 <sup>er</sup> armónico	3 <sup>er</sup> armónico	5 <sup>o</sup> armónico	7 <sup>o</sup> armónico
Lavadoras (en estado enjuague)	%	100,00%	40,72%	1,85%	2,03%
	[A]	2,153	0,877	0,040	0,044

Fuente: Experimental Measurements and Computer Simulations of Home Appliances loads for Harmonic Studies [27].

### Refrigeradores:

Los refrigeradores trabajan en dos estados, encendido donde produce el frío requerido, y apagado donde conserva la temperatura. La Tabla 4 presenta las componentes armónica de un refrigerador en el ciclo de prendido [27].

**Tabla 4. Componente armónicas de la corriente en refrigeradoras**

		1 <sup>er</sup> armónico	3 <sup>er</sup> armónico	5 <sup>o</sup> armónico	7 <sup>o</sup> armónico
Refrigeradores (en condiciones de prendido)	%	100,00%	6,91%	1,20%	0,64%
	[A]	0,66	0,046	0,008	0,004

Fuente: Experimental Measurements and Computer Simulations of Home Appliances loads for Harmonic Studies. [27].

### Hornos microondas:

Los hornos microondas son equipos que utilizan ciclo convertidores, los cuales que generan distorsión de la señal de corriente. El contenido de las componentes armónicas se presenta en la Tabla 5 [2].

**Tabla 5. Componente armónicas de la corriente en hornos microondas**

		1 <sup>er</sup> armónico	3 <sup>er</sup> armónico	5 <sup>o</sup> armónico	7 <sup>o</sup> armónico
Hornos microondas	%	100,00%	30,61%	11,41%	5,39%
	[A]	5,161	1,58	0,589	0,278

Fuente: Análisis de la distorsión armónica y los efectos de atenuación y diversidad en áreas residenciales [5].

### **Computador de torre más el monitor:**

Los computadores personales son hoy día uno de los equipos más comunes en complejos residenciales y comerciales, y a su vez un gran generador de distorsión de la señal de corriente por los rectificadores necesarios para su funcionamiento, en la Tabla 6 se muestra el contenido de armónicos de un computador de escritorio [2].

**Tabla 6. Componente armónicas de la corriente en computadores de torre**

		1 <sup>er</sup> armónico	3 <sup>er</sup> armónico	5 <sup>o</sup> armónico	7 <sup>o</sup> armónico
Computador + monitor	%	100,00%	63,60%	22,70%	6,00%
	[A]	0,934	0,594	0,212	0,056

Fuente: Análisis de la distorsión armónica y los efectos de atenuación y diversidad en áreas residenciales [5].

### **Lámparas CFL:**

En la actualidad existen otros tipos de lámparas como la tipo led y las fluorescentes dimerizables que también producen distorsión de la señal de corriente, sin embargo, las lámparas fluorescentes compactas (CFL) son en la

actualidad las más usadas. La Tabla 7 muestra el contenido de armónicos de estas lámparas [2].

**Tabla 7. Componente armónicas de la corriente en lámparas ahorradoras no dimerizables**

		1 <sup>er</sup> armónico	3 <sup>er</sup> armónico	5 <sup>o</sup> armónico	7 <sup>o</sup> armónico
Lámparas ahorradoras	%	100,00%	72,41%	34,48%	39,66%
	[A]	0,058	0,042	0,02	0,023

Fuente: Análisis de la distorsión armónica y los efectos de atenuación y diversidad en áreas residenciales [5].

Las lámparas fluorescentes compactas (CFL) y las lámparas LED requieren de dispositivos electrónicos (balastos y *drivers* respectivamente) que afectan la calidad de las señales de corriente y tensión. En este tipo de cargas eléctricas se evidencian factores de potencia bajos (alrededor de 0,5) y distorsiones armónicas de corrientes altas (entre el 80% y el 150%) [12].

**Variadores de frecuencia en motores:**

Para los variadores de frecuencia se toma como ejemplo un variador de frecuencia de un equipo de aire acondicionado de 24000 BTU, el cual trabaja a plena carga. La Tabla 8 muestra el contenido de componentes armónicas de este variador [28].

**Tabla 8. Componente armónicas de la corriente de un equipo de aire acondicionado de 24000 BTU con variador de frecuencia**

		1 <sup>er</sup> armónico	3 <sup>er</sup> armónico	5 <sup>o</sup> armónico	7 <sup>o</sup> armónico
Equipos de aire acondicionado (24000 BTU)	%	100%	59,20%	12,70%	11,80%
	[A]	4,07	2,41	0,52	0,48

Fuente: An Investigation on Electrical Performance of Variable-frequency Drives for Air-conditioning Applications [28].

### **Características de la distorsión armónica de la combinación de algunas cargas eléctricas**

A continuación se muestran los resultados obtenidos de las componentes armónicas en algunos estudios realizados a diversas cargas no lineales utilizadas e instaladas con mayor frecuencia en el sector residencial [13]. En esta referencia la distorsión armónica de la señal de tensión es menor al 2% en todos los casos.

- Cuatro televisores a color de 14", 20", 20" y 21"; encendidos simultáneamente.  
RESULTADOS: La componente armónica de corriente predominante es la del tercer armónico. La magnitud del THDI es del orden del 70,38% y el THDV es de 1,81%.
- Un computador con monitor LCD de 17".  
RESULTADOS: Nuevamente predomina la componente armónica de corriente del tercer armónico. La magnitud del THDI es del orden de 74,48% y el THDV es de 1,64%.

- Tres lámparas fluorescentes con balasto electrónico, de 20 W de consumo cada una.

RESULTADOS: Predomina la componente armónica de corriente de tercer orden. La magnitud del THDI es del orden de 54,83% y el THDV es de 1,77%.

- Un televisor a color de 14", un minicomponente de 60 W.

RESULTADOS: Predomina la magnitud de la componente armónica de quinto orden. La magnitud del THDI es del orden de 37,01% y el THDV es de 1,81%.

- Un televisor a color de 20", un PC, tres lámparas fluorescentes de 22 W c/u, un minicomponente de 190 W.

RESULTADOS: Predomina la magnitud de la componente armónica de tercer orden. La magnitud del THDI es del orden de 55,54% y el THDV es de 1,74%.

Debido a la combinación de cargas no lineales conectadas a un sistema eléctrico, se presenta una disminución de la distorsión armónica de corriente y de tensión en el punto de acoplamiento común.

Un caso particular es el aumento del THDI cuando se conecta al sistema eléctrico un computador con monitor LCD de 17" presentando un THDI del 74,48%, mientras que al conectar simultáneamente el mismo PC, tres lámparas fluorescentes, un televisor de 20", y un minicomponente se obtiene un THDI del 55,54%, evidenciando el efecto del factor de diversidad en el punto de acoplamiento común del sistema eléctrico.

Este efecto puede ser significativo dependiendo de las características de las cargas instaladas y de la combinación de las mismas en el sistema eléctrico.

### **3. NORMATIVIDAD Y LÍMITES DEL CONTENIDO DE LAS COMPONENTES ARMÓNICAS**

El principal objetivo de las diversas normas establecidas a nivel internacional y adoptadas en Colombia en las regulaciones de la CREG 024 del 2005 y 016 de 2007, así como la exigencia del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) busca proveer prácticas recomendadas y límites de la distorsión armónica tanto por parte del operador de red en tensión como de los usuarios del sistema eléctrico en corriente; con el fin de asegurar la compatibilidad electromagnética de los diferentes equipos de uso final instalados al sistema eléctrico y de los sistemas de distribución de energía eléctrica.

En este capítulo se presenta un resumen de las normas relacionadas con las exigencias del RETIE en cuanto al límite máximo de la distorsión de las señales de tensión y corriente de un sistema eléctrico.

#### **3.1. IEEE 519 - 2014: PRÁCTICA RECOMENDADA Y REQUISITOS PARA EL CONTROL DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA.**

En esta norma se proponen límites de las distorsiones armónicas de las señales de tensión y corriente en el punto de conexión común (PCC) entre la fuente que suministra la tensión y la carga eléctrica que es conectada. El uso de cargas no lineales conectadas a sistemas de energía eléctrica incluye convertidores estáticos de potencia, dispositivos de arco de descarga, dispositivos magnéticos saturados, y en menor grado, máquinas rotativas.

Los límites establecidos para las distorsiones armónicas, son para la operación en estado estacionario. En algunos casos, las distorsiones armónicas de las tensiones y corrientes en el PCC pueden ser significativamente mayores a los límites recomendados en la norma IEEE 519, debido a la falta de diversidad de las cargas conectadas, a la falta compensación de componentes armónicas, y a otros efectos que tienden a reducir los niveles de las componentes armónicas de la combinación de cargas no lineales.

La Tabla 9 muestra los límites de la distorsión armónica de la tensión (tanto individual como total), propuestos por la norma IEEE 519 – 2014 [29] en el punto de acoplamiento común.

**Tabla 9. Límites de la distorsión armónica de tensión para diferentes niveles de tensión.**

Tensión (V) en el punto de acoplamiento común (PCC)	Armónico individual (%)	Distorsión armónica total % (THDV)
$V \leq 1,0 \text{ kV}$	5,0	8,0
$1,0 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$161 \text{ kV} < V$	1,0	1,0

Fuente: IEEE 519 – 2014 [29]

Los límites de distorsión armónica de corriente propuestos por esta norma se basan en el tamaño de la carga con respecto al sistema de distribución donde se conecta. Los usuarios con grandes cargas eléctricas se restringen más que los

usuarios pequeños. El tamaño relativo de la carga con el respecto a la fuente se define como la relación de cortocircuito:

$$\text{relación de cortocircuito} = \frac{\text{corriente de cortocircuito (MVA)}}{\text{carga (MVA)}} = \frac{I_{sc}}{IL} \quad (6)$$

Esta relación es una medida del tamaño de la distorsión armónica con respecto a la capacidad del sistema para que la distorsión de la corriente no afecte la señal de tensión.

La Tabla 10 presenta los límites individual y total (TDD) de las componentes armónicas de la corriente [29].

**Tabla 10. Límites de la distorsión armónica de corriente para sistemas eléctricos con tensiones entre 120 V hasta 69 kV**

Máxima distorsión armónica de corriente en % de IL						
Orden de la armónica individual (Armónico impar)						
Isc/IL	3 ≤ h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h < 50	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
20 < 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

Fuente: IEEE 519 – 2014 [29]

Donde:

**Isc:** Corriente máxima de cortocircuito en el punto de acoplamiento común.

**IL:** Corriente de carga máxima demandada.

### **3.2. IEC 61000-3-2: LÍMITES PARA EMISIONES DE CORRIENTES ARMÓNICAS (EQUIPOS CON ENTRADA DE CORRIENTE IGUAL O MENOR A 16 A POR FASE)**

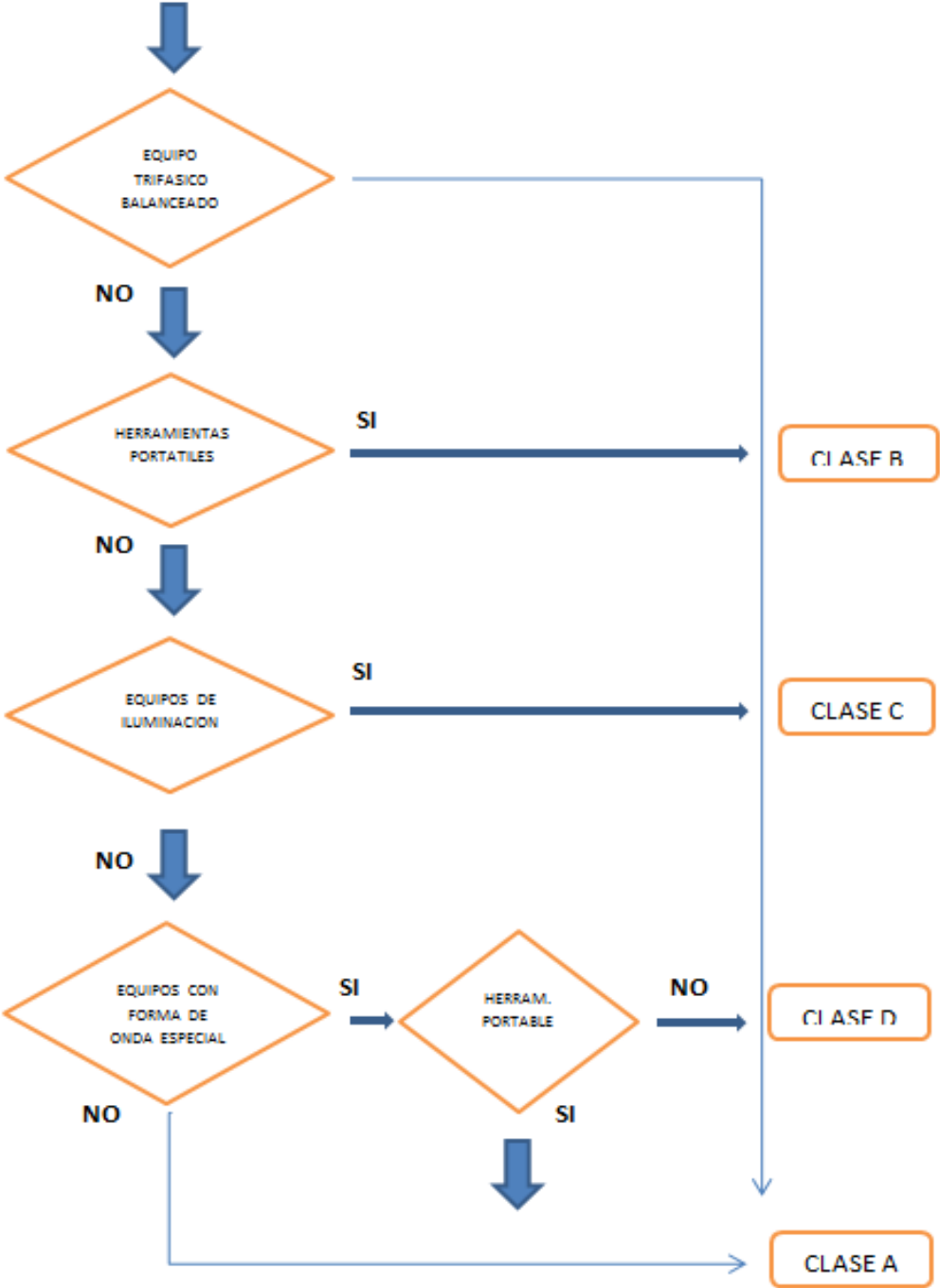
Este estándar está destinado a limitar las emisiones de las componentes armónicas para los equipos conectados a la red de suministro en baja tensión; aplicable a los aparatos eléctricos y electrónicos que tienen un valor eficaz de la corriente nominal menor o igual a 16 A por fase.

Para establecer los límites de emisión de corrientes armónicas, la norma establece la siguiente clasificación de los equipos:

- CLASE A: Equipos trifásicos balanceados y todos los demás equipos no pertenecientes a las clases B, C y D, además equipos domésticos con el control simétrico utilizado por un corto tiempo.
- CLASE B: Herramientas portátiles y equipos de soldadura por arco que no es un equipo profesional.
- CLASE C: Equipos de iluminación incluyendo dispositivos de atenuación (dimmer).
- CLASE D: Equipos con entrada de corriente con “forma de onda especial” y con consumo de potencia activa menor a 600 W.

La Figura 3 [30] muestra un flujograma utilizado por la norma para la clasificación de los equipos.

Figura 3. Flujograma para clasificar los tipos de equipos de acuerdo a la norma IEC 61000-3-2



Fuente: IEC 61000-3-2 [30]

La máxima corriente permisible para las clases A, B, C y D, es determinada con la medida de la corriente tomada en el punto de conexión del equipo.

Las tablas de 11 a la 13 extraídas de [30] presentan los límites del valor eficaz de las componentes armónicas de las corrientes para los equipos clase A, C y D. El límite de las componentes armónicas para los equipos de CLASE B, es del 150% de los de CLASE A.

**Tabla 11. Límite del valor eficaz de las componentes armónicas de la corriente para equipos clase A**

Orden impar h	Máximo valor de corriente permitido (A)	Orden par h	Máximo valor de corriente permitido (A)
3	2,3	2	1,08
5	1,14	4	0,43
7	0,77	6	0,3
9	0,4	8 - 40	$0,23 \cdot 8 / h$
11	0,33		
13	0,21		
15-39	$0,15 \cdot 15 / h$		

Fuente: IEC 61000-3-2 [30]

**Tabla 12. Límite del valor eficaz de las componentes armónicas de la corriente para equipos clase C**

Orden impar h	Máximo valor permitido de la corriente (%)
3	30 * Factor de potencia del circuito
5	10
7	5
9	7
11-39	3
Porcentaje de la corriente fundamental de ingreso	

Fuente: IEC 61000-3-2 [30]

El límite del valor eficaz de las corrientes armónicas para equipos de clase D, están especificados en números absolutos y valores relativos de potencia activa, aplicados a equipos con consumos de potencia hasta 600 W.

**Tabla 13. Límite del valor eficaz de las componentes armónicas de la corriente para equipos clase D**

Armónico de orden h	Máxima corriente armónica permitida (%)	
	Por vatio (mA/W)	(A)
2	3,4	2,3
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77

Armónico de orden h	Máxima corriente armónica permitida (%)	
	Por vatio (mA/W)	(A)
9	0,5	0,4
13	0,35	0,33
11 - 39	3,86 / h	Ver tabla CLASE A

Fuente: IEC 61000-3-2 [30]

### 3.3. IEC 61000-3-4: LÍMITES PARA EMISIONES DE CORRIENTES ARMÓNICAS (EQUIPOS CON ENTRADA DE CORRIENTE SUPERIOR A 16 A POR FASE)

La norma IEC 61000-3-4 expone límites de la máxima cantidad de componentes armónicas de corriente que una instalación puede tolerar. Esta capacidad de la fuente de suministro se da en función de la impedancia de la red o de la potencia de corto circuito.

Para determinar la potencia de cortocircuito de cierto sistema, este valor se debe conocer en el punto de conexión de la red de distribución (PCC).

Para obtener altos valores de potencia de cortocircuito se debe tener una impedancia baja en la línea de alimentación y en las instalaciones eléctricas internas [31].

En la Tabla 14 se presentan los límites de emisión de armónicos para consumo de equipos con corrientes nominales mayores a 16 A por fase cuando  $S_{equ} \leq S_{sc} / 33$

**Tabla 14. Valores límites de emisión para equipos de I>16A cuando**

$$S_{equ} \leq S_{sc} / 33$$

Orden del armónico (n)	Corriente armónica admisible (In/I1) %
3	21,6
5	10,7
7	7,2
9	3,8
11	3,1
13	2
15	0,7
17	1,2
19	1,1
21	≤ 0,6
23	0,9
25	0,8
27	≤ 0,6
29	0,7
21	0,7
≥ 33	≤ 0,6

Fuente: Aspectos técnico económicos de la calidad de suministro eléctrico [31].

