

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Facultad de Ingeniería Eléctrica



División de Estudios de Posgrado

Análisis Tiempo-Frecuencia de Supra-armónicos en Redes de Baja Tensión Basado en Transformada Wavelet

Tesis Para Obtener el Grado de Maestro en Ciencias en
Ingeniería Eléctrica

Presenta:

Ing. Luis Fernando Yáñez Olmos

Asesor:

Dr. Norberto García Barriga



**ANÁLISIS TIEMPO-FRECUENCIA DE SUPRA-ARMÓNICOS EN
REDES DE BAJA TENSIÓN BASADO EN TRANSFORMADA
WAVELET**

Los Miembros del Jurado de Examen de Grado aprueban la **Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica** de **Luis Fernando Yañez Olmos**.

Dra. Elisa Espinosa Juárez
Presidente del Jurado

Dr. Norberto García Barriga
Director de Tesis

Dr. Félix Calderón Solorio
Vocal

Dr. Fernando Ornelas Téllez
Vocal

Dr. Enrique Acha Daza
Revisor Externo (Tampere University)

Dr. J. Aurelio Medina Rios
*Jefe de la División de Estudios de Posgrado
de la Facultad de Ingeniería Eléctrica. UMSNH
(Por reconocimiento de firmas)*

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
Octubre 2022

A mis padres, Ma. de la Luz Olmos y Pablo Yañez

Agradecimientos

Gracias a mis padres, Ma. de la Luz Olmos y Pablo Yañez, por haberme dado la vida, por brindarme su apoyo, por confiar en mí, por educarme como lo hicieron, porque, gracias a esa educación que ustedes me dieron hoy me encuentro aquí culminando mi Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, gracias por todo el apoyo que me brindaron en mi formación académica, ya que sin su apoyo no hubiera logrado culminar mis estudios, ustedes siempre estuvieron ahí convenciéndome de que estudiar era lo mejor. Me brindaron esa oportunidad que ustedes no tuvieron y que tanto deseaban, en especial mi madre. Siempre estaré eternamente agradecido por todo ese amor incondicional que me brindaron, estoy orgulloso de tener unos padres como ustedes, por todo muchas gracias.

A mis queridos hermanos, quiero agradecerles por todo ese apoyo que recibí de ustedes, para mí fueron un gran ejemplo a seguir, intervinieron mucho en mi decisión de continuar con mis estudios, estuvieron conmigo en todo momento, tanto en las buenas como en las malas, son los mejores hermanos, gracias por creer en mí, los quiero mucho.

Quiero agradecerle al Dr. Norberto García Barriga por brindarme todo su apoyo en la realización de este proyecto, por ser un gran asesor y un excelente profesor, el cual para mí es un gran ejemplo a seguir, gracias por brindarme sus conocimientos, de antemano muchas gracias por todo.

Quiero darle las gracias a la UMSNH por ofrecerme esa oportunidad de llevar a cabo mis estudios en sus instalaciones, por haberme brindado la oportunidad de formarme como profesionista, gracias por brindarme la oportunidad de ser parte de esta gran institución.

Por último, quiero darle las gracias a CONACYT por todo el apoyo económico brindado, en el trascurso de mi formación como Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica.

Resumen

Los sistemas de potencia modernos están experimentando una transición hacia un funcionamiento más eficiente y sostenible. Este proceso implica la instalación generalizada de sistemas de generación distribuidos mediante fuentes de energía renovables, sistemas de almacenamiento de energía y el diseño de cargas altamente eficientes. Por lo general, estos dispositivos son interconectados a las redes de distribución de bajo voltaje a través de convertidores, los cuales introducen contaminación en las formas de onda de corriente y tensión. De hecho, las emisiones por conducción son provocadas por el proceso de conmutación. En los últimos años se ha prestado especial atención al intervalo de frecuencia por debajo de 150 kHz, el cual se ha etiquetado como supra-armónicos en la literatura correspondiente. Este tópico sigue siendo un desafío ya que los supra-armónicos pueden ser responsables del mal funcionamiento y la pérdida de eficiencia de las cargas conectadas a la red de baja tensión. Además, los supra-armónicos son un tipo de contaminación variante en el tiempo, entonces la eficacia de métodos de análisis de estado estable es limitada al análisis de señales estacionarias en el tiempo. Como consecuencia, se deben considerar métodos alternativos más adecuados para el manejo de señales caracterizadas por fenómenos transitorios.

La atención de esta tesis se centra en el desarrollo de experimentos y métodos de medida. Por lo tanto, el problema se aborda mediante el desarrollo de una plataforma de medición de supra-armónicos. Los datos se recopilan de las redes de distribución de bajo voltaje reales utilizando un procedimiento de muestreo en el dominio del tiempo y tarjetas de adquisición de datos. Se utilizan procedimientos de procesamiento basados en la transformada Wavelet continua y el análisis Wavelet multi-resolución. Los experimentos realizados en este trabajo incluyen equipos que emiten supra-armónicos como inversores fotovoltaicos, cargadores de vehículos eléctricos y lámparas LED.

Palabras clave: Emisión, señal, espectrograma, escalograma, distorsión, contaminación y frecuencia.

Abstract

Modern power systems are undergoing an intelligent transition toward a more efficient and sustainable operation. This process involves the widespread installation of distributed-renewable generation systems, energy storage systems and high-efficiency loads. Typically, these devices are interfaced to low-voltage distribution networks through electronic converters, which introduce disturbances in current and voltage waveforms. In fact, emissions from driving are caused by the commutation process. In the last years, attention has been extended to frequency intervals below 150 kHz, which have been labeled as supra-harmonics in the relevant literature. This topic remains challenging since supra-harmonics may be responsible for severe malfunctioning and loss of efficiency. Further, since supra-harmonics are typically time-varying then the efficacy of steady-state analysis methods to evaluate their impact on distribution networks is very limited. As a consequence, alternative methods better suited to handle signals characterized by transients should be considered.

This thesis contributes to state-of-the-art time-frequency characterization of supra-harmonics in low-voltage distribution networks. The focus is on the development of experiments and measurement methods. Then, the topic is tackled by developing a measuring platform for supra- harmonics. Data is collected at actual low-voltage distribution networks using a time-domain sampling procedure and data acquisition boards. Post- processing procedures based on wavelets with the Continuous Wavelet Transform and Wavelet multi-resolution analysis are presented. The experiments carried out in this work include equipment that emit supra-harmonics such as photovoltaic inverters, electric vehicle chargers and LED lamps.

Contenido

Lista de Figuras	XII
Lista de Tablas	XIX
1. Introducción	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Revisión de estado del arte	4
1.2.1. Instrumentos de medición de supra-armónicos	5
1.2.2. Supra-armónicos en lámparas LED	6
1.2.3. Supra-armónicos en fuentes de generación de energía renovables	8
1.2.4. Supra-armónicos en cargadores de vehículos eléctricos	9
1.2.5. Métodos de procesamiento	11
1.3. Objetivos	12
1.3.1. Objetivo general	12
1.3.2. Objetivos particulares	12
1.4. Hipótesis	13
1.5. Justificación	13
1.6. Metodología	14
1.7. Descripción de los Capítulos	14
1.8. Contribuciones	15
2. Supra-armónicos	17
2.1. Emisiones entre 2 kHz y 150 kHz	17
2.1.1. Lámparas LED	18
2.1.2. Vehículo eléctrico	20
2.1.3. Inversor fotovoltaico	21
2.2. Impacto de las emisiones entre 2 kHz y 150 kHz	22
2.3. Estándares de supra-armónicos	22

2.4. Sumario	25
3. Sistema de medición de supra-armónicos	27
3.1. Plataforma de medición	27
3.2. Sistema de adquisición de datos	28
3.3. Sensor de Voltaje: Transductor LEM LV25-P	30
3.4. Sensor de Corriente: Transductor LEM LA55-P	31
3.5. Validación del sistema de medición	32
3.6. Conclusiones	36
4. Transformada Wavelet	37
4.1. Transformada de Fourier	37
4.2. Transformada de Fourier de tiempo corto	38
4.3. Ventanas de procesamiento	39
4.4. Transformada continua Wavelet	41
4.5. Transformada Wavelet Discreta	42
4.6. Análisis Wavelet multi-resolución	43
4.7. Validación del análisis multi-resolución	46
4.8. Conclusiones	49
5. Identificación de supra-armónicos: Emisión simple	51
5.1. Red eléctrica de distribución	53
5.2. Lámparas LED	59
5.2.1. Lámpara tipo A	60
5.2.2. Lámpara tipo B	70
5.2.3. Lámpara tipo C	79
5.3. Vehículo eléctrico	89
5.4. Generador fotovoltaico	99
5.5. Conclusiones	108
6. Interacción de supra-armónicos: Emisión múltiple	111
6.1. Lámparas LED y vehículo eléctrico	111
6.2. Conclusiones	123
7. Conclusiones	125
7.1. Sistema de medición	125
7.2. Identificación de supra-armónicos: Emisión simple	126

7.3. Interacción de supra-armónicos: Emisión múltiple	127
7.4. Trabajos futuros	129
A. Cálculo de resistencia R_1 y R_M para el sensor de voltaje.	131
B. Cálculo de resistencia R_M para el sensor de corriente.	133
Referencias	135

Lista de Figuras

1.1.	<i>Corriente en luminaria LED. a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Escalograma.</i>	3
2.1.	<i>Topologías de circuitos manejadores de lámparas LED: a) Circuito con corrector de factor de potencia pasivo, b) circuito con una etapa de conversión y corrector de factor de potencia activo y c) circuito con dos etapas de conversión y corrector de factor de potencia activo.</i>	19
2.2.	<i>Diagrama esquemático de cargador de vehículo eléctrico nivel I.</i>	20
2.3.	<i>Diagrama esquemático de un sistema fotovoltaico.</i>	21
2.4.	<i>Análisis de armónicos y supra-armónicos segun IEC 61000-4-7.</i>	23
2.5.	<i>Estándares internacionales del IEC y IEEE.</i>	24
3.1.	<i>Sistema de medición de supra-armónicos</i>	28
3.2.	<i>(a) Osciloscopio digital Analog Discovery 2 y (b) Adaptador BNC para Analog Discovery o 2.</i>	29
3.3.	<i>Diagrama esquemático del sensor de voltaje LEM LV 25-P.</i>	30
3.4.	<i>Diagrama esquemático del sensor de corriente LEM LA 55-P.</i>	31
3.5.	<i>Tarjeta de medición implementada para la medición de voltaje y corriente</i>	32
3.6.	<i>Experimento de validación.</i>	33
3.7.	<i>Espectros de frecuencia de las señales 60 Hz, 50 kHz, 100 kHz y 150 kHz con amplitud de 2 V.</i>	34
3.8.	<i>Capturas de pantalla de los valores obtenidos por el osciloscopio tektronix para las señal de 60 Hz, 50 kHz, 100 kHz y 150 kHz con amplitud de 2 V.</i>	35
4.1.	<i>Rectángulo Heisenberg en el plano tiempo-frecuencia para la transformada de Fourier de tiempo corto.</i>	39
4.2.	<i>Ventanas de procesamiento a).- Señal original, b).- Ventana rectangular y c).- Ventana Hamming.</i>	40
4.3.	<i>Tipos de Wavelets: a) Gaussiana, b) Sombrero Mexicano, c) Haar y d) Morlet.</i>	41

