



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,
SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



REVISIÓN DE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN Y TÉCNICAS DE MITIGACIÓN DE SUPRAARMÓNICOS EN LAS REDES ELÉCTRICAS

REVIEW OF MEASUREMENT METHODS AND SUPRAHARMONIC MITIGATION TECHNIQUES IN ELECTRICAL NETWORKS

Autor:

EDINSON ACEVEDO CARRERO

Director:

M.Sc. EDISON ANDRÉS CAICEDO PEÑARANDA

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,
SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
PAMPLONA – COLOMBIA
2022**



REVISIÓN DE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DE SUPRAARMÓNICOS EN LAS REDES ELÉCTRICAS

REVIEW OF MEASUREMENT METHODS AND SUPRAHARMONIC MITIGATION TECHNIQUES IN ELECTRICAL NETWORKS

Autor:
EDINSON ACEVEDO CARRERO

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
ELÉCTRICO**

Director:
M.Sc. EDISON ANDRÉS CAICEDO PEÑARANDA

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,
SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
PAMPLONA – COLOMBIA
2022



DEDICATORIA

Este trabajo de grado está dedicado a:

A mi madre Amparo Lucy Carrero Diaz quien con su amor, paciencia y esfuerzo me ha permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por no dejar de creer en mí y por enseñarme a superar las dificultades y a confiar en Dios.

A toda mi familia por todo su apoyo incondicional, consejos y palabras de aliento que hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a mis amigos, por apoyarme cuando más los he necesitado, por extender su mano en momentos difíciles y por brindarme su amistad incondicional cada día, de verdad mil gracias.



RESUMEN

Este documento presenta una revisión sobre las técnicas de medición, estándares y métodos de mitigación de supraarmónicos. Para realizar una adecuada recopilación de información se utilizaron las bases de datos de Sciencedirect, Scopus e IEEE Xplore, de esta forma se obtuvo una gran cantidad de material bibliográfico, de los cuales se seleccionaron los estudios más recientes y relevantes.

El primer capítulo presenta un breve marco de referencia que servirá como base teórica para la comprensión del resto del trabajo. El segundo capítulo describe algunos de los métodos de medición de supraarmónicos, especialmente los descritos en los estándares IEC 61000-4-7, IEC 61000-4-30 y CISPR 16-1-1. El tercer capítulo explica los estándares de regulación aplicables al rango supraarmónico, clasificándolos por los límites de emisión, inmunidad y compatibilidad, además se presenta una sugerencia para establecer estos límites. Y el cuarto capítulo muestra algunas de las técnicas de mitigación de emisiones de 2 kHz a 150 kHz y sugerencias para lograr esto.

El objetivo de este trabajo es generar una compilación de la información relevante referente a la emisión de supraarmónicos, como sus efectos en las redes eléctricas, avance de los estándares, técnicas de medición y mitigación. De esta manera se refleja el panorama actual para este tipo de emisiones y las dificultades que se han presentado para lograr la normalización y regulación de las emisiones en este rango de frecuencias. Sumado a esto, se espera que este escrito sirva para futuros estudios, especialmente aquellos realizados por hispanohablantes debido a la falta de información en este idioma en las bases de datos más reconocidas.

Palabras clave: Supraarmónicos, Distorsión armónica, alta frecuencia, calidad de la energía, electrónica de potencia, emisiones.



ABSTRACT

This document presents a review of supraharmonic measurement techniques, standards, and mitigation methods. To carry out an adequate collection of information, the Sciencedirect, Scopus and IEEE Xplore databases were used, in this way a large amount of bibliographic material was obtained from which the most recent and relevant studies were selected.

The first chapter presents a brief frame of reference that will serve as a theoretical basis for understanding the rest of the work. The second chapter describes some of the supraharmonic measurement methods, especially those described in the IEC 61000-4-7, IEC 61000-4-30 and CISPR 16-1-1 standards. The third chapter explains the regulation standards applicable to the supraharmonic range, classifying them by emission limits, immunity and compatibility, and a suggestion is presented to establish these limits. And the fourth chapter shows some of the emission mitigation techniques from 2 kHz to 150 kHz and suggestions to achieve this.

The objective of this work is to generate a compilation of relevant information regarding the emission of supraharmonics, such as their effects on electrical networks, advancement of standards, measurement, and mitigation techniques. In this way, the current panorama for this type of emissions and the difficulties that have arisen to achieve the normalization and regulation of emissions in this frequency range are reflected. In addition to this, it is expected that this paper will serve for future studies, especially those carried out by Spanish speakers due to the lack of information in this language in the most recognized databases.

Keywords: Supraharmonics, Harmonic distortion, high frequency, power quality, power electronics, emissions.



TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	6
LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE TABLAS.....	12
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	13
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	13
2. OBJETIVOS	14
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	14
2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	14
2.3. ACOTACIONES	14
3. MARCO DE REFERENCIA	14
3.1. CALIDAD DE LA ENERGÍA	14
3.2. EMISIONES POR DEBAJO DE 2 kHz	16
3.2.1. Clasificación de distorsiones por debajo de 2 kHz	16
3.2.2. Fuentes de distorsiones por debajo de 2 kHz	16
3.2.3. Efectos de los armónicos e interarmónicos	17
3.3. EMISIONES ENTRE 2-150 kHz	18
3.3.1. Clasificación.....	18
3.3.2. Fuentes de emisión de supraarmónicos.....	19
3.3.3. Impacto de la distorsión supraarmónica.....	20
3.4. ESTÁNDARES PARA SUPRAARMÓNICOS	21
3.5. ARTÍCULOS DESTACADOS.....	21
CAPÍTULO II. MÉTODOS DE MEDICIÓN DE SUPRAARMÓNICOS.....	27
1. IEC 61000-4-7 (MÉTODO A).....	27
2. IEC 61000-4-30 (MÉTODO B).....	29
3. CISPR 16 (MÉTODO C)	31



4. COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS A, B Y C	32
4.1. MEDICIONES DE LABORATORIO	33
4.2. MEDICIONES DE CAMPO	34
4.3. COMPLEJIDAD COMPUTACIONAL	35
5. OTRAS ALTERNATIVAS.....	36
5.1. ENFOQUE DE SUBMUESTREO.....	36
5.2. MÉTODO WPD	38
CAPÍTULO III. ESTANDARES APLICABLES PARA EL RANGO SUPRAARMÓNICO.....	42
1. LÍMITES DE EMISIÓN Y ESTÁNDARES DE MEDICIÓN	44
2. ESTÁNDARES DE INMUNIDAD	46
3. NORMAS DE COMPATIBILIDAD	46
CAPÍTULO IV. TÉCNICAS DE MITIGACIÓN DE SUPRAARMÓNICOS.....	48
1. MITIGACIÓN A TRAVÉS DEL NIVEL DE INMUNIDAD	49
2. MITIGACIÓN MEDIANTE FILTROS ACTIVOS.....	50
3. MITIGACIÓN POR MEDIO DE CONVERTIDORES MULTINIVEL	50
4. MITIGACIÓN INTEGRADA	53
CAPÍTULO V. IMPACTO DEL TRABAJO.....	55
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	56
CAPÍTULO VII. BIBLIOGRAFÍA	58



LISTA DE FIGURAS

Figura I-1. Clasificación de las perturbaciones de la calidad de la energía. Adaptada de [3].	15
Figura I-2. Emisiones entre 1 Hz-250 kHz de una bombilla CFL de baja potencia. Tomada de [3].	19
Figura I-3. Modelo Linealizado para Emisiones Primarias y Secundarias. Adaptada de [3].	19
Figura I-4. Efectos de las emisiones de supraarmónicos en la red. Adaptada de [2].	20
Figura II-1. Método de medición de supraarmónicos según la norma IEC 61000-4-7. Adaptada de [25].	28
Figura II-2. Metodología de medición propuesta por el estándar IEC 61000-4-30 Ed3. Tomada de [25].	30
Figura II-3. Paso a paso del método sugerido por la norma IEC 61000-4-30. Adaptada de [25].	30
Figura II-4. Intervalos de medición y análisis para los métodos considerados (A: IEC 61000-4-7; B: IEC 61000-4-30; C: CISPR 16-1-1). Tomada de [26].	31
Figura II-5. Bandas de frecuencia previstas para los métodos considerados (A: IEC 61000-4-7; B: IEC 61000-4-30; CISPR 16-1-1). Tomada de [26].	31
Figura II-6. Espectros RMS de la señal de la medición de laboratorio (A: azul; B: rojo; C: amarillo). Tomada de [26].	34
Figura II-7 Espectros RMS de la señal de la medición de campo (A: azul; B: rojo; C: amarillo). Tomada de [26].	34
Figura II-8. Metodología propuesta para el método de submuestreo. Adaptada de [22].	36
Figura II-9. Comparación del método propuesto y la norma IEC 61000-4-30 para la estimación supraarmónica. Tomada de [22].	37
Figura II-10. Comparación entre la estrategia IEC y la estrategia WPD propuesta para el análisis de armónicos y supraarmónicos. Tomada de [27].	38
Figura II-11. Evaluación de supraarmónicos (a) y armónicos (b) de un cargador de EV en la red analizados con el método propuesto y el método IEC (con etapa de filtrado previa y sin filtrado). Tomada de [27].	40
Figura II-12. Evaluación de supraarmónicos (a) y armónicos (b) de un inversor fotovoltaico conectado a la red y analizado con el método propuesto y el método IEC (con etapa de filtrado previa y sin filtrado). Tomada de [27].	41
Figura III-1. Emisión de un grupo de computadoras desde el 2002 al 2009. Tomada de [12].	42
Figura III-2. Televisor moderno: (a) forma de onda y espectro actuales, (b) 0-2 kHz, (c) 2-9 kHz y (d) 9-150 kHz. Tomada de [12].	43
Figura III-3. Frecuencias cubiertas por los estándares de armónicos IEEE e IEC. Tomada de [12].	43
Figura III-4. Límites de emisión de banda ancha según: IEC TS 62578 (○), CISPR 15 (□) y EN 50065 (Δ). Límites de banda estrecha de EN 50160 (línea punteada). Tomada de [19].	45



Figura III-5. Límites de emisión de banda estrecha según: EN 50160 (□) e IEC 61000-3-8 (Δ). Tomada de [19].	45
Figura III-6. Niveles de compatibilidad propuestos (línea continua negra) y límites de inmunidad (línea punteada negra) para señales de banda ancha. Tomada de [16].	47
Figura IV-1. Mitigación de emisiones de SH por filtros activos. Tomada de [2].	49
Figura IV-2. Filtro tipo LCL (izquierda) y filtro tipo CLC (derecha). Tomada de [34].	50
Figura IV-3. Convertidor NPC de tres niveles. Tomada de [35].	51
Figura IV-4. Convertidor de condensador flotante. Tomada de [35].	51
Figura IV-5. Convertidor puente H en cascada. Tomada de [35].	52
Figura IV-6. Espectro de la corriente emitida por un convertidor de dos niveles (arriba) y de cinco niveles (abajo). Nótese las diferencias de escalas. Tomada de [36].	52
Figura IV-7. Espectro de frecuencia de la corriente emitida con: PWM convencional (izquierda), RPPMa (centro), RPPMb (derecha). Tomada de [37].	53
Figura IV-8. Mitigación de emisiones de SH a través de fases integradas. Adaptada de [2].	54



LISTA DE TABLAS

Tabla I-1. Definiciones matemáticas de forma de onda teniendo en cuenta sus componentes espectrales. Adaptada de [10].....	16
Tabla I-2. Límites de distorsión de voltaje. Adaptada de [12].....	17
Tabla I-3. Límites de distorsión de corriente. Adaptada de [12].....	18
Tabla II-1. Posibles modificaciones de la longitud del intervalo de medición para el método A. Adaptada de [26].	29
Tabla II-2. Características de los métodos de medida A, B y C. Adaptada de [32].....	32
Tabla II-3. Número de FLOPs y requisitos de memoria para los diferentes métodos. Adaptada de [26].	35
Tabla II-4. Pros y contras de los tres métodos. Adaptada de [33].	35
Tabla II-5. Análisis comparativo de la complejidad computacional. Adaptada de [22].	37
Tabla II-6. Características del método propuesto WPD. Adaptada de [27].	39



CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Los sistemas eléctricos han ido evolucionando rápidamente durante las últimas décadas, estos cambios han sido impulsados principalmente por el desarrollo de la electrónica de potencia, la revolución digital y la implementación de tecnologías de telecomunicación. Pasando de ser sistemas centralizados con grandes centrales eléctricas basadas en combustibles fósiles o nucleares, a sistemas de generación distribuida, basados en fuentes de energía renovables. Como resultado de esto, se ha conseguido aumentar la eficiencia de los sistemas eléctricos y contribuir en la lucha contra el cambio climático. Por ello cada vez es más común hablar de las redes eléctricas modernas como redes inteligentes o smart grids, por su traducción del inglés [1].

No obstante, aunque las redes inteligentes tienen muchas ventajas, durante estos últimos años se ha detectado algunos inconvenientes que afectan la calidad del suministro eléctrico. Identificar estos fenómenos y problemas de calidad de la energía es de vital importancia para la transición hacia las redes inteligentes.

Los equipos basados en electrónica de potencia generan problemas de calidad de la energía en las redes eléctricas a través de su emisión de armónicos dentro del rango de frecuencia clásico de 0-2 kHz. Además, en los últimos años y a medida que se aumentan las frecuencias de conmutación de los convertidores de potencia con el fin de poder ofrecer equipos más compactos y eficientes, se ha descubierto un nuevo tipo de emisiones dentro del rango de 2-150 kHz, la cual ha sido bautizada como emisión supraarmónica [2].

Algunos ejemplos de equipos que tienen emisiones dentro del rango de 2-150 kHz son: lámparas LED, inversores fotovoltaicos, convertidores de turbinas eólicas, cargadores de vehículos eléctricos, variadores de velocidad, unidades de aire acondicionado, sistemas de comunicación por línea eléctrica (PLC), fuentes de alimentación informática y muchos otros dispositivos basados en circuitos de electrónica de potencia [3, 4]. Aunque durante los últimos años la distorsión supraarmónica se ha convertido en un problema relevante y está llamando la atención de la comunidad científica, todavía falta estandarización internacional, principalmente debido a la falta de un método de medición generalmente aceptado [5]. Por esta razón en el presente trabajo se hace una revisión de la literatura divulgada para determinar los diferentes métodos de medición publicados, los estándares aplicables en este rango de frecuencias y algunas técnicas para la reducción o mitigación de supraarmónicos que diferentes autores han desarrollado, de esta forma dejando una recopilación literaria en el idioma español que sirva como fuente bibliográfica para futuras investigaciones.



2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar los métodos de medición y técnicas de reducción de supraarmónicos en las redes eléctricas.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar los métodos de medición de supraarmónicos en las redes eléctricas.
- Establecer los estándares aplicables en el rango de los supraarmónicos en las redes eléctricas.
- Identificar las técnicas para la reducción de los supraarmónicos en las redes eléctricas.

2.3. ACOTACIONES

Para el presente trabajo se utilizarán las bases de datos disponibles en la Universidad de Pamplona.

3. MARCO DE REFERENCIA

A continuación, se presenta una base teórica para comprender las emisiones de alta frecuencia entre 2-150 kHz conocida como “distorsión supraarmónica”. Se expone una sinopsis de una clasificación general, algunas fuentes de emisión armónicos y los impactos que estos tienen en las redes eléctricas tanto para emisiones por debajo de 2 kHz (armónicos, interarmónicos, subarmónicos) como entre 2-150 kHz (supraarmónicos). Por último, se mencionan los estándares y normas vigentes relacionadas con este tipo de emisiones.

3.1. CALIDAD DE LA ENERGÍA

Durante los últimos años se ha incrementado el interés por la calidad de la energía eléctrica, debido a la creciente aplicación de equipos electrónicos que pueden generar perturbaciones electromagnéticas en las redes eléctricas o pueden ser sensibles a estos fenómenos. La IEC define la calidad de la energía como “las características de la electricidad en un punto determinado de un sistema eléctrico, evaluadas frente a un conjunto de parámetros técnicos de referencia” [6]. Por ello, cualquier desviación significativa de voltaje o corriente de la forma “ideal” se puede considerar como un problema de calidad de la energía. La forma de onda “ideal” es una onda sinusoidal de frecuencia única con amplitud y frecuencia constantes, además las señales de corriente y voltaje deben de estar en fase. La calidad de la energía es la combinación de la calidad del voltaje y la calidad de la corriente. Según

[7], la calidad del voltaje es cómo la red afecta al cliente o la carga, mientras que la calidad de la corriente es cómo el cliente o la carga afectan a la red.

Según la IEC 61000-1-1 [8], la compatibilidad electromagnética es “la habilidad de un dispositivo, pieza de equipo, equipo o sistema para funcionar satisfactoriamente en su ambiente electromagnético sin introducir disturbios electromagnéticos intolerables a cualquier cosa en ese ambiente”. Dentro de la compatibilidad electromagnética existen dos términos importantes: la emisión que es la contaminación electromagnética producida por un dispositivo; la inmunidad que es la habilidad del dispositivo para soportar la contaminación electromagnética. La emisión está relacionada a la calidad de la corriente, mientras que la inmunidad a la calidad del voltaje [9]. Por lo anterior, se puede notar una relación entre la calidad del voltaje y la calidad de la corriente con la definición de compatibilidad electromagnética y, en los estándares internacionales, la calidad de la energía se trata como un subtema en el campo de estudio de la compatibilidad electromagnética.

Las perturbaciones en la calidad de la energía se pueden clasificar en dos grupos, según la forma en que se mide la señal de voltaje o corriente [7]:

- **Variaciones:** son perturbaciones en estado estacionario o cuasi estacionario que pueden ser medidas en diferentes momentos.
- **Eventos:** son perturbaciones repentinas que solo pueden ser medidas en un determinado momento.