Donde:

**I<sub>1</sub>**: Corriente fundamental.

**I<sub>n</sub>**: Corriente armónica de la componente.

**S<sub>sc</sub>** Potencia de cortocircuito: Es un indicador de la impedancia propia de la red, se define como:

$$S_{sc} \leq U_{nom}^2 / Z_{cc} \quad (7)$$

**S<sub>equ</sub>** Potencia nominal del equipo: Se calcula de distinta forma según el tipo de carga

$$S_{equ} = U_{fase-N} \cdot I_{equ} \quad \text{Para equipos entre fase y neutro.} \quad (8)$$

$$S_{equ} = U_{fase-fase} \cdot I_{equ} \quad \text{Para equipos entre fase y fase.} \quad (9)$$

$$S_{equ} = \sqrt{3} \cdot U_{fase-fase} \cdot I_{equ} \quad \text{Para equipos trifásicos equilibrados.} \quad (10)$$

**R<sub>sce</sub>** Relación de cortocircuito: Es un índice de la carga que supone un equipo para la red.

$$R_{sce} = S_{sc} / 3S_{equ} \quad \text{Para equipos entre fase y neutro;} \quad (11)$$

$$R_{sce} = S_{sc} / 2S_{equ} \quad \text{Para equipos entre fase y fase;} \quad (12)$$

$$R_{sce} = S_{sc} / S_{equ} \quad \text{Para equipos trifásicos equilibrados.} \quad (13)$$

En las tablas 15 y 16 se presentan los límites de armónicos admisibles según la IEC 61000-3-4, que deben generar las instalaciones eléctricas con valores de R<sub>sce</sub> >33.

**Tabla 15. Límites de emisión para equipos monofásicos o trifásicos desequilibrados con  $R_{sce} > 33$**

$R_{sce}$	Factor de distorsión de la corriente armónica admisible (%)	Corriente armónica individual admisible (In/I1)					
	THDI	$I3$	$I5$	$I7$	$I9$	$I11$	$I13$
66	25	23	11	8	6	5	4
120	29	25	12	10	7	6	5
175	33	29	14	11	8	7	6
250	39	34	18	12	10	8	7
350	46	40	24	15	12	9	8
450	51	40	30	20	14	12	10
600	57	40	30	20	14	12	10

Fuente: Aspectos técnico económicos de la calidad de suministro eléctrico [31].

**Nota 1:** Se permite la interpolación lineal entre los valores sucesivos.

**Nota 2:** Para los equipos de tres fases desequilibradas, estos valores se aplicarán para cada fase.

**Tabla 16. Corriente admisible según el armónico para sistemas trifásicos balanceados.**

$R_{sce}$	Factor de distorsión de la corriente armónica admisible (%)	Corriente armónica individual admisible (In/I1)			
	THDI	$I_5$	$I_7$	$I_{11}$	$I_{13}$
66	16	14	11	10	8
120	18	16	12	11	8
175	25	20	14	12	8
250	35	30	18	13	8
350	48	40	25	15	10
450	58	50	35	20	15
600	70	60	40	25	18

Fuente: Aspectos técnico económicos de la calidad de suministro eléctrico [31].

**Nota 1:** Se permite la interpolación lineal entre los valores sucesivos  $R_{sce}$

#### 4. MÉTODOS PARA MITIGAR EL IMPACTO DE LAS COMPONENTES ARMÓNICAS EN EL SISTEMA ELÉCTRICO.

Con el fin de establecer una guía para la realización de un diseño eléctrico considerando la distorsión de señales de tensión y de corriente en la red eléctrica, se compila una serie de técnicas; para eliminar o corregir el flujo de los armónicos hacia equipos sensibles.

Estas técnicas presentan diversas formas de atenuar los efectos de las componentes armónicas, las que incluyen filtros, compensadores estáticos, conexión de transformadores, sobredimensionamiento de dispositivos del sistema entre otros [14].

**Filtros de choque:** Elimina las posibles resonancias que se puedan presentar en el sistema eléctrico, utilizando reactancias capacitivas e inductivas.

**Filtro de absorción (sintonizado):** Este tipo de filtro evita la resonancia, protege los capacitores, elimina las componentes armónicas del sistema y corrige el factor de potencia. La configuración de este filtro es la conexión de un capacitor con un reactor en serie, sintonizado a las frecuencias armónicas más significativas del sistema.

**Compensadores estáticos:** Dispositivos de electrónica de potencia que eliminan las corrientes armónicas, evitan las resonancias, regulan el nivel de tensión en el punto de conexión al sistema y corrigen el factor de potencia.

**Bloqueo con transformadores zig-zag:** Elimina las componentes armónicas de secuencia cero, debido a que proporciona un desplazamiento angular igual al de un devanado en configuración delta.

**Técnicas de bloqueo para la 5° y 7° armónica:** Se utiliza doble variador de frecuencia con desfase en el disparo de ambos rectificadores de seis pulsos.

#### **4.1 CONTENIDO DE ARMÓNICOS EN EL PUNTO DE CONEXIÓN.**

Para determinar los límites de inyección de las componentes armónicas de la corriente, se considera que habrá una cierta diversidad entre las componentes armónicas de las corrientes por los diferentes clientes y del tamaño de los mismos; esta diversidad se puede presentar por diferentes componentes armónicas que se modelan, ya sea por las diferencias en los ángulos de fase de la componente armónica de corriente individual o los cambios en las componentes armónicas en el tiempo.

En la Tabla 17, según referencia [8] se muestran los límites de las componentes armónicas de la señal de tensión a frecuencia individual (causada por un solo cliente), considerando la impedancia de cortocircuito del sistema en el punto de acoplamiento común (PCC).

**Tabla 17. Límites de armónicos de tensión a usuarios individuales**

SCR a PCC	Máxima frecuencia individual de armónica de tensión%	Relacionados
10	2,5 - 3,0 %	Sistema delicado
20	2,0 - 2,5 %	1 - 2 grandes clientes
50	1,0 - 1,5 %	Algunos clientes relativamente grandes
100	0,5 - 1,0 %	5-20 clientes de tamaño medio
1000	0,05 - 0,1 %	Muchos clientes pequeños

Fuente: IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems, Std 519 - 1992 [8]

Para un sistema en baja tensión los límites de distorsión de tensión de armónicos, se pueden considerar en los siguientes sistemas:

- En aplicaciones especiales incluyen hospitales y aeropuertos, el **THDV es del 3%**.
- En sistemas generales, el **THDV es del 5%**.

Sin embargo la actualización de la norma IEEE 519, publicada en el 2014 [29], sugiere en baja tensión un límite del 5% para las componentes armónicas individuales y un 8% para la distorsión armónica total de la tensión como se muestra en la Tabla 9.

Si los clientes individuales, cumplen con los límites de distorsión armónica de corriente y no hay suficiente diversidad entre las componentes armónicas de los clientes individuales, se recomienda aplicar algún tipo de filtrado en el sistema eléctrico para limitar los niveles de distorsión armónica de tensión [8].

**METODOLOGÍA PARA LA APLICACIÓN DE LÍMITES:** Con el fin de mantener la calidad de onda de tensión y garantizar los niveles de compatibilidad electromagnética del entorno, se requiere establecer una metodología de evaluación para la aplicación de límites de armónicos de tensión y de corriente según el tipo de instalación a evaluar [17].

Los pasos que se proponen para realizar este diagnóstico es el siguiente:

**Paso 1:** Selección del punto de acoplamiento común.

Este punto del sistema será la frontera entre la instalación y la empresa suministradora de energía eléctrica.

**Paso 2:** Cálculo del nivel de cortocircuito en el punto de acoplamiento común.

Este valor por lo general es suministrado por las empresas de servicios públicos.

**Paso 3:** Estimación de la influencia de la carga no lineal.

Para el cálculo del factor ponderado de la influencia de la carga no lineal se utiliza la siguiente expresión:

Factor ponderado de influencia de la carga no lineal

- Potencia nominal para una carga perturbadora individual (kVA)
- Factor de peso para la carga perturbadora (pu)

La aplicación de este paso es viable siempre y cuando se pueda realizar un levantamiento de la carga a instalar, de no ser así se continúa al paso 4.

**Paso 4:** Justificación de realizar un estudio detallado.

Si alguna de las siguientes dos condiciones se cumple, se justifica realizar un estudio detallado de límites de armónicos.

- El nivel de cortocircuito y el factor ponderado de influencia de la carga no lineal de una instalación cumple la condición.

$$S_{DW}/S_{SC} \geq 0.1\% \quad (14)$$

$S_{DW}$  = Factor ponderado de influencia de la carga no lineal.

$S_{SC}$  = Nivel de cortocircuito.

- Se prevé la instalación de compensación reactiva.

**Paso 5:** Medición de parámetros eléctricos.

Se realiza la instalación de un equipo de medida en el punto de acoplamiento común, con el fin de obtener niveles de distorsión armónica de las señales de tensión y corriente, la impedancia de la red de alimentación y la corriente máxima de carga (IL).

**Paso 6:** Caracterización de las cargas generadoras de armónicos.

Se realizan mediciones en el momento que se conectan cargas no lineales al sistema, con el fin de registrar el impacto de estas cargas en la distorsión armónica.

**Paso 7:** Cálculo de la relación “scr”

Se utiliza la siguiente expresión:

$$S_{cr} = I_{SC}/I_L \quad (15)$$

**Isc:** Corriente de cortocircuito.

**IL:** Corriente de carga.

**Paso 8:** Determinación de los límites de la distorsión armónica de las señales de tensión y corriente.

Distorsión armónica de tensión: Está en función del nivel de tensión del punto de acoplamiento común.

Distorsión armónica de corriente: definido el perfil de carga obtenido en el punto de conexión, se pueden aplicar las condiciones propuestas por las normas vigentes. Como ejemplo se presentan los límites de distorsión armónica propuestos en la referencia [17]:

Carga máxima menor a 10 kW: Los límites de la Tabla 18 se aplican en el PCC, para baja tensión y con una frecuencia de 60 Hz, se pueden utilizar como valores de diseño en el sistema eléctrico en condiciones normales que duren más de una hora.

**Tabla 18. Límites para instalaciones eléctricas con demanda máxima  $\leq 10$  kW**

Armónicos					
Impares no múltiplos de 3		Impares múltiplos de 3		Pares	
Orden (n)	Amp	Orden (n)	Amp	Orden (n)	Amp
5	2,28	3	4,6	2	2,16
7	1,54	9	0,8	4	0,86
11	0,66	15	0,3	6	0,6
13	0,42	21	0,21	8	0,46
17	0,26	>21	4,5/n	10	0,37
19	0,24	-	-	12	0,31
23	0,2	-	-	>12	3,68/n
25	0,18	-	-	-	-
>25	4,5/n	-	-	-	-

Fuente: Norma venezolana control de armónicos eléctricos [17].

- Carga máxima mayor a 10 kW: La tabla 10 muestra los límites que se aplican en cualquier punto de acoplamiento común en media o alta tensión, depende de la clasificación del usuario y de la relación entre la capacidad de cortocircuito y la corriente máxima en el PCC.

Se establece en el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas hacer uso de los lineamientos considerados en la norma IEEE 519, el cual presenta límites de distorsión armónica para diferentes niveles de tensión mostrados en las tablas 9 y 10.

Por lo tanto es necesario considerar en el presente paso los límites establecidos en la Tabla 10, con el fin de evaluar según la corriente máxima de cortocircuito y la corriente de carga máxima demandada, el límite de distorsión armónica en el punto de conexión entre el usuario y la red de distribución de energía eléctrica.

Por otra parte, en la regulación colombiana actualmente está en discusión una propuesta regulatoria propuesta por la resolución CREG 065 de 2012 [9] donde los límites de distorsión armónica de corriente son los propuestos por la norma IEEE 519 de 1992.

**Paso 9:** Determinación de las fuentes que generan las distorsiones armónicas en el sistema.

- Realizar un levantamiento de los tipos de cargas conectadas en la instalación bajo estudio.
- Con las mediciones en el PCC, determinar el flujo de potencia armónica.
- Se realiza mediciones a la instalación con los equipos de compensación reactiva desconectados.
- Inspeccionar instalaciones adyacentes, con el fin de determinar posibles fuentes externas de distorsión armónica.

- Determinar la capacidad del transformador y verificar su cargabilidad.

**Paso 10:** Aplicación de técnicas de control.

Se deben considerar las componentes armónicas predominantes en el sistema, para determinar las especificaciones de los equipos para el control de estas componentes armónicas.

#### **4.2 CÁLCULO DE CAPACIDAD DE CORRIENTE EN LÍNEAS Y NEUTROS TENIENDO EN CUENTA LA DISTORSIÓN DE LA CORRIENTE.**

Existen dos causas que provocan el sobrecalentamiento en el conductor del neutro y pérdidas de potencias en este conductor:

- Las diversas cargas no lineales instaladas en los sistemas eléctricos, como lo son equipos de entretenimiento, dispositivos electrónicos, computadores entre otros; que generan distorsiones armónicas de la corriente, que en los sistemas trifásicos son de secuencia cero y por consiguiente van a circular por el neutro.
- Cuando la carga a instalar en un sistema trifásico es no balanceada, circula corriente por el neutro.

Por lo anterior, en algunos casos el valor eficaz de la corriente en el neutro puede ser mayor a las corrientes que circulan por los conductores de las líneas.

Aplicando el estándar IEC 60364-5-52 en la sección 524.2.1, señala que el neutro deberá tener al menos la misma área de sección transversal que los conductores de línea bajo los siguientes parámetros [16]:

- En circuitos monofásicos de dos conductores sea cual sea el área de sección transversal de estos.
- En circuitos de múltiples fases en el que el área de sección transversal de los conductores de línea sea menor o igual a  $16 \text{ mm}^2$  de cobre o  $25 \text{ mm}^2$  de aluminio.
- En circuitos en los que podrían llevar corrientes del tercer armónico y los armónicos que son múltiplos impares del tercer armónico, con distorsión armónica total entre el 15% y el 33%.

Por otra parte en la sección 524.2.353 del estándar, se indica que para circuitos polifásicos donde el área de la sección transversal de los conductores de línea sea mayor que  $16 \text{ mm}^2$  de cobre o  $25 \text{ mm}^2$  de aluminio, el área de la sección transversal del neutro puede ser menor que el área de la sección transversal de los conductores de línea, si se cumplen simultáneamente las siguientes condiciones:

- La carga alimentada por el circuito en condiciones normales es balanceada entre las fases y el tercer armónico y los múltiplos impares del tercer armónico de corriente no excedan el 15% de la corriente de conductor de línea.
- La corriente máxima prevista, incluyendo los armónicos que puedan existir, susceptible de recoger el conductor neutro durante el funcionamiento normal no es superior a la corriente admisible correspondiente a la sección reducida del conductor neutro.
- El área de la sección transversal del conductor neutro no es inferior a  $16 \text{ mm}^2$  de cobre o  $25 \text{ mm}^2$  de aluminio.

Cuando se desconoce las condiciones iniciales del sistema eléctrico, se pueden aplicar unos coeficientes de corrección a la capacidad de conducción de corriente del conductor, para considerar el calibre del conductor neutro.

Se debe determinar la distorsión armónica total de corriente THDI, además de considerar la capacidad de corriente establecida por cada conductor, con el fin de aplicar los siguientes parámetros [19]:

- Hasta un 15% del THDI presente en las corrientes de las fases, no se requieren medidas correctivas. La corriente del neutro puede ser hasta de un 45% de la corriente de fase, y las pérdidas de calor en todo el cable aumentan en un 6%.
- Entre un 15% a 33% del THDI presente en las corrientes de fase. La corriente del neutro es similar a la de la fase, por lo tanto a la corriente establecida por el cable se desclasifica con un factor de 0,86. Aplicado al conductor de fase.
- Entre un 33% a 45% de THDI, en las corrientes de fase. La corriente del neutro es similar a la de la fase, por lo tanto a la corriente establecida por el cable se desclasifica con un factor de 0,86. Aplicado al conductor del neutro.
- Para valores de THDI mayores al 45%, el tamaño del cable de fase se determina por la corriente del neutro.

La Tabla 19 muestra un resumen de lo anterior, según referencia [19].

**Tabla 19. Factor de reducción para cables que conduce corrientes distorsionadas**

THDI en la corriente del conductor de fase del 3° armónico	Valor seleccionado de acuerdo con:	
	Corriente del conductor de fase	Corriente del conductor del neutro
0% - 15%	1	-
15% - 33%	0,86	-
33% - 45%	-	0,86

THDI en la corriente del conductor de fase del 3° armónico	Valor seleccionado de acuerdo con:	
	Corriente del conductor de fase	Corriente del conductor del neutro
>45%	-	1

Fuente: Application note neutral sizing in harmonic-rich installations [19].

Se deben considerar tres factores que simplifican el método descrito previamente:

- El sistema es trifásico y equilibrado.
- La única componente armónica importante que no se cancela es la tercera (es decir, las otras componentes armónicas múltiplos de tres tienen magnitudes relativamente bajas y las otras componentes armónicas están casi equilibradas y suman cero).
- El conductor del neutro es del mismo material y de la misma sección que los conductores de fase.

Establecer una metodología para determinar la distorsión armónica en un edificio residencial o comercial es difícil, debido a que se requiere predecir el tipo de carga y la simultaneidad de los electrodomésticos que se conectan en cada uno de los usuarios pertenecientes al edificio. Adicionalmente, la mayoría de los fabricantes de electrodomésticos no especifican el THDI de sus aparatos.

Por lo tanto se propone un enfoque simplificado, considerando que todas las componentes armónicas se concentran en el neutro, este fenómeno no es realmente cierto; pero es útil debido a que se estima un margen de seguridad con el fin de compensar la incertidumbre de un número limitado y similares de cargas en la cual tienen comportamientos de en las componentes armónicas diferentes; además se considera los efectos del desequilibrio de las fases.

Por lo tanto la selección de una sección de conductor mayor que la del conductor requerido, ofrece ventajas operativas; tales como: una menor caída de tensión y pérdidas de energía, además de una reducción en el impacto de las componentes armónicas de las corrientes, mejorando la operación del sistema eléctrico.

La Tabla 20 proporciona un factor de cálculo para cada dispositivo, con el fin de determinar la corriente sobre el conductor del neutro utilizando la potencia en  $W$  de cada equipo [19].