4.4. Función Wavelet tipo Morlet afectada por: a) parámetro de traslación y b) parámetro de dilatación.	42
4.5. Rectángulo Heisenberg en el plano tiempo-frecuencia para la transformada Wavelet.	43
4.6. Diagrama esquemático del algoritmo Wavelet multi-resolución.	46
4.7. a).- Señal generada por el generador BK PRECISION y b).- Resultado del análisis Wavelet multi-resolución.	47
5.1. Implementación del experimento en el laboratorio.	52
5.2. Implementación del experimento en el laboratorio con el generador fotovoltaico.	53
5.3. Formas de onda en el tiempo de la señal de voltaje de la red de distribución.	54
5.4. Espectro en el dominio de la frecuencia de la señal de voltaje de la red de distribución: a).- 0 a 2 kHz, b).- 2 kHz a 9 kHz y c).- 9 kHz a 150 kHz.	55
5.5. Emisión de voltaje en el dominio tiempo-frecuencia. a).- Forma de onda en el tiempo de señal de voltaje y b).- Espectrograma obtenido por medio de la TFTC.	56
5.6. Emisión de voltaje en el dominio tiempo-frecuencia. a).- Forma de onda en el tiempo de señal de voltaje y b).- Escalograma con la WTC.	57
5.7. Descomposición en dominio del tiempo-frecuencia de la señal de voltaje utilizando análisis Wavelet multi-resolución.	58
5.8. Diagrama básico de medición de la lámpara LED.	60
5.9. Formas de onda en el tiempo de voltaje y corriente para 90 lámparas LED tipo A de la marca Osram.	61
5.10. Curva característica V-I para lámparas LED tipo A.	61
5.11. Espectro de frecuencia del voltaje para las lámparas LED tipo A para tres rangos de frecuencias diferentes: a).- 0 a 2 kHz, b).- 2 kHz a 9 kHz y c).- 9 kHz a 150 kHz	62
5.12. Espectro de frecuencia de la corriente para las lámparas LED tipo A para tres rangos de frecuencias diferentes: a).- 0 a 2 kHz, b).- 2 kHz a 9 kHz y c).- 9 kHz a 150 kHz	63
5.13. Emisión de voltaje para 90 lámparas LED tipo A en el dominio tiempo-frecuencia: a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Espectrograma obtenido con TFTC.	64
5.14. Emisión de corriente para 90 lámparas LED tipo A en el dominio tiempo-frecuencia: a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Espectrograma obtenido con TFTC.	65
5.15. Emisión de voltaje para lámparas LED tipo A en el dominio tiempo-frecuencia: a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Escalograma con la WTC.	66

5.16. Emisión de corriente para lámparas LED tipo A en el dominio tiempo-frecuencia:	
a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Escalograma con la WTC	66
5.17. Descomposición en el dominio tiempo-frecuencia de la señal de voltaje utilizando el análisis Wavelet multi-resolución.	68
5.18. Descomposición en el dominio tiempo-frecuencia de la señal de corriente utilizando el análisis Wavelet multi-resolución.	69
5.19. Formas de onda en el tiempo del voltaje y corriente para una lámpara LED tipo B.	70
5.20. Curva característica V-I para 5 lámparas tipo B.	70
5.21. Espectro de frecuencia de la señal de voltaje, para lámpara LED tipo B en tres rangos de frecuencias diferentes: a).- 0 a 2 kHz, b).- 2 kHz a 9 kHz y c).- 9 kHz a 150 kHz.	71
5.22. Espectro de frecuencia de señal de corriente, lámpara LED tipo B para el rango de frecuencias: a).- 0 a 2 kHz, b).- 2 kHz a 9 kHz y c).- 9 kHz a 150 kHz. . .	72
5.23. Emisión de voltaje para 5 lámparas LED tipo B en el dominio tiempo-frecuencia.	
a).- Forma de onda en el tiempo de señal de voltaje y b).- Espectrograma con la TFTC.	74
5.24. Emisión de corriente para 5 lámparas LED tipo B en el dominio tiempo-frecuencia.	
a).- Forma de onda en el tiempo de señal de corriente y b).- Espectrograma con la TFTC.	74
5.25. Emisión de voltaje para lámparas LED tipo B en el dominio tiempo-frecuencia:	
a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Escalograma con la WTC.	76
5.26. Emisión de corriente para lámparas LED tipo B en el dominio tiempo-frecuencia:	
a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Escalograma con la WTC	76
5.27. Descomposición en dominio del tiempo-frecuencia de la señal de voltaje de la lámpara tipo B utilizando análisis Wavelet multi-resolución.	77
5.28. Descomposición en dominio del tiempo-frecuencia de la señal de corriente de la lámpara tipo B utilizando la análisis Wavelet multi-resolución.	78
5.29. Formas de onda en el tiempo de voltaje y corriente demandada por la lámpara LED tipo C.	79
5.30. Curva característica V-I para lamparas LED tipo C.	80
5.31. Espectro de frecuencia de la señal de voltaje, para lámpara LED tipo C en tres rangos de frecuencias diferentes: a).- 0 a 2 kHz, b).- 2 kHz a 9 kHz y c).- 9 kHz a 150 kHz.	81

5.32. Espectro de frecuencia de la señal de corriente, para lámpara LED tipo C en tres rangos de frecuencias diferentes: a).- 0 a 2 kHz, b).- 2 kHz a 9 kHz y c).- 9 kHz a 150 kHz.	82
5.33. Emisión de voltaje para 5 lámparas LED tipo C en el dominio tiempo-frecuencia. a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Espectrograma con la TFTC.	83
5.34. Emisión de corriente para 5 lámparas LED tipo C en el dominio tiempo-frecuencia. a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Espectrograma con la TFTC.	84
5.35. Emisión de voltaje para lámparas LED tipo C en el dominio tiempo-frecuencia. a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Escalograma con la WTC.	85
5.36. Emisión de corriente para lámparas LED tipo C en el dominio tiempo-frecuencia. a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Escalograma con la WTC	85
5.37. Descomposición en dominio de tiempo-frecuencia de la señal de voltaje utilizando análisis Wavelet multi-resolución.	87
5.38. Descomposición en dominio de tiempo-frecuencia de la señal de corriente utilizando la transformada Wavelet multi-resolución.	88
5.39. Formas de onda en el tiempo de voltaje y corriente demandada por el cargador de vehículo eléctrico nivel 1.	89
5.40. Curva característica V-I para cargador de vehículo eléctrico nivel 1.	91
5.41. Espectro de frecuencia de señal de voltaje, para cargador de vehículo eléctrico nivel 1, se muestran en tres rangos de frecuencias diferentes: a).- 0 a 2 kHz, b).- 2 kHz a 9 kHz y c).- 9 kHz a 150 kHz.	92
5.42. Espectro de frecuencia de señal de corriente, para cargador de vehículo eléctrico nivel 1, se muestran en tres rangos de frecuencias diferentes: a).- 0 a 2 kHz, b).- 2 kHz a 9 kHz y c).- 9 kHz a 150 kHz.	93
5.43. Emisión de voltaje para cargador de vehículos eléctricos nivel 1 en el dominio tiempo-frecuencia. a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Espectrograma con la TFTC.	94
5.44. Emisión de corriente para cargador de vehículos eléctricos nivel 1 en el dominio tiempo-frecuencia. a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Espectrograma con la TFTC.	94
5.45. Emisión de voltaje para cargador de vehículo eléctrico nivel 1 en el dominio tiempo-frecuencia: a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Escalograma con la WTC.	95

5.46. Emisión de corriente para cargador de vehículo eléctrico nivel 1 en el dominio tiempo-frecuencia: a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Escalograma con la WTC	96
5.47. Descomposición en dominio del tiempo-frecuencia de la señal de voltaje utilizando análisis Wavelet multi-resolución.	97
5.48. Descomposición en dominio del tiempo-frecuencia de la señal de corriente utilizando el análisis Wavelet multi-resolución.	98
5.49. Formas de onda en el tiempo de voltaje y corriente generada por el generador fotovoltaico.	99
5.50. Curva característica V-I para el generador fotovoltaico.	100
5.51. Espectro de frecuencia de la señal de voltaje, para generador fotovoltaico, se muestran tres rangos de frecuencias diferentes: a).- 0 a 2 kHz, b).- 2 kHz a 9 kHz y c).- 9 kHz a 150 kHz.	101
5.52. Espectro de frecuencia de la señal de corriente, para generador fotovoltaico, se muestran tres rangos de frecuencias diferentes: a).- 0 a 2 kHz, b).- 2 kHz a 9 kHz y c).- 9 kHz a 150 kHz.	102
5.53. Emisión de voltaje para el generador fotovoltaico en el dominio tiempo-frecuencia. a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Espectrograma con la TFTC.	103
5.54. Emisión de corriente para el generador fotovoltaico en el dominio tiempo-frecuencia. a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Espectrograma con la TFTC.	103
5.55. Emisión de voltaje para el generador fotovoltaico en el dominio tiempo-frecuencia: a).- Forma de onda en el tiempo de señal de voltaje y b).- Escalograma con la WTC.	104
5.56. Emisión de corriente para el generador fotovoltaico en el dominio tiempo-frecuencia: a) Forma de onda en el tiempo de señal de corriente y b) Escalograma con la WTC	105
5.57. Descomposición en dominio del tiempo-frecuencia de la señal de voltaje utilizando análisis Wavelet multi-resolución.	106
5.58. Descomposición en dominio del tiempo-frecuencia de la señal de corriente utilizando el análisis Wavelet multi-resolución.	107
6.1. Formas de onda en el tiempo de voltaje y corriente para 45 lámparas LED tipo A, 5 lámparas LED tipo B, 5 lámparas LED tipo C y un cargador de vehículo eléctrico nivel 1.	112

6.2.	<i>Curva característica V-I para 45 lámparas tipo A, 5 lámparas tipo B, 5 lámparas tipo C y un cargador de vehículo eléctrico nivel 1.</i>	112
6.3.	<i>Espectro de frecuencia del voltaje para las lámparas LED tipo A, lámparas tipo B, lámparas tipo C y un vehículo eléctrico, para tres rangos de frecuencias diferentes: a).- 0 a 2 kHz, b).- 2 kHz a 9 kHz y c).- 9 kHz a 150 kHz</i>	114
6.4.	<i>Espectro de frecuencia de la corriente para las lámparas LED tipo A, lámparas tipo B, lámparas tipo C y un vehículo eléctrico, para tres rangos de frecuencias diferentes: a).- 0 a 2 kHz, b).- 2 kHz a 9 kHz y c).- 9 kHz a 150 kHz</i>	115
6.5.	<i>Emisión de voltaje para 45 lámparas tipo A, 5 lámparas tipo B, 5 lámparas tipo C y un vehículo eléctrico con cargador nivel 1 en el dominio tiempo-frecuencia. a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Espectrograma con la TFTC.</i>	117
6.6.	<i>Emisión de corriente para 45 lámparas tipo A, 5 lámparas tipo B, 5 lámparas tipo C y un vehículo eléctrico con cargador nivel 1 en el dominio tiempo-frecuencia. a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Espectrograma con la TFTC.</i>	117
6.7.	<i>Emisión de voltaje para 45 lámparas tipo A, 5 lámparas tipo B, 5 lámparas tipo C y un vehículo eléctrico con cargador nivel 1 en el dominio tiempo-frecuencia: a).- Forma de onda en el tiempo de señal de voltaje y b).- Escalograma con la WTC.</i>	119
6.8.	<i>Emisión de corriente para 45 lámparas tipo A, 5 lámparas tipo B, 5 lámparas tipo C y un vehículo eléctrico con cargador nivel 1 en el dominio tiempo-frecuencia: a).- Forma de onda en el tiempo de señal de corriente y b).- Escalograma con la WTC.</i>	119
6.9.	<i>Descomposición en dominio del tiempo-frecuencia de la señal de voltaje utilizando análisis Wavelet multi-resolución.</i>	121
6.10.	<i>Descomposición en dominio del tiempo-frecuencia de la señal de corriente utilizando el análisis Wavelet multi-resolución.</i>	122