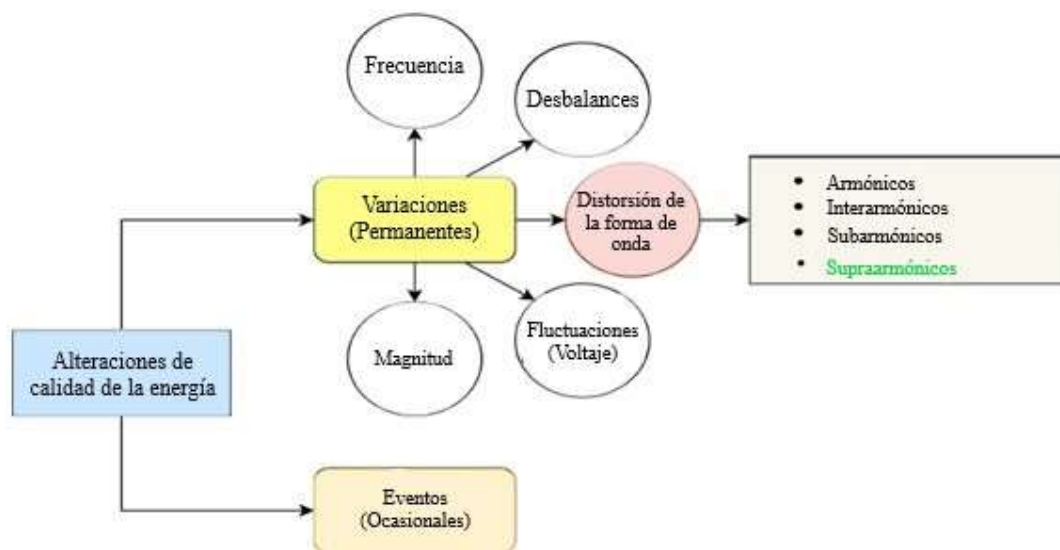


Figura I-1. Clasificación de las perturbaciones de la calidad de la energía. Adaptada de [3].

No obstante, una perturbación en la calidad de la energía solo se considera un problema cuando causa problemas, ya sea para el cliente o para el operador de red. En la Figura I-1 se presenta una clasificación de las perturbaciones de la calidad de la energía.



3.2. EMISIONES POR DEBAJO DE 2 kHz

En gran parte de los estudios solo se considera la distorsión armónica debido a su comportamiento dominante frente a otros tipos de distorsiones de forma de onda. Es por ello, que en gran parte de la literatura solo se considera los armónicos e interarmónicos como las principales fuentes de distorsión de la forma de onda. No obstante, el continuo avance que vienen experimentando los equipos basados en electrónica de potencia y los protocolos de comunicación han transformado las emisiones de armónicas percibidas en la red eléctrica tanto por debajo como por encima de los 2 kHz [3].

3.2.1. Clasificación de distorsiones por debajo de 2 kHz

La distorsión de la forma de onda de una señal se puede dividir en las siguientes componentes [3]:

- **Componente de CD:** también llamada Offset de DC o componente de corriente directa, es una distorsión con frecuencia cero.
- **Armónicos:** componentes espectrales con frecuencias múltiplos enteros de la frecuencia fundamental (50 Hz o 60 Hz).
- **Interarmónicos:** componentes espectrales con frecuencias que no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental.
- **Subarmónicos:** son interarmónicos con frecuencias por debajo de la frecuencia fundamental.

En la Tabla I-1 se resume la clasificación de las distorsiones armónicas por debajo de 2 kHz, junto con una definición matemática.

Tabla I-1. Definiciones matemáticas de forma de onda teniendo en cuenta sus componentes espectrales. Adaptada de [10].

ARMÓNICO	$f = nf_1$, donde n es un entero mayor que 0
COMPONENTE DE C.C.	$f = nf_1$, con $n = 0$
INTERARMÓNICO	$f = nf_1$, donde n es un número no entero mayor que 0
SUBARMÓNICO	$f > 0 \text{ Hz y } f < f_1$
$f_1 = \text{frecuencia fundamental de la tensión}$	

3.2.2. Fuentes de distorsiones por debajo de 2 kHz

La distorsión armónica por debajo de 2 kHz es producida por la presencia de elementos no lineales conectados al sistema eléctrico, bien sea en la red o en las cargas. Fundamentalmente las corrientes armónicas son producidas por cargas residenciales e industriales con características no lineales que, dependiendo del método de operación, estas fuentes producirán armónicos a nivel constante o variable [7, 10]. Algunos de estos dispositivos son:

- Hornos de inducción, hornos de arco.
- Convertidores de potencia o rectificadores
- Aires acondicionados
- Lámparas ahorradoras de energía
- Electrodomésticos (Televisores, Lavadoras, etc)



- Cargadores de baterías

Por otro lado, aunque las emisiones de armónicos de muchos de estos dispositivos se pueden considerar pequeñas de manera individual, al ser equipos de amplio uso en la sociedad actual, se acumulan y de manera global terminan siendo emisiones nada despreciables.

3.2.3. Efectos de los armónicos e interarmónicos

Los principales efectos de la presencia de voltajes y corrientes armónicas son el incremento de las pérdidas y el calentamiento, sin embargo, se han identificado otros efectos [3, 11]:

- En los sistemas de suministro de energía eléctrica, la presencia de armónicos aumenta las pérdidas en las líneas y la aparición de posibles condiciones de resonancia que pueden provocar sobrevoltajes permanentes y transitorios al realizar maniobras de switcheo en el sistema.
- Calentamiento adicional en las cargas y reducción de la vida útil de los aislamientos y aumento del par en motores y generadores, son efectos de la presencia de armónicos de voltaje.
- Sobrecalentamiento en cables y transformadores, ruido en amplificadores de audio y suma de corrientes a través del neutro, son consecuencias de distorsión armónica en la corriente.
- La presencia de armónicos provoca interferencias en los servicios de comunicación y de transmisión de datos.
- Operación inadecuada de dispositivos de protección, fusibles fundidos en capacitores para corrección del factor de potencia debido a voltajes y corrientes altas por resonancia con la línea.

Tabla I-2. Límites de distorsión de voltaje. Adaptada de [12].

VOLTAJE (V) EN EL BUS	ARMÓNICO INDIVIDUAL (%)	THD (%)
$V \leq 1,0 \text{ kV}$	5	8
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3	5
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$161 \text{ kV} < V$	1	1,5

Estos solo son algunos de los efectos que provoca la presencia de distorsión armónica con frecuencias por debajo de los 2 kHz. Esta distorsión normalmente es limitada a un porcentaje bajo, en cuyo caso los equipos eléctricos funcionarán de manera adecuada. En la Tabla I-2, se presentan los límites establecidos por la IEEE Std 519 (2014) para la distorsión armónica total de la onda del voltaje; mientras en la Tabla I-3, se encuentran los límites fijados también por la IEEE Std 519 (2014) para la distorsión armónica de la corriente en sistemas clasificados de 120 V a 69 kV.



Tabla I-3. Límites de distorsión de corriente. Adaptada de [12].

MÁXIMA DISTORSIÓN DE CORRIENTE ARMÓNICA EN UN PORCENTAJE DE I_L

I_{SC}/I_L	ORDEN ARMÓNICO INDIVIDUAL (ARMÓNICOS IMPARES)					TDD
	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	
< 20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20 < 50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50 < 100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100 < 1000	12	5,5	5	2	1	15
> 1000	15	7	6	2,5	1,4	20

3.3. EMISIONES ENTRE 2-150 kHz

La distorsión de corriente y voltaje para frecuencias entre 2-150 kHz, también es conocida como distorsión supraarmónica, se ha convertido recientemente en un tema de interés para la comunidad científica. Esto se debe principalmente a la creciente cantidad de dispositivos basados en electrónica de potencia, al aumento de sus frecuencias de conmutación y al uso de la tecnología Power Line Communication (PLC) en este rango de frecuencia como parte de la infraestructura de medición inteligente. Todo esto ha provocado que las amplitudes de las emisiones dentro del rango de 2-150 kHz no sean tan despreciables y, sumado a esto, actualmente existe una falta de regulación para este tipo de emisiones. Los supraarmónicos también son conocidos como distorsiones de forma de onda de alta frecuencia [2, 3].

3.3.1. Clasificación

Las emisiones supraarmónicas están relacionadas no solo con la frecuencia de conmutación de los dispositivos electrónicos, sino también con varios elementos capacitivos que estos dispositivos no lineales introducen en las redes de baja tensión. Igualmente, en los últimos años estas distorsiones han aumentado en amplitud y ancho de banda. Se considera a los dispositivos electrónicos (cargas no lineales) como las fuentes más comunes de distorsión de corriente y voltaje para frecuencias por encima de 2 kHz. Este tipo de emisiones de alta frecuencia pueden clasificarse de la siguiente manera [3]:

- **Emisiones intencionales y no intencionales:** las emisiones intencionales son aquellas producidas por las señales de PLC en las redes de baja tensión, por otro lado, las emisiones no intencionales son aquellas generadas por cargas no lineales. Algunos protocolos de PLC en las redes de baja tensión actuales utilizan señales de tensión con frecuencias normales entre 9-95 kHz, por lo que también pueden considerarse emisiones supraarmónicas.
- **Emisiones de banda estrecha y banda ancha:** los investigadores han determinado tres tipos de distorsiones supraarmónicas: distorsión de banda estrecha, de banda ancha y de cruce por cero. Las distorsiones de banda estrecha y de banda ancha se clasifican según el ancho de banda de las emisiones en el dominio de la frecuencia, mientras que las distorsiones de cruce

por cero se clasifican según el comportamiento de las señales actuales cerca del cruce por cero en el dominio del tiempo. La Figura I-2 muestra los espectros de la señal de corriente de una bombilla CFL con una potencia nominal inferior a 15 W.

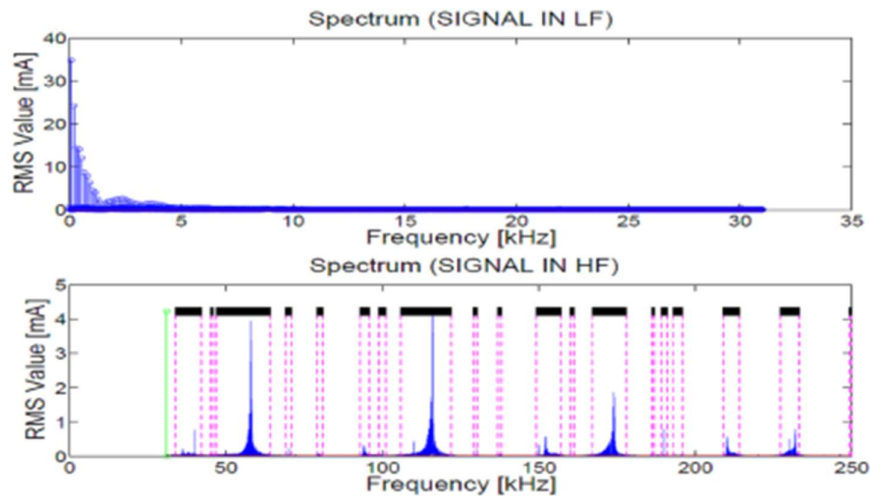


Figura I-2. Emisiones entre 1 Hz-250 kHz de una bombilla CFL de baja potencia. Tomada de [3].

- **Emisiones primarias y secundarias:** la emisión primaria es aquella generada por el dispositivo bajo prueba. Mientras que la emisión secundaria es toda emisión que se genera fuera del dispositivo. El esquema de la Figura I-3 representa un dispositivo conectado en un punto de conexión común (PCC).

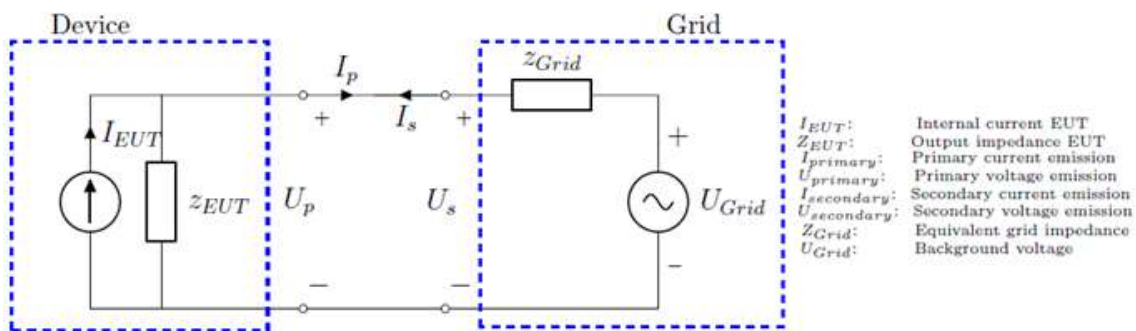


Figura I-3. Modelo Linealizado para Emisiones Primarias y Secundarias. Adaptada de [3].

3.3.2. Fuentes de emisión de supraarmónicos

Según los estudios examinados, las dos fuentes principales de emisiones en el rango de 2 a 150 kHz son los convertidores electrónicos de potencia y los sistemas de comunicación por línea eléctrica (PLC). Los siguientes dispositivos son algunos ejemplos de emisores de supraarmónicos [2, 3]:

- Inversores (inversores fotovoltaicos, variadores de velocidad, etc.)
- Fuentes de alimentación de modo conmutado (lámparas LED, computadoras, etc.)
- Convertidores (Cargadores de vehículos)
- Dispositivos de comunicación mediante línea de potencia (PLC)

3.3.3. Impacto de la distorsión supraarmónica

Diferentes autores a nivel mundial han publicado sus resultados respecto al origen, medición e interacción de la emisión de supraarmónicos. Algunos efectos que este tipo de emisiones tiene en las redes eléctricas y sus dispositivos, que los investigadores han identificado son las siguientes [2, 3, 4]:

- Los supraarmónicos podrían aumentar las corrientes capacitivas, lo que podría dañar las fuentes de alimentación, aumentando los riesgos de seguridad.
- Además, pueden provocar fallas en los dispositivos de protección; reducción de la vida útil de los dispositivos eléctricos; interferencias con las señales de comunicación por línea eléctrica (PLC); sobrecalentamiento de transformadores y banco de condensadores; pérdida de comunicación de los medidores inteligentes; y alteración de dispositivos domésticos, equipos de fabricación de semiconductores, dispositivos médicos y sistemas de seguridad, incluso controles de transporte, entre otros.

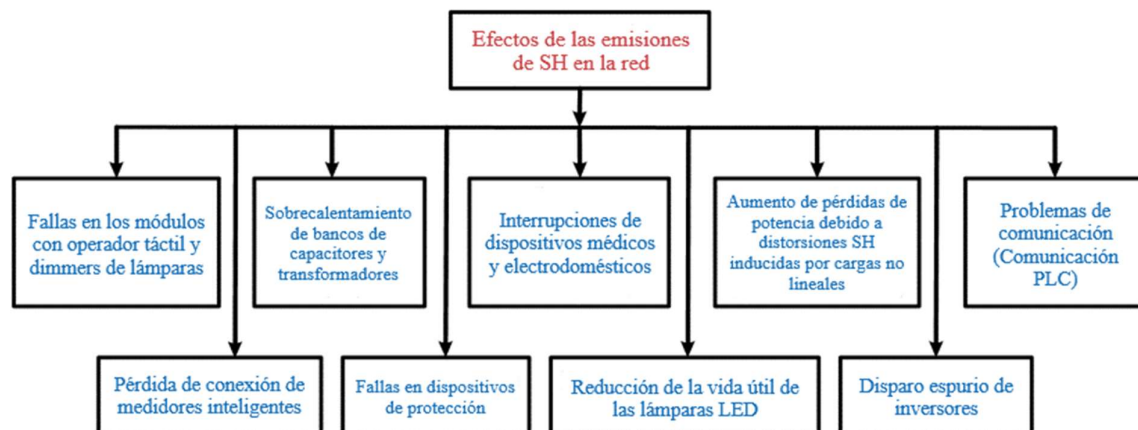


Figura I-4. Efectos de las emisiones de supraarmónicos en la red. Adaptada de [2].

La Figura I-4 resume los efectos que la emisión supraarmónica puede provocar en las redes eléctricas. Además de los efectos mencionados anteriormente, cabe mencionar que la presencia de este tipo de distorsión inducida por cargas no lineales aumentará las pérdidas de energía, lo que tendrá un efecto nocivo en los sistemas de distribución y en las empresas eléctricas. El comportamiento detallado de estas emisiones en las redes reales aún es tema de estudio. Si bien algunos estándares internacionales abordan las emisiones por debajo de 2 kHz, todavía está en desarrollo un consenso internacionalmente aceptado sobre los límites de emisión, los límites de inmunidad y los niveles de compatibilidad para el rango de frecuencia de 2-150 kHz [2, 3].



3.4. ESTÁNDARES PARA SUPRAARMÓNICOS

La investigación sobre las emisiones de supraarmónicos son sumamente importantes para el desarrollo de estándares que definan los niveles de emisión, inmunidad y compatibilidad electromagnética en las redes de baja tensión. Por ello, determinar el origen, amplitud, interacción, medición y eventual mitigación de las emisiones en este rango de frecuencia es un tema de gran interés para los diferentes campos de la ingeniería eléctrica [3].

El rango entre de 2-150 kHz, también llamado rango supraarmónico actualmente no cuenta con un marco regulatorio. Sin embargo, esta afirmación no es del todo cierta, ya que algunos estándares están abordando este rango de frecuencia. En el Anexo A de la norma IEC 61000-4-19 se facilita una revisión de los límites en estos pocos estándares. Aun así, no existen tantos estándares que cubran este rango de frecuencias como si los hay para los armónicos de bajo orden. Sin embargo, puede que en algunos estándares nacionales o militares se cubra este rango de frecuencias, se necesita de una mayor investigación para comprobar esto. Es necesario señalar que mientras en los estándares que cubren el rango de alta frecuencia solo se describe la medición de emisiones bajo condiciones controladas en laboratorio, para los armónicos de bajo orden, existen estándares que especifican los límites armónicos en las cercanías de la red [2].

3.5. ARTÍCULOS DESTACADOS

Para el presente trabajo se realizó una amplia búsqueda bibliográfica en algunas bases de datos como IEEE Xplore [13], Scopus [14], ScienceDirect [15]. A continuación, se presentará de manera breve una reseña del estado actual del conocimiento respecto a la distorsión supraarmónica, enunciando de manera cronológica los avances y publicaciones más relevantes sobre este tema. Con esto ya establecido, en la presente sección solo se mencionarán los artículos de investigación disponibles en la base de datos Scopus, se tendrá en cuenta el indicador FWCI para determinar la relevancia de los artículos, al mismo tiempo, se mencionarán aquellos que tengan relación con los objetivos propuestos del presente trabajo.