**Tabla 20. Los valores típicos de cargas monofásicas no lineales.**

Dispositivo / Condición de Operación	Comentarios / Explicaciones	Carga de la Red electrica - 1 dispositivo por fase					
		Mediciones					Conversion I(neutro)/P(nom) mA/w
		Potencia			Corriente (A)		
		P(nom) W	P(prom) W	S(prom) VA	I (fase)	I (neutro)	
Fluorescente compacta hasta 25W	Lampara fluorescente compacta	23	23	35	0.15	0.24	10.43
Lamparas fluorescentes por encima de 25W (con equipo electronico interno o externo)	Lampara lineal con balasto externo	30	29	30	0.13	0.06	2.00
		58	55	59	0.25	0.13	2.24
Lamparas fluorescentes por encima de 25W (con equipo magnetico interno o externo)	Sin compensacion (inductiva)	58	62	140	0.6	0.2	3.45
	Con compensacion en paralelo	58	62	67	0.3	0.2	3.45
	Con compensacion en serie (capacitivo)	58	75	170	0.73	0.3	5.17
Lamparas incandescentes (con atenuadores de control de angulo de fase)	No atenuado, angulo de 5'	200	200	200	0.87	0.02	0.1
	Atenuado a 60' (120' ang de conduccion)		161	179	0.78	0.67	3.36
	Atenuado a 120' (60' ang de conduccion)		38	87	0.38	0.66	3.29
Tubos de iluminacion LED	Sin balasto	25	26	27	0.12	0.05	1.87
	Con balasto magnetico		27	27	0.12	0.06	2.38
PC de la oficina (sin factor de correccion)	Inactivo	400	80	105	0.46	0.76	1.86
	Jornada de trabajo en oficina		85	112	0.48	0.81	2.02
	Maxima demanda del procesador		145	190	0.83	1.34	3.36
PC de la oficina (con factor de correccion)	Inactivo	400	77	83	0.36	0.16	0.40
	Jornada de trabajo en oficina		82	87	0.38	0.17	0.43
	Maxima demanda del procesador		136	139	0.6	0.24	0.60
CRT monitor	Tecnologia obsoleta	60	60	90	0.38	0.6	10.00
Pantalla plana	100% brillo	35	32	54	0.24	0.41	11.71
	20% brillo		22	38	0.17	0.29	8.33
Laptop-PC hasta 75 W	PC, operando y carga de la bateria	65	65	118	0.53	0.91	13.99
Fax	Stand - by		20	40	0.16	0.21	10.68
	Activa		235	330	1.4	0.57	1.76
Fotocopiadora	Minimo		62	101	0.43	0.22	3.47
	Medio		103	142	0.61	0.43	4.21
	Maximo		324	352	1.59	1.93	5.96

Fuente: Application note neutral sizing in harmonic-rich installations [19].

Una forma rápida y sencilla para determinar la corriente en el neutro se muestra en el siguiente ejemplo [19]:

- En un sistema trifásico, donde se balancean las cargas en cada una de las fases, pero una de ellas queda sobrecargada con los siguientes aparatos y equipos.
  - 4 computadores con su respectiva pantalla plana.
  - 10 fluorescentes compactas, cada una de 20 W.
  - 1 Fotocopiadora.

Con la respectiva información considerada en la anterior tabla se realizan los siguientes cálculos:

- PC de oficina sin factor de corrección, en jornada de trabajo de oficina, según tabla se tiene una corriente en el neutro de 0,81A.
- Pantalla plana con un 100% en brillo, según tabla se tiene una corriente en el neutro de 0,41 A.
- Fluorescente compacta hasta 25 W, según tabla se tiene una corriente en el neutro de 0,24 A.
- Fotocopiadora, trabajo medio, según tabla se tiene una corriente en el neutro de 0,43 A.

En resumen se tiene lo siguiente:

- 4 PC \* 0,81 A = 3,24 A
- 4 Pantalla plana \* 0,41 A = 1,64 A
- 10 Fluorescente \* 20 W \* 10,43 mA/W = 2,09 A
- 1 Fotocopiadora \* 0,43 A = 0,43 A.

Total: 7,4 A será la corriente que se conduce por el neutro.

Nota: Cuando no se tiene una potencia definida según tabla para las fluorescentes compactas, se recomienda utilizar la columna definida como “Conversión  $I(\text{neutro})/P(\text{nom})$ ”, tal y como se define en el ejemplo.

#### **4.3 CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO Y SELECCIÓN DE TRANSFORMADORES.**

En los transformadores uno de los principales efectos sobre ellos debido a las cargas no lineales, son el aumento de las pérdidas, y el sobrecalentamiento del mismo, ya sea debido a sobrecarga, pérdidas de potencia o ferro-resonancia.

Algunas consideraciones que deben considerarse en la etapa de diseño de un transformador según la IEEE std C57. 110-1998 [4] son:

- 1) Filtro de corrientes armónicas: se recomienda la instalación de filtros en el secundario del transformador, donde las componentes armónicas producidas por las cargas sean reducidas, teniendo en cuenta que si la frecuencia de alguna componente armónica es cercana a la frecuencia de resonancia resultante del filtro, la amplificación de una señal a esta frecuencia puede ocurrir.
- 2) Impacto de armónicos en el neutro: el neutro se puede ver afectado severamente por las componentes armónicas de orden tres producidas por la carga. Una práctica comúnmente usada es duplicar la capacidad de corriente del neutro del transformador.
- 3) Uso de compensadores del factor de potencia: aunque esto es útil para disminuir la potencia reactiva del transformador, se debe considerar que bajo condiciones de resonancia debido a la impedancia del compensador del factor de potencia, pueden ocasionar el incremento de la amplitud de las

componentes armónicas de las corrientes y producir daños en el transformador y en la carga.

- 4) Uso de pantallas electrostáticas conectadas a tierra: el uso de estos elementos permite disminuir el efecto de las perturbaciones producidas por las cargas no lineales en el secundario del transformador, pero se debe tener en cuenta que las pérdidas de potencia debidas al calentamiento pueden aumentar por el constante flujo de energía a través de este elemento.
- 5) Elementos exteriores al devanado: Para evitar las pérdidas debidas a las corrientes de eddy en los elementos estructurales externos distintos a los devanados del transformador, se recomiendan espaciamientos adicionales entre los elementos que lo componen, el uso de materiales no magnéticos que impidan el flujo de corriente, la ruptura de las trayectorias de circulación de las corrientes y el uso de materiales de apantallamiento [23].
- 6) Conocimiento del espectro de las componentes armónicas producidas por la carga: esto puede llegar a ser lo más difícil de conocer en la etapa de diseño, y es importante que el cliente especifique lo mejor posible las cargas que se van a conectar, para así poder tomar decisiones como si se debe incrementar la capacidad del transformador, o si se deben tener en cuenta los elementos mencionados anteriormente.

Algunas otras pautas de diseño y métodos para dimensionar el transformador se presenta en [20].

En el Anexo B se presenta un método para seleccionar la carga eléctrica a la que debe trabajar un transformador de potencia, conociendo previamente las componentes armónicas a los que se será sometido, esto con el fin de evitar calentamiento excesivo en el mismo.

#### **4.4 USO DE FILTROS PARA CONTROL DE ARMÓNICOS.**

Los filtros han sido ampliamente usados para el control de componentes armónicas en los sistemas eléctricos, ya sea para grandes cargas industriales, comerciales o residenciales, aunque también existen otros beneficios que se pueden obtener de los filtros, como: la corrección del factor de potencia, el balance de las cargas en sistemas trifásicos y la compensación de la potencia reactiva [21].

Múltiples estudios y alternativas para el filtrado de componentes armónicas se han estado desarrollando, donde se tienen más opciones de equipos teniendo en cuenta aspectos económicos y técnicos para seleccionar el filtro más adecuado para cada sistema eléctrico.

En general, se tiene tres tipos de filtros: activo, pasivo e híbridos. Los filtros pasivos han sido ampliamente usados en los sistemas de distribución debido a su precio, simplicidad, confiabilidad y fácil operación [21], aunque también tiene desventajas como su gran tamaño, la posibilidad de crear resonancia con la impedancia del sistema, entre otros.

Por otra parte, los filtros activos presentan unas ventajas con respecto a los pasivos como: su tamaño, flexibilidad, respuesta rápida a todas las componentes armónicas, para lo cual se encuentre diseñado. Como desventajas se tienen: su complejidad y elevado costo.

Además existen los filtros como híbrido que combinan las características de los filtros pasivos y activos. Ofreciendo una alternativa para algunos tipos de compensación donde se tiene la necesidad de compensar la potencia reactiva y filtrar la distorsión de las señales de corriente y/o tensión.

Para seleccionar filtros en la etapa de diseño de un sistema eléctrico residencial o comercial, se debe conocer inicialmente las componentes armónicas que afecten en mayor medida el funcionamiento del sistema, de tal manera que se seleccione el filtro más adecuado. La carga de diseño del sistema eléctrico y el factor económico también deben ser considerados.

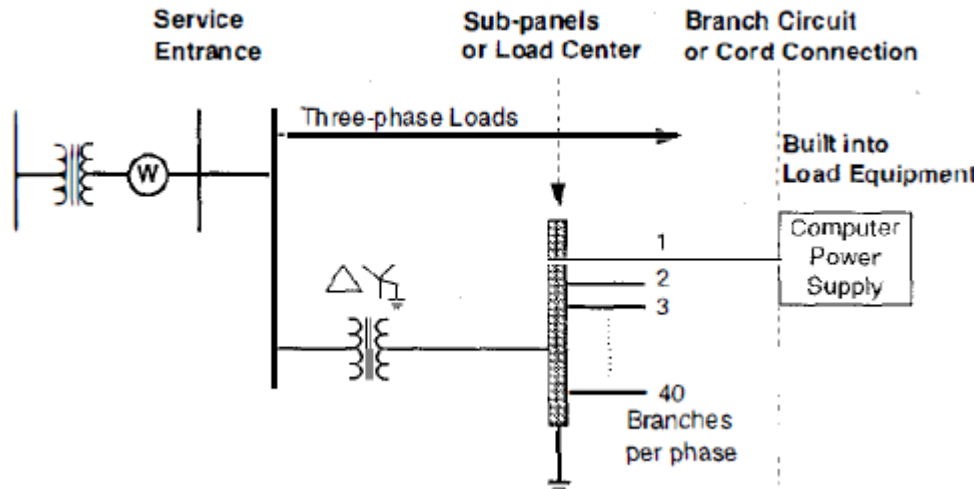
En la etapa de diseño debe ser considerado con especial cuidado la ubicación del filtro, ya que dependiendo de este aspecto se podrán o no reducir eficazmente las componentes armónicas del sistema, donde se debe recordar que dependiendo de la ubicación aumentarán o disminuirán los costos en la ejecución del proyecto. Por ejemplo al tener que instalar los filtros en postes, se incurre en costos como una cuadrilla con trabajo y equipo de alturas, un camión con canasta, preparación segura del sitio de trabajo y demarcación del área, etc. [22]. También hay otras alternativas más económicas en este aspecto (no necesariamente en el costo de los filtros) en el mercado donde se instala un filtro a cada usuario en su punto de conexión, o donde se tengan cargas sensibles.

**4.4.1 Selección de filtros.** Seleccionar un método de atenuación de armónicos apropiado, puede llegar a ser una tarea compleja. La complejidad se debe a la incertidumbre de como cierto filtro o equipo responderá a un sistema, y que ubicación será la óptima.

Considerando que un circuito o carga es la que más aporta componentes armónicas al sistema, se obtienen diversas posibilidades de conexión de equipos compensadores, obteniendo ventajas y desventajas en cada selección realizada.

En la Figura 4 se muestra un ejemplo de un sistema eléctrico que corresponde a un circuito que es exclusivo para equipos de cómputo, y se sugieren cuatro puntos para la ubicación de los filtros: en la carga, en el circuito que alimenta la carga, en el tablero general que alimenta la carga, o en la alimentación principal [24].

**Figura 4. Ubicación de filtros en las instalaciones eléctricas**



Fuente: Analysis of harmonic mitigation methods for building wiring systems [24]

Se analiza inicialmente la ubicación de los elementos reductores de la distorsión de la onda en la carga, donde según estudios resulta ser la ubicación más eficiente obteniendo la mayor reducción de las componentes armónicas, pero a su vez resulta ser la solución más costosa.

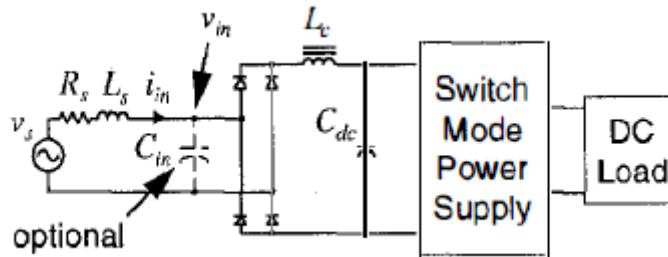
Algunos métodos de filtrado en este punto son:

- **Filtros inductores en serie (Series Inductor Filter (SIF)):**

Este método de filtrado, es implementado generalmente por el fabricante del equipo, produciendo menores valores de THDI, se añade un inductor en serie ya sea en el lado AC o DC del rectificador del equipo. Aunque este tipo de solución puede reducir el factor de potencia del equipo.

En la Figura 5 se tiene un SIF donde  $L_c$  es el inductor en serie conectado en el lado de DC, antes del capacitor  $C_{dc}$  (capacitor suavizador).  $C_{in}$  es usualmente instalado para corregir el factor de potencia.

**Figura 5. Filtro con inductor en serie.**



Fuente: Analysis of harmonic mitigation methods for building wiring systems [24]

- **Boost Converter Current Shaping (BCCS):**

Este método de filtrado interno de los equipos con distorsiones de señal, al igual que el caso anterior, disminuye ampliamente las distorsiones armónicas de corriente. Este sistema también es conocido como “step up converter” el cual convierte bajos valores de tensión en DC a altos valores de tensión en DC [24].

Este dispositivo controla la forma de la onda de la corriente, para que sea igual a la de la tensión con poca distorsión, con factores de potencia del orden de 0,99 y THDI generalmente menores al 5%.

Para garantizar una operación estable la tensión de entrada al dispositivo (valor pico) debe ser menor al de salida del mismo (tensión en DC). Como regla de diseño se multiplica el valor de la tensión de entrada por 1,2 para obtener el valor de la tensión salida en DC.

En el circuito o ramal que alimenta las cargas distorsionantes, se tienen los siguientes equipos para mejorar el contenido de armónicos.

- **Filtro resonante conectado en paralelo.**

En inglés Parallel Connected Resonant Filter (PCRF), este tipo de filtros son usualmente configurados para conectarse a una salida de tomacorriente, y servir como un punto de conexión para de 2 a 4 equipos electrónicos.

En la Figura 6, se muestra el diagrama de este tipo de filtros conectados al equipo rectificador, donde la impedancia del filtro puede ser expresada como:

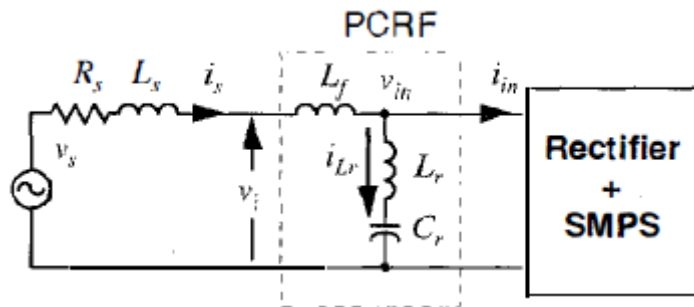
$$Z_r(\omega) = j * \omega * L_r + 1 / (j * \omega * C_r) \quad (16)$$

La impedancia se aproxima a cero cuando:

$$\omega = \omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_r * C_r}} \quad (17)$$

Donde  $\omega_r$  es la frecuencia de resonancia.

**Figura 6. Diagrama de eléctrico de filtro resonante comercial en paralelo**



Fuente: Analysis of harmonic mitigation methods for building wiring systems [24]

Para mitigar el tercer armónico la frecuencia de resonancia es configurada en 180 Hz generalmente.

Un filtro resonante real además contiene una resistencia en el circuito para dar cierta amortiguación.

Además, si la red también presenta cierta cantidad de terceros armónicos, la impedancia  $L_f$  permite que no se sobrecargue la rama resonante del filtro, obteniendo así una frecuencia de resonancia vista desde la fuente de:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{(L_r + L_f) * C_r}} \quad (18)$$

Este valor se configura dependiendo de los terceros armónicos entregados por la fuente.

Este tipo de filtrado bajo condiciones de carga bajas, puede disminuir el factor de potencia de las cargas individuales, pero puede ayudar a compensar otras potencias reactivas.

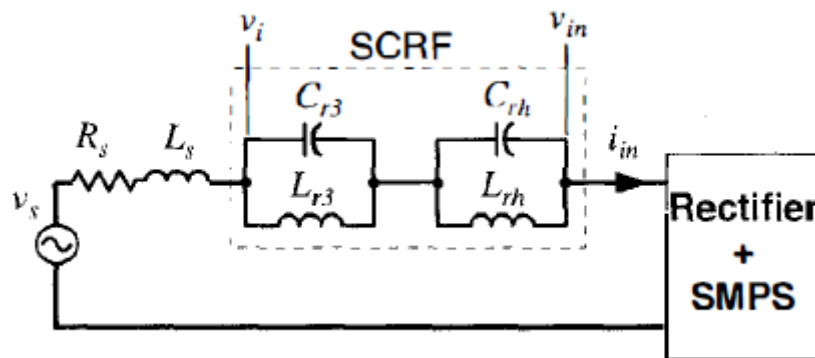
- **Filtro resonante conectado en serie.**

En inglés Series Connected Resonant Filter (SCRF), al igual que en el caso anterior, este filtro es usado para conectar varios equipos electrónicos, pero además puede ser configurado para filtrar una frecuencia o varias frecuencias.

En la Figura 7 se muestra un diagrama eléctrico, de un SCRF con 2 frecuencias de filtrado, estas pueden ser seleccionadas a conveniencia.

Este tipo de filtro tiene como desventaja que el valor eficaz de la tensión de entrada es reducido significativamente al pasar por el filtro. En un filtro con dos frecuencias de filtrado se puede disminuir la tensión de entrada en un 75%, y con una sola frecuencia de filtrado en un 88% pero aumentando el THDI con respecto a uno con dos frecuencias de filtrado.

**Figura 7. Diagrama de eléctrico de filtro resonante comercial en serie.**



Fuente: Analysis of harmonic mitigation methods for building wiring systems [24]

El filtrado de la distorsión de las señales de un sistema eléctrico en el tablero general o en el centro de cargas tiene como consecuencia que las señales distorsionadas tienen la posibilidad de circular desde el equipo que genera las distorsiones hasta el punto donde se instala el filtro, teniendo como consecuencia pérdidas de potencia por calentamiento en las líneas, representando un aumento en los costos de la energía eléctrica.