Lista de Tablas

2.1. Factor de potencia sugerido por el estándar IEC 62612-2018 para lámparas LED.	18
3.1. Características del osciloscopio digital Analog Discovery 2.	29
3.2. Características principales del transductor LEM LV 25-P.	30
3.3. Características principales del transductor LEM LA 55-P.	31
3.4. Comparación de mediciones obtenidas por los diferentes instrumentos de medición y por ciento de error entre mediciones.	33
5.1. Parámetros del sistema de adquisición de datos del experimento.	53
5.2. Rangos de frecuencias para las bandas involucradas en el análisis Wavelet multi-resolución.	59
5.3. Análisis comparativo del por ciento de distorsión armónico y por ciento de distorsión supra-armónico del voltaje de la red eléctrica con la lámpara tipo A. .	64
5.4. Análisis comparativo del por ciento de distorsión armónica para el voltaje de la red eléctrica con la lámpara tipo B.	73
5.5. Análisis comparativo del por ciento de distorsión armónica y por ciento de distorsión supra-armónica para el voltaje de la red eléctrica con la lámpara tipo C.	83
5.6. Características del vehículo eléctrico	90
5.7. Análisis comparativo del por ciento de distorsión armónica total y distorsión supra-armónica total para el voltaje de la red eléctrica con el vehículo eléctrico.	92
5.8. Características del generador fotovoltaico.	99
5.9. Análisis comparativo del por ciento de distorsión armónica y supra-armónica para el voltaje de la red eléctrica con el generador fotovoltaico.	102

6.1. Análisis comparativo del porcentaje de distorsión armónica para el voltaje de la red eléctrica, lámparas tipo A, lámparas tipo B, lámparas tipo C, vehículo eléctrico, generador fotovoltaico y lámparas con vehículo eléctrico en operación múltiple.	116
---	-----

Lista de símbolos

I	Corriente eléctrica
V	Volt
mV	mili-Volts
A	Amperes
mA	mili-Amperes
W	Watts
P	Potencia Activa
I_p	Corriente devanado primario
I_s	Corriente devanado secundario
R_m	Resistencia de medición
Z_s	Impedancia del sistema
R	Resistencia
Z	Impedancia
f	Frecuencia
dB	Decibel

Lista de acrónimos

AT: Alta Tensión

BT: Baja Tensión

MT: Media Tensión

fp: Factor de Potencia

LED: Diodo Emisor de Luz (Light Emitting Diode)

LFC: Lámpara Fluorescente Compacta

THD: Distorsión Armónica Total

TSHD: Distorsión Supra-armónica Total

C.C.: Corriente Continua

C.A.: Corriente Alterna

Hz: Hertz (Frecuencia)

kHz: Kilo Hertz (Frecuencia)

MHz: Mega Hertz (Frecuencia)

MRA: Análisis Multi-Resolución

STFT: Transformada de Fourier de Tiempo Corto

WTC: Transformada Wavelet de Tiempo Continuo

FFT: Transformada Rápida de Fourier

IC: Lámpara incandescente

MATLAB: Matrix Laboratory (Laboratorio de Matrices)

Capítulo 1

Introducción

1.1. Descripción del problema

Las redes eléctricas modernas de baja tensión se encuentran actualmente en un proceso de transición hacia un escenario de operación más eficiente y sostenible. Estos cambios requieren forzosamente la utilización de sistemas de generación, almacenaje de energía y el diseño de cargas altamente más eficientes. En este sentido, los importantes avances logrados en los últimos años en el área de la electrónica de potencia han permitido el desarrollo de un conjunto de soluciones altamente eficientes, compactas y de bajo costo. Como consecuencia de esto, se ha observado la introducción masiva de convertidores de electrónica de potencia en las redes eléctricas de potencia para operar sistemas de generación distribuida basado en fuentes renovables de energía, sistemas de almacenamiento masivo de energía, sistemas de iluminación eficientes y sistemas de transporte eléctrico. Los convertidores de electrónica de potencia involucrados en estas soluciones se diseñan para generar una corriente con poca distorsión, factor de potencia cercano a la unidad y cumplimiento de los requerimientos indicados en estándares internacionales tales como IEEE std. 1547 e IEC 61000-3 [std 1547-2018, 2018] y [61000-3-2:2018, 2018]. Sin embargo, los esfuerzos encaminados para que las soluciones basadas en electrónica de potencia produzcan bajas emisiones armónicas ha traído como consecuencia que se inyecten componentes de frecuencia en el rango supra-armónico de 2 kHz a 150 kHz [Larsson, 2006], [Rönnberg, 2013] y [Meyer et al., 2013]. El contenido supra-armónico se origina en los esquemas de conmutación que operan a altas frecuencias en los convertidores de electrónica de potencia y se inyecta en las redes eléctricas durante la operación del convertidor. En la Figura 1.1 (a) se ilustra, a manera de ejemplo, la forma de onda en el tiempo de la corriente demandada por una lámpara LED moderna y su correspondiente escalograma. Se puede apreciar que la corriente presenta una forma de onda en el tiempo con una componente

fundamental de 60 Hz pero con oscilaciones de alta frecuencia. Además, se aprecia que las oscilaciones de alta frecuencia no son permanentes a lo largo del ciclo de 60 Hz, es decir, son variantes en el tiempo. Por su parte, la Figura 1.1 (b) muestra el escalograma correspondiente en el dominio tiempo-frecuencia, en donde se aprecia claramente los instantes en el tiempo en donde aparecen componentes supra-armónicas originadas por una frecuencia de conmutación alrededor de 60 kHz. Un escalograma es una representación bidimensional de los coeficientes obtenidos por la transformada Wavelet continua, ya que la transformada Wavelet es una medida de similitud entre la señal y la función Wavelet a diferentes resoluciones.

En el contexto de las redes eléctricas inteligentes, la presencia del fenómeno supra-armónico permanece como un tópico de interés y desafiante en virtud de que dicho fenómeno podría ser responsable de escenarios de mal funcionamiento y degradación de la vida útil de los dispositivos conectados a la red [Espín-Delgado et al., 2021]. Además, las frecuencias supra-armónicas podrían ser responsables de generar disturbios que afectan el desempeño de los sistemas de control o mediciones provenientes de medidores inteligentes, interferir con las redes de comunicación y aumentar el estrés térmico de dispositivos y equipos, reduciendo como consecuencia su vida útil [Rönnberg et al., 2017a]. Por su parte, el creciente incremento de dispositivos como vehículos eléctricos y generadores foto-voltaicos incrementan las emisiones supra-armónicas en redes de baja tensión y causan la degradación y pérdida de eficiencia en equipos y los sistemas eléctricos de potencia [Slangen et al., 2020b]. Los sistemas de comunicación que utilizan la red eléctrica para transmitir información en el rango de 9 kHz a 95 kHz pueden presentar degradación de la transmisión de datos debido a las emisiones supra-armónicas concurrentes [Moreno-Munoz et al., 2015]. Además, existen reportes de impactos negativos debido a fuentes supra-armónicas en dispositivos como sistemas de medición [Leferink et al., 2016], capacitores electrolíticos [Darmawardana et al., 2019] y envejecimiento acelerado en cables de media tensión [Espín-Delgado et al., 2020].

Por otra parte, el estado actual de las normas internacionales regulatorias indican que el fenómeno supra-armónico no se encuentra actualmente regulado [Rönnberg et al., 2018] [Commission et al., 2003]. Existen trabajos importantes en curso encaminados a establecer regulaciones específicas a frecuencias supra-armónicas que permitan fijar límites en la calidad de la energía suministrada a los consumidores. Se espera que en los próximos años se establezcan límites de distorsión supra-armónica similares a los que ya se tienen desde hace varias décadas para el rango de frecuencias armónicas.

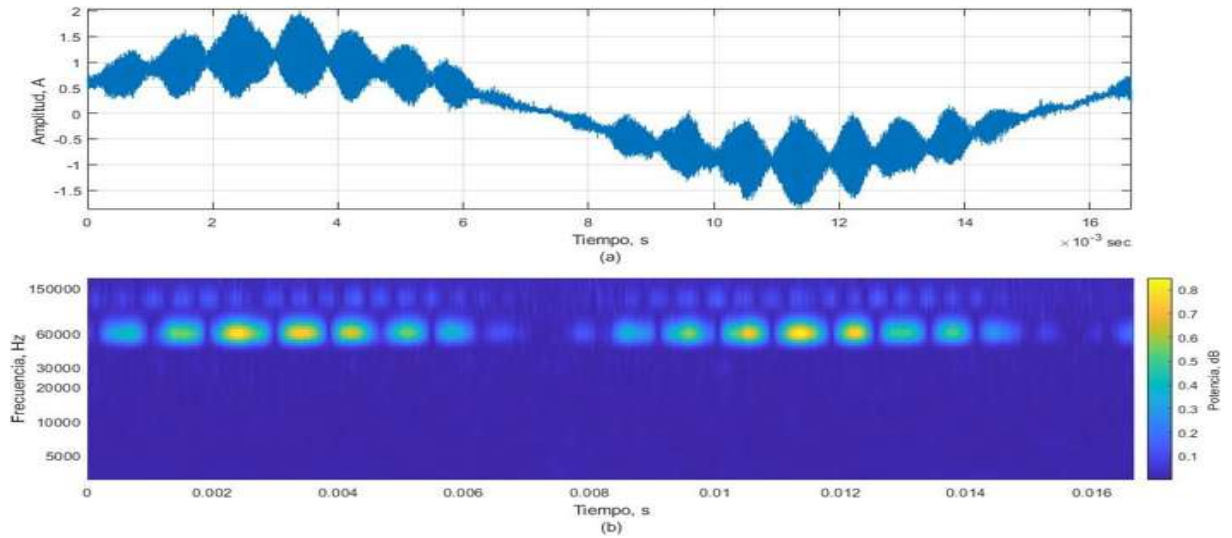


Figura 1.1: Corriente en luminaria LED. a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Escalograma.