En el año 2014 un grupo de investigadores realizó una comparación entre algunas de las características de los armónicos y supraarmónicos (SH), allí se hace un paralelismo entre la disminución de la distorsión armónica y el aumento que vienen experimentando las emisiones en el rango de 2-150 kHz. Además, se hace una propuesta para establecer límites en este rango de frecuencia. Esta propuesta está fundamentada en los estándares existentes disponibles en ese tiempo y se sugiere que esta propuesta sea tomada en cuenta como tema de discusión en los comités internacionales. Por último, los autores invitan a continuar con todo tipo de investigación relacionada con las emisiones de alta frecuencia, ya que esta es necesaria para alcanzar un marco regulatorio que establezca los límites para este rango de frecuencias [16].



Para el 2016 se publica “Power quality issues in the electric power system of the future” [17], en este artículo se presenta un análisis de los cambios que han experimentado las redes eléctricas con la llegada de nuevos dispositivos basados en electrónica de potencia, los impactos que estos pueden tener en las emisiones, la inmunidad y la transferencia de perturbaciones. Advierten de la llegada de nuevos tipos de perturbaciones y el aumento de la distorsión entre 2-150 kHz. Analizan el cambio de los tipos de luminarias en el Reino Unido, las cuales aproximadamente desde el año 2010 han pasado de ser en su gran mayoría bombillas incandescentes a repartirse entre bombillas LED y CFL. Dedicar una sección a estudiar el aumento de dispositivos electrónicos conectados a la red durante las últimas décadas, afirman que la emisión de armónicos de bajo orden tiene tendencia a disminuir gracias a la integración de estos dispositivos electrónicos. Con base a lo anterior, deducen que la emisión en este rango de frecuencias aumentará en el futuro en los sistemas eléctricos, debido a la relevancia de este tema, los autores presentan una breve revisión del conocimiento existente sobre emisión, inmunidad y propagación de supraarmónicos.

También en el 2016 se publica el artículo [18], en él se analiza la influencia que puede tener la implementación de la energía distribuida en las comunicaciones de línea eléctrica (PLC), ya que estas pueden generar señales de interferencia y emisiones de alta frecuencia (supraarmónicos), estas emisiones pueden provocar una pérdida de datos de medición y control. Para ello los autores describen y analizan la influencia de varios recursos energéticos en los PLC realizando varias mediciones de prueba en una microred real. Los resultados revelan que la frecuencia de conmutación de los inversores y la presencia de cargadores de baterías son fuentes significativas de perturbación en las redes de distribución de baja tensión. En este sentido, los investigadores creen que estos resultados puedan contribuir en los esfuerzos hacia la estandarización y posterior regulación de las emisiones en este rango de frecuencias.

“A literature survey on power quality disturbances in the frequency range of 2-150 kHz” [19] realiza un estudio de literatura actualizado sobre las perturbaciones para el rango de frecuencia de 2-150 kHz, publicado para el año 2017. En él, se mencionan métodos de clasificación, estandarización, interacción entre equipos, propagación y mitigación. En este estudio se indica que gran parte de las investigaciones realizadas en este campo han sido empíricas o utilizando métodos simples, sugieren que se deben desarrollar modelos analíticos/físicos para equipos y redes de bajo voltaje con suficiente detalle, para aumentar la comprensión del impacto de los SH en los equipos y activos del usuario final en la red de distribución. Este artículo resulta especialmente relevante por su aporte en cuanto al estado de la estandarización para el rango supraarmónico, tomando un enfoque desde los límites de emisión, compatibilidad e inmunidad, mencionando las normas que podrían aplicarse para este rango de frecuencia. Además, recalca la importancia de continuar e incluso aumentar los esfuerzos en investigación para este rango de frecuencias de 2-150 kHz, ya que se espera que este tipo de emisiones continúe en aumento debido al creciente número de dispositivos emisores de alta frecuencia.



A fin de cumplir con los requisitos de calidad de la energía, los cuales pueden verse afectados por la integración de la generación distribuida, vehículos eléctricos y unidades de carga, se hace necesario implementar comunicaciones que permitan monitorear y controlar las redes de baja tensión casi en tiempo real. Los sistemas de Comunicación por Línea Eléctrica están ganando aceptación para cumplir con este objetivo. Sin embargo, las líneas eléctricas representan un duro medio de comunicación ya que puede tener problemas de ruido, que puede ser provocado por la generación distribuida, vehículos eléctricos y unidades de carga. Es por esto por lo que en [20] los autores proporcionan una descripción de los tipos de ruido que afectan los PLC de banda estrecha, incluyendo ruidos normativos, ruidos provenientes de dispositivos electrónicos comunes medidos en redes reales y los ruidos provenientes de inversores fotovoltaicos y puntos de carga de vehículos eléctricos medidos en un ambiente controlado. También proporcionan algunas técnicas para mitigar los efectos del ruido, brindando especial atención al filtrado pasivo. Por último, realizan pruebas para evaluar el impacto de algunos ruidos en el rendimiento de la red de comunicaciones por línea eléctrica de banda estrecha, así como también la efectividad de diferentes configuraciones de filtros pasivos para mitigar el impacto del ruido. Este estudio puede servir como un marco de referencia para mejorar las comunicaciones PLC.

Recién para el año 2019 se hacen las primeras propuestas de nuevos métodos para la medición de la distorsión de alta frecuencia. Un nuevo método de medición es propuesto en [21]. En este artículo se propone un algoritmo de medición de alta resolución para supraarmónicos, este algoritmo está basado en un modelo de Detección de Compresión (CS) de Múltiples Vectores de Medición (MMVs) y un algoritmo de recuperación de Búsqueda de Coincidencia Ortogonal (OMP). Este método funciona con una resolución de frecuencia de 200 Hz y una amplitud de muestreo de 0,5 ms. Con base en los resultados de simulación y la verificación de los datos medidos obtenidos muestran que este nuevo algoritmo puede mejorar la resolución de frecuencia sin necesidad de aumentar el tiempo de observación, además, puede disminuir el tiempo de cálculo en 100 veces en comparación con la detección de compresión de un solo vector, también permite calcular la amplitud y fase de las componentes con gran precisión. Por lo tanto, este algoritmo puede resultar útil para un estudio futuro sobre las formas de propagación, el mecanismo de interacción, el límite de emisión y la mitigación de este tipo de emisiones. Sin embargo, los autores señalan que se debe mejorar la resolución de frecuencia y aumentar las velocidades para poder realizar mediciones en tiempo real de supraarmónicos. Con esto en mente, sugieren el desarrollo de un nuevo algoritmo con mayor resolución de frecuencia, mayor velocidad de computación y capaz de analizar más tipos diferentes de equipos electrónicos que generan emisiones en el rango de frecuencias de 2-150 kHz.

Otra estrategia con frecuencia de muestreo reducida y mejor resolución de frecuencia es propuesta en [22], la cual está basada en un banco de filtros analógicos y un muestreo compresivo. El uso del banco de filtros permite reducir el número de muestras procesadas por la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Además, los investigadores proponen un procedimiento para mejorar la resolución de frecuencia del método, utilizando la técnica de sensado compresivo (CS). Los resultados demostraron



que con esta metodología se puede utilizar tasas de muestreo bajas y lograr una buena estimación en frecuencia debido a la mejora de la resolución. Esto resulta interesante ya que esta técnica permitiría utilizar la mayoría de los medidores de calidad de la energía actuales, los cuales cuentan en su gran mayoría con frecuencias de muestreo relativamente bajas.

Las lámparas LED han sido identificadas como generadoras de emisiones supraarmónicas y a su vez se ha descubierto que se ven afectadas por este tipo de distorsión. Por ello durante el mismo año en [23] se analizó el impacto de los SH en la intensidad de la luz de las lámparas LED, realizaron pruebas de inmunidad para determinar la posible degradación del rendimiento de la luz en este tipo de lámparas. Se expusieron las lámparas a perfiles de prueba SH basados en la norma IEC 61000-4-19. Lograron determinar que el impacto de los SH en la intensidad de la luz aparece alrededor del comienzo y final del periodo de conducción, estos resultados revelaron que los voltajes SH podrían causar desviaciones en la profundidad de modulación y la intensidad de luz promedio. Esto demuestra la importancia de estudiar y discutir más a fondo la inmunidad de las lámparas LED frente a los SH.

Diversos autores han demostrado los efectos que tiene la inclusión de las tecnologías de las energías renovables a las redes eléctricas y la implementación de las redes inteligentes a la calidad de la energía. Por lo tanto, en [24] se presenta un estudio en el que se comparan los problemas, soluciones y estándares de calidad de la energía que tienen que ver con la implementación de las microredes. Se comparan los principales problemas relacionados con la caída de tensión, el aumento de la tensión, armónicos de voltaje y corriente, los desequilibrios del sistema y las fluctuaciones para garantizar una entrega de potencia de alta calidad por parte de las redes inteligentes. Igualmente se dedica una sección para las emisiones de supraarmónicos, analizando sus características, causas, consecuencias y formas de medición. Además, se realiza una comparativa entre los dispositivos más populares que se utilizan para mitigar problemas de calidad de la energía en una microgrid. Por último, presentan algunas sugerencias y recomendaciones para mejorar la calidad de la energía en este tipo de redes, incluyendo los SH. Por todo lo anterior, resulta evidente que este estudio puede ayudar de gran manera en los esfuerzos hacia la mitigación y el desarrollo de nuevos estándares de calidad de la energía en microredes, por lo que se puede catalogar como una revisión muy completa.

Hasta el momento, no se habían realizado muchos estudios comparativos entre los métodos de medición de supraarmónicos. Sin embargo, en el año 2020 se publica [25], en él se realiza un análisis en profundidad de las metodologías propuestas por los estándares IEC 61000-4-7 e IEC 61000-4-30 para el rango de frecuencias de 2-150 kHz. En este artículo se describen las medidas estandarizadas existentes para este rango de frecuencias y se comparan las diferentes formas para realizar las medidas por estas normas. Además, realizan un análisis comparativo de los métodos de medida estandarizados en el que se considera tanto la eficiencia como la complejidad computacional. Para realizar estas comparaciones consideraron señales reales, señal en tiempo real, señal sintética variable en el tiempo y la influencia del ruido a las mediciones. Con ello, se demostró que el método descrito en la norma



IEC 61000-4-30 es más susceptible al ruido y es el menos complejo (de acuerdo con el número de operaciones requeridas por el método) en comparación con el método de la IEC 61000-4-7, pero pierde precisión en la estimación de algunas componentes de alta frecuencia.

Siguiendo con la línea de los estudios comparativos, en [26] también se realiza un estudio comparativo entre los métodos de medición sugeridos en las normas IEC 61000-4-7 e IEC 61000-4-30, pero agregan el método descrito en la norma CISPR 16-1-1, hacen una evaluación crítica entre estos tres métodos y algunas de sus posibles variantes para determinar su idoneidad para mediciones de perturbaciones en aplicaciones de red. Utilizan señales sintéticas y mediciones reales de laboratorio y campo para realizar esta comparativa. Además, presenta los beneficios e inconvenientes de cada método. Este trabajo resulta importante porque agrega a la comparación no solo el método descrito por la norma CISPR 16-1-1, sino que además presenta algunas variantes que se pueden hacer de estos tres métodos. Los resultados y recomendaciones de este artículo pueden resultar ser una buena fuente de información para los comités internacionales para definir un método normativo para la medición de niveles de perturbación supraarmónica.

En [27] se presenta un nuevo método para la medición en simultaneo de la distorsión armónica y la distorsión supraarmónica, con una robustez mejorada frente a las variaciones de amplitud y frecuencia. El algoritmo propuesto está basado en el análisis wavelet y utiliza un intervalo de medición de 10 ciclos, cumpliendo con los requisitos para la medición de emisiones dentro del rango armónico y en el rango de 2-150 kHz, establecidos en el estándar IEC 61000-4-7. Los resultados obtenidos demuestran que el método sugerido por la IEC 61000-4-7 produce resultados afectados por el valor de la frecuencia y amplitud de potencia, mientras que el método propuesto resulta no verse afectado por estas variaciones. Gracias a esto, la etapa previa de filtrado de paso alto resulta ser innecesaria para este método. Este método tiene la ventaja de utilizar el mismo intervalo de medición para calcular armónicos y supraarmónicos, lo que reduce la complejidad de manejo de datos.

Un paso para avanzar en los esfuerzos de establecer límites de emisión para el rango de frecuencias de 2-150 kHz poder evaluar cuánta distorsión puede inyectar a la red el uso masivo de dispositivos electrónicos de potencia, una solución a este problema es predecir la emisión de alta frecuencia de una instalación de baja tensión en conjunto, para ello se requiere el desarrollo de modelos adecuados. De acuerdo con lo anterior en [28] se presenta una comparación de diferentes modelos para la suma de supraarmónicos. Los resultados muestran que, al utilizar el modelo propuesto, se puede realizar predicciones de la propagación este tipo de emisiones en las redes eléctricas. También demostraron de manera experimental que, al aumentar el número de dispositivos generadores de emisiones en este rango de frecuencias, la distorsión de corriente supraarmónica inyectada a la red por una instalación aumenta hasta un valor máximo, luego disminuirá debido a la naturaleza capacitiva de los aparatos de electrónica de potencia existentes en las redes de baja tensión.



En el año 2021 fue publicado el último estudio comparativo entre métodos de medición de supraarmónicos a la fecha, disponible en la base de Datos Scopus. A diferencia de otras comparaciones en [5] se comparan los 2 métodos descritos en los estándares internacionales IEC y CISPR, así como los nuevos métodos presentados en la literatura hasta la fecha. Para el análisis se utilizaron señales de prueba sintéticas avanzadas y complejas, así como mediciones reales las cuales permiten una comparación precisa del rendimiento de los métodos. Utilizan indicadores diseñados específicamente para caracterizar la precisión de los métodos, de esta forma pueden identificar las fortalezas y debilidades de cada método. Los resultados obtenidos en este artículo contribuirán en el trabajo de estandarización que se está llevando a cabo actualmente por parte del IEC SC77A/WG9 para definir un método normativo adecuado para evaluar los niveles de perturbación en la red en el rango de 2-150 kHz.

Una nueva recopilación del conocimiento disponible hasta la fecha es presentada en [2]. Este trabajo realiza una revisión extensiva de las técnicas y estándares relacionados para identificar, medir y mitigar las emisiones de supraarmónicos. Se destacan y analizan en consecuencia las características de los SH junto con los conocimientos disponibles sobre la mitigación y medición. Sugieren algunas recomendaciones para mitigar las emisiones de SH. Este trabajo proporciona una base con respecto al conocimiento disponible sobre SH, la cual puede ser de gran ayuda para futuras mitigaciones, estándares y mejoras en las técnicas de medición.



CAPÍTULO II. MÉTODOS DE MEDICIÓN DE SUPRAARMÓNICOS

En esta sección, se mencionan tres métodos de medición de supraarmónicos y algunas de sus variantes. Aunque actualmente no exista una técnica normalizada para la medición de los niveles de perturbación en la red, si existe algunos métodos propuestos, dentro de los que tenemos los anexos informativos de las normas IEC 61000-4-7 [29] e IEC 61000-4-30 [6], que por su carácter informativo no se consideran como obligatorios para el cumplimiento de los respectivos estándares. Además, está el estándar CISPR 16-1-1 [30], allí se especifica las características de un receptor de medición para las emisiones del dispositivo en condiciones de laboratorio y evaluar el cumplimiento de los límites del equipo, mas no un método para la evaluación de las emisiones en redes eléctricas. De estos métodos se han desarrollado modificaciones con el fin de obtener mejores resultados o simplificar los cálculos.

Con el creciente uso de dispositivos electrónicos, los cuales son fuentes de distorsiones en el rango de 2-150 kHz, se hace urgente encontrar una técnica de medición que sea comparable y reproducible bajo cualquier escenario. De esta forma se podrán medir con precisión las emisiones de supraarmónicos y de este modo poder investigar la propiedad de propagación, el mecanismo de interacción, los límites de emisión y la mitigación para este tipo de emisiones.

1. IEC 61000-4-7 (MÉTODO A)

El apéndice B de la norma IEC 61000-4-7 propone un método de medición de emisiones en el rango de frecuencias de 2-9 kHz [29] utilizando la transformada discreta de Fourier (DFT). A pesar de que esta norma no cubre todo el espectro de los supraarmónicos, algunos investigadores han propuesto la ampliación de la metodología a toda la banda. Aunque esta norma está destinada a medir las emisiones de los equipos, también es utilizada para medir los niveles de perturbación en la red.

Este método propone agrupar la energía de la señal analizada en bandas de frecuencia predefinida. Según el CISPR 16-1, el agrupamiento de para estas emisiones se debe hacer con un ancho de banda de 200 Hz. El muestreo de la señal se debe realizar en un intervalo de medición de 200 ms, el cual será igual al intervalo de análisis y equivale a 10/12 ciclos de la señal fundamental dependiendo de la frecuencia nominal del sistema (50/60 Hz). Posteriormente se debe convertir al dominio de la frecuencia mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT) [5, 26, 31, 25].

La salida C_b de cada banda es el valor r.m.s. según (1) [25].

$$C_b = \sqrt{\sum_{f=b-95\text{Hz}}^{b+100\text{Hz}} C_f^2} \quad (1)$$

Donde, C_f será el valor r.m.s. a la frecuencia f , por ejemplo C_{5100} es el valor eficaz de la componente a 5100 Hz. La separación entre dos componentes seguidas C_f debe ser de 5 Hz. La frecuencia central es representada por b . La salida de la FFT se agrupará en bandas de 200 Hz. Como resultado de esto, b tomará valores como 2100 Hz, 2300 Hz, 2500 Hz, y así sucesivamente. Por lo tanto, la frecuencia central más alta será 8900 Hz. Esta norma también recomienda el uso de un filtro pasa banda que atenúe la frecuencia fundamental y las componentes por encima de 9 kHz con una atenuación de la componente fundamental de al menos 55 dB.

Para determinar la frecuencia de muestreo la norma sugiere utilizar el principio de Nyquist, por lo que, para medir componentes de hasta 9 kHz la frecuencia de muestreo deberá ser mayor o igual a 18 kHz. Sin embargo, según la norma IEC 61000-4-7 para realizar una adecuada transformación de los datos mediante la FFT se recomienda que la frecuencia mínima de muestreo sea igual a 20,48 kHz. Considerando una resolución de frecuencia de 5 Hz, como lo sugiere la norma, se puede calcular una única FFT de 4096000 muestras. Estos componentes de la FFT de 5 Hz de resolución se agruparán en bandas de 200 Hz [25]. La Figura II-1 muestra la metodología propuesta por la norma en cuestión.