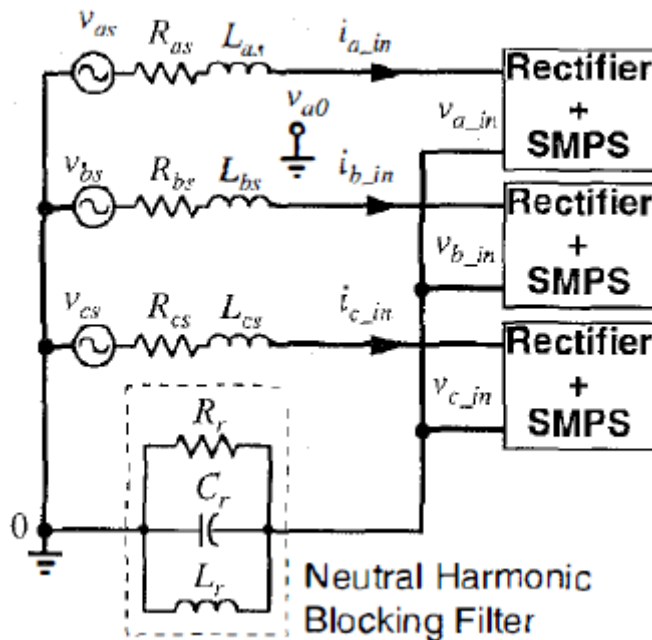
Algunos métodos de filtrado de estas perturbaciones se describen a continuación.

- **Neutral Current Blocking Filter (NCF):**

Este tipo de filtro es conectado como se muestra en la Figura 8, generalmente entre el transformador y el tablero alimentador de las cargas distorsionantes, donde se tiene como fin reducir los terceros armónicos en el neutro.

Este filtro tiene la capacidad de reducir eficazmente los terceros armónicos, pero a altas frecuencias las magnitudes de la onda pueden ser amplificadas en vez de atenuadas, por lo tanto se requiere conocer el tipo de perturbaciones producidas por la carga ya que de lo contrario se podría obtener un efecto inverso a lo esperado.

**Figura 8. Neutral current blocking filter.**



Fuente: Analysis of harmonic mitigation methods for building wiring systems [24]

- **Zigzag Grounding Filter (ZZF)**

Otra forma de proteger el transformador es usando un ZZF entre el transformador y el tablero general o de distribución de las cargas distorsionantes.

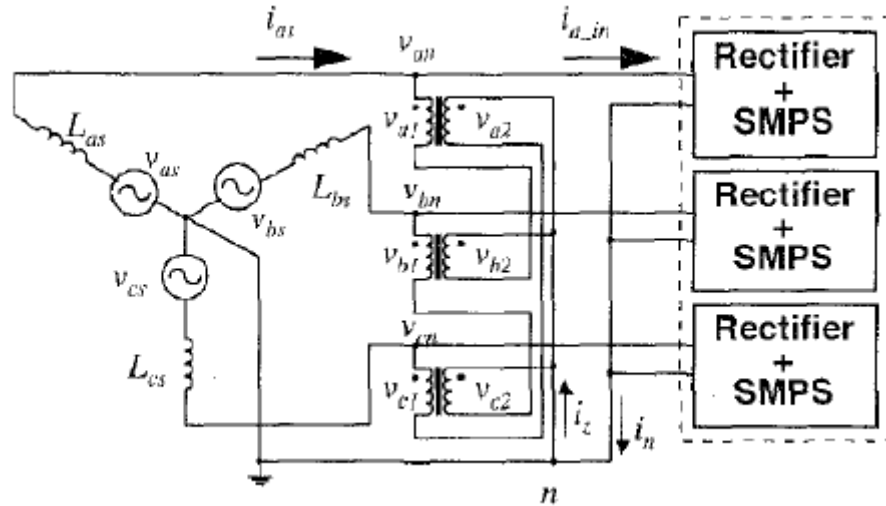
La estructura de este tipo de filtrado es como se muestra en la Figura 9, donde las componentes de los terceros armónicos producidos por la carga quedan circulando en el secundario del transformador en zig-zag.

Con esta configuración no solo quedan circulando en los bobinados del transformador zig zag las componentes de los terceros armónicos en sistemas balanceados, además agregando otros devanados con distintos ángulos de fase y configuraciones se puede lograr que las componentes armónicas de secuencias negativa y positiva también queden circulando en los devanados del transformador zig-zag.

Este sistema puede reducir de una distorsión armónica total de corriente (THDI) del 100% a un 30%, y las componentes de los terceros armónicos son atenuadas, pero la corriente fundamental puede duplicarse en condiciones de baja carga.

Se debe tener en cuenta en este tipo de configuración la carga trifásica que se va a suplir, y el balance de ésta, ya que sin estas condiciones, se puede tener una sobre compensación de la corriente, empeorando el THDI y el factor de potencia.

Figura 9. Conexión transformador zig-zag.



Fuente: Analysis of harmonic mitigation methods for building wiring systems [24]

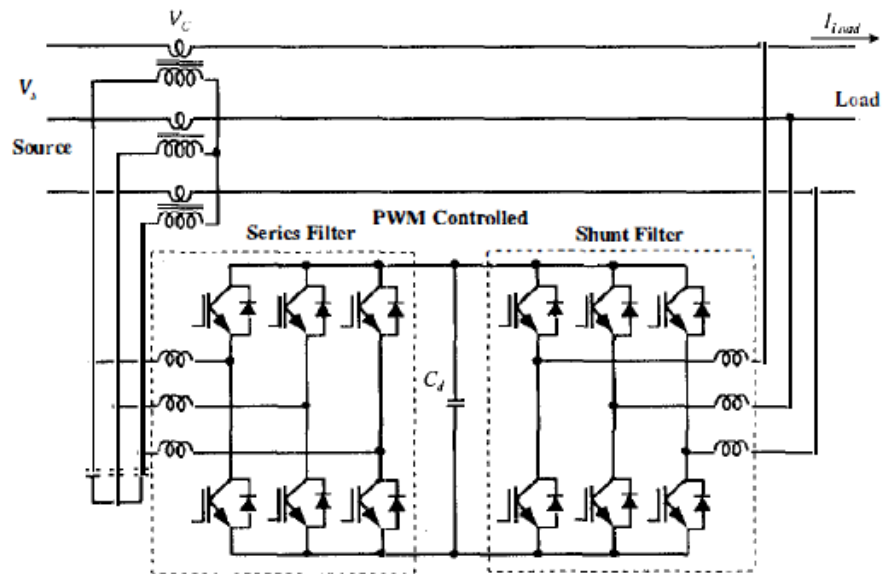
- **Filtros activos**

En inglés Active Power Filter (APF), este tipo de dispositivos pueden ser usados para controlar los armónicos y mejorar el factor de potencia. La dificultad en este tipo de filtros se presenta en la velocidad y precisión cuando se requiere la compensación de parámetros eléctricos.

Este tipo de configuración se muestra en la Figura 10. En este caso se tiene un filtro activo con conexión tanto en serie como en paralelo, donde se podrá compensar tanto las componentes armónicas de la tensión como las de la corriente.

Este tipo de filtros se encuentran en proceso de evolución constante. Entre los retos que tiene este tipo de tecnologías es la competitividad en precios, la velocidad de respuesta y la simplicidad que tienen los filtros pasivos, entre otros.

Figura 10. Filtro activo con conexión en serie y paralelo.



Fuente: Analysis of harmonic mitigation methods for building wiring systems [24]

## **5. FUENTES DE ENERGÍAS RENOVABLES Y SU IMPACTO EN LA GENERACIÓN DE COMPONENTES ARMÓNICAS**

Las fuentes de energía renovables están siendo ampliamente usadas en el mundo para reemplazar las fuentes de energías convencionales, con todos los beneficios asociados como menor impacto al medio ambiente, mayores opciones de generación de energía y aprovechamiento de los recursos, entre otras, pero a su vez presentan efectos negativos como control de sistemas eléctricos más complejos, necesidad de inversión en nueva infraestructura, distorsiones armónicas en el sistema entre otros.

Las distorsiones armónicas producidas por sistemas de generación fotovoltaica y eólica serán estudiadas a continuación, al ser dos de las fuentes de generación de energía renovable más usadas en la actualidad.

### **5.1 GENERACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA**

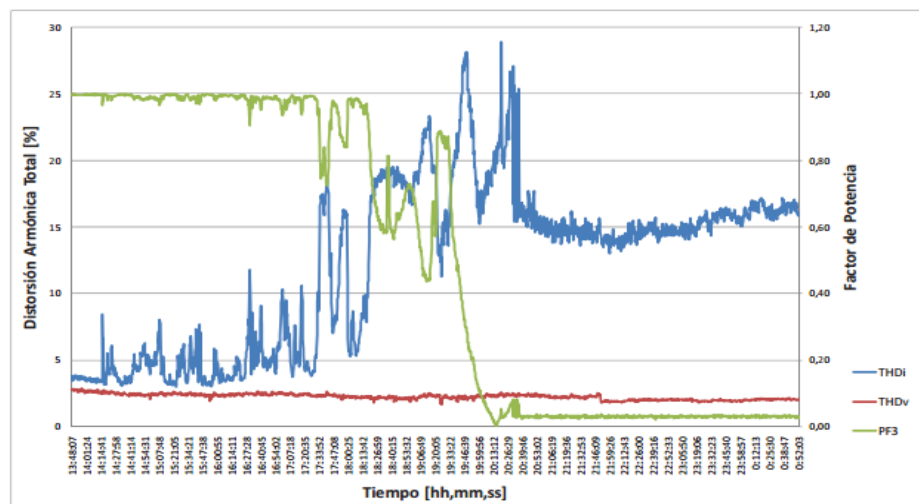
Para la generación de este tipo de energía, se requiere de un sistema fotovoltaico (panel fotovoltaico FV) el cual es un conjunto de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que se reúnen para captar y transformar la energía solar disponible en energía eléctrica.

La energía eléctrica generada por el panel FV es en corriente continua, por lo tanto se requiere de la conexión de un inversor (corriente continua a corriente alterna) para poder inyectar la energía generada por el panel FV al sistema de distribución de energía eléctrica. La operación de estos inversores generan distorsiones en las señales de corriente de la red, que pueden producir

calentamientos adicionales en los conductores eléctricos, mal funcionamiento de protecciones eléctricas, aparición de frecuencias de resonancia, vibraciones entre otros.

Mediante medidas experimentales, realizadas en una instalación de un panel fotovoltaico, con una potencia máxima de 190 W, se obtienen estimaciones del contenido de las componentes armónicas en el sistema eléctrico, procedente de los inversores fotovoltaicos [18]. La Figura 11 muestra las curvas de comportamiento de las distorsiones armónicas de la tensión y la corriente y del factor de potencia a la salida del inversor.

**Figura 11. THDI, THDV, FP**



Fuente: Análisis de las componentes armónicas de los inversores fotovoltaicos de conexión a la red [18]

En la Figura 11 se visualizan dos etapas:

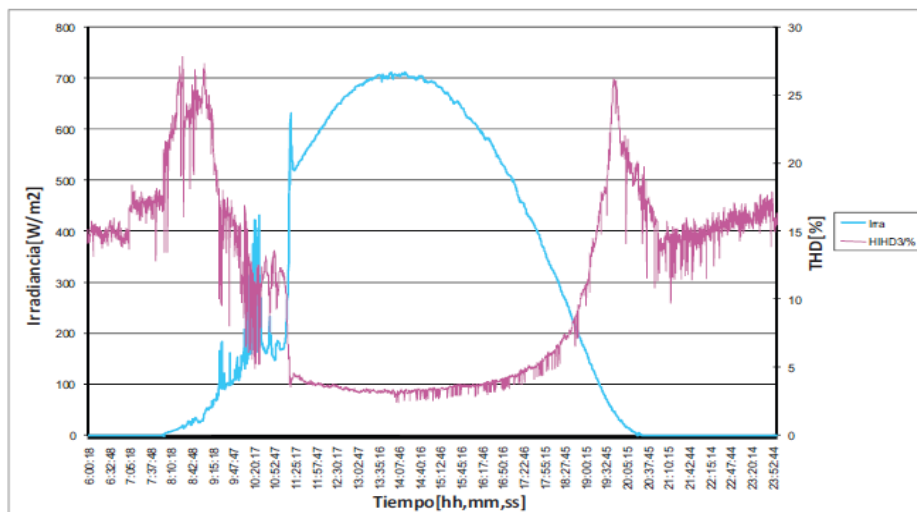
1. El inversor se encuentra en pleno funcionamiento, y la distorsión armónica de la tensión no supera el 5%, manteniendo un factor de potencia cercano a 1.

2. El panel fotovoltaico recibe suficiente luz solar para trabajar correctamente, el factor de potencia tiende a cero y el THDI alcanza un valor del 15%.

Lo anterior describe que a mayor distorsión armónica mayor es la corriente total respecto a su componente fundamental.

La Figura 12 por su parte describe las irradiaciones que se presentan en un día soleado, desde las 6:00 AM hasta las 00:00, evidenciando que a bajas radiaciones del sol, la distorsión armónica total de la corriente (THDI) aumenta hasta alcanzar un 30%.

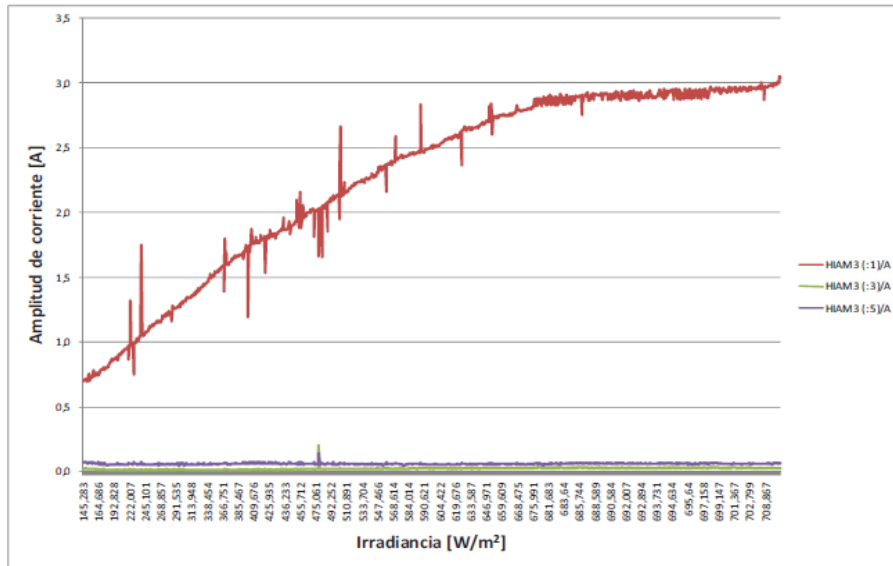
**Figura 12. THDI vs irradiancia**



Fuente: Análisis de las componentes armónicas de los inversores fotovoltaicos de conexión a la red [18]

En la medida que la irradiancia aumenta (hasta  $500 \text{ W/m}^2$ ) el THDI disminuye hasta alcanzar un valor aceptable del 5%. Los valores eficaces de la componente fundamental y de las componentes armónicas de orden 3° y 5°, se muestran en la Figura 13.

**Figura 13. Armónicos 1°, 3° y 5° Vs Irradiación**



Fuente: Análisis de las componentes armónicas de los inversores fotovoltaicos de conexión a la red [18]

En la Figura 13 se observa que el valor eficaz de la componente fundamental de la corriente varía con la irradiación de forma directa, mientras que el comportamiento de las componentes armónicas del 3° y 5° orden se mantienen constantes, sin ser afectadas por los cambios en la irradiación solar.

A partir de estos resultados se observa como el comportamiento del factor de potencia del generador está ampliamente ligado al THDI del mismo, donde a mayor THDI menor es el factor de potencia, pero el THDV no se ve afectado por las etapas de trabajo del panel.

Además se aprecia que el THDI es sensible a los cambios de la irradiación solar, esto debido a que a mayor irradiación, aumenta la componente fundamental de la corriente, y no las terceras y quintas armónicas de corriente, disminuyendo por consiguiente el THDI.

Cabe resaltar que para la instalación de estudio, se obtienen distorsiones de señales de tensión de máximo del 3% (cumple con la exigencia de límites de la norma IEEE 519), mientras que para la corriente el valor máximo del THDI es del 28%, que dependiendo del valor nominal de la corriente puede ser elevado.

## **5.2 GENERACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA**

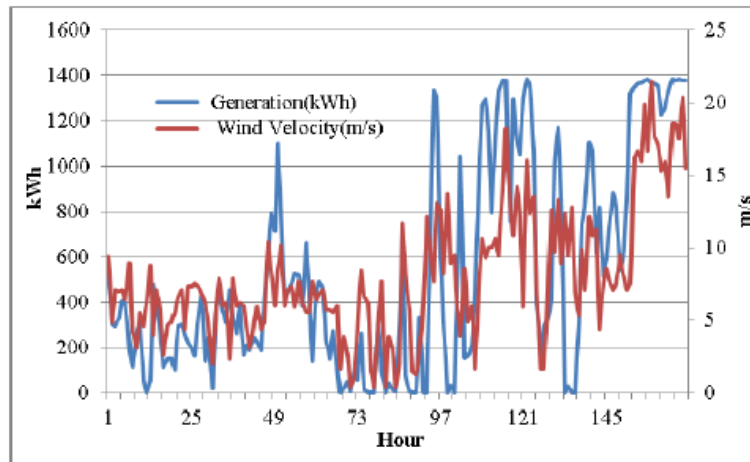
La energía eólica, es una fuente de energía prometedora ya que en algunas zonas del mundo este recurso tiene gran potencial y puede convertirse en una solución energética limpia para el planeta. Hoy día es común encontrar turbinas de viento con variadores de velocidad con el fin de extraer la mayor potencia posible [25]. Los variadores de velocidad distorsionan las señales de corriente durante su funcionamiento debido a la conmutación de los interruptores de potencia, deteriorando la calidad de energía eléctrica de los generadores eólicos.

El contenido de componentes armónicas de los aerogeneradores, dependerá de la cantidad de energía que éste suministre, y es conveniente realizar medidas por largos periodos de tiempo para establecer el espectro de las componentes armónicas promedio del sistema.

En [26] se encuentran datos experimentales de: la potencia de salida, las formas de onda de la corriente y la tensión y el espectro de las componentes armónicas de la tensión y la corriente de una turbina de 1,5 MVA.