Para describir a las frecuencias de alto orden se utiliza el termino armónico junto con el prefijo supra para describir componentes en rango de frecuencia de 2 kHz a 150 kHz. Este rango de frecuencia está determinado desde el armónico 40 hasta el armónico 3,000. Por lo tanto, para una frecuencia fundamental de 50 Hz se tiene un rango de frecuencia de 2 kHz a 150 kHz. La emisión de componentes en este rango de frecuencia no es nueva, tanto los ingenieros y los constructores de equipo electrónico tienen conocimiento de estas emisiones desde hace algunas décadas. Sin embargo, la cantidad de investigación dirigida a este rango de frecuencia es muy limitada. Algunas fuentes de generación de estas componentes supra-armónicas son las siguientes [Rönnberg and Bollen, 2017]:

- Convertidores industriales (9 kHz a 150 kHz).
- Oscilaciones en torno a muescas de conmutación (hasta 10 kHz).
- Luminarias (hasta 20 kHz).
- Cargadores de vehículos eléctricos, rango de emisión (15 kHz a 100 kHz).
- Inversores fotovoltaicos (4 kHz a 20 kHz).
- Dispositivos domésticos (2 kHz a 150 kHz).
- Comunicación por linea eléctrica (9 kHz a 95 kHz).

La introducción de la electrónica de potencia y las válvulas autoconmutadas ha provocado una transición de frecuencias armónicas a supra-armónicas. Los fabricantes de dispositivos eléctricos y electrónicos han diseñado sus productos para satisfacer los límites de emisión armónica establecidos por las normas de cada país. Sin embargo, esto provoca emisiones a frecuencias más altas (Supra-armónicas).

1.2. Revisión de estado del arte

Los sistemas eléctricos de potencia modernos incorporan diversos sistemas basados en convertidores de electrónica de potencia operando a altas frecuencias tales como plantas generadoras de energía renovable [Sun et al., 2019], redes de transmisión de potencia [Yang et al., 2018] y microrredes [Tapia and García, 2013]. Además, se han desarrollado sistemas multiterminal Voltage Source Converter-High Voltage Direct Current (VSC-HVDC, por sus siglas en inglés) tanto en nivel de transmisión como en distribución, así como también controladores Voltage Source Converter-Flexible AC Transmission Systems (VSC-FACTS, por sus siglas en inglés) [Acha et al., 2019]. La versatilidad del VSC ha llevado a su amplia adopción en diversas aplicaciones en sistemas de potencia, observándose problemas de estabilidad reportadas previamente en la forma de resonancias probablemente amortiguadas en el bus de C.C. entre los convertidores de alta frecuencia y el cable de transmisión de C.C. en un enlace VSC-HVDC de dos terminales [Zhang et al., 2010]. Además, desde hace varias décadas ha surgido un creciente interés por identificar las causas de la presencia de armónicos atípicos y resonancias en sistemas de potencia basados en controladores de electrónica de potencia. Por ejemplo, el enlace VSC-HVDC back-to-back de Eagle Pass localizado en la frontera de México y Estados Unidos falló su operación poco tiempo después de su puesta en funcionamiento. Investigaciones posteriores a esta falla revelaron la existencia de altos niveles de distorsión. Esta distorsión fue presente en múltiplos de la frecuencia de conmutación del VSC y esta fue amplificada debido a una resonancia local en la red. La distorsión se encontró a una frecuencia de 12.4 kHz con amplitudes entre 13 % y el 40 % de la tensión fundamental. Los estudios realizados concluyen que cuanto mayor sea la frecuencia de la tensión supra-armónica mayor será la probabilidad de falla y la elevación de la temperatura en los puntos de conexión de los conductores. El envejecimiento de los conductores ocurre porque los materiales resistivos clasificados por tensión tienen inherentemente alta conductividad a frecuencias supra-armónicas, esto da como resultado la aparición de puntos calientes en la superficie de la capa [Espín-Delgado et al., 2020].

1.2.1. Instrumentos de medición de supra-armónicos

En principio, las mediciones de supra-armónicos podrían realizarse con las herramientas de caracterización tradicionales usadas para analizar armónicos. Sin embargo, la distorsión de frecuencias de alto orden es intrínsecamente diferente a la distorsión armónica. La emisión armónica está constituida por un conjunto de formas de onda cuya frecuencia es un entero múltiplo de la frecuencia fundamental de la red eléctrica. Por su parte, los supra-armónicos se refieren a emisiones más allá del rango armónico, pero no necesariamente son múltiplos de la frecuencia fundamental de la red eléctrica.

En [Agudelo Martínez, 2020] se implementa un instrumento de medición de voltaje y corriente con la finalidad de detectar componentes supra-armónicas generadas por luminarias LED. La señal de voltaje que alimenta a las luminarias se crea en la plataforma de programación de Matlab. Esta señal se procesa con un convertidor digital/analógico y un amplificador. El instrumento de medición utiliza un sensor de corriente, un sensor de voltaje y un sistema de adquisición de datos DEWETRON-2600. Las mediciones se realizaron con una duración de 1 segundo y se procesaron sub-señales de 200 ms, utilizando una frecuencia de muestreo de 1,000,000 muestras/s y utilizando un filtro pasa bajas con frecuencia de corte de 300 kHz. Para analizar estas señales de voltaje y corriente se utiliza la transformada rápida de Fourier y la transformada de Fourier de tiempo corto. En esta contribución se detectaron componentes supra-armónicas en los rangos de 2 kHz a 9 kHz y de 30 kHz a 95 kHz.

En [Amaripadath et al., 2018] se describe el diseño de un sistema de medición supra-armónico en el rango de 2 kHz a 150 kHz en escenarios de operación real de la red eléctrica considerados para el diseño. El sistema de medición fue diseñado para medir componentes fundamentales y supra-armónicas. Se utilizan sensores de corriente basados en bobinas de Rogowski. El medidor implementado consta de 4 canales, 2 canales para la señal de tensión y 2 canales para la señal de corriente. La contribución de este documento se centra en la implementación del sistema de medición, el cual fue validado y puesto en marcha para confirmar que el sistema está operando correctamente. Los resultados son comparados con los valores obtenidos por un analizador de calidad de la energía. Las pruebas de puesta en servicio validan la capacidad del sistema para ser utilizado para mediciones de frecuencia fundamental y componentes supra-armónicas.

En [Rönnberg et al., 2018] se presenta la medición y caracterización de la emisión supra-armónica de tensión en 6 diferentes redes europeas y 7 diferentes redes norteamericanas de baja tensión. Este estudio se enfoca solamente al rango supra-armónico de 2 kHz a 150 kHz. Las mediciones se realizaron con monitores PQube3, ya que estos dispositivos permiten ac-

ceder a los datos de forma remota mediante una página web. Los resultados muestran que los valores son más altos en América del Norte en comparación con Europa. Por ejemplo, el promedio de distorsión supra-armónica total (TSHD) en Europa varía entre 0.09 % y 0.43 %, mientras que en Americana del Norte el promedio de TSHD varía entre 0.09 % y 0.56 %. Además, se presenta una discusión que sirve como guía para una futura estandarización de los niveles supra-armónicos de tensión, ya que presenta valores obtenidos en diferentes países y continentes.

En [García et al., 2020] se desarrolla un instrumento virtual de medición, con la finalidad de medir las componentes espectrales de la señal de tensión y corriente. Se analizan tres diferentes cargas no lineales tales como un cargador de teléfono móvil, una lámpara fluorescente y un monitor de PC. Se utiliza un sensor de tensión LEM LV25-P y un sensor de corriente LEM LA25-NP, los sensores son alimentados por una fuente de CD Phillips PE 1542 y se diseña un circuito acondicionador para la señal de tensión y señal de corriente. Se utiliza una tarjeta de adquisición de datos NI USB6210 con una capacidad de muestreo máxima de 250,000 muestras/s y una resolución de 16 bits. El entorno de programación para el desarrollo del instrumento virtual, se realiza en la plataforma de programación gráfica de Labview. Se utiliza la FFT para procesar una ventana de muestreo de 1 segundo. Los resultados se reportan en el dominio de la frecuencia y se analiza el contenido armónico de las señales aplicando parte de la normativa vigente en España. El análisis de frecuencias se divide en los rangos de 0 Hz 2 kHz y de 2 kHz 9 kHz.

1.2.2. Supra-armónicos en lámparas LED

La proliferación de cargas monofásicas basadas en electrónica de potencia provoca la distorsión de tensión y corriente en el rango de 2 kHz a 150 kHz. Una de las principales fuentes de distorsión de la onda de tensión y corriente a alta frecuencia son las lámparas LED. Estas lámparas operan no solo como cargas sensibles a la presencia de supra-armónicos sino también como fuentes de perturbaciones electromagnéticas en este rango de frecuencia. En [Martínez and Pavas, 2015] se presenta la medición y caracterización de los niveles de emisión supra-armónicos causados por dispositivos de iluminación LED, CFL y lámparas incandescentes, con consumo de potencia menores 85 W. Se utiliza un dispositivo de medición de la marca DEWETRON a una frecuencia de muestreo de 500,000 muestras/s. Se analizan 12 ciclos completos de la señal de corriente y se obtiene un rango de frecuencias observable de 0 Hz a 250

kHz. En este estudio se observó que las lámparas incandescentes cuentan con los niveles de emisión supra-armónica más bajas, mientras que las emisiones más altas de supra-armónicos provienen de la tecnología CFL, después de esta le sigue la tecnología LED.

De igual manera en [Agudelo-Martínez et al., 2018] se estudia la interacción de lámparas LED de baja potencia menores a 10 W dentro del rango supra-armónico de 2 kHz a 150 kHz. El experimento se realiza midiendo y simulando circuitos LED sin ninguna etapa de corrección de factor de potencia. En el experimento se detectan 4 bandas de frecuencia dentro del rango de 2 kHz a 200 kHz, en donde la primera banda contiene la frecuencia de conmutación entre 40 kHz y 65 kHz del controlador Buck que alimenta a la lámpara LED. Se observó que el comportamiento en el dominio del tiempo es bastante similar entre mediciones y simulaciones. Sin embargo, al aplicar la transformada de Fourier en el dominio de la frecuencia los resultados obtenidos son similares en un rango de frecuencia de 0 Hz a 30 kHz en mediciones y simulaciones, pero las mediciones en rangos supra-armónicos no son similares a los obtenidos por las simulaciones. Se concluye que para obtener resultados adecuados en el rango supra-armónico se requiere mejorar los modelos de simulación.