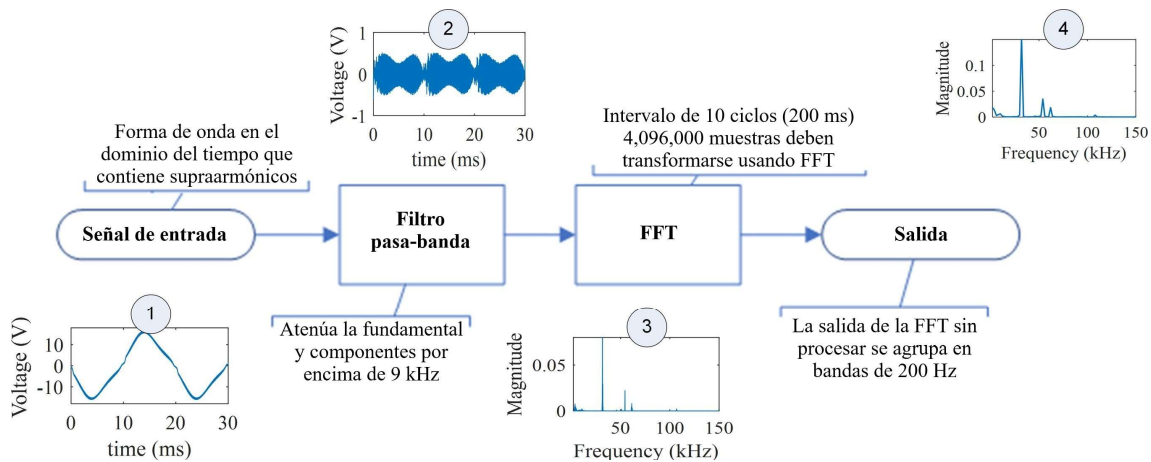


Figura II-1. Método de medición de supraarmónicos según la norma IEC 61000-4-7. Adaptada de [25].



De ser necesario se pueden acortar los intervalos de medición según se muestra en la Tabla II-1, lo que podría reducir de manera significativa la complejidad computacional y los requisitos de memoria utilizados por este método. A fin de cubrir por completo el intervalo de análisis de 200 ms, se requerirán varios intervalos de medición más cortos, que deben agregarse en el tiempo para obtener un valor de medición al final del intervalo de análisis. Algunas investigaciones han demostrado que acortar los intervalos de medición puede mejorar la detección de los valores mínimos y máximos. Sin embargo, estos resultados dependerán del punto de inicio del intervalo de medición dentro del ciclo de potencia, lo que hace que el método sea difícil de reproducir. Para cada intervalo de análisis se deben calcular los valores mínimo, máximo y RMS de cada medición [26].

Tabla II-1. Posibles modificaciones de la longitud del intervalo de medición para el método A. Adaptada de [26].

INTERVALO DE MEDIDA (MS)	RESOLUCIÓN DE FRECUENCIA (HZ)	NÚMERO DE COMPONENTES ESPECTRALES A AGRUPAR	NÚMERO DE INTERVALOS DE MEDICIÓN A AGREGAR
100	10	20	2
50	20	10	4
20	50	4	10
5	200	-	40

2. IEC 61000-4-30 (MÉTODO B)

En la tercera edición de la norma IEC 61000-4-30 [6] sugiere un método para la medición de las emisiones en el rango de frecuencia de 9-150 kHz. El anexo C establece este método, el cual describe la medición de la distorsión para los rangos de frecuencia de 2-9 kHz y 9-150 kHz, allí se recomienda utilizar el método descrito en la norma IEC 61000-4-7 para las frecuencias de 2-9 kHz. Por otro lado, para las frecuencias de 9-150 kHz, sugiere que la señal sea muestreada con una frecuencia de 1024 kHz, la cual deberá filtrada por un filtro de paso alto en cascada con un filtro de paso bajo. El filtro de paso alto se utiliza para atenuar la fundamental y los armónicos de bajo orden de la señal de entrada, debe tener 2 polos con 3 dB de atenuación a 1,5 kHz o más. Mientras que el filtro de paso bajo es un filtro de cuarto orden con 3 dB de atenuación y una frecuencia de corte a 200 kHz [5, 31, 26, 25].

El intervalo de análisis debe ser de 200 ms o 10/12 ciclos para redes de 50/60 Hz, respectivamente. Después de la etapa de filtrado el intervalo de análisis se divide en 32 intervalos de medición (igualmente espaciados), como se observa en la Figura II-2. Por cada intervalo de medición se debe tomar 512 muestras, las cuales deberán ser procesada mediante una transformada rápida de Fourier (FFT) o equivalente. Cada intervalo de medición tendrá una duración de 0.5 ms, obteniendo de esta manera una resolución de frecuencia de 2 kHz [5, 31, 26, 25].

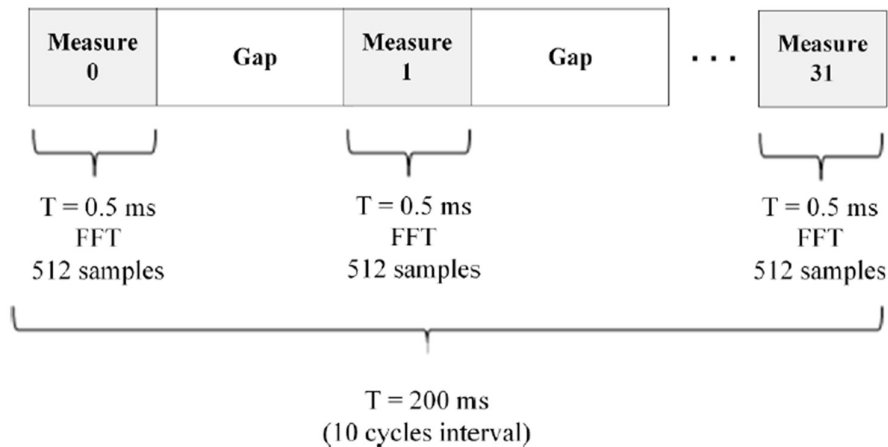


Figura II-2. Metodología de medición propuesta por el estándar IEC 61000-4-30 Ed3. Tomada de [25].

Se deben descartar los 4 bins más bajos, que representan el rango de frecuencias por debajo de 8 kHz, ya que como se dijo anteriormente, se recomienda analizar el rango de frecuencias de 2-9 kHz según la norma IEC 61000-4-7. De igual manera, los 181 bins superiores representan frecuencias superiores a 150 kHz y por ello también deberán ser descartados. Las magnitudes de los 71 bins restantes contienen las emisiones de 8 kHz a 150 kHz que deben ser analizados. Se deberá calcular los valores mínimo, medio y máximo de las 32 magnitudes RMS de cada uno de estos 71 bins. Además, se debe calcular un único valor RMS de los 71 bins [5, 31, 26, 25]. En la Figura II-3 se ilustra todos los pasos de la metodología propuesta en el estándar IEC 61000-4-30.

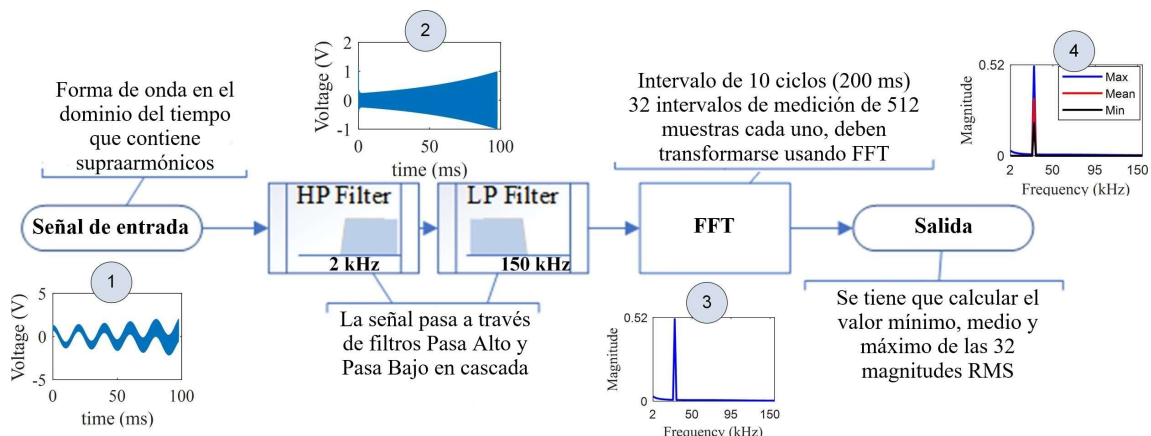


Figura II-3. Paso a paso del método sugerido por la norma IEC 61000-4-30. Adaptada de [25].

Este método presenta algunos inconvenientes. Al ser más cortos los intervalos de medición, se reduce el coste computacional, no obstante, esto puede ocasionar que se pierdan algunas características de las emisiones, debido a que este método solo cubre el 8% del intervalo de análisis (Figura II-4, método

B). En consecuencia, se generan vacíos temporales los cuales provocan que los resultados obtenidos difieran considerablemente, de ahí que el método sea difícilmente reproducible. Otro problema que presenta este método es la baja resolución de frecuencia de 2 kHz, que no corresponde a los requisitos de la norma CISPR-16-1-1 de una resolución de 200 Hz para el rango de frecuencias de 9-150 kHz. Asimismo, como este método tiene un paso de frecuencia de 2 kHz, sus resultados no pueden ser comparados directamente con los otros métodos con pasos de frecuencia de 200 Hz [5, 26].

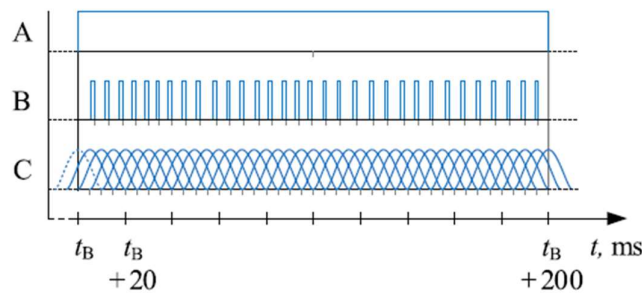


Figura II-4. Intervalos de medición y análisis para los métodos considerados (A: IEC 61000-4-7; B: IEC 61000-4-30; C: CISPR 16-1-1). Tomada de [26].

3. CISPR 16 (MÉTODO C)

Esta norma especifica las características de un receptor de medición y no un método para la evaluación de las emisiones en las redes de energía. El método está basado en el principio de un analizador de espectro heterodino, cuya salida es procesada con un detector de cuasi-picos que proporciona un valor de pico ponderado de la envolvente de la señal como resultado final de la medición. Inicialmente este método solo permitía medir una frecuencia a la vez, lo cual es de poca importancia para la medición de las emisiones de los equipos, pero es un problema importante para la evaluación del cumplimiento de la red. Sin embargo, desde 2010 la norma permite implementaciones digitales basadas en la DFT, lo que permite la medición paralela en múltiples frecuencias [26].

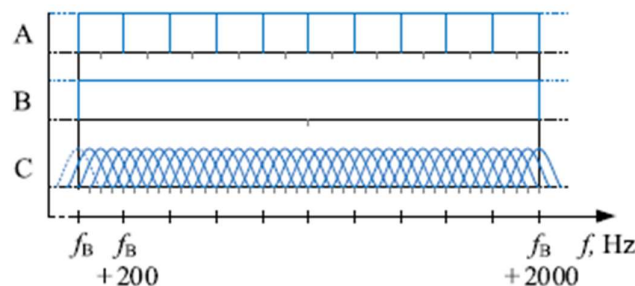


Figura II-5. Bandas de frecuencia previstas para los métodos considerados (A: IEC 61000-4-7; B: IEC 61000-4-30; CISPR 16-1-1). Tomada de [26].



Esta norma exige una resolución de frecuencia de 100 Hz o mayor y un solapamiento en el tiempo del 75% o superior (Figura II-4 y Figura II-5, método C). Este solapamiento hace que el cálculo de los valores integrales sea más complicado, de manera comparable a los del THD para los armónicos. Estos valores integrales son útiles para la evaluación de las perturbaciones de la red, pero según la norma CISPR 16 no son relevantes para la evaluación de las emisiones. Actualmente se encuentra en debate la idoneidad del detector de cuasi-picos para el rango de frecuencias de 2-150 kHz [5, 26].

En [32] proponen una implementación digital que cumple con los requisitos de la norma CISPR. El método toma una DFT de ventanas superpuestas de 20 ms con forma de Lanczos atenuada a 6 dB con un ancho de banda de 200 Hz. Los espectros resultantes consisten en bins de frecuencia espaciados 50 Hz. La serie temporal resultante de amplitudes para cada intervalo de frecuencia tiene un paso de tiempo de 0,5 ms y pueden ser agregados o postprocesados por CISPR 16 [5].

Tabla II-2. Características de los métodos de medida A, B y C. Adaptada de [32].

MÉTODO DE MEDIDA	A	B	C
ESTÁNDAR IMPLEMENTADO	IEC 61000-4-7	IEC 61000-4-30	CISPR 16 basada en FFT [32]
SIN ESPACIOS	Si	No	Si
TASA DE MUESTREO	327,68 kHz (655,36 kHz)	1024 kHz	409,6 kHz
DISEÑO DE LA VENTANA	Rectangular	Rectangular	$\sin(x)/x$ con 10 ms de ancho del lóbulo principal
LONGITUD DE LA FFT	200 ms	0,5 ms	20 ms (40 ms)
SUPERPOSICIÓN DE LA FFT	0 %	-	77 % (88,75 %)
ANCHO DE BIN	5 Hz por bin, en grupos de 200 Hz	2 kHz	50 Hz (25 Hz), solo se usan múltiplos de 100 Hz
NÚMERO DE FFT	Una cada 200 ms	32 cada 200 ms	Una cada 4,5 ms
DETECTORES DISPONIBLES	RMS, Pico	RMS, Pico	Cuasi-Pico, RMS, Pico

4. COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS A, B Y C

A la fecha se han realizado numerosos estudios comparativos con el fin de determinar las ventajas y desventajas de cada método. En [26], se realiza una amplia comparativa entre los tres métodos enunciados hasta el momento (IEC 61000-4-7, IEC 61000-4-30 y CISPR 16) y algunas de sus variantes.



Para ello, generaron señales sintéticas variables tanto en magnitud como en frecuencia para medir el espectro detectado por cada método. Además de las señales sintéticas, utilizaron dos señales reales medidas, las cuales representan un comportamiento de emisión realista, pero se desconoce el contenido de emisión “verdadero” de estas señales, por lo tanto, no se cuenta con un valor de referencia. Igualmente se debe tener en cuenta la influencia del ruido de la medición y las desviaciones de frecuencia de la red en los resultados. Los siguientes son los tipos de señales sintéticas utilizadas en [26]:

- **Constante en magnitud y en frecuencia:** este tipo de emisión rara vez se encuentra, pero se incluye para la exhaustividad del estudio.
- **Constante en frecuencia con variación en la magnitud:** típica de los convertidores con tecnología de modulación de ancho de pulso (PWM).
- **Constante en magnitud con variación de la frecuencia:** emisiones típicas de los dispositivos con corrección del factor de potencia activa (PFC).
- **Variable en magnitud y en frecuencia:** esta emisión se observa para las topologías de circuitos que utilizan PFC con un convertidor elevador (por ejemplo, lámparas LED).

Para el presente trabajo solo se mencionarán brevemente los resultados obtenidos con las señales reales medidas en laboratorio y en campo. La medición de laboratorio la realizaron con una fuente de voltaje sinusoidal casi perfecta y un vehículo eléctrico (EV) conectado con su cargador, la frecuencia de conmutación del cargador del EV se encuentra alrededor de 27 kHz y su segundo armónico en 54 kHz. Por otro lado, la medición de campo se realizó en la terminal de un cliente con una instalación fotovoltaica (PV), además, se utiliza un sistema de comunicación PLC en la red para tomar las lecturas de los contadores, la frecuencia de conmutación del inversor fotovoltaico sucede a una frecuencia alrededor de 20 kHz y la emisión PLC se encuentra en el rango de 35-90 kHz. Debido a la falta de valores de referencia, se utiliza el método CISPR 16-1-1 (con el detector cuasi-pico) como referencia para evaluar los resultados [26].

4.1. MEDICIONES DE LABORATORIO

La Figura II-6 presenta los espectros RMS de las mediciones de laboratorio utilizando los tres métodos. Según el análisis preliminar de las frecuencias de conmutación de los dispositivos se identificó la emisión en las frecuencias de 27, 54 y 108 kHz. Es evidente como con el método B no se pueden identificar ciertas componentes individuales (por ejemplo, a 81 kHz) las cuales, si pueden ser identificadas con los métodos A y C, esto es provocado por un mayor nivel de fugas y de ruido. Mientras que las fugas se deben a los intervalos de medición tan cortos, el ruido se debe a la menor resolución de frecuencia [26].

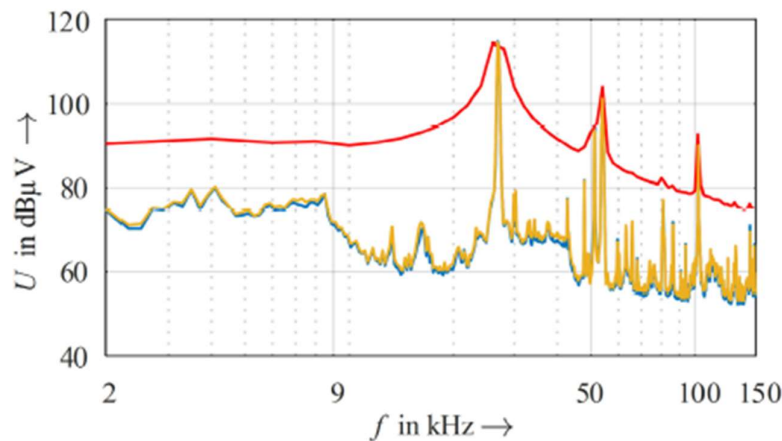


Figura II-6. Espectros RMS de la señal de la medición de laboratorio (A: azul; B: rojo; C: amarillo). Tomada de [26].