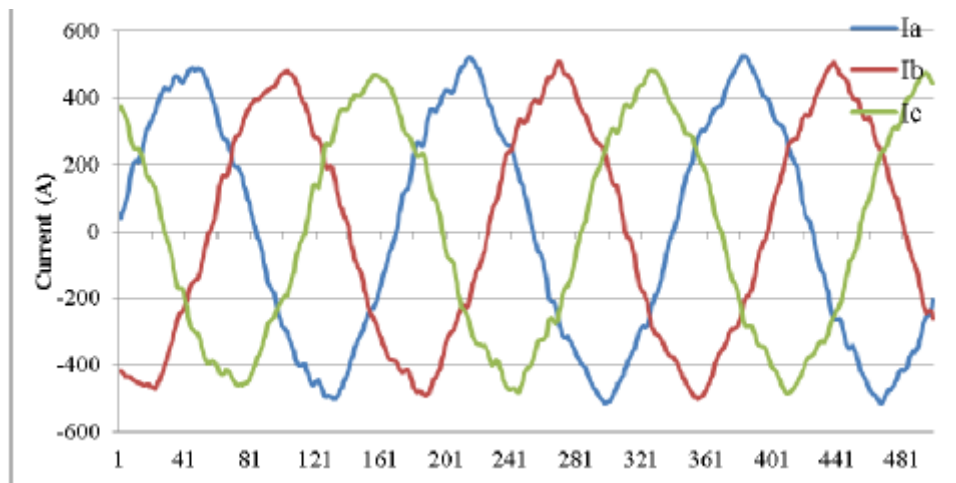
Las figuras 14 a 18 muestran el comportamiento de: la potencia generada por el aerogenerador, las formas de las ondas de las señales de tensión y corriente y las distorsiones armónicas totales de la tensión y la corriente a la salida del variador de velocidad utilizado para inyectar la potencia al sistema eléctrico.

**Figura 14. Generación de turbina Vs. velocidad del viento.**



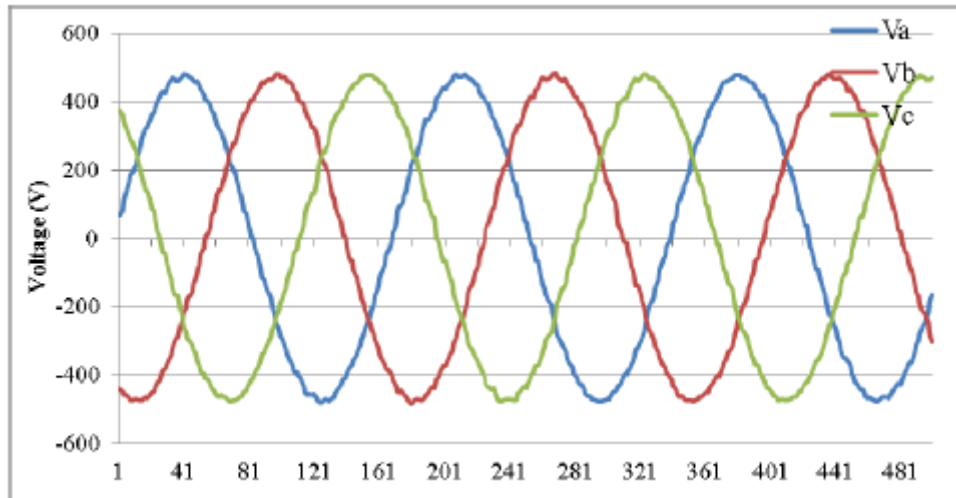
Fuente: Harmonic Current Characteristic Analysis for Wind Turbines [26].

**Figura 15. Forma de onda de la señal de corriente a velocidad de viento de 9,2 m/s**



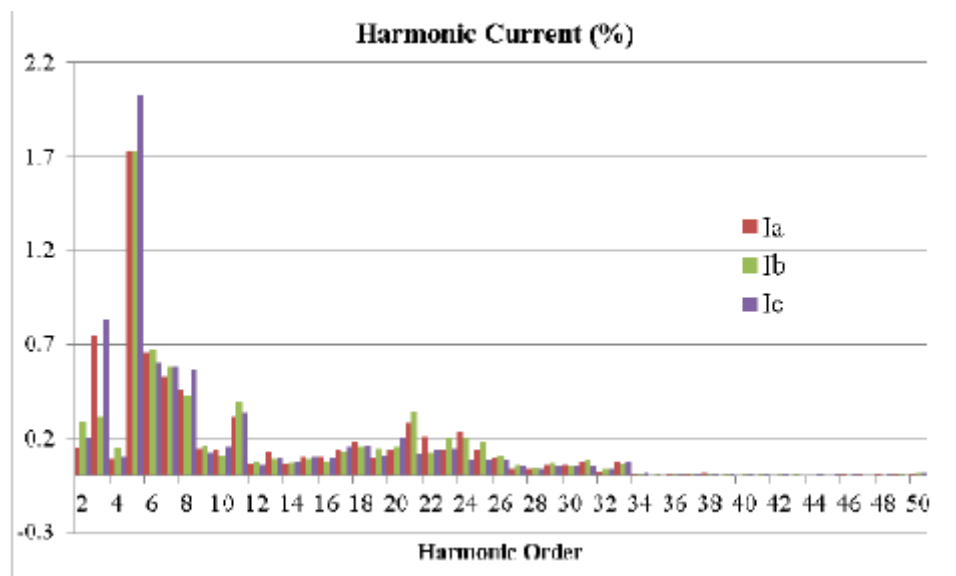
Fuente: Harmonic Current Characteristic Analysis for Wind Turbines [26].

Figura 16. Forma de onda de la señal de tensión a velocidad de viento de 9,2 m/s



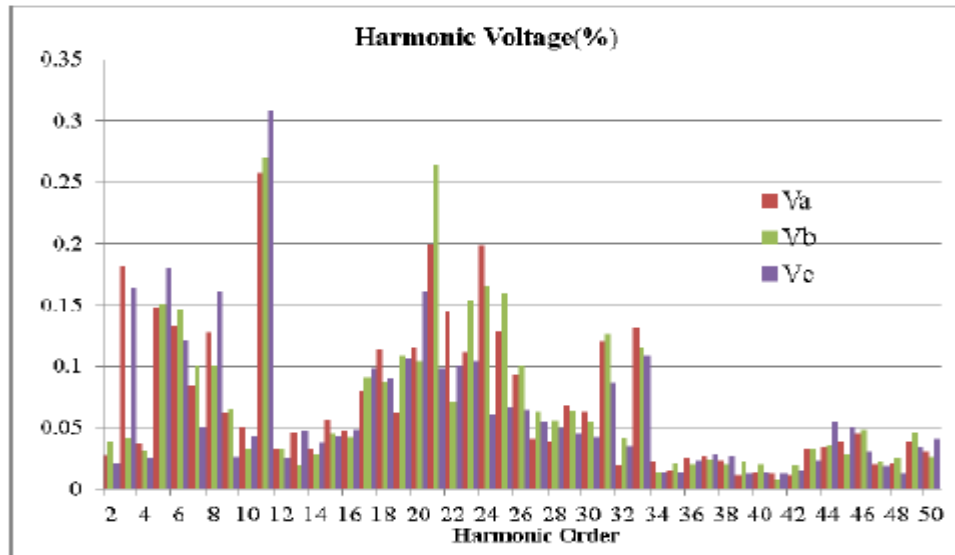
Fuente: Harmonic Current Characteristic Analysis for Wind Turbines [26].

Figura 17. Espectro de las componentes armónicas de la corriente en la turbina.



Fuente: Harmonic Current Characteristic Analysis for Wind Turbines [26].

**Figura 18. Espectro de las componentes armónicas de la tensión en la turbina.**



Fuente: Harmonic Current Characteristic Analysis for Wind Turbines [26].

Para los armónicos generados por este tipo de sistemas, debido a su amplia gama de las componentes armónicas y su dependencia con la potencia generada se recomienda en [25] diversos métodos de compensación de las componentes armónicas. Sin embargo, los resultados de las figuras 17 y 18 muestran que las distorsiones armónicas de las señales de tensión y corriente del aerogenerador analizado son bajas.

### **5.3 METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DE NUEVAS FUENTES ARMÓNICAS**

En la medida en que se conecten nuevos sistemas de generadores de energía eléctrica no convencionales y dispersos en el sistema eléctrico, será necesario realizar un procedimiento de análisis de las componentes armónicas,

convirtiéndose este análisis en una parte del diseño general, debido al incremento de los sistemas de generación no convencionales instalados a los sistemas eléctricos convencionales.

Una alternativa es realizar simulaciones preliminares para identificar los niveles de distorsión armónica y la respuesta del sistema ante estas nuevas fuentes de generación. Cuando se realiza una simulación detallada se deben estudiar diversas consideraciones en el sistema eléctrico:

- Analizar las diferentes condiciones del sistema, incluidas las posibles condiciones futuras.
- Determinar el efecto de nuevas fuentes de distorsión de las señales de tensión y corriente en el sistema eléctrico.
- Simular parámetros de los equipos y procedimientos operativos para el control de las componentes armónicas.

Para identificar los niveles de distorsión con la instalación de nuevos generadores en la red se puede realizar el siguiente procedimiento:

- Caracterización de los niveles de distorsión armónica existentes.
- Evaluar los problemas del sistema relacionados con la distorsión de las señales de tensión y corriente.
- Evaluar el impacto de una nueva fuente generadora de perturbaciones.
- Diseñar el equipo de control de las componentes armónicas.

En el futuro, el procedimiento de análisis de componentes armónicas puede ser parte del diseño general.

## **6. ANÁLISIS DE CASOS EXPERIMENTALES**

Para identificar el efecto que producen las componentes de las distorsiones armónicas en un sistema eléctrico, se analizarán algunos casos y estudios realizados a diferentes instalaciones; con el fin de obtener información relevante al comportamiento de algunos parámetros eléctricos y su efecto en el sistema eléctrico.

Conocer el comportamiento de las distorsiones armónicas de instalaciones eléctricas existentes, permite tener información, para predecir las componentes armónicas que pueden generar la combinación de diferentes tipos de cargas eléctricas. El conocimiento de las características de las señales de tensión y corriente permite establecer las acciones requeridas para mitigar los efectos que las distorsiones de las señales del sistema eléctrico pueden generar sobre los componentes del sistema desde una etapa de diseño.

### **6.1 ANÁLISIS DE UN SISTEMA ELÉCTRICO MONOFÁSICO CON CARGAS LINEALES Y NO LINEALES**

El punto de partida de este estudio se realiza en un tablero de distribución, en el cual se instala un sistema eléctrico con cargas lineales y no lineales, identificadas a continuación [11]:

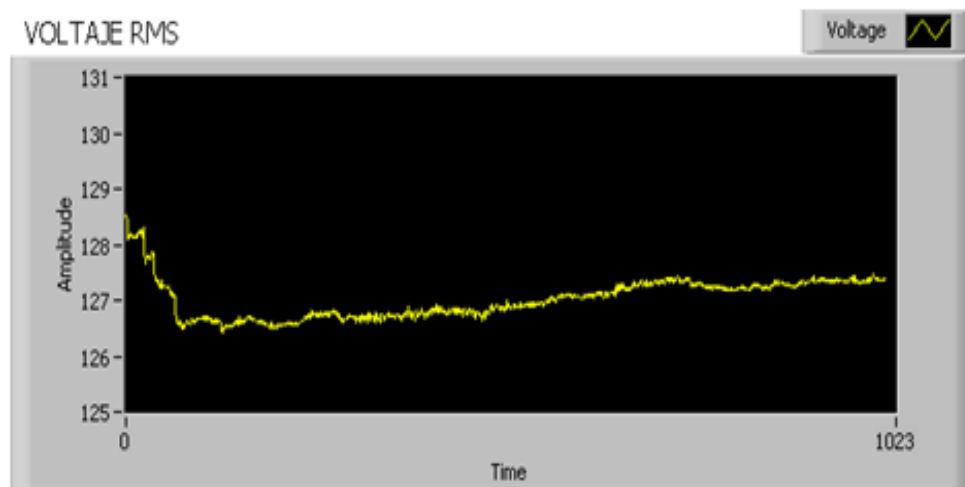
- Un computador con unidad de procesamiento de 1G de memoria RAM.
- Un motor monofásico de ½ HP.
- Lámpara fluorescente de 40 W.
- Foco incandescente de 100 W.

- Foco ahorrador de 40 W.

Los anteriores equipos y dispositivos se encuentran conectados a la barra principal del tablero de distribución, y este a su vez tiene instalado el módulo de medición para la respectiva toma de datos, en el cual se evalúan mediante gráficas los siguientes parámetros:

- El valor eficaz de la tensión del sistema eléctrico (ver Figura 19), el cual se disminuye cuando se conectan las cargas, hasta que se estabiliza, indicando que la corriente de las cargas provocan dicha caída de tensión.

**Figura 19. Tensión del sistema eléctrico de la referencia [11].**

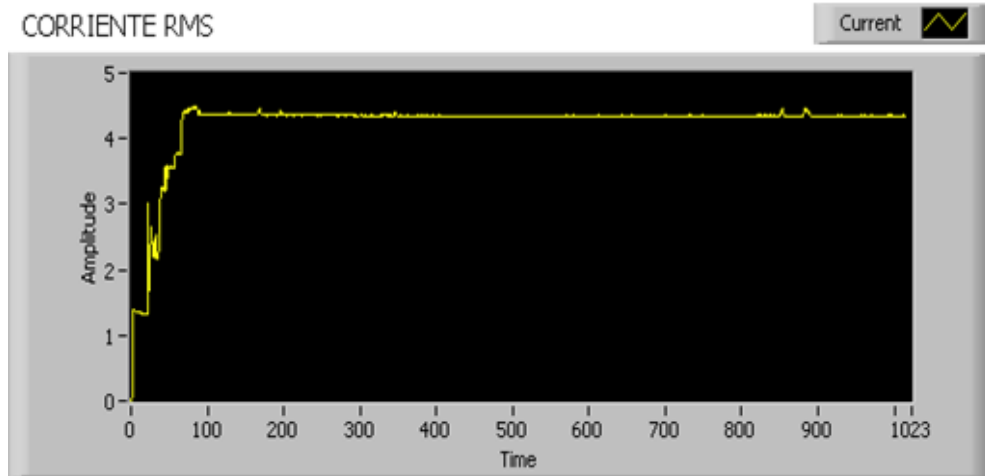


Fuente: Adquisición de datos para el análisis de armónicos en sistemas eléctricos usando Labview, tesis de grado [11].

- El valor eficaz de la corriente (ver Figura 20), que se incrementa con la conexión de las cargas al sistema y posteriormente se estabiliza. Sin embargo, en la Figura 20 se evidencian picos de corrientes originadas por las

perturbaciones que se generan en el sistema por la distorsión armónica debida a las cargas no lineales.

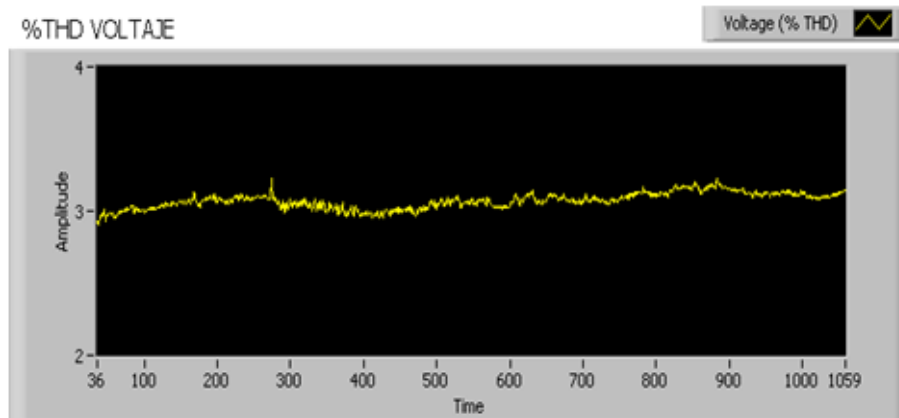
**Figura 20. Corriente del sistema eléctrico de la referencia [11].**



Fuente: Adquisición de datos para el análisis de armónicos en sistemas eléctricos usando Labview, tesis de grado [11].

- La distorsión armónica de la tensión “THDV”, mostrada en la Figura 21 permanece alrededor del 3%.

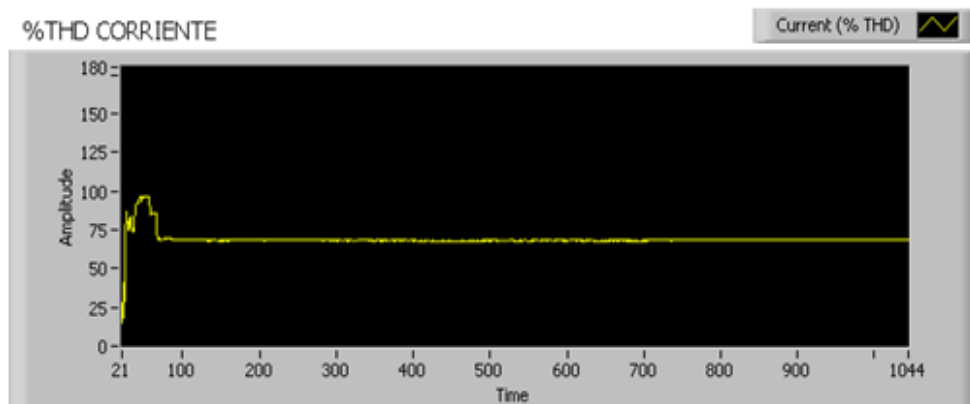
**Figura 21. THDV del sistema eléctrico de la referencia [11].**



Fuente: Adquisición de datos para el análisis de armónicos en sistemas eléctricos usando Labview, tesis de grado [11].

- Las distorsión armónica de corriente “THDI”, presentan un incremento durante la conexión de las cargas, estabilizándose posteriormente en un rango del 73% como se muestra en la Figura 22. Esta figura evidencia el alto contenido de las componentes armónicas de corriente, debido a las cargas no lineales conectadas al sistema eléctrico.

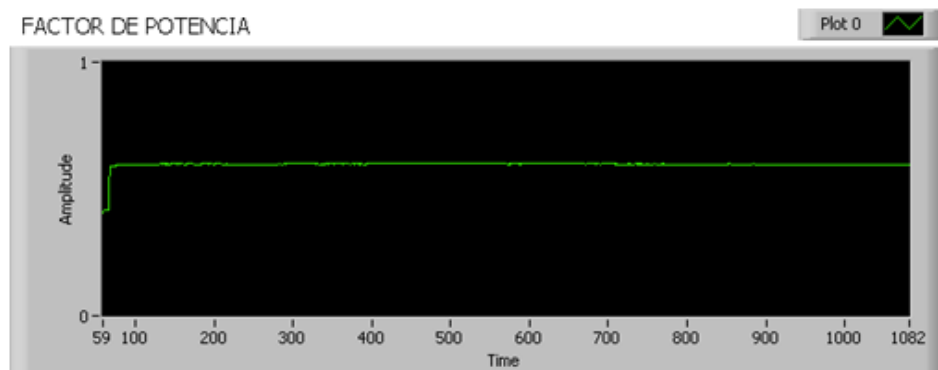
**Figura 22. THDI del sistema eléctrico**



Fuente: Adquisición de datos para el análisis de armónicos en sistemas eléctricos usando Labview, tesis de grado [11].