En [Sakar et al., 2019] se estudia el impacto de los supra-armónicos en la intensidad de la luz de las lámparas LED. Estas lámparas son expuestas a perturbaciones supra-armónicas de prueba, de estos experimentos se observan 3 fenómenos que impactan la intensidad de la luz, bloqueo posterior causado por voltajes supra-armónicos, conducción intermitente dependiendo de la impedancia supra-armónica del controlador y corriente de recuperación inversa del diodo a mayor frecuencia. En determinadas condiciones, la presencia de supra-armónicos en la forma de onda de tensión aplicada a las lámparas LED pueden conducir a la producción de parpadeo visible de dichas lámparas. Además, algunas lámparas pueden producir ruido audible. En [Khokhlov et al., 2019], se investiga el proceso de aumento de temperatura en los circuitos de los equipos de iluminación modernos, causada por la emisión supra-armónica, así como el estrés térmico del condensador electrolítico en las lámparas LED. Las mediciones se llevan a cabo por medio de un instrumento de registro de transitorios el cual mide tensión y corriente, posteriormente los datos son enviados a Matlab para ser analizados. Las lámparas LED son tanto víctimas como fuentes de perturbaciones en el rango de frecuencia de 2 kHz a 150 kHz. Es por esto que la prueba de inmunidad para este rango de frecuencia es importante debido a la posible degradación del rendimiento de la intensidad de la luz con lámparas LED. En [Singh et al., 2017, Singh et al., 2021] se analizan estos problemas causados por componentes supra-armónicas. Para llevar a cabo este experimento se utilizó un equipo especializado para superponer distorsión de alta frecuencia en la señal de tensión, esta señal fue aplicada al

equipo bajo prueba, lámpara LED. Se concluye que el parpadeo de estas lámparas puede aumentar hasta 10 veces en valor debido a la presencia de tal distorsión en la señal de voltaje. El parpadeo de las lámparas LED aumenta con un aumento en la amplitud de la alta distorsión de frecuencia. Durante la prueba de inmunidad de algunas lámparas LED, se observó que el ruido emanaba de algunas de las lámparas, este fenómeno se puede atribuir a la mecánica y resonancias eléctricas dentro del circuito del controlador LED. Es por esto que los estándares de parpadeo deben de tener en cuenta tal distorsión o al menos mencionar esto como una fuente de parpadeo visible para el ser humano.

1.2.3. Supra-armónicos en fuentes de generación de energía renovables

En la actualidad los sistemas de generación de energía a partir de fuentes de energía renovables utilizan convertidores de electrónica de potencia con alta frecuencia de conmutación. Estos convertidores provocan distorsiones de tensión y corriente en un rango de frecuencia superior a 2 kHz. Como consecuencia se pueden presentar problemas en el funcionamiento óptimo en los sistemas de medición de energía de la red eléctrica. Por ejemplo, en [Novitskiy et al., 2018] se analiza una red real de media tensión en Alemania con el objetivo de analizar la propagación de las componentes supra-armónicas generadas por fuentes de generación renovables tales como parques fotovoltaicos y parques eólicos. Se utilizan dos sistemas de medición ubicados en dos puntos diferentes de la red de MT a un voltaje nominal de 20 kV. Esta red contiene una planta eólica y múltiples plantas fotovoltaicas distribuidas en toda la red. Los instrumentos de medición son de la marca Sirius-HS y se operan a una frecuencia de muestreo de 400,000 muestras/s y una ventana de análisis de 10 ciclos. De los resultados mostrados se observaron las emisiones correspondientes al parque eólico emitiendo componentes de frecuencia a 2.5 kHz y los inversores fotovoltaicos emitiendo componentes a frecuencias de 5.9 kHz y 6.1 kHz. Por otra parte, en [Mohos and Ladányi, 2018] se investiga la emisión supra-armónica no intencionada de un parque fotovoltaico. Este parque consta de 50 módulos fotovoltaicos con sus inversores individuales. En el experimento se llevaron a cabo 3 mediciones en diferentes puntos del parque. Estas mediciones se realizaron por medio de un registrador de datos multifuncional Swemet MFA 600 y las señales se pueden visualizar por medio del software MCS real spectrum analyzer. La medición de la corriente se hace con dos pinzas amperimétricas de la marca ETS-Lindgren y Miniflex CA-MA200 y se procesan ventanas de tiempo de 200 ms. Los resultados reportados indican frecuencias supra-armónicas en 16 kHz y su múltiplo en 32 kHz.

En [Recinos, 2018] se muestran los resultados obtenidos de la medición supra-armónica durante la puesta en marcha de una planta solar de 5 MWA en una red de distribución de 13 kV. Se utiliza un analizador de redes PSL modelo PQube y los resultados se analizan en términos de la norma salvadoreña hasta el armónico 50 y con la norma IEC 61000-4-30 para el armónico 125. Los resultados indican la presencia de contaminación supra-armónica en el rango de 4.5 kHz y 5.5 kHz. En un estudio reportado en [Novitskiy et al., 2019] se instalaron medidores Sirius-Hs y Wesense en una red de distribución de MT/BT real en Alemania. Esta red contiene plantas de generación eólicas conectadas a la red de MT y plantas de generación fotovoltaicas tanto en MT como BT. En este estudio se detectaron componentes supra-armónicas en señales de tensión generadas por los parques fotovoltaicos y eólicos. Los resultados muestran emisiones supra-armónicas correspondientes al parque eólico en torno a la frecuencia de 2.5 kHz y emisiones en torno a la frecuencia de 16.1 kHz estas correspondientes a las plantas fotovoltaicas.

En el trabajo reportado en [Jian et al., 2019] se propone un modelo detallado en PSCAD del inversor fotovoltaico conectado a la red con la finalidad de estudiar las características de transmisión y propagación supra-armónica. Se modela el sistema fotovoltaico, el control del inversor y se analiza la influencia de los principales parámetros del sistema fotovoltaico tales como intensidad de radiación solar, temperatura de operación y frecuencia de conmutación del inversor. Finalmente se verifica la exactitud del modelo comparándolo con los datos medidos en campo. Los resultados de la simulación son coherentes con los resultados medidos. Esta comparación se realizó comparando el espectro de frecuencias del modelo del inversor fotovoltaico y las mediciones realizadas en campo.

En [Carneiro et al., 2020] se reportan mediciones en 4 sitios de instalaciones de sistemas fotovoltaicos, Las mediciones se realizaron con un equipo RohdeSchwarz RTM3004 de 4 canales y 10 bits-ADC. Se utilizaron ventanas de análisis de 1 ciclo, 3 ciclos y 60 ciclos. Los datos fueron analizados en la plataforma de Matlab y el espectrograma se obtuvo con la transformada de Fourier de corta duración. Se observó que la distorsión en el rango de frecuencia 2-150 kHz se encuentra vinculada a la frecuencia de conmutación de los inversores de 20 kHz.

1.2.4. Supra-armónicos en cargadores de vehículos eléctricos

La distorsión de la forma de onda de tensión y corriente aumenta con el aumento de la penetración de cargas de vehículos eléctricos (EV). En el trabajo reportado en [Misra, 2014] se estudia el impacto de los vehículos eléctricos en las distorsiones armónicas de una red de distribución. El modelo del sistema de distribución se desarrolla en OpenDSS, en donde los

EV son representados como cargas y fuentes de corrientes armónicas. Los datos del sistema de distribución corresponden al sistema de prueba IEEE 34-nodos. Los estudios se realizaron con baja, moderada y alta penetración de EV. Los estudios muestran que el THD en voltaje y corriente podría aumentarse hasta un 9.5 % y un 50 %, respectivamente. Estos valores de THD son significativamente mayores que los límites definidos por la norma IEEE. En el trabajo reportado en [Meyer et al., 2016] se presenta el análisis de la distorsión de corriente armónica y supra-armónica de 19 cargadores de vehículos eléctricos de diferentes marcas disponibles en el mercado alemán y europeo. El sistema de medición consta de un banco de prueba, un dispositivo de medición y un programa de medición automatizado desarrollado en Matlab, el cual utiliza una frecuencia de muestreo de 1,000,000 muestras/s. Los resultados indican un incremento de las magnitudes supra-armónicas en el rango de frecuencia de 0 a 50 kHz, lo cual se debe a que las diferentes marcas de cargadores producen componentes armónicas y supra-armónicas a diferentes frecuencias.

Por otro lado, en [Streubel et al., 2019] se describe la emisión supra-armónica de una estación de carga de vehículos eléctricos mediante la identificación de patrones irregulares y detectando anomalías en el espectro armónico de alta frecuencia, estas mediciones son procesadas localmente en el medidor enviando los resultados al operador. De los resultados se observa que existen dos rangos de frecuencias importantes en los cuales se concentra la mayor parte de contaminación supra-armónica, los cuales son de 40 kHz a 80 kHz y de 0 kHz a 10 kHz, resaltando por su importancia el de 40 a 80 kHz.

En [Cassano et al., 2019] se realiza el modelado de un cargador de batería de vehículo eléctrico que emite componentes supra-armónicas. Estas simulaciones se realizan en la plataforma de Matlab/Simulink con la ayuda de la caja de herramientas de Simscape Power Systems. Desafortunadamente el modelo resultó ser demasiado lento para ser práctico, requiriendo varios minutos de cálculo. Se observó que la emisión supra-armónica se encuentra a 15.1 kHz con magnitud de 0.3682 A. En [Slangen et al., 2020a] se presentan algunos aspectos causados por los vehículos eléctricos de baterías de uso común en los países bajos. Se realizan mediciones tanto de tensión como de corriente, haciendo uso del instrumento de adquisición de datos Dewetron Dewe 800 con una frecuencia de muestreo de 300,000 muestras/s y el procesamiento de estas señales se realiza en Matlab y Dewesoft. Este trabajo presenta especial atención al rango supra-armónico ya que la emisión en este rango está solo parcialmente estandarizada y los vehículos eléctricos de baterías son una fuente conocida de supra-armónicos. Los estudios realizados con un cargador de vehículo eléctrico indican la presencia de emisiones en torno a las frecuencias de 10 kHz, 20 kHz y 40 kHz, tanto en la señal de voltaje como de corriente.

1.2.5. Métodos de procesamiento

Existen diferentes métodos de procesamiento de señales que han sido aplicados para estudiar supra-armónicos de tensión y corriente. La propagación de componentes supra-armónicas en redes eléctricas con presencia de plantas de generación eólicas y fotovoltaicas usando la transformada rápida de Fourier se reportan en [Zolett and Leborgne, 2020, Recinos, 2018]. Los resultados muestran que las bandas supra-armónicas están directamente relacionadas con la modulación PWM de los inversores de potencia. Los efectos en términos de supra-armónicos causados por los cargadores de los vehículos eléctricos de uso común en los países bajos se analizan en [Slangen et al., 2020a]. El espectro de frecuencia tanto de voltaje como de corriente se determina mediante la transformada rápida de Fourier. De igual manera en [Chicco et al., 2015], se obtienen resultados experimentales tomados de sistemas fotovoltaicos. El enfoque de procesamiento desarrollado en este trabajo se apega a las recomendaciones de las normas IEC 61000-4-7 y IEC 61000-4-30, el cual consiste en procesar una ventana de tiempo de 200 ms con la transformada discreta de Fourier. En el trabajo realizado en [Martínez and Pavas, 2015], se presentan las mediciones y caracterización de los niveles de emisión causados por dispositivos electrónicos de uso común. En el documento se proponen dos técnicas de procesamiento de señales para identificar las componentes supra-armónicas. Se analizan 12 ciclos de la señal de corriente utilizando la transformada discreta de Fourier y la transformada de Fourier de tiempo corto.

Por su parte, la transformada Wavelet es una herramienta matemática que presenta la característica de descomponer una señal en diferentes escalas, con diferentes niveles de resolución de la señal. Este enfoque proporciona un análisis en tiempo y frecuencia.