4.2. MEDICIONES DE CAMPO

Los resultados de la medición de campo de los espectros RMS medidos para los tres métodos se presentan en la Figura II-7. En el análisis preliminar se determinó la emisión a una frecuencia de 20 kHz y en el rango de 35-90 kHz. Al igual que con la medición de laboratorio, el método A muestra resultados muy similares a los obtenidos con el método C en los valores RMS de la emisión de banda estrecha a 20 kHz, por el contrario, para la emisión corta y diferenciada causada por el PLC se obtienen valores inferiores con respecto al método C. Para los autores, esta desviación puede ser debido al comportamiento del detector de cuasi-pico. Al igual que los resultados de la señal de laboratorio, el método B muestra valores generalmente más altos a los obtenidos con el método C. La baja resolución del método B provoca que no sea capaz de identificar componentes de emisión en algunas frecuencias individuales (por ejemplo, 108 kHz), que son detectadas por los métodos A y C [26].

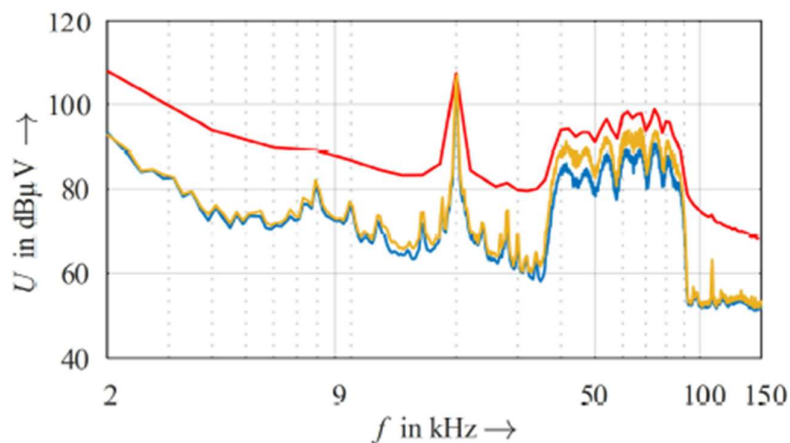


Figura II-7 Espectros RMS de la señal de la medición de campo (A: azul; B: rojo; C: amarillo). Tomada de [26].



4.3. COMPLEJIDAD COMPUTACIONAL

Además de la precisión de los métodos, también se debe evaluar la complejidad computacional de cada uno de ellos. Como se menciona en [26], la complejidad computacional de un algoritmo puede evaluarse mediante el número de Operaciones de Punto Flotante (FLOP) y la cantidad de memoria requerida para procesar cada intervalo de medición. En la Tabla II-3 se muestra un resumen de los requisitos de cada método.

Tabla II-3. Número de FLOPs y requisitos de memoria para los diferentes métodos. Adaptada de [26].

MÉTODO	A	B	C
FRECUENCIA DE MUESTREO POR FFT	327,68 kHz	1024 kHz	409,6 kHz
NÚMERO DE FLOPS POR FFT	1048576	4608	106496
MEMORIA REQUERIDA POR FFT	512 kB	4 kB	8 kB*(2960)
NÚMERO DE FFTS REQUERIDAS	1	32	310800
TOTAL DE FLOPS PARA TODAS LAS FFTS	1048576	147456	33181911578

Es evidente que el método C es el de mayor complejidad computacional de los tres. El método A requiere de unas 31500 veces menos FLOPs que el método C. Por otro lado, el método B es el que tiene una menor complejidad, alrededor de unas 6 veces menos FLOPs comparado con el método A, pero tiene huecos significativos y es el método con la menor resolución de frecuencia (2 kHz), a comparación de los métodos A y C (200 Hz). Según [26], para poder implementar el método B sin huecos, se necesitarían 400 FFTs para cubrir el intervalo de análisis de 200 ms, en ese caso el método podría requerir más FLOPs que el método A. Del mismo modo, puede observarse que el método C es el que requiere más memoria debido a las DFT paralelas. Contrariamente, el método B es el que requiere menor capacidad de memoria, debido a que realiza menor cantidad de operaciones. En la Tabla II-4 se resumen algunas ventajas y desventajas de los métodos descritos en las normas IEC 61000-4-7, IEC 61000-4-30 y CISPR 16.

Tabla II-4. Pros y contras de los tres métodos. Adaptada de [33].

MÉTODO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
CISPR 16-1-2	Alta precisión	Intervalo de medición largo
IEC 61000-4-7	Sin espacios	Baja resolución de frecuencia y precisión de medición
IEC 61000-4-30	Velocidad de medición rápida	Baja resolución de frecuencia y precisión de medición

Como ya se pudo evidenciar, el método CISPR 16 es el más preciso y se utiliza como referencia de comparación. Sin embargo, se deben de tener cuidado con los resultados obtenidos a través de este método, ya que asume que la distribución supraarmónica no cambia durante la medición, cuando en realidad no siempre es cierto y esto podría inducir a errores en los resultados de la medición.

5. OTRAS ALTERNATIVAS

De los tres métodos descritos anteriormente se pueden hacer algunas variantes, por ejemplo, en los métodos descritos en las normas IEC se puede variar la resolución de frecuencia, mientras en el método definido en el estándar CISPR 16 se puede cambiar el tipo de detector (cuasi-pico, RMS y pico) [26]. Estos métodos igualmente sirven como base y marco de referencia para el desarrollo de nuevos métodos. Algunos de estos nuevos métodos que se han propuesto son los siguientes:

5.1. ENFOQUE DE SUBMUESTREO

Según el teorema de Shannon-Nyquist, la frecuencia de muestreo para medir emisiones de hasta 150 kHz debería de ser al menos de 300 kHz. El método con enfoque de submuestreo propone utilizar un banco de filtros analógicos para descomponer la señal de entrada en diez anchos de banda de 15 kHz, por lo que solo se requiere de una frecuencia de muestreo de 30 kHz. Estas diez señales se procesan utilizando la DFT. Este enfoque ha sido propuesto con el fin de permitir el uso de instrumentos de calidad de la energía ya existentes con frecuencias de muestreo más bajas [5, 22].

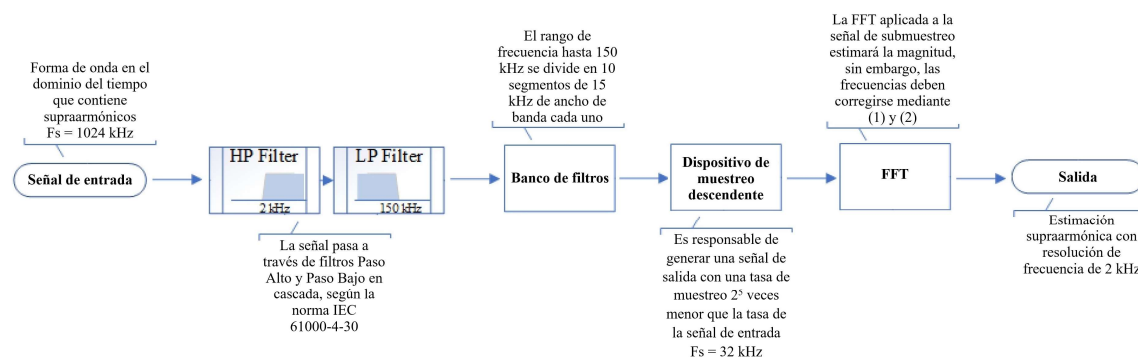


Figura II-8. Metodología propuesta para el método de submuestreo. Adaptada de [22].

En primer lugar, la señal de entrada debe ser filtrada para limitar el espectro a un rango de frecuencias de 2-150 kHz. Luego, por medio del banco de filtros propuestos, se divide el rango de frecuencias de 2-150 kHz en 10 segmentos de 15 kHz de ancho de banda cada uno (excepto el primero que será de 13 kHz). Debido a que el ancho de banda de cada banco es de 15 kHz, se puede reducir la frecuencia

de muestreo, para el método propuesto se utilizó un factor de reducción de 2^5 . Después del paso de submuestreo la nueva frecuencia de muestreo para la señal será de 32 kHz. Se utiliza una FFT de 16 muestras para obtener una resolución de frecuencia de 2 kHz como lo sugiere la norma IEC 61000-4-30. El algoritmo FFT aplicado a la señal submuestreada calculará la magnitud y fase, pero la frecuencia deberá ser corregida utilizando las ecuaciones (1) y (2) presentadas en [22]. La metodología utilizada para este método es resumida en la Figura II-8.

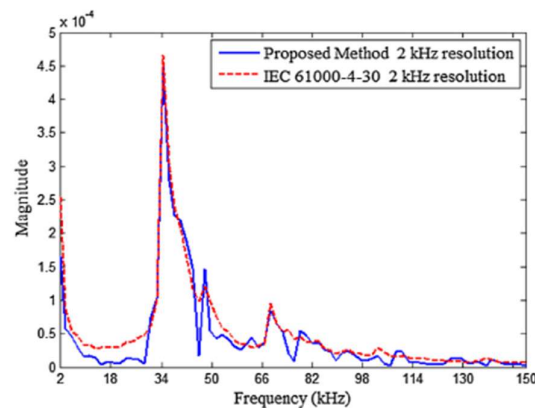


Figura II-9. Comparación del método propuesto y la norma IEC 61000-4-30 para la estimación supraarmónica. Tomada de [22].

En [22], utilizan la forma de onda generada por una lámpara LED para comparar los resultados de este método de medición con respecto al propuesto en la norma IEC 61000-4-30. Utilizaron la Diferencia Espectral Relativa (RSD) para evaluar el rendimiento del método propuesto con respecto al de la norma IEC 61000-4-30, el valor del RSD fue de 0,008%, lo que demuestra la eficiencia del método en la medición de supraarmónicos. En la Figura II-9, se muestran los resultados del método propuesto comparados con los de la norma IEC 61000-4-30.

Tabla II-5. Análisis comparativo de la complejidad computacional. Adaptada de [22].

MÉTODO	RESOLUCIÓN DE FRECUENCIA	NÚMERO DE OPERACIONES
MÉTODO PROPUESTO	Señal real/señal simulada	20480
	2000 Hz de resolución	
MÉTODO PROPUESTO MEJORADO	Señal simulada	96885
	125 Hz de resolución	80790
	Señal real	
	125 Hz de resolución	
IEC 61000-4-30 ED3	Señal simulada/señal real	147456
	2000 Hz de resolución	3407872
	Señal simulada/señal real	
	125 Hz de resolución	

Al observar la Tabla II-5, es correcto afirmar que el método propuesto tiene menor complejidad computacional que el de la norma IEC 61000-4-30. El uso de un banco de filtros analógicos junto con la herramienta diezmo permitió la reducción del número de muestras procesadas por la FFT. Es evidente que el método propuesto realiza una menor cantidad de operaciones utilizando una resolución de frecuencia de 2 kHz, en comparación del método IEC 61000-4-30. Sin embargo, cabe mencionar que este método tiene una mejora para lograr una resolución de frecuencia de 125 Hz, una resolución 16 veces mayor que la ofrecida por la norma (2 kHz), bajo estas condiciones, el número de operaciones realizadas por el método propuesto mejorado continúa siendo menor a las realizadas por el método IEC 61000-4-30 [22].

5.2. MÉTODO WPD

Otra alternativa a los métodos basados en DFT es la Descomposición de Paquetes de Ondas (WPD) de la señal digitalizada. Este método se puede utilizar para la evaluación simultánea de la distorsión armónica y supraarmónica. Es especialmente eficaz en condiciones fluctuantes, donde no se cumplen los requerimientos de linealidad y estacionariedad necesarios para el adecuado procesamiento de la señal a través de una DFT. Se presenta como una metodología compatible con el estándar IEC para el grupo de armónicos y comparables con las sugerencias de la IEC y CISPR para supraarmónicos. En la Figura II-10, se puede observar una comparación entre la metodología IEC y la metodología WPD propuesta en [27].

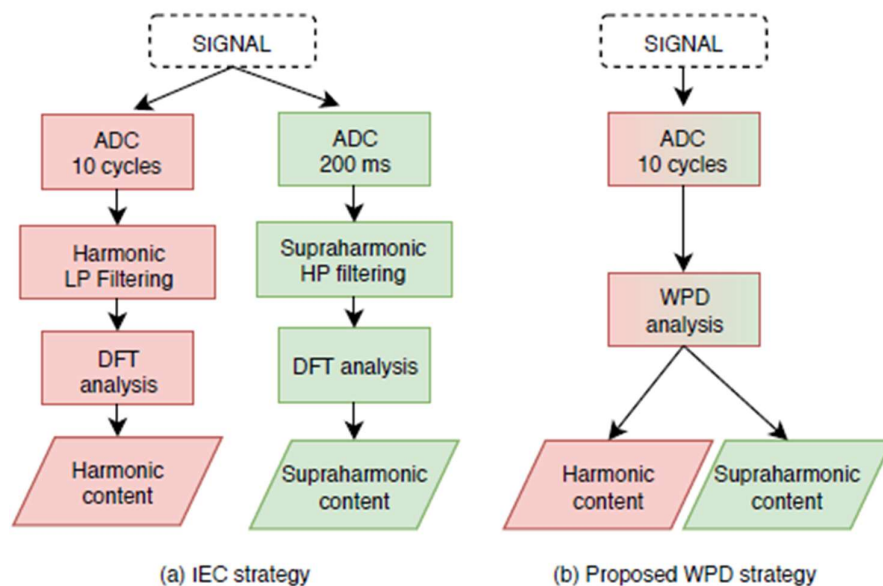


Figura II-10. Comparación entre la estrategia IEC y la estrategia WPD propuesta para el análisis de armónicos y supraarmónicos. Tomada de [27].



Primero se toma un intervalo de medición con una longitud de 10 ciclos para una frecuencia nominal del sistema eléctrico de 50 Hz, para ser descompuesto utilizando el WPD. Luego, en cada paso de descomposición, la señal se filtra a la mitad de su ancho de banda utilizando un par de Filtros de Espejo en Cuadratura (QMF) y las muestras se reducen por un factor de 2. En consecuencia, en cada paso, el número de nodos se duplica y su ancho de banda se reduce a la mitad, sucesivamente [5, 27]. La Tabla II-6 presenta las características de la estructura del método de descomposición, en ella se muestra el número de nodos por nivel, el número de muestras por nodo, el tiempo efectivo de resolución, y el ancho de banda para cada nodo en cada nivel. El área verde representa el rango supraarmónico y la sección resaltada en rojo representa el rango armónico [27].

Tabla II-6. Características del método propuesto WPD. Adaptada de [27].

Nivel (<i>j</i>)	Nodos (<i>p</i>)	Muestras/nodo	Δt ms	<i>Bw</i> /Nodo (hz)
0	1	81920	0,00244	204800
1	2	40960	0,00488	102400
2	4	20480	0,00976	51200
3	8	10240	0,01953	25600
4	16	5120	0,03906	12800
5	32	2560	0,07812	6400
6	64	1280	0,15625	3200
7	128	640	0,31250	1600
8	256	320	0,625	800
9	512	160	1,25	400
10	1024	80	2,5	200
11	32	40	5	100
12	64	20	10	50
13	128	10	20	25
13*	128/2=64	10+10=20	N/A	25+25=50

La señal original de ancho de banda completo representa el nodo inicial (nivel 0). La frecuencia de muestreo inicial será de 409600 Hz, es decir, un ancho de banda teórico máximo de 204800 Hz. Utilizando el árbol de descomposición, se obtiene para cada nodo a nivel 10, un ancho de banda de 200 Hz (la misma resolución de frecuencia de los métodos IEC 61000-4-7 y CISPR 16, para frecuencias superiores a 2 kHz). Aprovechando los resultados del análisis supraarmónico, con una descomposición adicional de 3 niveles, y solo se realiza para el rango de frecuencias de 0 Hz a 3200 Hz, se obtiene la resolución exigida por la norma IEC 61000-4-7 para el rango armónico [27].

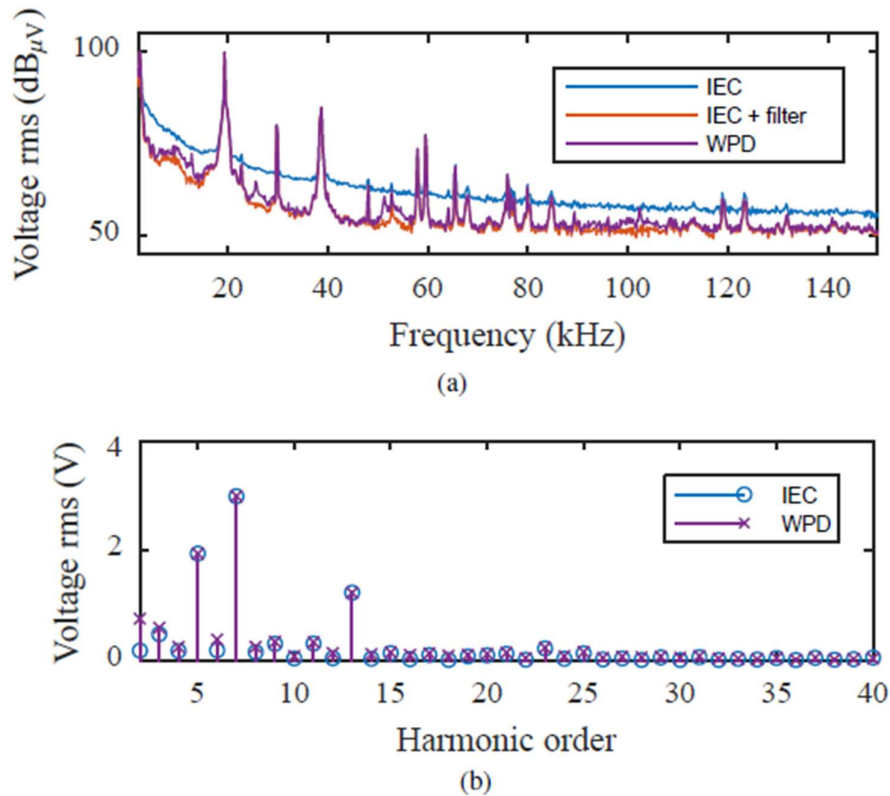


Figura II-11. Evaluación de supraarmónicos (a) y armónicos (b) de un cargador de EV en la red analizados con el método propuesto y el método IEC (con etapa de filtrado previa y sin filtrado). Tomada de [27].

La Figura II-11 (a) muestra la emisión de voltaje en el rango de frecuencia de 2-150 kHz de un cargador de un vehículo eléctrico conectado a la red, mientras que la Figura II-11 (b) presenta los resultados obtenidos del espectro armónico. Del mismo modo, en la Figura II-12 se presenta la misma comparación para las emisiones armónicas y supraarmónicas de un inversor fotovoltaico. Respecto al análisis de supraarmónicos, en ambas figuras puede observarse que el rendimiento del método propuesto es muy similar al del método IEC con etapa de filtrado. Por otra parte, el método IEC sin filtrado tiene peor rendimiento, debido a niveles de fondo más altos, causados por fugas de energía. Los autores encontraron que la razón de esto era una desviación en la frecuencia de la red de su valor nominal [27].