- El factor de potencia se mantiene constante en un valor de 0,8 (ver Figura 23), lo cual indica la ineficiencia del sistema, dado que el 20% de la potencia de dimensionamiento se requiere para suplir la necesidad de la potencia no activa de la carga no lineal, que comprende tanto la potencia reactiva como la potencia de distorsión.

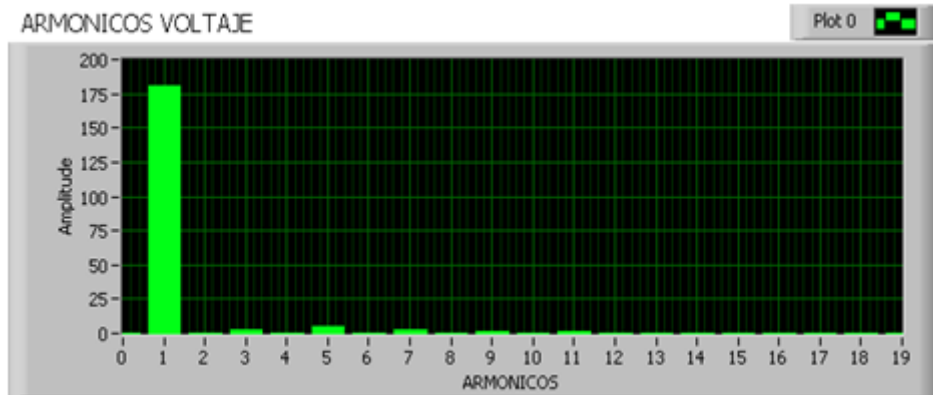
**Figura 23. Factor de potencia del sistema eléctrico**



Fuente: Adquisición de datos para el análisis de armónicos en sistemas eléctricos usando Labview, tesis de grado [11].

- Las componentes armónicas de la tensión son bajas. La Figura 24 muestra que las componentes armónicas de tensión son del 3, 5 y 7 orden; con magnitudes que no afectan el funcionamiento sistema.

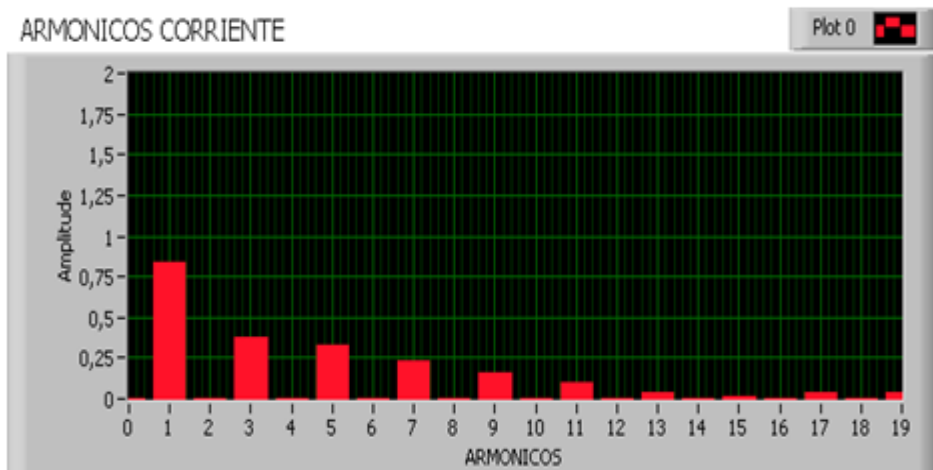
**Figura 24. Espectro de armónicos de la tensión del sistema.**



Fuente: Adquisición de datos para el análisis de armónicos en sistemas eléctricos usando Labview, tesis de grado [11].

- Las componentes armónicas de la corriente tiene una mayor magnitud y se presentan son de 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 19 orden como se muestra en la Figura 25. Estas componentes armónicas de corriente pueden afectar el funcionamiento del sistema.

**Figura 25. Espectro de armónicos de la corriente del sistema.**



Fuente: Adquisición de datos para el análisis de armónicos en sistemas eléctricos usando Labview, tesis de grado [11].

De este estudio se resalta que cuando un sistema eléctrico tenga cargas eléctricas no lineales instaladas, es necesario realizar el respectivo análisis de las componentes armónicas para evaluar las perturbaciones generadas en el sistema; para tomar acciones correctivas mediante la implementación de dispositivos que mitigan las distorsiones y de esta forma garantizar un adecuado funcionamiento de los dispositivos eléctricos para su correcto funcionamiento [11].

Cabe resaltar, que cuando se combinan varias cargas en el sistema eléctrico, se producen niveles de distorsión armónica más bajos que los generados por cada uno de los equipos o cargas individuales.

Las cargas residenciales con algún tipo de motor (lavadora, nevera, aspiradora, etc.) generan una menor distorsión armónica, debido a que su comportamiento está relacionado con cargas lineales inductivas.

Determinar los niveles de emisión de las componentes armónicas en el punto de acoplamiento común (PCC), ha sido una tarea compleja y difícil de realizar; debido a que se han planteado una gran cantidad de técnicas, pero por algunas razones ninguna de ellas se utiliza ampliamente en la práctica; además se requieren datos reales de la red eléctrica a evaluar.

## **6.2 TRANSFORMADOR EN SECTOR PÚBLICO**

En la referencia [7] se realiza el análisis para un transformador trifásico de 400 kVA, con una relación de tensión de 10/0,4 kV; de uso público y con una gran proporción de cargas no lineales. Las mediciones realizadas en el punto de evaluación se realizaron durante más de una semana cada 10 minutos y la frecuencia de muestreo utilizada fue de 128 muestras/ciclo.

Los resultados obtenidos durante esta medición muestran que las magnitudes más altas se presentan en las componentes armónicas dominantes en la red que son las de orden 5<sup>o</sup>, 7<sup>o</sup> y 11<sup>o</sup>.

De acuerdo al análisis realizado se resalta que:

- Para el armónico de 5<sup>o</sup> orden se muestra que el nivel de tensión en un percentil del 95 es de 1,96 V, con un nivel de emisión de corriente armónica de 17,8 A.
- Para el armónico de 7<sup>o</sup> orden se muestra que el nivel de tensión en un percentil del 95 es de 1,0 V, con un nivel de emisión de corriente armónica de 6,46 A.
- Para el armónico de 11<sup>o</sup> orden se muestra que el nivel de tensión en un percentil del 95 es de 0,42 V, con un nivel de emisión de corriente armónica de 1,73 A.

En este estudio se determinaron magnitudes de las componentes armónicas de tensiones y corrientes en el punto de conexión, se observa que a pesar de que el sistema a evaluar tiene varias cargas no lineales, el contenido de las componentes armónicas en el punto de acoplamiento común es menor al esperado; debido a que al combinar cargas no lineales se presenta mitigación entre componentes armónicas de las diferentes cargas.

### **6.3 ESTUDIO DE CARGAS EN UN EDIFICIO DE AULAS ACADÉMICAS**

El presente estudio se realiza en el Edificio de Ingeniería Eléctrica ubicado en el campus de la Universidad Industrial de Santander, mediante el trabajo de grado denominado “CARACTERIZACIÓN DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS Y CARGAS DEL EDIFICIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER” [15].

Se extrae de este análisis la caracterización de cargas, identificándose en cada uno de los pisos (sótano, piso 1, piso 2, piso 3, piso 4 y piso 5) mediante la asignación de tableros de distribución, en cada uno de ellos se tiene instalado:

- Fluorescentes 1X28 W a 120 V
- Fluorescentes 2X28 W a 120 V
- Fluorescentes 4X17 W a 120 V
- Fluorescentes 4X14 W a 120 V
- Bala compacta de 1x26 W a 120 V
- Tomacorriente normal
- Tomacorriente GFCI
- Salida de voz y datos

Para obtener la información sobre los parámetros eléctricos y el comportamiento de las cargas instaladas en cada uno de los tableros de distribución, se utiliza un analizador de redes. A continuación se presentan en las tablas 21 y 22 los resultados relevantes de este estudio:

- Los parámetros de corriente para cada uno de los tableros se muestra en la Tabla 21.

**Tabla 21. Valores eficaces de corriente (mínima, máxima y promedio)**

PARÁMETROS DE CORRIENTE												
TABLERO	Fase A			Fase B			Fase C			Neutro		
	Min [A]	Max [A]	Prom [A]	Min [A]	Max [A]	Prom [A]	Min [A]	Max [A]	Prom [A]	Min [A]	Max [A]	Prom [A]
Piso 1	0,17	18,62	3,98	1,77	26,76	6,17	0,17	26,11	5,65	1,46	12,78	4,21
Piso 2	0,20	8,03	1,01	2,31	13,50	3,34	0,31	9,19	1,03	1,78	10,84	2,93
Piso 3	0,85	18,05	4,01	0,33	10,49	2,59	0,33	5,66	1,33	0,76	17,60	3,68
Piso 4	0,24	18,34	4,26	5,06	5,13	5,11	0,31	9,38	1,31	0,28	16,03	3,83
Piso 5 N.	5,50	12,34	7,28	0,79	11,45	2,60	0,23	8,84	1,85	0,14	0,24	0,18
Piso 5 R.	1,56	9,98	2,55	0,43	3,60	0,86	0,29	4,29	0,60	2,29	9,95	2,81
Piso A.A.	0,40	12,93	0,70	-	-	-	-	-	-	0,44	9,69	0,55

Fuente: Caracterización de instalaciones eléctricas y cargas del edificio de la Universidad Industrial de Santander, Trabajo de grado. [15]

- La distorsión armónica total de tensión (THDV) se presenta en la Tabla 22.

**Tabla 22 Valores de distorsión armónica total de tensión (THDV)**

DISTORSION ARMONICA DE VOLTAJE THD						
TABLERO	Fase A		Fase B		Fase C	
	V	%	V	%	V	%
Piso 1	6,86	5,36	7,03	5,49	6,96	5,48
Piso 2	4,57	3,69	4,89	3,88	4,67	3,67
Piso 3	5,24	9,90	5,05	10,05	5,08	9,69
Piso 4	5,96	4,77	5,79	4,60	5,64	4,61
Piso 5 N.	5,03	6,34	5,22	4,81	4,9	6,18
Piso 5 R.	6,79	4,09	6,59	4,43	6,55	4,62
Piso A.A.	10,31	4,60	-	-	-	-

Fuente: Caracterización de instalaciones eléctricas y cargas del edificio de la Universidad Industrial de Santander, Trabajo de grado. [15]

Se observa en la anterior información, que los tableros de distribución se encuentran desbalanceados en cada una de sus fases; además la distorsión armónica de tensión en algunas de las líneas supera el valor reglamentario del 5%.

#### **6.4 TRANSFORMADOR PARA USO RESIDENCIAL**

Mediante un estudio realizado a un transformador de propiedad de la empresa de distribución ESSA ESP con número N° 4148, ubicado en el municipio de Piedecuesta Santander, por medio del trabajo de grado denominado “Metodología para la estimación de la distorsión armónica de corriente en redes de distribución y análisis de impacto en los transformadores”

Entre los muchos parámetros eléctricos que se evaluaron en el presente trabajo de grado, para este análisis se consideran los de distorsión armónica, tomados por el medidor PQube instalado en el transformador.

El transformador a evaluar es trifásico, de 112,5 kVA, con un nivel de tensión de 13,2 kV/220 V [16].

Los resultados obtenidos son los siguientes:

- Los valores de la distorsión armónica total de tensión THDV tomados durante una semana para cada una de las fases, muestran que no pasan el límite de THDV permitido (5% según lo establecido en la norma IEEE 519 - 1992), solo se alcanza un pico del 3,8%.
- Para el análisis de las corrientes de línea ( $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ ) y neutro ( $n$ ), se obtiene un comportamiento sinusoidal altamente distorsionado con valores sobresalientes,

pero que no sobrepasan el límite establecido de la corriente máxima del sistema.

- Se evidencia cierta magnitud de corriente por el neutro (sin ser mayor que las corrientes de fases), esto se debe a dos factores: el desbalance de las cargas monofásicas conectadas y la distorsión de señales de corriente debidas a las cargas no lineales conectadas al sistema.
- En el perfil semanal de la distorsión armónica total de corriente THDI de las fases, se visualiza que supera el límite del 8% establecido por la IEEE 519-2014.
- Los valores de la distorsión armónica total de corriente en el neutro THDI(n) generados, evidencian el alto contenido de armónicos (de tercer orden) y su alta distorsión.

## **6.5 SISTEMA DE COMUNICACIONES**

Para analizar este caso, se realiza un estudio en un área de trabajo con dos computadores, uno de ellos portátil y el otro de mesa; un enlace de comunicación realizado mediante los módems PLC a la red eléctrica, con el fin de enviar los datos a través ella y su sistema de suministro de energía eléctrica.

El entorno donde se encuentran instalados los equipos de comunicaciones, es un ambiente industrial; con diversos tipos de actuadores instalados, conmutadores, un sistema de banda transportadora, diversos motores entre otros, lo cual recrea un escenario con ruido electromagnético de amplio espectro que se irradia en la red eléctrica de suministro de energía.

El comportamiento de la red se observa en los siguientes resultados [10]:

- El nivel del tercer armónico en tensión es del 2,8%, mientras que la quinta armónica es de 3,6%; este comportamiento es normal.
- El nivel del tercer armónico en corriente es del 6,0 %, mientras que la quinta armónica es del 4,4 %.
- El factor de potencia registra un valor de 0,203 inductivo.
- El THDV es del 4,7%, mientras que el THDI llega al 7,6 %; evidenciando un porcentaje de ruido por encima de los estándares admisibles en redes industriales no superiores al 4% en tensión y al 6 % en corriente.

Es claro que la influencia de la distorsión de las señales en estos sistemas comunicaciones y más para la transmisión de datos es considerable, siendo directamente proporcional a la distorsión armónica total (THD); entre mayor es la distorsión, mayor será la posible pérdida de datos.

Además en el estudio, al incluir un condensador al sistema eléctrico con el fin de mejorar el factor de potencia, se produce una elevación del THDV a un 23% y del THDI al 25%, lo cual afecta la transmisión de los datos por el sistema de comunicación.

A continuación se resumen los estudios anteriores, considerando los aportes de interés relacionados al comportamiento de las componentes armónicas de las diferentes cargas instaladas al sistema eléctrico para cada caso de estudio.

En el primer caso se conectan una serie de cargas lineales y no lineales a un tablero de distribución eléctrico monofásico, donde se observa como estas cargas ocasionan distorsiones en la onda de tensión y de corriente, las cuales afectan en mayor medida el THDI del sistema, y en menor medida el factor de potencia y el THDV.

Por otra parte, del estudio de un transformador trifásico de 400 kVA, con cargas no lineales instaladas al sistema eléctrico se tiene que las componentes armónicas predominantes son del 5<sup>o</sup>, 7<sup>o</sup> y 11<sup>o</sup> orden, donde el 5<sup>o</sup> armónico es la componente con mayor magnitud y manifestando un comportamiento de mitigación debido a la combinación de cargas y sus efectos.

En un tercer caso se muestra un estudio donde se miden las distorsiones armónicas de tensión en un edificio de aulas, donde la carga instalada más representativa son luminarias fluorescentes. Se obtiene un THDV máximo del 10,05% el cual se encuentra por encima de los límites establecidos en la IEEE 519-2014.

Y finalmente en un cuarto caso, se presenta la instalación de un sistema de comunicaciones en un complejo industrial, en el cual se afecta en gran proporción la sensibilidad de los equipos de comunicaciones debido a la influencia de la distorsión de las señales sobre este sistema; con un THDI significativo afectando el buen funcionamiento del sistema, pero que no supera los límites establecidos en la norma IEEE 519 del 2014.

Realizando una valoración a todos los casos de análisis expuestos, se observan magnitudes de THDI que afectan el funcionamiento del sistema eléctrico, y componentes de distorsiones de señales impares de mayor magnitud que las pares, donde las de tercer orden se incrementan en el conductor del neutro, generando problemas de sobrecalentamiento en este conductor y caídas de tensión que pueden afectar el adecuado funcionamiento del sistema eléctrico.

Por este motivo el RETIE del 2013 es enfático en tener en cuenta en el dimensionamiento del conductor de neutro y del transformador de potencia, las distorsiones armónicas a las que estos serán sometidos.

## **7. ASPECTOS A CONSIDERAR CON RELACIÓN A LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA ETAPA DEL DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA**

En el momento de evaluar y dar una solución para la mitigación de la distorsión de las señales de tensión y corriente en el punto de acoplamiento común, entre el distribuidor y el usuario; es conveniente realizar buenas prácticas en el lado del usuario, para evitar que las perturbaciones generadas por las cargas no lineales y/o variantes en el tiempo que se instalen perturben el sistema eléctrico y a otros usuarios conectados al sistema de distribución.

A continuación se enumeran unas recomendaciones a considerar en las instalaciones eléctricas para mitigar los efectos que tiene la distorsión de las señales de corriente y tensión en el funcionamiento de los sistemas eléctricos.

- Se recomienda una conexión a tierra en todo sistema eléctrico, para evitar perturbaciones en las señales, las cuales pueden provenir de la distorsión de las señales de tensión y corriente del sistema eléctrico [11].
- Algunas soluciones básicas para la atenuación de las componentes armónicas en el lado del usuario pueden ser:
  - Agrupación de cargas no lineales y lineales en barras distintas, para disminuir la posibilidad que las componentes armónicas de la corriente circulen por el mismo conductor con el riesgo de impactar en la tensión de suministro de las cargas lineales, lo cual hará que las corrientes de las cargas lineales también se distorsionen.
  - Diseño e implementación de circuitos independientes para cargas lineales y cargas no lineales y en lo posible con diferentes impedancias para que la distorsión de las señales de corriente de las cargas no lineales impacten lo menos posible la tensión de suministro del sistema eléctrico.