En [Rodrigues and de Lima Tostes, 2018] se presenta un caso de estudio de la medición de supra-armónicos en un establecimiento comercial bancario. Este análisis fue desarrollado utilizando Wavelet Packets Transform, lo cual permitió observar una periodicidad en las señales característica de los supra-armónicos y se determinaron las bandas de frecuencia asociadas a la frecuencia de conmutación. En [Lodetti et al., 2020] se hace uso del método de descomposición en paquetes Wavelet para el análisis de distorsión armónica y supra-armónica. La eficiencia de este método ha sido comparada con el método IEC 61000-4-7 ya que en este se utiliza la transformada discreta de Fourier para el análisis de las señales. Ambos métodos analizan 10 ciclos de la señal. El método propuesto por IEC 61000-4-7 utiliza una etapa de filtrado y un análisis de armónicos y supra-armónicos por separado. Sin embargo, el método propuesto en [Lodetti et al., 2020] evita la etapa de filtrado y realiza un análisis armónicos y supra-armónicos simultáneo. Se ha demostrado que la implementación de un filtro previo al

procesamiento, como sugiere la norma IEC, mejora el comportamiento del método para estimaciones supra-armónicas. Sin embargo, el método propuesto no se ve afectado por voltajes residuales bajos durante cualquier tipo de evento de tensión. Esta característica hace que el método sea adecuado para una monitorización continua de los armónicos independientemente del valor de la amplitud del voltaje. En [Sandrolini and Mariscotti, 2020] se analiza la contaminación producida por fuentes de alimentación conmutadas. En este trabajo se conectan estas cargas a la red a través de una red de estabilización de impedancia de línea, se hace uso de un filtro pasa altas con frecuencia de corte de 1 kHz, un filtro pasa bajas con frecuencia de corte de 2 MHz y la señal es muestreada a una frecuencia de 10,000,000 muestras/s. Los autores utilizan el método de Wavelet Packets Transform para la detección de componentes supra-armónicas. De los resultados obtenidos en dicho experimento se detectan frecuencias supra-armónicas generadas por las fuentes de alimentación conmutadas a frecuencias de 44 kHz y su múltiplo a 88 kHz, respectivamente.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es el estudio de la presencia de frecuencias supra-armónicas en redes eléctricas de distribución de media tensión mediante el desarrollo de una metodología avanzada de medición basada en herramientas de análisis en el marco de referencia tiempo-frecuencia.

1.3.2. Objetivos particulares

- Implementar una plataforma de medición de voltaje y corriente en el rango supra-armónico.
- Desarrollar una etapa de post-procesamiento de las señales de voltaje y corriente medidas basado en la transformada Wavelet discreta.
- Estudiar la presencia de fenómenos supra-armónicos en redes eléctricas de distribución provocados por dispositivos como lámparas LED, vehículos eléctricos y generadores fotovoltaicos.

1.4. Hipótesis

El estudio del fenómeno supra-armónico en redes eléctricas de distribución requiere de la aplicación de herramientas novedosas de análisis en el dominio tiempo-frecuencia ya que las herramientas tradicionales de análisis de estado estable en el marco de la frecuencia presentan limitaciones debido a la característica variante en el tiempo del fenómeno supra-armónico.

1.5. Justificación

Desde el año 2006, se han establecido límites para la prohibición de la producción, importación y venta de lámparas incandescentes en al menos 37 países debido al gran consumo de energía [Strack et al., 2014]. En México a partir del primero de enero de 2014 está prohibido la venta de lámparas incandescentes. Por lo tanto, se ha prestado mucha atención para reemplazar el sistema de iluminación convencional con sistemas de iluminación de bajo consumo. El impacto que provoca en las redes de distribución el reemplazo de lámparas que poseen características lineales por otras con alto contenido de armónicos y supra-armónicos es un tema que preocupa a muchos investigadores del área de calidad de la energía.

Los vehículos eléctricos y la energía fotovoltaica han surgido como una alternativa atractiva en los sectores del transporte y de energía para contrarrestar el creciente agotamiento de las fuentes de energía fósil y la emisión de gases de efecto invernadero. Sin embargo, la aparición de vehículos eléctricos y generadores fotovoltaicos en la red de distribución podrían provocar impactos adversos debido a la contaminación de alta frecuencia producida por controladores de electrónica de potencia. Esto provocaría la degradación de la calidad de la energía en las redes de distribución. La inyección de armónicos y supra-armónicos por parte de estas cargas no lineales deforman la forma de onda sinusoidal de voltaje. Por lo tanto, las empresas suministradores de energía requieren mantener la forma de onda del voltaje cercana a una sinusoidal, ya que muchas cargas que son conectadas al sistema eléctrico son sensibles y depende de un voltaje de suministro sinusoidal. Si se permite que la calidad de la energía del sistema se deteriore, este tipo de cargas sensibles no operarían adecuadamente o podrían sufrir daño permanente.

El fenómeno supra-armónicas es un tópico nuevo en el área de la calidad de la energía. En este sentido, es importante verificar la presencia de dichas componentes de frecuencia de alto orden en las redes eléctricas ya que los fabricantes de dispositivos electrónicos y eléctricos han diseñado sus productos para satisfacer los límites de emisión armónica establecidos por las

normas de cada país, pero sin prestar atención a emisiones a frecuencias supra-armónicas ya que se carece de normas que establezcan límites para emisiones supra-armónicas. Por lo tanto, es importante desarrollar instrumentos de medición y metodologías de análisis del fenómeno supra-armónico que permitan estudiar el impacto de la proliferación de dispositivos no lineales operando a altas frecuencias en las redes eléctricas de distribución y de potencia.

1.6. Metodología

En esta tesis se desarrollará una plataforma de medición de frecuencias supra-armónicas en redes de distribución de bajo voltaje. La implementación del sistema de medición se realizará con sensores de voltaje LEM LV25-P y de corriente LEM LA55-P con un ancho de banda de 200 kHz. La adquisición de las señales de alta frecuencia se realizará mediante una tarjeta de adquisición de datos analog discovery 2. Este instrumento de adquisición permitirá muestrear las señales de voltaje y corriente hasta una frecuencia de 100,000,000 muestras/s. El dispositivo de adquisición se controlará desde un programa de adquisición desarrollado en la plataforma de programación de Matlab.

Una vez obtenidas las señales se realizará el procesamiento de las señales en el ambiente de Matlab. Se desarrollarán metodologías para el procesamiento de las señales basadas en la transformada discreta de Fourier, la transformada de Fourier de tiempo corto, la transformada Wavelet continua y el análisis Wavelet multi-resolución. Se estudiarán dispositivos basados en controladores de electrónica de potencia que generan un espectro de frecuencia en el rango supra-armónico, tales como lámparas LED, cargadores de vehículos eléctricos e inversores fotovoltaicos. Los casos de estudio incluirán emisión simple y emisión múltiple.

1.7. Descripción de los Capítulos

La introducción, descripción del problema, revisión del estado del arte, objetivos, hipótesis, justificación y metodológica de este trabajo se describen en este capítulo.

En el capítulo 2 se introducen conceptos relacionados a la calidad de la energía. Se analizan las componentes de frecuencias en el rango armónico debajo de 2 kHz. Además, se clasifican las fuentes de distorsión armónica y sus efectos. De igual forma se analizan las componentes de frecuencias en el rango de 2 kHz y 150 kHz. Por último, se describen los estándares existentes para armónicos.

El diseño e implementación del sistema de medición de supra-armónicos se describen en el capítulo 3. Se presentan los sensores de voltaje y corriente utilizados, así como el dispositivo de adquisición de datos. Además se presenta la validación del sistema de medición.

En el capítulo 4 se abordan las herramientas de procesamiento que se utilizan en esta tesis. En particular se describen las herramientas de procesamiento de señales basadas en la transformada de Fourier y Wavelet.

La identificación de componentes armónicas y supra-armónicas emitidas por dispositivos tales como cargadores de vehículos eléctricos, generadores foto-voltaicos y lámparas LED se reportan en el capítulo 5.

La identificación de componentes armónicas y supra-armónicas emitidas por la operación combinada de dispositivos basados en controladores de electrónica de potencia operando a altas frecuencias se reportan en el capítulo 6. De igual forma, se presentan las pruebas obtenidas por las diferentes herramientas de procesamiento y se muestran comparaciones.

Las conclusiones de este trabajo y las recomendaciones para trabajos futuros se presentan en el capítulo 7.

1.8. Contribuciones

Las contribuciones de este trabajo son:

- Implementación de una plataforma de medición en el rango supra-armónico basado en tarjetas de adquisición de datos y sensores de bajo costo.
- Estudios comparativos de emisiones supra-armónicas basado en herramientas de análisis en el dominio de la frecuencia y tiempo-frecuencia tales como Transformada de Fourier, Transformada de Fourier de Tiempo Corto, Transformada Continua Wavelet y Análisis Wavelet Multi-resolución.
- Detección de emisiones supra-armónicas en las redes eléctricas de baja tensión del sistema eléctrico nacional.
- Estudio de emisiones supra-armónicas simples y múltiples asociadas a la operación de lámparas LED, cargadores de vehículos eléctricos y generadores fotovoltaicos.

Capítulo 2

Supra-armónicos

Una parte importante de los estudios de la calidad de la energía de fenómenos en estado estable se centran en la distorsión armónica en un rango de frecuencia de 0 a 2 kHz. En el área de la ingeniería eléctrica se define armónico como una componente sinusoidal que posee una frecuencia múltiplo entero de una frecuencia fundamental. Sin embargo, la proliferación de equipos basados en electrónica de potencia tales como fuentes de alimentación conmutadas, iluminación LED, inversores fotovoltaicos y cargadores de vehículos eléctricos generan contaminación armónica tanto por debajo como por encima de la frecuencia de 2 kHz [Rönnberg, 2013] [Agudelo Martínez, 2020] y [Larsson, 2011].

2.1. Emisiones entre 2 kHz y 150 kHz

En área de la calidad de la energía, la frecuencia fundamental del sistema eléctrico es de 50 o 60 Hz y los múltiplos enteros hasta el múltiplo 40 de esta frecuencia fundamental están definidos como armónicos [Rönnberg and Bollen, 2017]. La distorsión de corriente y voltaje en el rango entre 2 kHz y 150 kHz es un tópico muy actual de investigación en el área de calidad de la energía. El término armónicos de alta frecuencia se utiliza también para describir señales en el rango de frecuencias de 2 kHz a 150 kHz. Sin embargo, la Unión Internacional de Telecomunicaciones ya utiliza el término alta frecuencia para definir el rango de frecuencias entre 3 kHz y 30 MHz [Rönnberg and Bollen, 2017]. El término emisión de baja frecuencia se utiliza dentro de los estándares de la IEEE EMC para referirse a frecuencias por debajo de 150 kHz, mientras que dentro de IEC el término baja frecuencia se utiliza para referirse a componentes de frecuencia por debajo de 9 kHz [Rönnberg et al., 2017b]. La distorsión de forma de onda tanto de voltaje como de corriente entre 2 kHz y 150 kHz ha sido nombrada recientemente como supra-armónicos [Bollen et al., 2014a]. Los supra-armónicos también son conocidos como dis-

Tabla 2.1: Factor de potencia sugerido por el estándar IEC 62612-2018 para lámparas LED.

Potencia	Factor de potencia de desplazamiento
$2 \text{ W} \geq P$	No limite
$2 \text{ W} < P \leq 5 \text{ W}$	$\cos \theta \geq 0.5$
$5 \text{ W} < P \leq 25 \text{ W}$	$\cos \theta \geq 0.7$
$25 \text{ W} < P$	$\cos \theta \geq 0.9$

torsiones de forma de onda de alta frecuencia [Agudelo Martínez, 2020],[Bollen et al., 2014b].