Con respecto a los resultados del espectro armónico, se observan ligeras diferencias entre los métodos, especialmente para los armónicos de bajo orden. Los investigadores sugieren que esto se debe a una fuga espectral masiva provocada por la naturaleza fluctuante de la onda. Este método tiene el potencial de simplificar los equipos de medición y muestra un gran desempeño frente a las fluctuaciones de voltaje y variaciones de frecuencia, lo cual es un problema en los métodos basados en DFT [27].

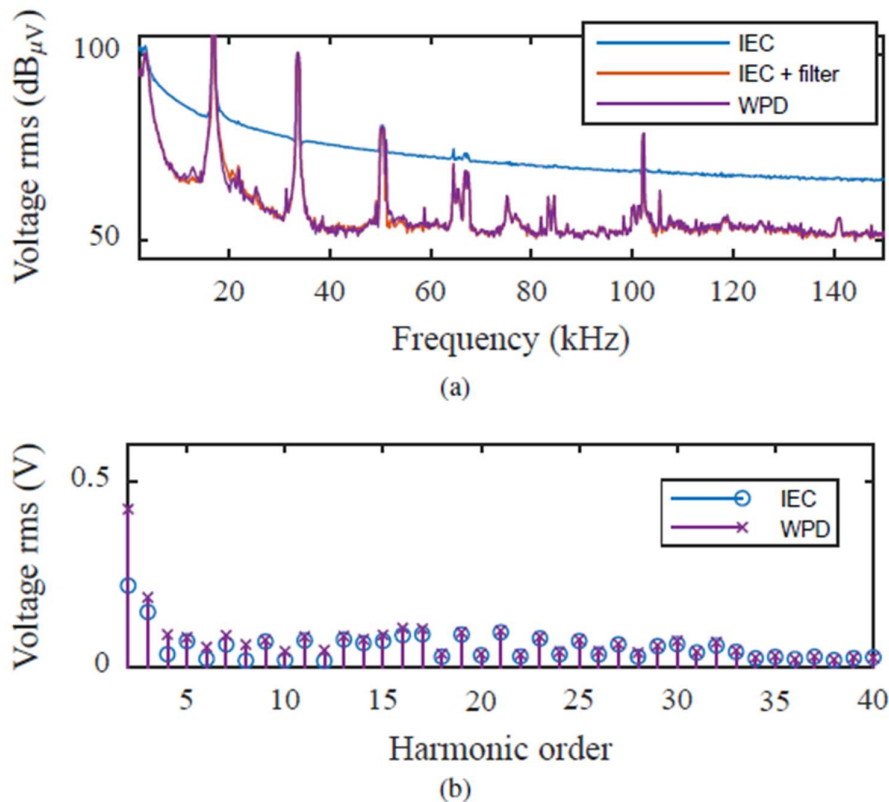


Figura II-12. Evaluación de supraarmónicos (a) y armónicos (b) de un inversor fotovoltaico conectado a la red y analizado con el método propuesto y el método IEC (con etapa de filtrado previa y sin filtrado). Tomada de [27].

Aparte de los métodos mencionados anteriormente, se debe mencionar otros dos métodos para la medición de supraarmónicos, estos están basados en la detección compresiva (CS):

- El método descrito en [21] utiliza la Búsqueda de Coincidencia Ortogonal (OMP) como algoritmo de detección compresiva. Primero procesa la señal de entrada a través de una DFT con ventanas de medición consecutivas de 0,5 ms de duración, para obtener una resolución de 2 kHz.
- Por otro lado, en [33] proponen un método de detección compresiva bayesiana que al igual que el método anterior no tiene espacios entre las ventanas de medición de 0,5 ms y también utiliza un modelo de vector de medición múltiple, este método pretende mejorar la precisión con respecto al basado en OMP utilizando el aprendizaje bayesiano disperso.

CAPÍTULO III. ESTANDARES APLICABLES PARA EL RANGO SUPRAARMÓNICO

Durante los últimos años se ha notado una disminución en la emisión de armónicos (por debajo de 2 kHz), esto puede explicarse ya que los armónicos han sido durante mucho tiempo la mayor preocupación en el campo de la calidad de la energía, por lo que existe una gran cantidad de publicaciones (libros, trabajos, estándares, normas, etc.) aplicables a este rango de frecuencias. Junto con esto, se ha visto un aumento en la emisión de supraarmónicos (entre 2-150 kHz), principalmente debido a la introducción de dispositivos basados electrónica de potencia y al aumento de las frecuencias de conmutación de estos dispositivos. Todo esto ha desplazado la generación de armónicos a frecuencias cada vez más altas [16]. Esta tendencia puede ser observada en la Figura III-1, la cual presenta mediciones realizadas a grandes grupos de usuarios de computadoras durante festivales electrónicos desde el año 2002 al 2009, se puede notar una caída drástica en las emisiones de los armónicos de tercero, quinto y séptimo orden [12].

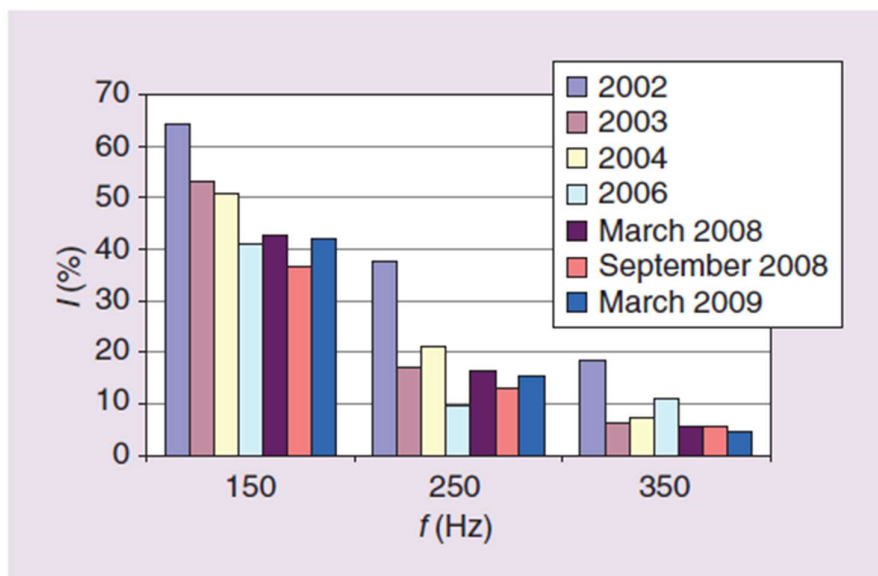


Figura III-1. Emisión de un grupo de computadoras desde el 2002 al 2009. Tomada de [12].

Esta tendencia se ve aún más reflejada en la Figura III-2, allí también se puede evidenciar la introducción de armónicos de mayor frecuencia en los dispositivos modernos. En esta figura se presenta la forma de onda actual y los espectros de un televisor moderno. Se observa como los armónicos de baja frecuencia se redujeron, aunque el tercer armónico presenta la mayor magnitud

(alrededor del 30%). Se manifiestan niveles relativamente altos de frecuencias altas de 5 kHz y 50-70 kHz. Este tipo de emisiones de mayor frecuencia no se encontraban en la tecnología más antigua que usaba rectificadores simples en sus extremos frontales [12].

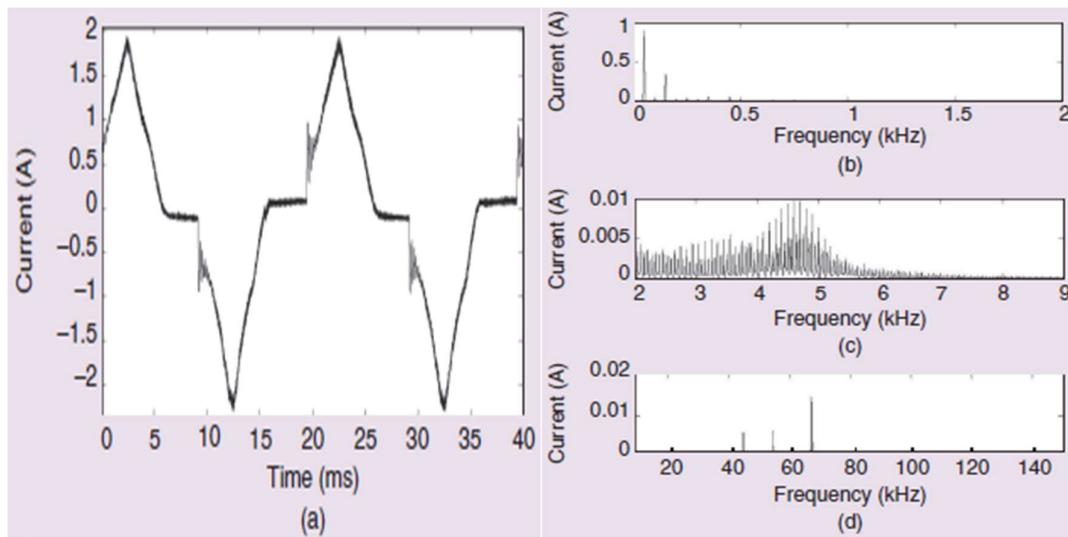


Figura III-2. Televisor moderno: (a) forma de onda y espectro actuales, (b) 0-2 kHz, (c) 2-9 kHz y (d) 9-150 kHz. Tomada de [12].

Esta evolución no ha sido acompañada por las normas destinadas a evitar la interferencia, las cuales se han retrasado en la actualización o en el desarrollo de nuevos estándares, lo que ha generado una falta de normatividad para este rango de frecuencias más altas (Figura III-3). Debido a esta falta de estandarización, los equipos han sido diseñados para cumplir con los límites de emisión a frecuencias más bajas, lo que ha provocado que aumenten sus emisiones para las frecuencias más altas [16].

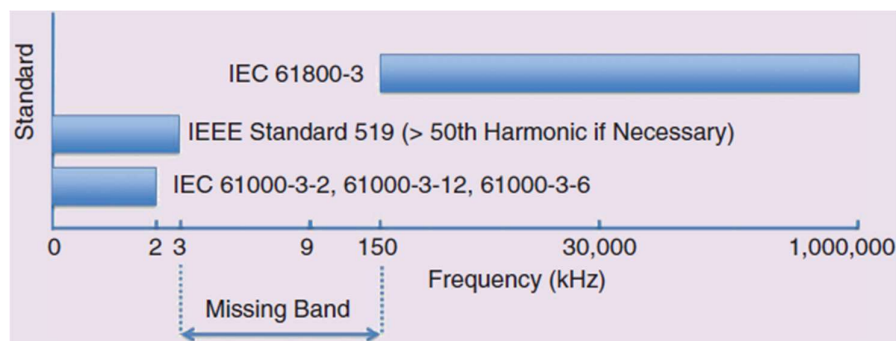


Figura III-3. Frecuencias cubiertas por los estandares de armónicos IEEE e IEC. Tomada de [12].



Que este rango de frecuencias no esté cubierto resulta interesante, ya que la mayoría de los dispositivos de conmutación de electrónica de potencia, conmutan precisamente dentro de este rango de frecuencias (2-8 kHz o más). Sumado a esto, se tiene que la mayoría de los instrumentos de medición utilizados para medir los índices de calidad de la energía solo pueden medir hasta el armónico 50 (2,5 kHz para sistemas de 50 Hz y 3 kHz para sistemas de 60), por lo tanto, no detectarán niveles altos de armónicos para la banda de frecuencia supraarmónica. [12].

Actualmente se encuentra en proceso y discusión la estandarización de este rango de frecuencias por parte de organizaciones internacionales, tales como: CENELEC TC 8X, TC 210, WG 1, 6, 8 y 9 de IEC SC 77A. Como se mencionó en el Capítulo II, esta carencia de estándares se debe principalmente a la falta de un método de medida de emisiones en equipos, que sea reproducible y cuyos resultados brinden una representación real del comportamiento del equipo en una instalación real [16]. No obstante, decir que este rango de frecuencias no cuenta con ninguna estandarización no es del todo cierto ya que en algunos estándares se abordan ya sea de manera regulatoria o informativa. Los supraarmónicos se pueden clasificar en tres categorías [19]:

- **Señales de banda estrecha:** son aquellas perturbaciones que aparecen aproximadamente como frecuencias individuales, con un ancho de banda < 5 kHz. Son perturbaciones de tipo inducida, por ejemplo, por PLC, luces fluorescentes con balastos de alta frecuencia o cocinas de inducción.
- **Señales de banda ancha:** son señales con un ancho de banda > 5 kHz, suelen ser emitidas por equipos de usuarios finales con corrección activa del factor de potencia.
- **Oscilaciones recurrentes:** son distorsiones transitorias de corriente que se producen cerca al cruce por cero de la tensión en convertidores CA/CC monofásicos con factor de potencia corregido, este fenómeno ocurre cada $\frac{1}{2}$ ciclo de la frecuencia fundamental.

A continuación, se mencionarán algunos estándares europeos e internacionales que cubren el rango de frecuencias supraarmónicas con respecto a la emisión, inmunidad y compatibilidad.

1. LÍMITES DE EMISIÓN Y ESTÁNDARES DE MEDICIÓN

Los límites máximos de emisión de banda ancha son definidos en el estándar europeo EN 50065 y en los estándares internacionales CISPR 11 y 15. En el estándar CISPR 11 se establecen los límites obligatorios para la emisión de equipos científicos, médicos o industriales de alto rendimiento. Mientras en el CISPR 15 se establecen los mismos niveles de emisión y, además agrega unos provisionales para la iluminación eléctrica, la cual ha sido identificada como una fuente muy común de perturbaciones de banda ancha. En la especificación técnica IEC TS 62578 se describen las condiciones de funcionamiento y características típicas de los convertidores de alimentación activa, en ella también se incluye valores de emisión máximos (no intencionales) recomendados para convertidores en el

rango de 2-150 kHz [19]. En la Figura III-4 se ilustran los límites de emisión de las normas mencionadas anteriormente.

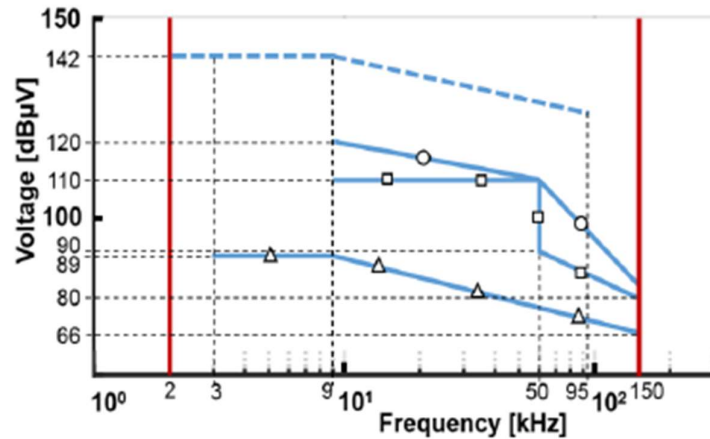


Figura III-4. Límites de emisión de banda ancha según: IEC TS 62578 (○), CISPR 15 (□) y EN 50065 (Δ). Límites de banda estrecha de EN 50160 (línea punteada). Tomada de [19].

Los PLC han recibido un renovado interés debido a la implementación de los medidores inteligentes y de las llamadas “redes inteligentes”, gracias a que los PLC son una fuente de emisión intencional, principalmente de banda estrecha en el rango de 3-148,5 kHz. Los estándares de emisión para señales de banda estrecha son el EN 50065-1 e IEC 61000-3-8, en los cuales sus límites de emisión coinciden para el rango de frecuencias de 3-148,5 kHz. En el estándar EN 50160 también se presentan los límites de emisión para la señalización intencional [19]. Los límites de emisión de banda estrecha para los estándares mencionados son representados en la Figura III-5.

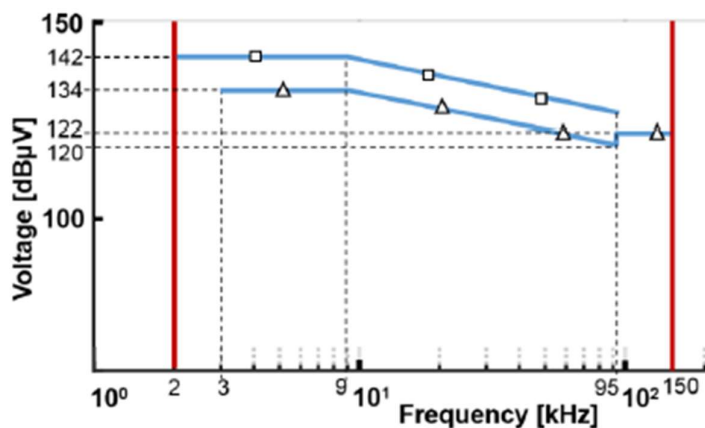


Figura III-5. Límites de emisión de banda estrecha según: EN 50160 (□) e IEC 61000-3-8 (Δ). Tomada de [19].



Actualmente no existen estándares específicos para las oscilaciones recurrentes. Probablemente a la falta de conocimiento exacto sobre los niveles de voltaje y frecuencias que se producen en instalaciones de baja tensión [19].

2. ESTÁNDARES DE INMUNIDAD

Según [19], se han dedicado los estándares IEC 61000-4-16 e IEC 61000-4-19 a las pruebas de inmunidad en el rango de frecuencias supraarmónicas. Estos dos estándares especifican técnicas de prueba para evidenciar la inmunidad contra perturbaciones conducidas en el rango de frecuencia de 2-150 kHz en puertos de alimentación de CA. El estándar IEC 61000-4-19 es específico para las interferencias de modo diferencial, mientras que el IEC 61000-4-16 se encarga de las interferencias de modo común. La interferencia de modo diferencial se origina normalmente en la electrónica de potencia y el PLC, mientras que las interferencias de modo común a menudo son inducidas por las corrientes de la línea de alimentación y el retorno de las corrientes de fuga en los sistemas de puesta a tierra.