- Instalación de filtros de atenuación de la distorsión de las señales de corriente y en algunos casos las de tensión. En lo posible la instalación de sistemas de compensación debe realizarse lo más cerca posible de la carga o cargas con mayor capacidad de distorsión.
- Instalación de transformadores con conexiones especiales para que las componentes armónicas de las corrientes circulen a través de los devanados secundarios de estos transformadores y no impacten la tensión del sistema eléctrico de suministro.
- Dependiendo del tipo de conexión del transformador, circulan las componentes armónicas de la corriente por los devanados secundarios:
  - En la Conexión Dyd se atenúan las componentes armónicas de orden 5° y 7.
  - En la Conexión Dy se atenúa la componente armónica de orden 3°.
  - En la conexión Dz5 se atenúa la componente armónica de orden 5°.
- En los transformadores de potencia, tener en cuenta las recomendaciones de diseño expuestas en el Capítulo 4 (numeral 4.3) y en el Anexo B, de tal manera que se minimice el impacto de las distorsiones armónicas sobre este importante elemento del sistema.
- Para la selección adecuada del cableado de alimentación teniendo en cuenta las componentes armónicas a los que será sometido, se debe tener en cuenta las recomendaciones del Capítulo 4 (numeral 4.2) y en el anexo A para la selección de los conductores de fase y neutro.
- En circuitos electrónicos, especialmente los equipos de cómputo el ruido inducido es la causa principal de un mal funcionamiento; por lo tanto se recomienda el uso de transformadores de aislamiento que estén localizados cerca a la carga; con el fin de reducir el efecto.
- También se recomienda si es posible localizar las cargas eléctricas de características no lineales y variantes en el tiempo, aguas arriba del sistema eléctrico; debido a que las perturbaciones aumentan en la medida que se disminuye el nivel de la potencia de cortocircuito.

- Es recomendable analizar las instalaciones eléctricas ya existentes para conocer las componentes armónicas que se presentan por cierto tipo de carga y así poder predecir que distorsiones armónicas se deberán tener en cuenta al dimensionar los elementos que hagan parte del rediseño de la instalación eléctrica.
- Es de interés conocer los límites establecidos en las recomendaciones prácticas de la IEEE 519 del 2014 para las redes de distribución y la norma IEC 61000-3-2 para los equipos, con el fin de controlar las distorsiones de corriente y de tensión en un sistema eléctrico para mantener el buen funcionamiento del mismo.

## 8. CONCLUSIONES

Las conclusiones de este trabajo se resumen en las siguientes:

- Se evidencia que los generadores de energía que usan fuentes renovables estudiadas en esta monografía, no presentan distorsiones de ondas de tensión y de corriente muy representativas por si solas, en ninguna de sus etapas de trabajo. Pero el efecto acumulativo de estas podrían llegar generar impactos negativos en el sistema eléctrico.
- Para lograr un exitoso filtrado de las componentes armónicas, se deben tener en cuenta aspectos como el punto de instalación del sistema de compensación, donde a mayor cercanía a la carga se obtendrá mejor mitigación de los efectos producidos por las distorsiones de onda, pero reconociendo la mayor inversión económica que esto podría implicar; además conocer las componentes armónicas que se deben atenuar, permitirá seleccionar el filtro adecuado para la solución del problema esperado o existente asociado con las distorsiones de las señales de tensión y corriente del sistema eléctrico.
- Para seleccionar adecuadamente dispositivos eléctricos como el transformador de potencia y el cableado eléctrico del sistema, es necesario conocer de antemano las posibles componentes armónicas a las que éstos serán sometidos por el tipo de carga que se va a conectar en el sistema. Por esta razón en la etapa de diseño, es necesario disponer de la información relacionada con las distorsiones armónicas de las señales de corriente de los equipos que se instalarán en el sistema, para evitar así posibles errores en la selección de dichos elementos. En esta monografía se mencionan algunas prácticas comunes para mitigar el impacto de las componentes armónicas en los elementos del sistema.

- Se consideró para el estudio las normas de la distorsión armónica las recomendaciones de las normas IEEE 519 y la IEC 61000-3-2 referenciadas en el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, las cuales establecen límites de emisiones de armónicas ya sea en el punto de acoplamiento común del sistema eléctrico o en los equipos a instalar en un sistema eléctrico en razón a que el sistema regulatorio colombiano contempla actualmente en la resolución 065 del 2012 indicadores en la calidad de la potencia como la distorsión armónica total de corriente “THDI”, la distorsión armónica total de tensión “THDV” y la distorsión total de la demanda “TDD” establecidas en la norma IEEE 519 del 2014.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Téllez Ramírez. “Distorsión armónica programa de ahorro de energía”. Recuperado el 2016. Disponible en: <http://www.waterymex.org/contenidos/rtecnicos/Optimizando%20la%20Operacion%20y%20el%20Mantenimiento/Distorsion%20Armonica.pdf>.
- [2] Suárez J. A., Di Mauro G. F., D. y Agüero Anauty C. “Análisis de la distorsión armónica y los efectos de atenuación y diversidad en áreas residenciales”. IEEE LATÍN AMÉRICA TRANSACTIONS, Volumen 3 N° 5, 2005.
- [3] Ruiz Vallejo Jorge M, y Ortiz Quintero Francisco H. “Metodologías para identificar fuentes armónicas en sistemas eléctricos”. Trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira, 2007.
- [4] IEEE Std C57.110-1998, “IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Non sinusoidal Load Currents“, Revision of IEEE Std C57.110. 1986.
- [5] Luna Valdés Luis Enrique. “Metodología para el análisis de las perturbaciones armónicas en los sistemas industriales en baja tensión”. Tesis de grado. Instituto Politécnico Nacional, México.2007.
- [6] Alvarado Héctor de Jesús y Ramírez S. Juan Manuel. “Metodología para el análisis de propagación y filtrado de armónicas en sistemas eléctricos”. Tesis de grado. Instituto Politecnico Nacional. México. 2010.

- [7] T. Pfajfar y I. Papič, "Harmonic Emission Level Estimation Based on Measurements at the Point of Evaluation". IEEE Power and Energy Society. 2011
- [8] IEEE SM 519-1992. Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. Revision of IEEE SM 519-1981. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 1993.
- [9] Comisión de Regulación de Energía y Gas. Resolución CREG 065. Por el cual se ordena hacer público un proyecto de resolución de carácter general, que pretende establecer las normas de calidad de la potencia eléctrica aplicables en el Sistema Interconectado Nacional. Bogotá D.C, 2007.
- [10] Arias Barragán Luis A. y Lombo Carrasquilla Andrés." Influencia de las armónicas en la comunicación en redes LAN – BPL (Broadband Over Powerline) para diferentes factores de potencia". Recuperado el 2016. Disponible en: [http://biblioteca.sena.edu.co/exlibris/aleph/u21\\_1/alephe/www\\_f\\_spa/icon/revistaproyectese/imagenes/sistemas\\_BPL.pdf](http://biblioteca.sena.edu.co/exlibris/aleph/u21_1/alephe/www_f_spa/icon/revistaproyectese/imagenes/sistemas_BPL.pdf)
- [11] Meléndez L. Carlos A. y Mora J. Washington C. "Adquisición de datos para el análisis de armónicos en sistemas eléctricos usando Labview". Tesis de seminario. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Ecuador. 2011.
- [12] Blanco Castañeda Ana M. "Efecto sobre los circuitos de distribución secundarios debido al uso intensivo de bombillas fluorescentes compactas y leds (light emitting diodes)". Trabajo de tesis. Universidad Nacional de Colombia. 2010.
- [13] Mora-Barajas M.A. y Bañuelos-Sánchez P. "Contaminación armónica producida por cargas no lineales de baja potencia: modelo matemático y casos prácticos". Ingeniería de Investigación y Tecnología, Volumen Xi Núm. 2, 2009.

- [14] Esparza G. Mario Salvador, Mata Guerrero Jesús A. y Castañeda R. Luis. A. "Las cargas no Lineales, su repercusión en las instalaciones eléctricas y sus soluciones". Conciencia tecnológica N° 32. Instituto Tecnológico de Aguascalientes. México. 2006.
- [15] Otero Q. Jorge L. y Pedrozo C. Jeisson H. "Caracterización de instalaciones eléctricas y cargas del edificio de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander". Trabajo de Grado, Universidad Industrial de Santander. 2015.
- [16] Tarazona H. Laura H. y, Vélez P. Daniel E. "Metodología para la estimación de la distorsión armónica de corriente en redes de distribución y análisis del impacto en los transformadores". Trabajo de Grado, Universidad Industrial de Santander. 2015.
- [17] Norma venezolana control de armónicos en sistemas eléctricos. Proyecto Covenin 11:7 - 001. Propuesta de norma. Recuperado el 2016. Disponible en: <http://www.sencamer.gob.ve/sencamer/normas/117001-04.pdf>.
- [18] Iyo Horikoshi. "Análisis de las componentes armónicas de los inversores fotovoltaicos de conexión a red". Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés. 2009
- [19] Fassbinder Stefan. "Application note neutral sizing in harmonic-rich installations". Leonardo Energy. European Copper Institute. No Cu0153. 2012.
- [20] Jawad Faiz, Milad Ghazizadeh y Hashem Oraee; "Derating of transformers under non-linear load current and non-sinusoidal voltage –an overview". Institution of Engineering and Technology IET. Volumen 9. 2015.

[21] Maryclaire Peterson, Brij N. Singh, Member, y Parviz Rastgoufard, "Active and Passive Filtering for Harmonic Compensation ".Southeastern Symposium on System Theory (SSST) University of New Orleans. IEEE. 2008.

[22] Pooya Bagheri, Wilsun Xu, y and Tianyu Ding, "A Distributed Filtering Scheme to Mitigate Harmonics in Residential Distribution Systems". IEEE Transactions on Power Delivery. Volumen 31 N° 2. 2016.

[23] Malagón Carvajal Gabriel, Magister en ingeniería eléctrica, Universidad industrial de Santander, "Propuesta para el diseño de instalaciones eléctricas de uso final mediante la incorporación de criterios legales, reglamentarios, normativos y técnicos considerando parámetros de compatibilidad electromagnéticas". Trabajo de Investigación, Universidad Industrial de Santander, 2014.

[24] T. Key, y Jih-Sheng Lai. "Analysis of harmonic mitigation methods for building wiring system." IEEE Transactions on Power Systems. Volumen N° 13 N° 2 1998. 2002.

[25] S. S. Das, S. C. Gupta M. "Harmonic mitigation methods for wind energy conversion systems: A review". Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC). International Conference. 2014.

[26] Chuo-Yean Chan, Shun-Yu Chan, Jen-Hao Teng, y Rong-Ceng Leou, "Harmonic Current Characteristic Analysis for Wind Turbines". Power Electronics and Drive Systems (PEDS). International conference. 2013.

[27] Muhyaddin J. H. Rawa, David W. P. Thomas y Mark Sumner "Experimental Measurements and Computer Simulations of Home Appliances loads for Harmonic Studies". IEEE Computer Modelling and Simulation (UKSim), 2014 UKSim-AMSS 16th. International Conference. 2014.

[28] T.W. Ching, "An Investigation on Electrical Performance of Variable-frequency Drives for Air-conditioning Applications". IEEE Electric Power Conference.2008.

[29] IEEE Std 519 – 2014, "Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", Revision of IEEE Std 519-1992.

[30] IEC 61000-3-2, "Limits for harmonic current emissions (equipment input current $\leq$ 16 A per phase)", Edition 3.2 2009-04

[31] J. Balcells, "Aspectos técnico económicos de la calidad de suministro eléctrico". Recuperado el 2016. Disponible en: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:cVutz1yaXksJ:www.jcee.upc.edu/JCEE2003/BALCELLS.doc+&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=co>.

[32] Juan Carlos Herrera Heredia, "Determinación de la potencia del transformador para alimentar cargas no lineales", Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador.

[33] Ministerio de Minas y Energía, Resolución 90795 julio 25 de 2014, Por la cual se aclara y se corrige unos yerros en el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE. Bogotá DC. 2014

[34] Ministerio de Minas y Energía, Resolución 90708 agosto 30 de 2013, Por la cual se expide el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE. Bogotá DC. 2013

## BIBLIOGRAFÍA

ALVARADO, Héctor de Jesús y RAMÍREZ S. Juan Manuel. “Metodología para el análisis de propagación y filtrado de armónicas en sistemas eléctricos”. Tesis de grado. Instituto Politécnico Nacional. México. 2010.

ARIAS BARRAGÁN, Luis A. y LOMBO CARRASQUILLA, Andrés.” Influencia de las armónicas en la comunicación en redes LAN – BPL (Broadband Over Powerline) para diferentes factores de potencia”. Recuperado el 2016. Disponible en:

[http://biblioteca.sena.edu.co/exlibris/aleph/u21\\_1/alephe/www\\_f\\_spa/icon/revistapr oyectese/imagenes/sistemas\\_BPL.pdf](http://biblioteca.sena.edu.co/exlibris/aleph/u21_1/alephe/www_f_spa/icon/revistapr oyectese/imagenes/sistemas_BPL.pdf)

BLANCO CASTAÑEDA, Ana M. “Efecto sobre los circuitos de distribución secundarios debido al uso intensivo de bombillas fluorescentes compactas y leds (light emitting diodes)”. Trabajo de tesis. Universidad Nacional de Colombia. 2010.

CHUO-YEAN, Chan; SHUN-YU, Chan; JEN-HAO, Teng; y RONG-CENG, Leou. “Harmonic Current Characteristic Analysis for Wind Turbines“. Power Electronics and Drive Systems (PEDS). International conference. 2013.

Comisión de Regulación de Energía y Gas. Resolución CREG 065. Por el cual se ordena hacer público un proyecto de resolución de carácter general, que pretende establecer las normas de calidad de la potencia eléctrica aplicables en el Sistema Interconectado Nacional. Bogotá D.C., 2007.

G., Esparza; SALVADOR, Mario; MATA GUERRERO, Jesús A. y CASTAÑEDA, R. Luis. A. "Las cargas no Lineales, su repercusión en las instalaciones eléctricas y sus soluciones". Conciencia tecnológica N° 32. Instituto Tecnológico de Aguascalientes. México. 2006.

FASSBINDER, Stefan. "Application note neutral sizing in harmonic-rich installations". Leonardo Energy. European Copper Institute. No Cu0153. 2012.

IEC 61000-3-2, "Limits for harmonic current emissions (equipment input current  $\leq 16$  A per phase)", Edition 3.2 2009-04

IEEE SM 519-1992. Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. Revision of IEEE SM 519-1981. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 1993.

IEEE Std 519 – 2014, "Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", Revision of IEEE Std 519-1992.

IEEE Std C57.110-1998, "IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Non sinusoidal Load Currents", Revision of IEEE Std C57.110. 1986.

IYO, Horikoshi. "Análisis de las componentes armónicas de los inversores fotovoltaicos de conexión a red". Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés. 2009

BALCELLS, J. "Aspectos técnico económicos de la calidad de suministro eléctrico". Recuperado el 2016. Disponible en: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:cVutz1yaXksJ:www.jcee.upc.edu/JCEE2003/BALCELLS.doc+&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=co>.

FAIZ, Jawad; GHAZIZADEH, Milad y ORAEE, Hashem. “Derating of transformers under non-linear load current and non-sinusoidal voltage –an overview”. Institution of Engineering and Technology IET. Volumen 9. 2015.

HERRERA HEREDIA, Juan Carlos. “Determinación de la potencia del transformador para alimentar cargas no lineales”, Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador.

LUNA VALDÉS, Luis Enrique. “Metodología para el análisis de las perturbaciones armónicas en los sistemas industriales en baja tensión”. Tesis de grado. Instituto Politécnico Nacional, México.2007.

MALAGÓN CARVAJAL, Gabriel. Magister en ingeniería eléctrica, Universidad industrial de Santander, “Propuesta para el diseño de instalaciones eléctricas de uso final mediante la incorporación de criterios legales, reglamentarios, normativos y técnicos considerando parámetros de compatibilidad electromagnéticas”. Trabajo de Investigación, Universidad Industrial de Santander, 2014.

PETERSON, Maryclaire; SINGH MEMBER, Brij N.; y RASTGOUFARD, Parviz. “Active and Passive Filtering for Harmonic Compensation “.Southeastern Symposium on System Theory (SSST) University of New Orleans. IEEE. 2008.

MELÉNDEZ L., Carlos A. y MORA J., WASHINGTON C. “Adquisición de datos para el análisis de armónicos en sistemas eléctricos usando Labview”. Tesis de seminario. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Ecuador. 2011.

Ministerio de Minas y Energía. Resolución 90708 agosto 30 de 2013, Por la cual se expide el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE. Bogotá DC. 2013

Ministerio de Minas y Energía. Resolución 90795 julio 25 de 2014, Por la cual se aclara y se corrige unos yerros en el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE. Bogotá DC. 2014

MORA-BARAJAS, M.A. y BAÑUELOS-SÁNCHEZ, P. “Contaminación armónica producida por cargas no lineales de baja potencia: modelo matemático y casos prácticos”. Ingeniería de Investigación y Tecnología, Volumen Xi Núm. 2, 2009.

MUHYADDIN, J. H. RAWA, David W. P. Thomas y SUMNER, Mark. “Experimental Measurements and Computer Simulations of Home Appliances loads for Harmonic Studies”. IEEE Computer Modelling and Simulation (UKSim), 2014 UKSim-AMSS 16th. International Conference. 2014.

Norma venezolana control de armónicos en sistemas eléctricos. Proyecto Covenin 11:7 - 001. Propuesta de norma. Recuperado el 2016. Disponible en <http://www.sencamer.gob.ve/sencamer/normas/117001-04.pdf>.

OTERO Q., Jorge L. y PEDROZO C., Jeisson H. “Caracterización de instalaciones eléctricas y cargas del edificio de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander”. Trabajo de Grado, Universidad Industrial de Santander. 2015.

POOYA BAGHERI, Wilsun Xu; y and TIANYU, Ding. “A Distributed Filtering Scheme to Mitigate Harmonics in Residential Distribution Systems”. IEEE Transactions on Power Delivery. Volumen 31 N° 2. 2016.

RUIZ VALLEJO, Jorge M, y ORTIZ QUINTERO, Francisco H. “Metodologías para identificar fuentes armónicas en sistemas eléctricos”. Trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira, 2007.

S. S. Das, S. C. Gupta M. “Harmonic mitigation methods for wind energy conversion systems: A review”. Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC). International Conference. 2014.

SUÁREZ, J. A., DI MAURO, G. F., D. y AGÜERO ANAUTY, C. “Análisis de la distorsión armónica y los efectos de atenuación y diversidad en áreas residenciales”. IEEE LATÍN AMÉRICA TRANSACTIONS, Volumen 3 N° 5, 2005.

KEY, T. y JIH-SHENG, Lai. ”Analysis of harmonic mitigation methods for building wiring system.” IEEE Transactions on Power Systems. Volumen N° 13 N° 2 1998. 2002.

PFAJFAR, T., y PAPIČ, I. “Harmonic Emission Level Estimation Based on Measurements at the Point of Evaluation”. IEEE Power and Energy Society. 2011

CHING, T.W. “An Investigation on Electrical Performance of Variable-frequency Drives for Air-conditioning Applications”. IEEE Electric Power Conference.2008.

TARAZONA H., Laura H. y, VÉLEZ P., Daniel E. “Metodología para la estimación de la distorsión armónica de corriente en redes de distribución y análisis del impacto en los transformadores”. Trabajo de Grado, Universidad Industrial de Santander. 2015.