Las fuentes principales de emisión supra-armónica que se han identificado son los convertidores de electrónica de potencia y los transmisores de comunicación que utilizan la red eléctrica. La introducción de válvulas autoconmutadas ha cambiado las emisiones de frecuencias armónicas a supra-armónicas. Los dispositivos eléctricos y electrónicos se han diseñado para satisfacer los límites de emisión en frecuencias armónicas. Sin embargo, esto provoca emisiones a frecuencias más altas [Rönnberg and Bollen, 2017].

A continuación, se mencionan algunos ejemplos de dispositivos que son fuentes de generación de supra-armónicos.

2.1.1. Lámparas LED

Las lámparas LED presentan un comportamiento similar a una carga inductiva y, por lo tanto, requieren corrección del factor de potencia. Los circuitos manejadores de lámparas LED se equipan con capacitores que comúnmente se utilizan en circuitos de corrección de factor de potencia. Por lo tanto, el factor de potencia de la lámpara LED depende de la calidad del circuito corrector del factor de potencia. En la mayoría de las lámparas LED se utiliza circuito de filtro pasivo ya que es muy económico. Los circuitos de corrección de factor de potencia basados en filtrado activo representan la solución óptima, pero son menos utilizados debido al costo adicional. Los fabricantes de lámparas LED destinan el uso de circuitos de filtrado activo exclusivamente a lámparas LED de mayor potencia. En la Tabla 2.1 se describen los valores recomendados por el estándar IEC 62612-2018 para lámparas LED en términos del factor de potencia de desplazamiento [Kotschenreuther, 2018]. Se puede apreciar que se establece un factor de potencia de desplazamiento mayor a 0.9 únicamente para lámparas LED con una potencia mayor a 25 W.

Por otra parte, las lámparas LED deben de cumplir con los requerimientos de distorsión armónica establecidos en el estándar IEEE 519-2014. Normalmente, no es posible cumplir con dichos requerimientos de distorsión de la corriente sin aplicar técnicas de corrección de factor de potencia. Las Figuras 2.1 describen las topologías más comúnmente implementadas en los circuitos manejadores de lámparas LED. En la Figura 2.1 (a) se puede apreciar el circuito manejador de lámparas LED con corrector de factor de potencia pasivo, mientras que la Figura 2.1 (b) muestra un circuito corrector de factor de potencia activo con una etapa de conversión. Por su parte, la Figura 2.1 (c) presenta el circuito manejador con filtrado activo con dos etapas de conversión, el cual consiste de un filtro de interferencia electromagnética (EMI, por sus siglas en inglés), un rectificador CA/CC, un corrector de factor de potencia y un convertidor CC/CC tipo Flyback. La incorporación de la etapa de corrección de factor de potencia permite incrementar la eficiencia y mejorar la forma de onda de la corriente de entrada de los manejadores de las lámparas LED. Sin embargo, la frecuencia de conmutación utilizada en los convertidores CC/CC introducen distorsión en las formas de onda en el orden de kHz. El filtro EMI tiene como finalidad eliminar dichas componentes de frecuencia de alto orden, sin embargo, este filtro no es capaz de eliminar en su totalidad dichas componentes de frecuencia [Rönnberg and Bollen, 2012].

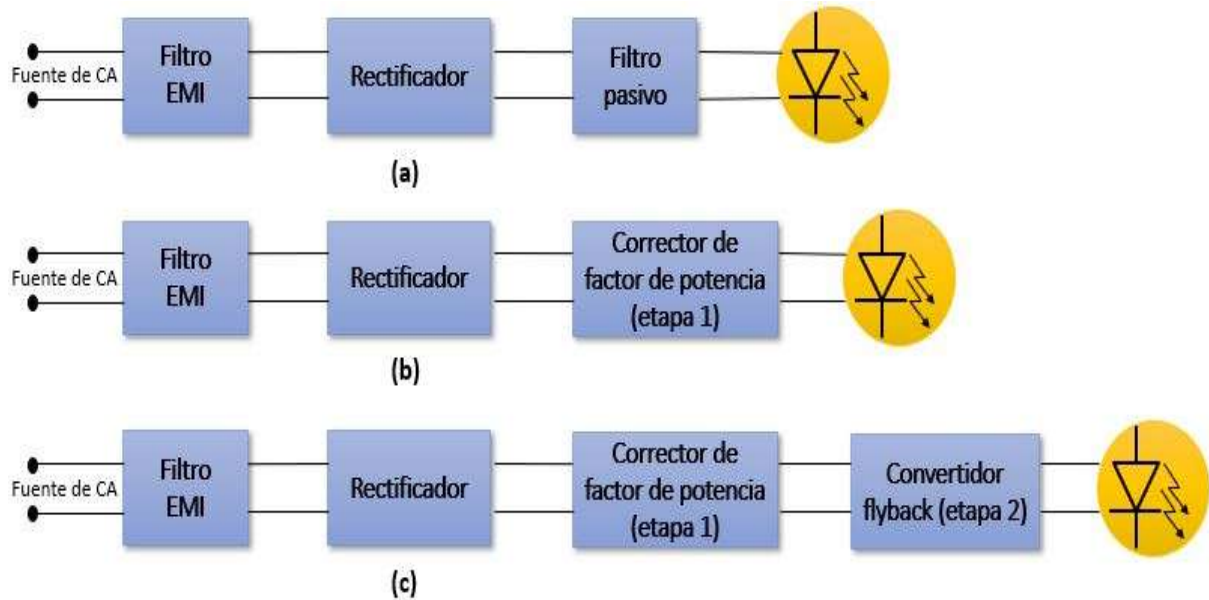


Figura 2.1: Topologías de circuitos manejadores de lámparas LED: a) Circuito con corrector de factor de potencia pasivo, b) circuito con una etapa de conversión y corrector de factor de potencia activo y c) circuito con dos etapas de conversión y corrector de factor de potencia activo.

2.1.2. Vehículo eléctrico

La presencia de vehículos eléctricos aumenta cada vez más con el paso de los años. Esto conlleva de igual forma un incremento de la operación de cargadores eléctricos en las redes de distribución, especialmente de bajo voltaje. Los vehículos eléctricos necesitan corriente continua para cargar sus baterías y, por lo tanto, un rectificador de alta potencia para convertir la corriente alterna de la red eléctrica a corriente continua. Esta conversión se lleva a cabo en el propio vehículo o en una estación de corriente continua de carga rápida. Estos cargadores son una fuente de perturbaciones supra-armónicas debido a que hacen uso de frecuencias de conmutación en este rango de frecuencias de 2 kHz a 150 kHz [Kaptan and CANSEVER, 2018] [Slangen et al., 2020a]. Por lo tanto, los vehículos eléctricos podrían tener un impacto significativo en la calidad de la energía de la red eléctrica.

La arquitectura típica de un cargador de vehículo eléctrico nivel I se muestra en la Figura 2.2. Se puede apreciar que este cargador consta de un rectificador CA-CC y dos etapas de conversión. La primera etapa contiene un corrector de factor de potencia, el cual se encarga de regular la corriente de entrada de CA para que sea proporcional y en fase con la forma de onda del voltaje de entrada de CA. La segunda etapa de conversión consiste de un convertidor CC/CC aislado que se encarga de generar los modos de carga a corriente y voltaje constantes [Pai et al., 2014]. Tanto la etapa 1 como la etapa 2 operan a altas frecuencias de conmutación.

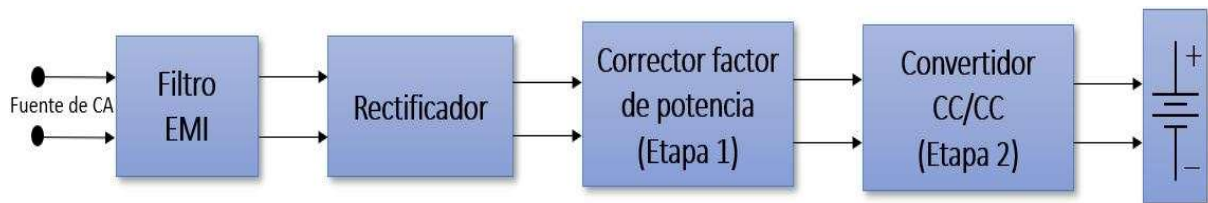


Figura 2.2: Diagrama esquemático de cargador de vehículo eléctrico nivel I.

2.1.3. Inversor fotovoltaico

La generación de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables ha tenido un crecimiento considerable en los últimos años. Estas fuentes de generación utilizan convertidores de electrónica de potencia, los cuales permiten acoplar la fuente de generación renovable a la red eléctrica. Un ejemplo de estas fuentes de energía es la generación fotovoltaica. En estos sistemas de generación, el inversor fotovoltaico juega un papel muy importante ya que permite el intercambio de potencia entre la fuente fotovoltaica y la red eléctrica. Estos inversores utilizan modulación por ancho de pulso (PWM) para la generación del voltaje de C.A [Novitskiy et al., 2018] [Mohos and Ladányi, 2018]. El inversor fotovoltaico opera a altas frecuencias de conmutación y, por lo tanto, genera distorsión de la forma onda de voltaje y corriente en el lado de C.A. en el rango de kHz.

En la Figura 2.3 muestra el diagrama de un sistema fotovoltaico, el cual consta de paneles solares los cuales generan una corriente directa y ésta es conducida por un regulador de energía. Este regulador alimenta al inversor el cual consta de dos partes principales una de control y una de potencia. La salida del inversor es enviada a un transformador elevador y este se encuentra conectado a la red eléctrica. La acción de transformación en la etapa del inversor es la causante de componentes supra-armónicas a frecuencia alrededor de la frecuencias de conmutación del circuito de potencia. Esta frecuencia de conmutación está controlada por el circuito de control.

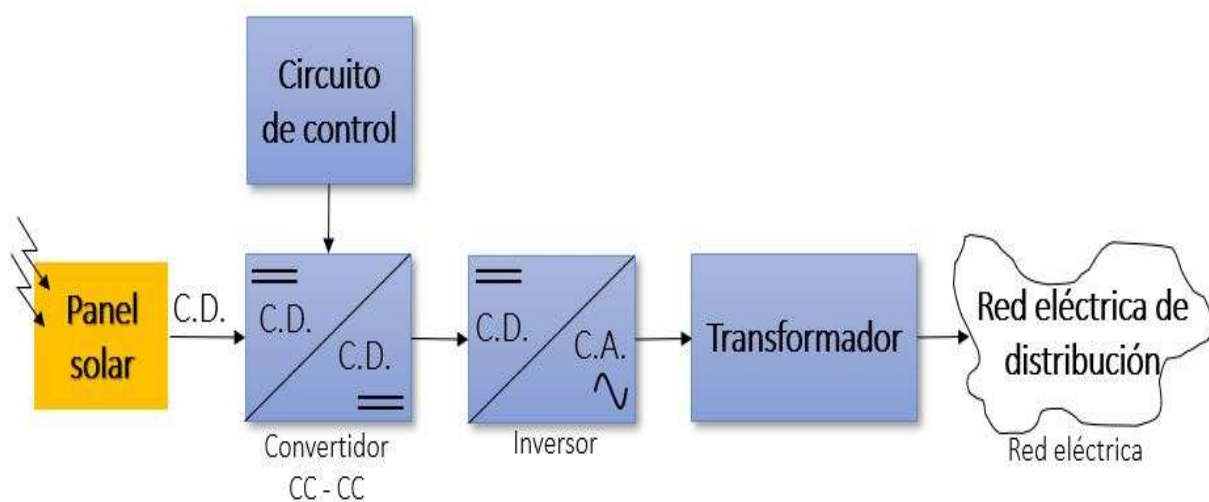


Figura 2.3: Diagrama esquemático de un sistema fotovoltaico.