3. NORMAS DE COMPATIBILIDAD

El estándar IEC 61000-2-2 propone niveles de compatibilidad (en otras palabras, niveles de referencia en un ambiente específico para la coordinación de los niveles de emisión e inmunidad, que garanticen el correcto funcionamiento de los dispositivos en un nivel de voltaje determinado) para PLC hasta 9 kHz. No obstante, este estándar se está ampliando por el TC 77 para cubrir todo el rango de frecuencia PLC (hasta 148,5 kHz); esto dividirá el espectro en dos rangos, el rango inferior del espectro (2-30 kHz) podrá transportar más perturbaciones (banda ancha) de la electrónica de potencia y, el rango superior del espectro (30-148,5 kHz) se reservará como una banda de frecuencia limpia para PLC [19].

Es evidente que aún faltan estándares de compatibilidad para otras aplicaciones que no sean PLC. De acuerdo con [19], esto puede ser debido a la falta de una descripción completa de los espectros de emisión de diferentes dispositivos. Sumado a esto, también se tiene que los espectros de emisión del mismo dispositivo, pero de diferentes fabricantes pueden ser significativamente diferentes, además de que las condiciones de la red también influyen en la emisión de los dispositivos. Por si fuera poco, el espectro medido de un dispositivo puede verse significativamente afectado por la presencia de otros dispositivos conectados en la misma instalación.

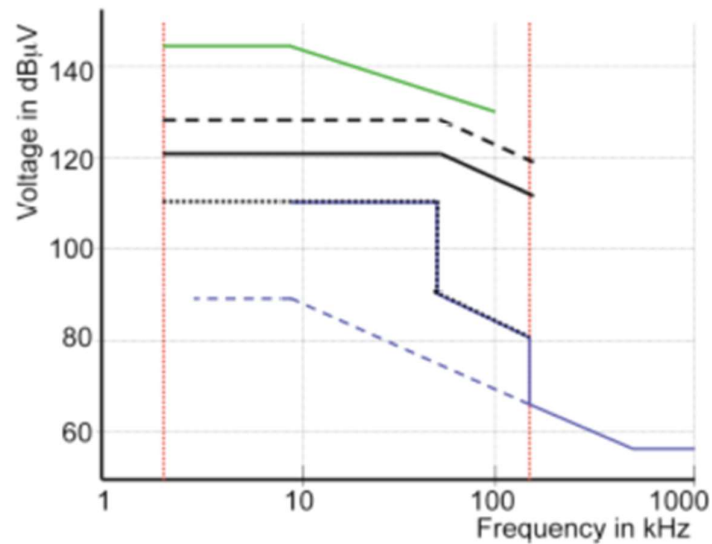


Figura III-6. Niveles de compatibilidad propuestos (línea continua negra) y límites de inmunidad (línea punteada negra) para señales de banda ancha. Tomada de [16].

En [16] los autores proponen extender los límites de emisión descritos en CISPR 15 hasta frecuencias más bajas (desde 2 kHz) y aplicarlo a todos los equipos. Además, recomiendan establecer un nivel de compatibilidad unos 6 dB por encima del límite de emisión y un límite de inmunidad otros 6 dB por encima del nivel de compatibilidad, como se ilustra en la Figura III-6.



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



CAPÍTULO IV. TÉCNICAS DE MITIGACIÓN DE SUPRAARMÓNICOS

Debido a los efectos que la distorsión supraarmónica puede producir sobre otros dispositivos conectados a la red, los SH han recibido mayor atención durante los últimos años. Como ya se mencionó anteriormente, los SH tienen múltiples efectos negativos en las redes eléctricas, algunos de ellos son: aumento de las corrientes capacitivas, reducción de la vida útil de lámparas LED, problemas de contacto en las comunicaciones PLC, sobrecalentamiento en transformadores y banco de condensadores, fallos en dispositivos de protección, pérdida de comunicación en los medidores inteligentes, perturbaciones en los dispositivos domésticos, equipos médicos y sistemas de seguridad. Además, las emisiones de SH aumentarán las pérdidas de energía, lo que se convierte en un gran problema para las redes de distribución y las empresas eléctricas [2].

Asimismo, las emisiones de SH ha ido en aumento durante los últimos años, debido al incremento de dispositivos basados en electrónica de potencia, especialmente los utilizados en la generación y distribución de electricidad basada en fuentes de energía renovable y en las llamadas redes inteligentes. Dos fuentes principales de SH en la red son las unidades de convertidores eléctricos y los sistemas PLC [2].

En consecuencia, es de suma importancia prestarles cada vez mayor atención a las emisiones de SH, y con ello establecer un método de medición reproducible, un marco regulatorio aceptado a nivel internacional para las emisiones en este rango de frecuencia y poder determinar técnicas para la reducción o mitigación de los supraarmónicos.

En un principio, los estudios de distorsión armónica se enfocaron en reducir los armónicos de baja frecuencia. Utilizaron técnicas PWM para reducir estas emisiones que estaban por debajo de 2 kHz. Sin embargo, pronto se descubrió que esto conducía a la generación de emisiones de frecuencias de conmutación de PWM múltiples, estas emisiones se encuentran en el rango de los SH [2]. A fin de garantizar los niveles requeridos de calidad de la energía en las redes eléctricas, es de gran importancia poner todos los medios disponibles para mitigar las distorsiones causadas por la emisión de SH. En esta sección se mencionarán algunas técnicas utilizadas para mitigar las emisiones de supraarmónicos.

1. MITIGACIÓN A TRAVÉS DEL NIVEL DE INMUNIDAD

La primera opción en las técnicas de mitigación de SH es prevenirlos o abordarlos desde las etapas iniciales de diseño, así se fortalece la red eléctrica contra los problemas de SH. Para reducir o prevenir las emisiones de SH al nivel de inmunidad es necesario evaluar el nivel de emisión en comparación con la inmunidad. Para ello primero se debe tomar una decisión por parte de los comités de normalización internacionales y regionales, quienes deberán establecer estos niveles de emisión e inmunidad [2].

En el Capítulo III, se mencionaron algunos estándares para los límites de emisión e inmunidad. De acuerdo con [2], en las normas EN 55011 y EN 55015 se establecen los límites de emisión SH no intencionada para las frecuencias armónicas de 9 kHz a 150 kHz, en la norma EN 50160 se establecen los límites de emisión SH intencionada hasta los 95 kHz. Por otro lado, los niveles de inmunidad son establecidos en los estándares IEC 61000-3-8 y en el Anexo A de IEC 61000-4-19 donde se dan los límites para la banda SH y límites más restrictivos por encima de 150 kHz. La emisión máxima permitida para las comunicaciones por línea eléctrica (PLC) es proporcionada por el estándar IEC 61000-3-8. El estándar IEEE 519 (2014) establece los límites máximos para la distorsión de la corriente armónica, los límites son establecidos para órdenes armónicos de $[35 < h < 50]$, pero no especifica el rango SH.

Es evidente que se requiere cuanto antes de nuevas regulaciones para poder realizar la mitigación de SH desde la etapa de diseño, con ello recomendando o exigiendo tecnologías y esquemas que modifiquen las características espectrales de las emisiones de supraarmónicos.

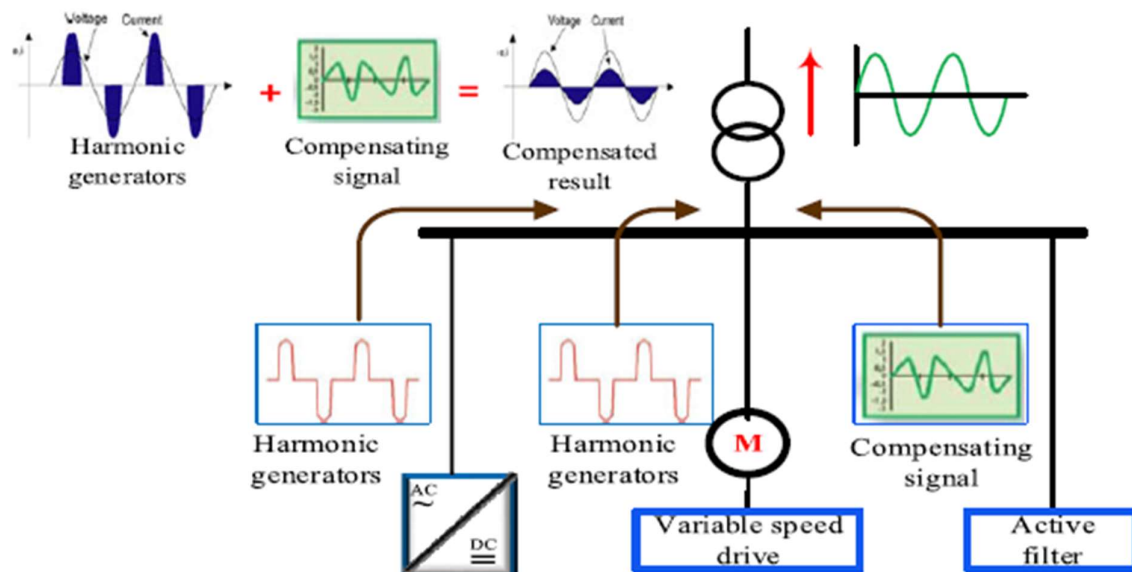


Figura IV-1. Mitigación de emisiones de SH por filtros activos. Tomada de [2].

2. MITIGACIÓN MEDIANTE FILTROS ACTIVOS

De acuerdo con [2], es importante evaluar la naturaleza del fenómeno al desarrollar actualizaciones a los estándares a cumplir. Pues una vez publicada la nueva normativa, la solución solo se podrá aplicar a los equipos aún en fase de diseño, algunas de estas soluciones son la implementación de filtros de interferencias electromagnéticas (EMI) y sistemas de electrónica de potencia que, al controlar su modo de operación, pueden modificar las características espectrales de las emisiones de alta frecuencia.

El método más simple para mitigar los SH es usar filtros activos, los cuales se utilizan para compensar la distorsión de la forma de onda en el punto de conexión del lado del consumidor, como se observa en la Figura IV-1. Estos filtros activos se componen de inductores y capacitores, pueden tener forma de T (tipo LCL) o forma de π (CLC) [2].

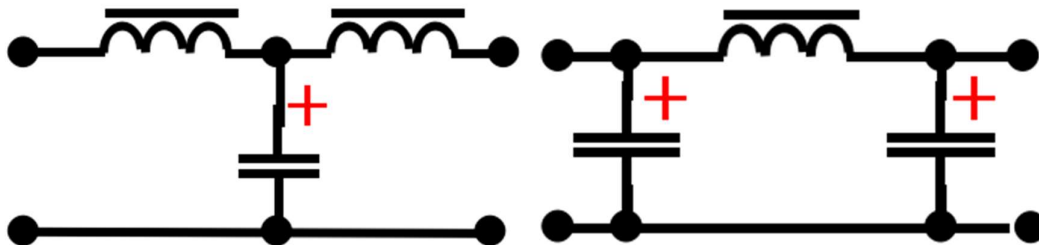


Figura IV-2. Filtro tipo LCL (izquierda) y filtro tipo CLC (derecha). Tomada de [34].

Se debe investigar cuidadosamente las impedancias espectrales y se deben tener en cuenta las resonancias y las emisiones secundarias para un correcto dimensionamiento del filtro. Sobredimensionar el filtro aumentará innecesariamente los costos, en cambio, utilizar condensadores de tamaño insuficiente provocará que sean ineficaces y propensos a sufrir daños. Si los SH se propagan en modo común, se pueden atenuar implementando inductores de modo común [19].

3. MITIGACIÓN POR MEDIO DE CONVERTIDORES MULTINIVEL

Otra tecnología que se puede utilizar son los convertidores multinivel, estos surgieron como una aplicación sofisticada de la regla del divisor de voltaje en los circuitos eléctricos. Con esta tecnología se logra que los semiconductores de potencia soporten solo una parte del voltaje nominal, esto reduce el tamaño y el costo de todo el equipo, reduce la distorsión de voltaje, mejora la eficiencia del equipo y aumenta la calidad de la energía [2]. Dentro de las topologías más comunes de convertidores multinivel disponibles tenemos:

- **Convertidor NPC (Neutral Point Clamped):** se conectan dos diodos al punto medio del bus para obtener un nivel de tensión adicional, es decir la tensión del punto intermedio del bus [35]. La Figura IV-3 presenta un esquema básico de este tipo de convertidor.

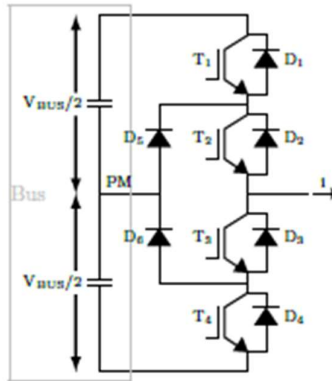


Figura IV-3. Convertidor NPC de tres niveles. Tomada de [35].

- **Convertidor de condensador flotante o FC (Flying Capacitor):** utiliza capacidades para sumar o restar la tensión de la celda a la tensión del bus y de esta manera obtener más niveles de tensión [35]. En la figura IV-4 se ilustra un esquema básico.

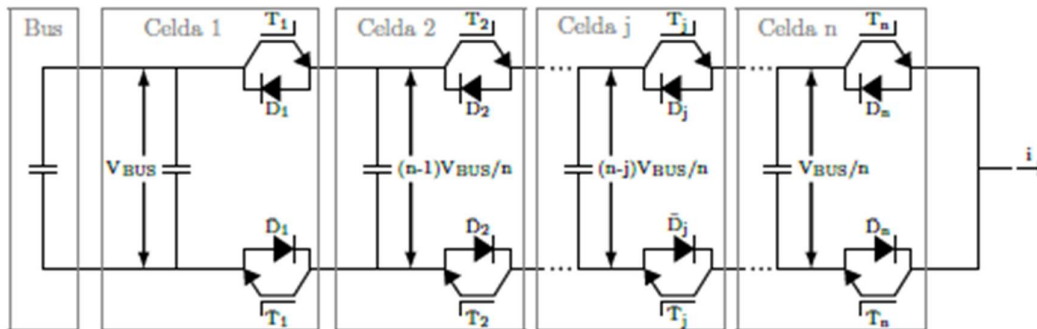


Figura IV-4. Convertidor de condensador flotante. Tomada de [35].

- **Convertidor de puente H en cascada o CHB (Cascaded H-Bridge):** se conectan en serie puentes en H (Figura IV-5) para obtener más niveles de tensión [35].

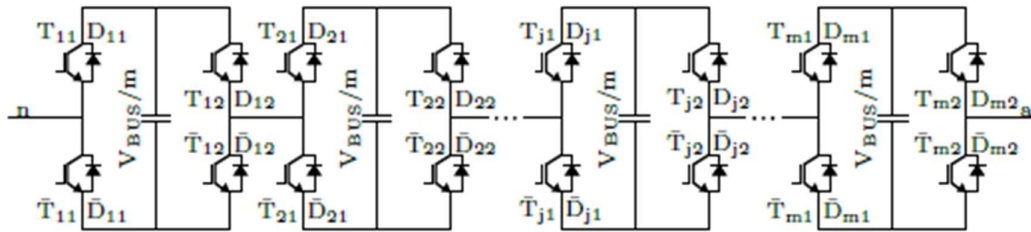


Figura IV-5. Convertidor puente H en cascada. Tomada de [35].

Un convertidor multinivel puede llegar a presentar una reducción en la emisión de SH entre un 30% a un 42% respecto a un convertidor convencional de dos niveles, para la misma frecuencia de conmutación y condiciones de carga, en la Figura IV-6 se evidencia esta reducción.

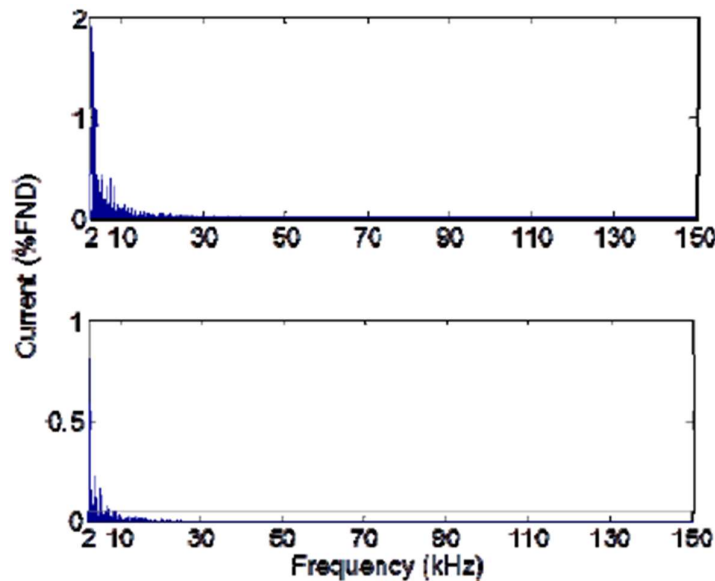


Figura IV-6. Espectro de la corriente emitida por un convertidor de dos niveles (arriba) y de cinco niveles (abajo). Nótese las diferencias de escalas. Tomada de [36].

Existen varias técnicas para la operación y control de los convertidores multinivel, algunas de ellas son [2]:

- **SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation):** Modulación de ancho de pulso sinusoidal.
- **SHE-PWM (Selective Harmonic Elimination Pulse Width Modulation):** Modulación de ancho de pulso de eliminación armónica selectiva.
- **SVM (Space Vector Modulation):** Modulación de vector espacial.
- **RRPM (Random-Pulse Position Modulation):** Modulación de posición de pulsos aleatorios.

Al utilizar un dispositivo LED para comparar la técnica de control de los convertidores multinivel, se descubrió que la técnica RRPM logró una reducción del 94% en las emisiones espectrales en comparación con la técnica PWM convencional (Figura IV-7) [37]. No obstante, se requiere de más estudios comparativos para comprobar cuál de las técnicas de control anteriormente mencionadas es la más efectiva para mitigar las emisiones de supraarmónicos, esto presenta una gran oportunidad para la realización de futuras investigaciones y trabajos [2].

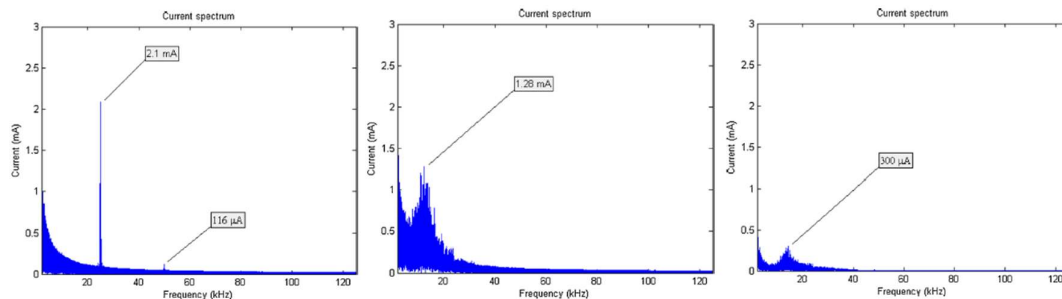


Figura IV-7. Espectro de frecuencia de la corriente emitida con: PWM convencional (izquierda), RPPMa (centro), RPPMb (derecha). Tomada de [37].