TÉLLEZ RAMÍREZ. “Distorsión armónica programa de ahorro de energía”. Recuperado el 2016 Disponible en <http://www.waterymex.org/contenidos/rtecnicos/Optimizando%20la%20Operacion%20y%20el%20Mantenimiento/Distorsion%20Armonica.pdf>.

## ANEXOS

### **ANEXO A. cálculo de capacidad de corriente en líneas y neutros teniendo en cuenta el contenido de armónicos.**

Uno de los componentes más afectados por la proliferación de cargas no lineales y/o variantes en el tiempo son los conductores de las fases y el neutro, donde se presentan problemas de calentamiento excesivo, pérdidas de potencia por el flujo constante de corriente por el neutro, entre otros, esto debido al incremento del valor eficaz de las señales distorsionadas que se acumulan a través de estos conductores, donde para el caso del neutro la componente del tercer armónico es quien lo impacta con mayor fuerza.

Para mitigar el impacto de las componentes armónicas sobre los conductores de neutro y fases, se debe tener en cuenta en la etapa de diseño, un factor de reducción debido a armónicos; HDF (Harmonic Derating Factor), el cual debe multiplicarse por la corriente nominal del cable que alimentará la carga.

Se recomienda usar el método propuesto en el artículo de la IEEE “Calculation of Ampacities and Sizing of Line and Neutral Conductors in the Presence of Harmonics” del autor Ajit Hiranandani, donde se siguen los siguientes pasos para hallar este factor:

- 1) Determinar las componentes armónicas tanto en las fases como en el neutro del sistema a analizar, esto se puede realizar ya sea a través de medición o a través de cálculos.

2) Hallar el factor de distribución armónico (“harmonic distribution factor”) para cada componente armónica de la corriente, que se define como el valor por unidad del enésimo armónico con respecto a una corriente base.

$$\alpha_n = \frac{I_n}{I_{base}} \quad (\text{A.1})$$

Donde  $I_n$  es la corriente generada por el enésimo armónico e  $I_{base}$  es la componente fundamental de la corriente.

3) Calcular el factor de resistencia del conductor debido al enésimo armónico el cual se evalúa de la siguiente manera:

Primero se estima un factor llamado resistencia total del conductor debida al enésimo armónico,  $r_{ac}(n)$  el cual tendrá en cuenta: el efecto piel, el efecto debido a los otros conductores y el efecto debido a las canalizaciones cercanas.

$$r_{ac}(n) = \{1 + x_s(n) + x_{sp}(n) + x_{cp}(n)\} \quad (\text{A.2})$$

$x_s(n)$  = Impedancia debida al efecto piel.

$$x_s(n) = \left(\frac{ka}{2}\right) \frac{M_0 ka}{M_1 ka} \text{sen} \left\{ \theta_1(ka) - \theta_0(ka) - \frac{\pi}{4} \right\} - 1 \quad (\text{A.3})$$

Donde:

$$k = \sqrt{2 * \pi * f * n * \mu * \sigma} \quad (\text{A.4})$$

a=Radio del conducto en metros

f=frecuencia en Hertz

$\mu$  = permeabilidad magnética del conductor

$\sigma$  =conductividad del conductor

$n$ = orden del armónico.

$M_0(ka)$ ,  $M_1(ka)$ ,  $\theta_0(ka)$ ,  $\theta_1(ka)$  Son funciones de Bessel

$xsp(n)$  Impedancia debida a los otros conductores.

$$xsp(n) = F(x_p) \left( \frac{Dc^2}{S} \right) \left\{ \frac{1,18}{F(x_p) + 0,27} + 0,31 \sqrt{n} \left( \frac{Dc}{S} \right)^2 \right\} \quad (A.5)$$

$$xp = \frac{k}{\sqrt{\sigma * \pi * r_{dc}}} * \sqrt{k_p} \quad (A.6)$$

$n$ =número de armónico

$Dc$ = Diámetro del conductor en metros.

$Kp$ = factor empírico.

$f$ = frecuencia en Hertz

$s$ = Separación del conductor en metros.

$xcp(n)$  = Impedancia debida a canalizaciones cercanas no magnéticas.

$$xcp(n) = \frac{\frac{3}{r_{dc}} \sum_{p=1}^3 \left( \frac{2s}{D_{sm}} \right)^{2p}}{\left( \frac{2,6416 \times 10^4 rs}{n} \right)^2 + 1} \quad (A.7)$$

$s=(Dp-Ds)/2$  Para un espacio ancho entre el cableado y las tuberías

$s=0,578 * Ds$  Para un espacio angosto entre el cableado y las tuberías

$n$ =número de armónico

$rs$ = resistencia de la tubería en ohms por metro

$Dsm$  = diámetro externo de la tubería en metros.

$Ds$ =diámetro externo de los cables en metros.

$Dp$ = diámetro interno de la tubería en metros

Luego tras obtener  $r_{ac}(n)$  para cada armónico se halla el factor de resistencia del conductor con la siguiente ecuación:

$$\beta_n = r_{ac}(n) / r_{ac}(1) \quad (\text{A.8})$$

4) Luego se halla el HDF con la siguiente ecuación esto tanto para el neutro como para las fases:

$$HDF = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum_{h=2}^n \alpha^2 \beta_h}} \quad (\text{A.9})$$

5) Se calcula la capacidad que tendrá el cableado afectado por los armónicos de la siguiente forma

$$I = I_r * HDF$$

Donde:

$I$  = Es la capacidad en amperios que tendrá el cableado.

$I_r$  = Es la capacidad nominal del cableado en amperios.

Esto se debe realizar tanto para las fases como para los neutros

## **ANEXO B. Método para calcular la carga a instalar en transformadores secos e inmersos en aceite.**

Del proyecto de maestría “Propuesta para el diseño de instalaciones eléctricas de uso final mediante la incorporación de criterios legales, reglamentarios, normativos y técnicos considerando parámetros de compatibilidad electromagnéticas” de Gabriel Malagón Carvajal, Magister en ingeniería eléctrica, se extrae el siguiente método para seleccionar la carga a instalar en transformadores tipo seco e inmersos en aceite:

### **B.1 Método para transformadores tipo seco**

Para los transformadores tipo seco, se debe lograr que las pérdidas nominales en el transformador sean las máximas pérdidas permisibles, luego para la carga que se tenga, se debe hacer la verificación que las nuevas pérdidas generadas por los elementos no lineales más las pérdidas  $I^2 \cdot R$  no superen las pérdidas de diseño.

Para esto usaremos la ecuación mostrada a continuación:

$$I_{\max}(pu) = \sqrt{\frac{P_{LL-R}(pu)}{1 + (F_{HL} \times P_{EC-R}(pu))}} [pu] \quad (B.1)$$

Donde

$I_{\max}(pu)$ =Es el valor eficaz de la corriente de carga máxima permitida bajo condiciones nominales.

$P_{LL-R}(pu)$ = Son las pérdidas bajo carga en por unidad para condiciones nominales.

$F_{HL}$ = Es el factor armónico de pérdidas para las corrientes de eddy en los devanados.

$P_{EC-R}(pu)$  Son las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados en por unidad a la corriente y frecuencia nominal.

Ejemplo de uso

Se tiene un espectro de armónicos según la Tabla B.1 para un transformador con corriente nominal de 1200 A y unas pérdidas de eddy en los devanados del 15% de las pérdidas de  $I^2 \cdot R$ .

**Tabla B.1: Espectro de las componentes armónicas de un transformador con  $I_n=1200A$**

h	1,00	5	7	11	13	17	19
$I_h/I_1$	1,00	0,23	0,11	0,042	0,027	0,013	0,008

Fuente: Propuesta para el diseño de instalaciones eléctricas de uso final mediante la incorporación de criterios legales, reglamentarios, normativos y técnicos considerando parámetros de compatibilidad electromagnéticas.

En dónde:

h =Es el orden del armónico, 1, 2, 3, etc.

$I_h$ =Es el valor eficaz de la corriente del h-ésimo armónico.

$I_1$ =Es el valor eficaz de la corriente armónica fundamental.

Las pérdidas de carga en por unidad PLL-R(pu) para las condiciones de corriente y frecuencia nominal se calculan de acuerdo con:

$$P_{LL-R}(pu) = 1 + P_{EC-R}(pu) + P_{OSL-R}(pu) \quad (B.2)$$

POSL-R (pu)=Son otras pérdidas por dispersión bajo carga en por unidad para condiciones nominales.

Donde para este caso se tiene:

$$P_{LL-R}(pu) = 1 + P_{EC-R}(pu) + P_{OSL-R}(pu)$$

$$P_{LL-R}(pu) = 1 + 0,15(pu) = 1,15(pu)$$

Y donde el factor de armónicos se halla de la siguiente ecuación:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{MAZ}} \left[ \frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{MAZ}} \left[ \frac{I_h}{I_1} \right]^2} \quad (B.3)$$

$$FHL=3,324/1,068=3,11$$

Luego de calcular el factor armónico de pérdidas se verifica si las pérdidas para la carga generadora de armónicos PLL (pu) sean menores a las pérdidas de cargas en por unidad para condiciones nominales PLL-R (pu)

$$PLL(pu) = I(pu)^2 \times (1 + FHL \times PEC-R(pu))$$

$$P_{LL}(pu) = P(pu)^2 \times (1 + F_{HL} \times P_{EC-R}(pu)) \quad (B.4)$$

$$I(pu) = \sqrt{1^2 + 0,23^2 + 0,11^2 + 0,042^2 + 0,027^2 + 0,013^2 + 0,008^2}$$

$$I(pu)=1,07$$

$$PLL(pu) = 1,07 \times (1 + 3,11 \times 0,15) = 1,57(pu)$$

Luego verificando que las pérdidas calculadas son mayores a las nominales, se debe calcular la corriente máxima admitida.

$$I_{\max}(pu) = \sqrt{\frac{P_{LL-R}(pu)}{1 + (F_{HL} \times P_{EC-R}(pu))}} [pu]$$

$$= \sqrt{1,15 / (1 + (3,11 * 0,15))} = 0,89 [pu]$$

Luego la corriente máxima que debería tener el transformador es de  $1200 * 0,89 = 1068 [A]$ , por lo tanto la capacidad máxima del transformador se verá reducida en un 89%.

## **B.2 Método para transformadores inmersos en líquido**

Para el caso de los transformadores inmersos en líquido, las pérdidas por dispersión en elementos que rodean al transformador, tales como la divisiones, tornillería, depósitos, etc., causan mayor impacto a la temperatura del equipo, ya que estas pérdidas generan que se caliente el aceite que lo refrigera, y a su vez el transformador.

Caso contrario en los transformadores tipo seco, donde la temperatura que generan estas corrientes parásitas, no es tan significativa.

Para realizar el cálculo de la carga que se debe instalar en el transformador conociendo el espectro de armónicos, se realiza similar al caso anterior, pero en esta ocasión se tendrán en cuenta estas pérdidas en elementos externos a los devanados y la temperatura del aceite.

### **Ejemplo**

Se tiene un transformador en aceite diseñado para un contenido armónico específico de corriente, para el cual la elevación media de temperatura de los devanados es  $65^{\circ}C$  y  $80^{\circ}C$  en el punto caliente de los devanados.

Después de la instalación se midieron las corrientes armónicas reales y estos valores se suministraron al fabricante con el objeto de verificar las elevaciones de temperatura.

Para el transformador descrito con condiciones de carga nominal y 60 Hz, las pérdidas nominales son las siguientes.

**Tabla B.2: Pérdidas de potencia en un transformador sumergido en aceite**

PÉRDIDAS NOMINALES	Potencia (W)
sin carga	4072
$i^2R$	27821
Pérdidas por corrientes de eddy y por dispersión	4060
Pérdidas totales	35953

Fuente: Propuesta para el diseño de instalaciones eléctricas de uso final mediante la incorporación de criterios legales, reglamentarios, normativos y técnicos considerando parámetros de compatibilidad electromagnéticas.

A su vez se conoce el espectro de armónicos producido por la carga instalada y la elevación de la temperatura con respecto a la temperatura ambiente como se muestra a continuación:

**Tabla B.3: espectro de armónicos en transformador en aceite**

h	I <sub>h</sub> /I <sub>1</sub>
1	1
3	0.35
5	0.17
7	0.12
9	0.092
11	0.071
13	0.051
15	0.043
17	0.04
19	0.039
23	0.032
25	0.029

Fuente: Propuesta para el diseño de instalaciones eléctricas de uso final mediante la incorporación de criterios legales, reglamentarios, normativos y técnicos considerando parámetros de compatibilidad electromagnéticas.

**Tabla B.4: Elevación de temperatura en transformador en aceite.**

Elevaciones de T° respecto a la temperatura ambiente	Temperatura [°C]
Elevación media en el lado de alta	48.1
Elevación media en el lado de baja	47.6
Elevación en la capa superior del aceite	47.2
Elevación de la zona caliente de los arrollamientos	55.3

Fuente: Propuesta para el diseño de instalaciones eléctricas de uso final mediante la incorporación de criterios legales, reglamentarios, normativos y técnicos considerando parámetros de compatibilidad electromagnéticas.

Luego se usarán las siguientes fórmulas para hallar el factor armónico tanto para corrientes de eddy en los devanados (igual que en el caso anterior), como para las pérdidas por dispersión.

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{MAZ}} \left[ \frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{MAZ}} \left[ \frac{I_h}{I_1} \right]^2}$$

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{MAZ}} \left[ \frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{MAZ}} \left[ \frac{I_h}{I_1} \right]^2} \quad (B.5)$$

Donde reemplazando se tiene que:

FHL-STR=1,38

FHL=6,5283

Para este tipo de transformadores una buena aproximación es asumir que las pérdidas por dispersión son aproximadamente el 92% y las pérdidas de eddy están alrededor del 8% del total de las pérdidas nominales dadas por dispersión y por corrientes de eddy, como se muestra a continuación.

**Tabla B.5: Pérdidas transformador en aceite.**

Pérdidas por dispersión	Potencia [W]
Pérdidas de eddy en los devanados	325
Pérdidas por dispersión	3735
Total pérdidas por corrientes de eddy y por dispersión	4060

Fuente: Propuesta para el diseño de instalaciones eléctricas de uso final mediante la incorporación de criterios legales, reglamentarios, normativos y técnicos considerando parámetros de compatibilidad electromagnéticas.

Para determinar la elevación de temperatura de la capa superior del aceite, las pérdidas totales (PLL) se deben corregir teniendo en cuenta el valor eficaz de la corriente medida, por encima de la corriente nominal, y también los efectos del contenido armónico.

Para hallar PLL tenemos:

$$P_{LL} = I^2 R + (F_{HL} \times P_{EC}) + (F_{HL-STR} \times P_{OSL}) \quad (B.6)$$

Donde

$I^2 R$  = Son las pérdidas debidas a la corriente de carga y a la resistencia en c.c. de los devanados.

FHL: El Factor armónico de pérdidas para las corrientes de eddy en los devanados.

PEC: Son las pérdidas debidas a las corrientes de eddy en los devanados.

FHL-STR: Es el factor armónico para las pérdidas por dispersión.

OSL: Son las pérdidas por dispersión en fijaciones, depósitos, etc.

Reemplazando valores nominales de potencia se tiene:

$$PLL = 35103 \text{ (W)}$$

Ahora corrigiendo el valor de las pérdidas totales se tiene:

$$P_{LL\text{corregid}}(pu) = P_{LL}(pu) \times (I_{RMS\text{ MEDIDA}})^2$$

$$P_{LL\text{corregid}}(pu) = 35103,7 \times (1.09)^2$$

$$P_{LL\text{corregid}}(pu) = 41729,26$$

A continuación se resumen las pérdidas en la tabla B.6:

**Tabla B.6: Resumen pérdidas transformador en aceite.**

Tipo de pérdidas	Pérdidas nominales (W)	Pérdidas de carga (W)	factor armónico	Pérdidas corregidas
PNL(sin carga)	4072	4072		4072
I <sup>2</sup> *R	27821	33054,1301		33054,1301
Pec (Pérdidas por corrientes de eddy)	324,8	385,89488	6,48	2500,598822
Posl (Pérdidas por corrientes de eddy)	3735,2	4437,79112	1,38	6124,151746
P. eddy y dis	4060	4823,686		8624,750568
<b>P total</b>	<b>35953</b>	<b>41949,8161</b>		<b>45750,88067</b>

Fuente: Propuesta para el diseño de instalaciones eléctricas de uso final mediante la incorporación de criterios legales, reglamentarios, normativos y técnicos considerando parámetros de compatibilidad electromagnéticas.

Al utilizar la siguiente ecuación se obtiene la elevación de la temperatura en la capa superior del aceite, para la carga armónica especificada.

$$\theta_{TO} = \theta_{TO-R} \times \left( \frac{P_{LL} + P_{NL}}{P_{LL-R} + P_{NL}} \right)^{0.8} [^{\circ}C] \quad (B.7)$$

En donde

$\theta_{to}$ : Es la elevación de la temperatura de la capa superior del aceite

$\theta_{to-R}$ : Es la elevación de la temperatura de la capa superior del aceite en condiciones nominales.

PNL: Son las pérdidas en vacío o ajenas a la carga.

PLL: Son las pérdidas en condiciones de carga.

PLL-R: Son las pérdidas en condiciones de carga nominales.

Reemplazando:

$$\theta_{TO} = 47.2 * (45750 / 35953)^{0.8}$$

$$\theta_{TO} = 57.23 [^{\circ}C]$$

Las pérdidas máximas en por unidad en los devanados ocurrieron en el devanado de alta tensión y se estiman en un promedio del 2% de las pérdidas óhmicas. Suponiendo que las máximas pérdidas por dispersión en los devanados en la zona correspondiente al punto más caliente son cuatro veces el promedio de las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados, estas resultan del 8%. La elevación de temperatura del punto más caliente respecto al a la temperatura de la capa superior del aceite, puede ser calculada por la Ecuación siguiente:

$$\theta_g = \theta_{g-R} \times \left( \frac{1 + (F_{HL} \times P_{EC-R}(pu))}{1 + P_{EC-R}(pu)} \right)^{0.8} [^{\circ}C] \quad (B.8)$$

$\theta_g$ : Es la máxima elevación de temperatura del punto caliente respecto a la capa superior del aceite.

$\theta_{g-R}$  Es la máxima elevación de temperatura del punto caliente respecto a la capa superior del aceite para las condiciones nominales.

$$\theta_g = (55,3 - 47,2) * \left( \frac{(1 + 6,52 * 0,08)}{1 + 0,08} \right)^{0.8}$$

$$\theta_g = 11,59 [^{\circ}C]$$

Luego la elevación de temperatura en el punto más caliente del conductor respecto al ambiente es:

$$57,23 + 11,59 = 68,82 [^{\circ}C]$$

Luego se debe verificar que  $\theta_{io}$  y  $\theta_g$  no excedan los valores de diseño del transformador.