Al analizar la Figura IV-7 se observa que el método RPPMa logra una reducción del 94 % en la componente de 25 kHz. Sin embargo, presenta una componente de 1,28 mA a 12,5 kHz debido al método de espectro ensanchado. Por otro lado, el método RPPMb no solo logra mitigar totalmente la componente a 25 kHz, sino que además logra disminuir hasta 300 uA la componente de 12,5 kHz, demostrando que con esta técnica se obtienen mejores resultados [37].

4. MITIGACIÓN INTEGRADA

Como se indica en [2], se obtiene una mejor mitigación de las emisiones de SH integrando todas las partes de la instalación. Esto incluye el suministro y los aparatos del consumidor junto con los pasos del procedimiento para garantizar el cumplimiento de las normas, como se muestra en la Figura IV-8.

Examinando los tres niveles objetivos de estandarización, hay que mencionar que las características de voltaje sirven como referencia en relación con el suministro eléctrico. Representa un indicador del rendimiento esperado y sirve como una guía para seleccionar la inmunidad de los aparatos del consumidor. Por esto, los niveles de prueba que proporcionen inmunidad a estos equipos deben elegirse con un margen adecuado según el tipo de aplicación y los niveles de confiabilidad. En consecuencia, la Figura IV-8 muestra las relaciones entre el proceso de estandarización, el sistema de suministro y la instalación del consumidor. A pesar de ello, actualmente no existe una técnica de mitigación de SH clara y eficiente; por ello, se requiere de mayores investigaciones [2].

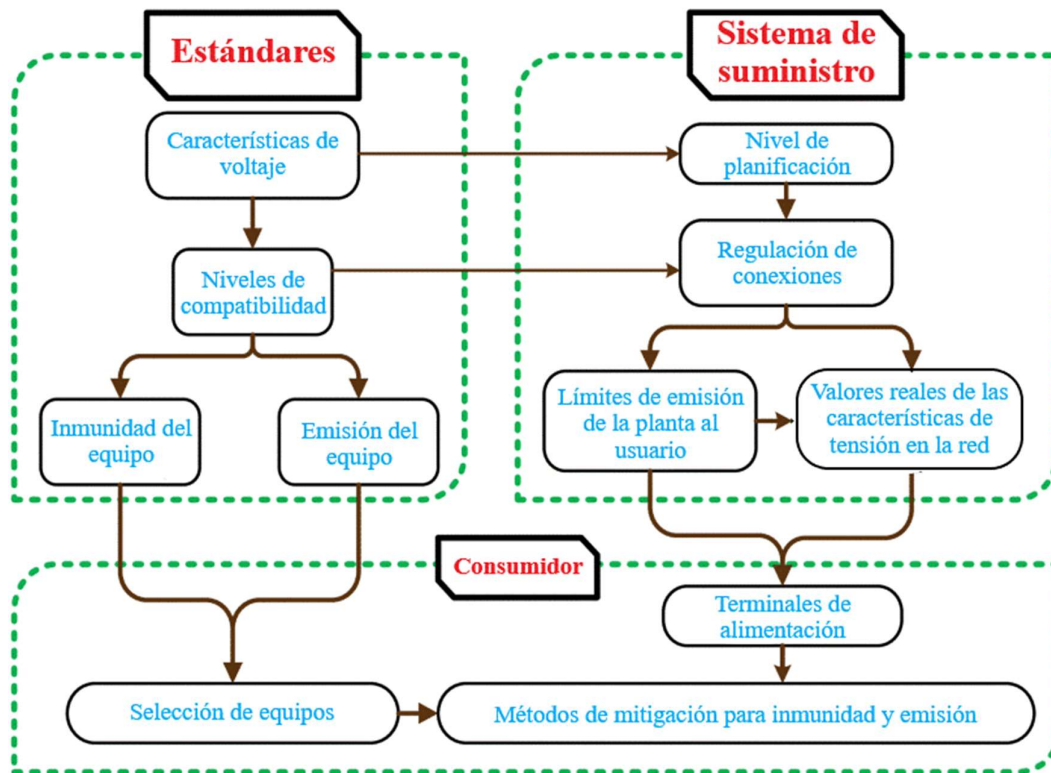


Figura IV-8. Mitigación de emisiones de SH a través de fases integradas. Adaptada de [2].

Para [19], la prevención de los niveles inadecuados de emisión supraarmónica se puede lograr en parte a través de la estandarización. Los estándares reconocidos internacionalmente pueden proporcionar límites de emisión e inmunidad para los dispositivos, también se podría crear una banda de frecuencia a la cual “volcar” la emisión supraarmónica con el fin de reducir la probabilidad de EMI. Según esto, la prevención es mejor que la mitigación, lo que recalca la importancia del trabajo de estandarización.



CAPÍTULO V. IMPACTO DEL TRABAJO

El presente trabajo tiene un impacto significativo para futuros estudios, debido a que en éste se presentó una revisión extensa, en la cual se incluyeron las más recientes publicaciones bibliográficas y se condensó una gran cantidad de información publicada sobre este tema relativamente novedoso, como lo son las emisiones en el rango de frecuencias supraarmónicas. Con este fin, los objetivos se enfocaron principalmente en presentar los métodos de medición, regulación aplicable y algunas técnicas de mitigación para este tipo de emisiones. De esta manera se presenta el panorama actual y lo que depara a futuro en lo referente a este tema.

Será especialmente de gran importancia para aquellas investigaciones relacionadas con las emisiones supraarmónicas realizadas por autores nativos del idioma español. Además, significa un punto de partida para la Universidad de Pamplona en cuanto a estudios sobre las emisiones de alta frecuencia comprendidas entre 2-150 kHz. Ya que representa un avance de investigación bibliográfico para nuestro idioma, dado que actualmente no se encuentra disponible otro trabajo de características similares en alguna base de datos reconocida, dentro del habla hispana.

Por todo lo anterior, este documento puede aprovecharse como fuente bibliográfica, base de referencia o marco de referencia para futuros trabajos, según lo considere el autor, la cual estará disponible en el repositorio de la Universidad de Pamplona.



CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En los últimos años ha aumentado el uso de equipos basados en electrónica de potencia, algunos de estos equipos han sido tecnologías clave en la implementación de fuentes de energía renovable, vehículos eléctricos, redes y medidores inteligentes. Estos dispositivos producen emisiones armónicas de bajo orden < 2 kHz, las cuales generan graves problemas en las redes eléctricas. Buscando cumplir con los parámetros de calidad de la energía establecidos en las normas internacionales, se ha utilizado señales PWM con altas frecuencias de conmutación para reducir la distorsión armónica (< 2 kHz) hasta los niveles establecidos. Sin embargo, esto ha provocado un aumento de las emisiones armónicas en el rango de 2-150 kHz (rango supraarmónico), estas emisiones se comportan de manera diferente a los armónicos de bajo orden.

Debido al aumento de las emisiones en el rango de frecuencias de 2-150 kHz, recientemente se ha detectado en varios estudios problemas relacionados con la calidad de la energía en las redes eléctricas. Algunos de los efectos nocivos se mencionaron en el presente trabajo. Además, la propagación de las emisiones de SH está afectando a otros dispositivos vecinos. Es evidente que los supraarmónicos representan un peligro cada vez mayor para las redes eléctricas, ya que las emisiones de SH continúan aumentando hasta que no se cuente con una norma de regulatoria por parte de los organismos internacionales.

Por lo anterior, en el presente trabajo se presentó una amplia revisión de las técnicas de identificación y mitigación, estándares y métodos de medición de SH. A continuación, se presentan una serie de sugerencias y recomendaciones para futuros estudios:

- El rango de frecuencias de 2-150 kHz no es suficientemente cubierto por las normas internacionales. Además, las normas IEC 61000-4-7 e IEC 61000-4-30 son más informativas que normativas. Por lo tanto, es necesario que la comunidad internacional le preste mayor atención al rango de frecuencias SH, con el fin de establecer normas que regulen este tipo de emisiones.
- Esta falta de regulación provoca una escasez de estudios sobre las técnicas de mitigación de SH. En consecuencia, hay una falta de comparaciones directas entre estos métodos de mitigación, las cuales podrían facilitar la selección del método más adecuado.
- La falta de un método de medición de emisiones de SH, es la principal razón que impide su estandarización. Por ello, se requiere de manera urgente un método de medición que sea reproducible y cuyos resultados representen de manera realista el comportamiento del equipo en una instalación real.



- Existe una carencia de equipos de medición adecuados para frecuencias más altas, especialmente para SH. Esto es producto de que las normas actuales establecen el límite de medición hasta el armónico 50, por ello los fabricantes no se preocupan en fabricar dispositivos que puedan tomar mediciones en el rango de frecuencia de 2-150 kHz.
- Se debe prestar mayor atención a los proyectos a gran escala de fuentes de energías renovables, vehículos eléctricos y redes y medidores inteligentes, ya que allí es donde se espera una alta gama de emisiones de supraarmónicos que pueden generar problemas en las redes eléctricas.
- La emisión supraarmónica de un dispositivo puede ser muy sensible a ciertos factores como, la topología del circuito interno y/o la presencia de otros dispositivos.
- En los supraarmónicos, la emisión total de una instalación en el punto de conexión disminuirá a medida que aumente el número de fuentes de emisión. Además, la emisión de los dispositivos fluirá mayormente entre los equipos electrónicos de potencia vecinos dentro de la instalación, y solo una pequeña parte de la emisión fluirá hacia la red.
- Se debe tener en cuenta que cuando se conecta una gran cantidad de dispositivos electrónicos de potencia en una misma instalación, se pueden producir resonancias armónicas.

Las sugerencias y recomendaciones anteriores pueden resultar útiles para futuros trabajos sobre mitigación de SH y el mejoramiento de la calidad de la energía en las redes eléctricas, en especial con la integración de las fuentes de energía renovables que se espera aumente considerablemente pronto. Sin embargo, se requiere de más investigación para desarrollar un método de medición adecuado, establecer un marco regulatorio y con ello desarrollar técnicas de mitigación.



CAPÍTULO VII. BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Lodetti, «New Power Quality Challenges in Smart Grids: Supraharmonics and Rapid Voltage Changes,» Universidad de Zaragoza, 2020.
- [2] S. T. Y. Alfalahi, A. Ahmed Alkahtani, A. Q. Al-Shetwi, A. Saadon Al-Ogaili, A. A. Abbood, M. Bin Mansor y Y. Fazea, «Supraharmonics in Power Grid: Identification, Standards, and Measurement Techniques,» *IEEE Access*, vol. 9, pp. 103677-103690, 2021.
- [3] D. Agudelo Martínez, «Supraharmonics in Low Voltage Networks,» Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2020.
- [4] Á. Espín-Delgado, S. Rönnerberg, S. Sudha Letha y M. Bollen, «Diagnosis of supraharmonics-related problems based on the effects on electrical equipment,» *Electric Power Systems Research*, vol. 195, p. 107179, 2021.
- [5] D. Ritzmann, S. Lodetti, D. de la Vega, V. Khokhlov, A. Gallarreta, P. Wright, J. Meyer, I. Fernández y D. Klingbeil, «Comparison of Measurement Methods for 2–150-kHz Conducted Emissions in Power Networks,» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1-10, 2021.
- [6] IEC, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods, Standard, International Electrotechnical Commission, 2015.
- [7] M. Bollen, «What is power quality?,» *Electric Power Systems Research*, vol. 66, nº 1, pp. 5-14, 2003.
- [8] IEC, Electromagnetic compatibility (EMC) Part 1: General Section 1: Application and interpretation of fundamental definitions and terms, Ginebra: Standard, International Electrotechnical, 2017.



- [9] M. H. J. Bollen, *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*, USA: Wiley Interscience, 1999.
- [10] D. García y R. Ignacio, *Medida y análisis de la distorsión armónica en cargas no lineales aisladas y combinadas en los rangos 0-2 kHz y 2-9 kHz*, Universidad de Cantabria, 2020.
- [11] M. A. Sánchez Cortés, *Calidad de la Energía Eléctrica*, Instituto Tecnológico de Puebla, 2009.
- [12] A. Hoevenaars, M. Farbis y M. McGraw, «Active Harmonic Mitigation: What the Manufacturers Don't Tell You,» *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 26, nº 5, pp. 41-51, 2020.
- [13] IEE, «IEEE Xplore,» IEEE, 2022. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>. [Último acceso: 2022].
- [14] Elsevier B.V., «Scopus,» Elsevier B.V., 2022. [En línea]. Available: <https://www.scopus.com/>. [Último acceso: 2022].
- [15] Elsevier B.V., «ScienceDirect,» Elsevier B.V., 2022. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/>. [Último acceso: 2022].
- [16] M. Bollen, M. Olofsson, A. Larsson, S. Rönnerberg y M. Lundmark, «Standards for supraharmonics (2 to 150 kHz),» *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, vol. 3, nº 1, pp. 114-119, 2014.
- [17] S. Rönnerberg y M. Bollen, «Power quality issues in the electric power system of the future,» *Electricity Journal*, vol. 29, nº 10, pp. 49-61, 2016.
- [18] N. Uribe-Pérez, I. Angulo, L. Hernández-Callejo, T. Arzuaga, D. De la Vega y A. Arrinda, «Study of Unwanted Emissions in the CENELEC-A Band Generated by Distributed Energy Resources and Their Influence over Narrow Band Power Line Communications,» *Energies*, vol. 9, nº 12, 2016.
- [19] S. Subhani, V. Cuk y J. F. G. Coben, «A literature survey on power quality disturbances in the frequency range of 2-150 khz,» *Renewable Energy & Power Quality Journal*, vol. 1, nº 15, pp. 405-410, 2017.



- [20] G. López, J. I. Moreno, E. Sánchez, C. Martínez y F. Martín, «Noise sources, effects and countermeasures in narrowband power-line communications networks: A practical approach,» *Energies*, vol. 10, nº 8, 2017.
- [21] S. Zhuang, W. Zhao, R. Wang, Q. Wang y S. Huang, «New Measurement Algorithm for Supraharmonics Based on Multiple Measurement Vectors Model and Orthogonal Matching Pursuit,» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 68, nº 6, pp. 1671-1679, 2019.
- [22] T. M. Mendes, C. A. Duque, L. R. Silva, D. D. Ferreira y J. Meyer, «Supraharmonic analysis by filter bank and compressive sensing,» *Electric Power Systems Research*, vol. 169, pp. 105-114, 2019.
- [23] S. Sakar, S. Rönnberg y M. Bollen, «Interferences in AC–DC LED Drivers Exposed to Voltage Disturbances in the Frequency Range 2–150 kHz,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, nº 11, pp. 11171-11181, 2019.
- [24] A. A. Alkahtani, S. T. Y. Alfalahi, A. A. Athamneh, A. Q. Al-Shetwi, M. B. Mansor, M. Hannan y V. G. Agelidis, «Power Quality in Microgrids Including Supraharmonics: Issues, Standards, and Mitigations,» *IEEE Access*, vol. 8, pp. 127104-127122, 2020.
- [25] T. M. Mendes, C. A. Duque, L. R. Manso da Silva, D. D. Ferreira, J. Meyer y P. F. Ribeiro, «Comparative analysis of the measurement methods for the supraharmonic range,» *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 118, p. 105801, 2020.
- [26] V. Khokhlov, J. Meyer, A. Greverer, T. Busatto y S. Rönnberg, «Comparison of Measurement Methods for the Frequency Range 2–150 kHz (Supraharmonics) Based on the Present Standards Framework,» *IEEE Access*, vol. 8, pp. 77618-77630, 2020.
- [27] S. Lodetti, J. Bruna, J. J. Melero, V. Khokhlov y J. Meyer, «A Robust Wavelet-Based Hybrid Method for the Simultaneous Measurement of Harmonic and Supraharmonic Distortion,» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, nº 9, pp. 6704-6712, 2020.
- [28] Á. Espín-Delgado, S. Rönnberg, T. Busatto, V. Ravindran y M. Bollen, «Summation law for supraharmonic currents (2–150 kHz) in low-voltage installations,» *Electric Power Systems Research*, vol. 184, 2020.



- [29] IEC, Electromagnetic Compatibility (EMC)-Part 4-7: Testing and Measurement Techniques-General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation, for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto, Standard, International Electrotechnical Commission, 2008.
- [30] CISPR Standard, Specification for Radio Disturbance and Immunity Measuring Apparatus and Methods-Part 1-1: Radio Disturbance and Immunity Measuring Apparatus, CISPR Standard, 2019.
- [31] A. Greverer, J. Meyer y S. Rönnerberg, «Comparison of Measurement Methods for the Frequency Range 2 – 150 kHz (Supraharmonics),» de *2018 IEEE 9th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)*, 2018, pp. 1-6.
- [32] M. Schwenke y D. Klingbeil, «Application aspects and measurement methods in the frequency range from 2 kHz to 150 kHz,» de *CIREN 2019 Conference*, Madrid, 2019.
- [33] S. Zhuang, W. Zhao, Q. Wang, Z. Wang, L. Chen y S. Huang, «A High-Resolution Algorithm for Supraharmonic Analysis Based on Multiple Measurement Vectors and Bayesian Compressive Sensing,» *Energies*, vol. 12, nº 13, 2019.
- [34] «programador clic,» [En línea]. Available: <https://programmerclick.com/>. [Último acceso: 2 Junio 2022].
- [35] E. Burguete Archel, Análisis, diseño y control de convertidores multinivel, Pamplona: Universidad Pública de Navarra, 2016.
- [36] S. K. Rönnerberg, A. Gil-de Castro, M. H. Bollen, A. Moreno-Munoz y E. Romero-Cadaval, «Supraharmonics from power electronics converters,» de *2015 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE)*, 2015, pp. 539-544.
- [37] J. Garrido, A. Moreno-Munoz, A. Gil-de-Castro, V. Pallares-Lopez y T. Morales-Leal, «Supraharmonics emission from LED lamps: A reduction proposal based on random pulse-width modulation,» *Electric Power Systems Research*, vol. 164, pp. 11-19, 2018.