2.2. Impacto de las emisiones entre 2 kHz y 150 kHz

Diferentes investigadores alrededor del mundo han reportado resultados sobre el origen, medición y detección de emisiones supra-armónicas generadas por diferentes dispositivos electrónicos. Por lo tanto, se han identificado algunas de las posibles consecuencias que provocan la emisión de supra-armónicos [Klatt et al., 2014], [Rönnberg et al., 2014] y [Agudelo Martínez, 2020].

- Aumento de la distorsión de la señal de corriente y voltaje
- Factor de potencia bajo
- Interferencia con las señales de comunicación (PLC)
- Reducción de la vida útil de dispositivos
- Resonancias en redes de baja tensión
- Mal funcionamiento de dispositivos de medición

Estos fenómenos se deben a la falta de compatibilidad electromagnética en el rango de frecuencia de 2 kHz a 150 kHz. Además, existe una falta de conocimiento sobre el impacto de estas emisiones en las redes eléctricas de distribución. Hasta hoy en día no existe una norma generalmente aceptada sobre límites de emisión, límites de inmunidad y niveles de compatibilidad en este rango supra-armónico.

2.3. Estándares de supra-armónicos

El rango de frecuencia menor de 2 kHz se aborda con detalle en los estándares internacionales actuales, mientras que el intervalo de 2 kHz a 150 kHz no se incluye adecuadamente. Existen estándares internacionales que cubren las frecuencias superiores a 150 kHz debido a las potenciales interferencias que pudieran surgir con emisiones de radio militares y públicas. El rango de frecuencia de 2 kHz a 150 kHz no ha recibido suficiente atención debido a la ausencia de fuentes de emisión y problemas en este rango de frecuencia. Sin embargo, es importante fomentar el desarrollo de estándares en este rango de frecuencias supra-armónicos debido al uso de la red eléctrica de potencia como red de comunicación y la incorporación masiva de equipo de electrónica de potencia con emisiones en este rango de frecuencias.

La Figura 2.4 describe el procedimiento propuesto en el estándar IEC 61000-4-7 para realizar mediciones de armónicos y supra-armónicos. Se puede apreciar que para realizar el análisis

de armónicos se procesan un total de 10 ciclos de la señal fundamental de 50 Hz, esta señal es pasada por un filtro pasa bajas y analizada utilizando la transformada discreta de Fourier. Para analizar contenido supra-armónico se procesa un total de 200 ms de la señal, esta señal es pasada por un filtro pasa altas y analizada por medio de la transformada discreta de Fourier.

La Figura 2.5 describe la serie del estándar IEC 61000 que cubre el fenómeno electromagnético. Estos estándares revisan aspectos tales como la terminología, técnicas de medición y guía para la instalación y mitigación. Además, en la Figura 2.5 se indican los estándares equivalentes en el IEEE que abordan el fenómeno electromagnético. Por ejemplo, el estándar IEC 61000-4-7 define la medición de armónicos e inter-armónicos para fuentes de alimentación y equipos. De igual forma, se describe el proceso de medición de armónicos y supra-armónicos en IEC 61000-4-7. Cabe mencionar que el estándar IEC 61000-4-7 solo describe los procesos de medición de supra-armónicos, pero no se establecen límites supra-armónicos debidamente regulados. En el anexo del IEC 61000-4-19 se definen algunos niveles de inmunidad, en donde se indican los límites para la banda supra-armónica. Sin embargo, estos niveles mencionados en el anexo del IEC 61000-4-19 se mencionan como un ejemplo de partida para su estandarización a futuro.

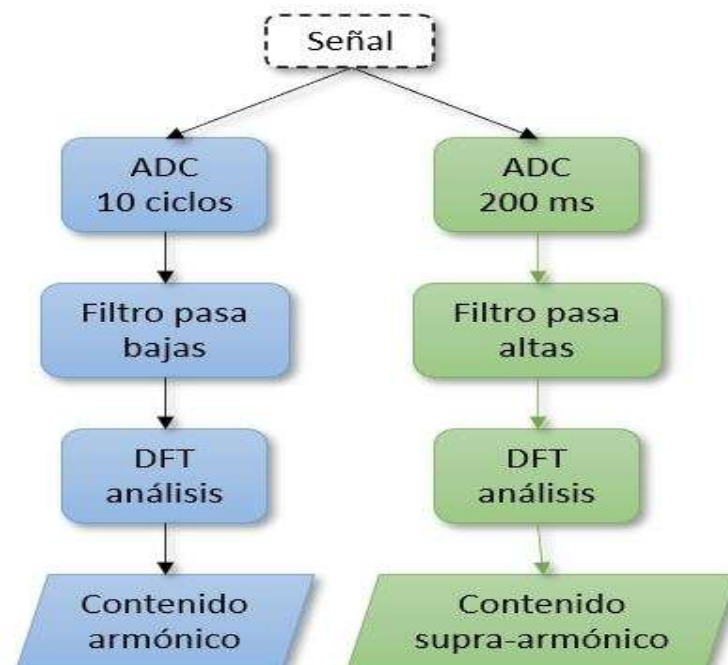


Figura 2.4: *Análisis de armónicos y supra-armónicos según IEC 61000-4-7.*

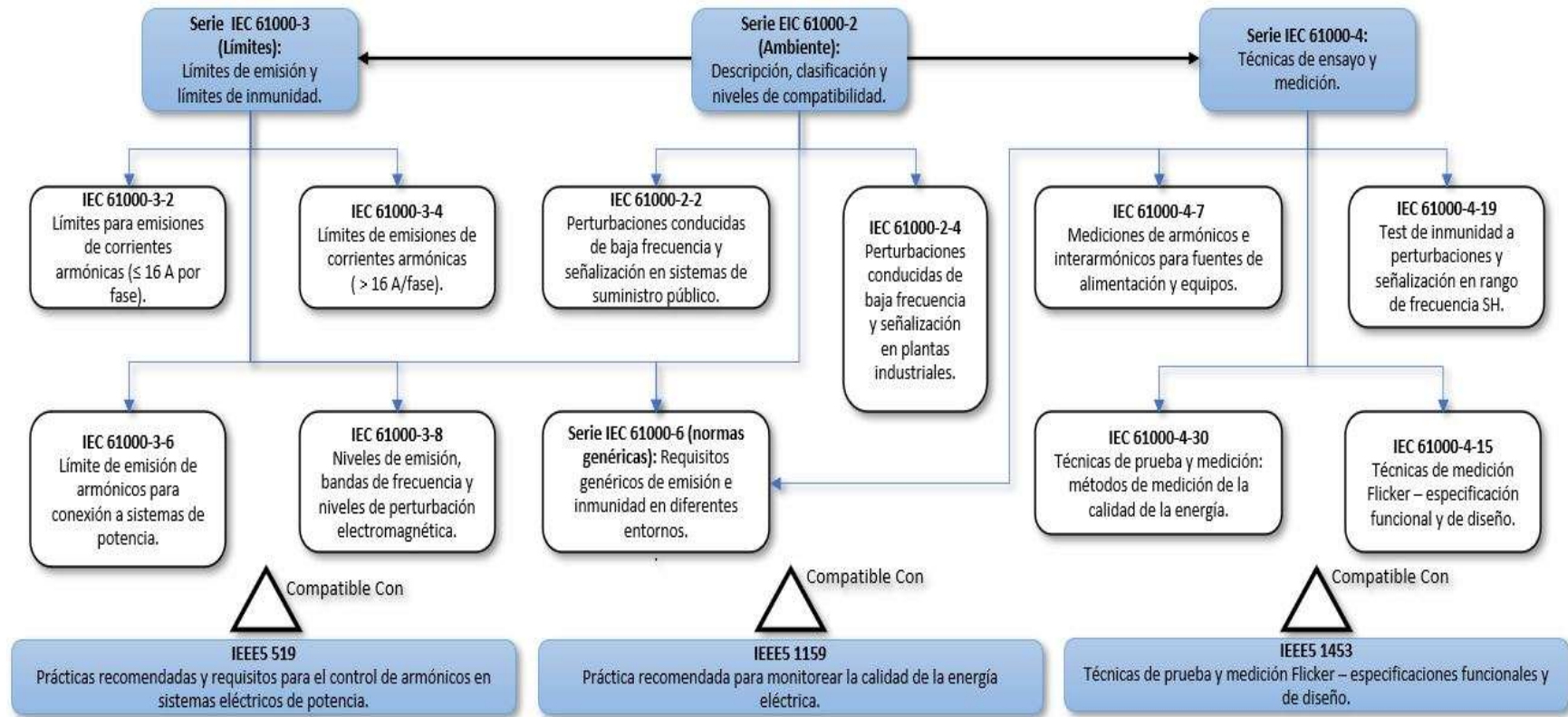


Figura 2.5: Estándares internacionales del IEC y IEEE.

2.4. Sumario

En este capítulo se describieron algunas fuentes de generación de distorsión supra-armónicas. En particular se analiza la estructura en términos de convertidores de electrónica de potencia operando a altas frecuencias en dispositivos como lámparas LED, vehículos eléctricos y generadores fotovoltaicos, ya que este trabajo se analizaran estas tres cargas mencionadas. Además, se describe la serie del estándar IEC 61000 que cubre el fenómeno electromagnético y se indican los estándares equivalentes en el IEEE que abordan el fenómeno electromagnético. En particular se hace énfasis en el estándar IEC 61000-4-7 ya que este estándar describe el procedimiento de medición de emisiones supra-armónicas.

Capítulo 3

Sistema de medición de supra-armónicos

En este capítulo se aborda el diseño del sistema de medición de supra-armónicos implementado en este trabajo. Además, se describen los componentes seleccionados tales como sensores y el sistema de adquisición de datos que permite abarcar el rango de frecuencia supra-armónico. Este sistema de medición se validará con los resultados obtenidos con un Osciloscopio Tektronix.

3.1. Plataforma de medición

La Figura 3.1 ilustra los componentes principales del sistema de medición de supra-armónicos desarrollado en este trabajo. Se puede apreciar que las señales de voltaje y corriente de la red eléctrica de distribución se procesan en el sistema de adquisición de datos. Es precisamente este sistema de adquisición de datos es el que se encarga de sensar, acondicionar y convertir las señales eléctricas analógicas a señales digitales de tal forma que una computadora las pueda procesar para extraer la información relevante.

El sistema de adquisición de datos desarrollado en este trabajo consiste de dos elementos básicos:

- Hardware de adquisición de datos: incluye los sensores de corriente y de voltaje, así como la fuente de C.C. que alimenta a los sensores. Además, incluye la tarjeta de adquisición de datos.
- Software de adquisición de datos: se utiliza el Toolbox de adquisición de datos de Matlab.

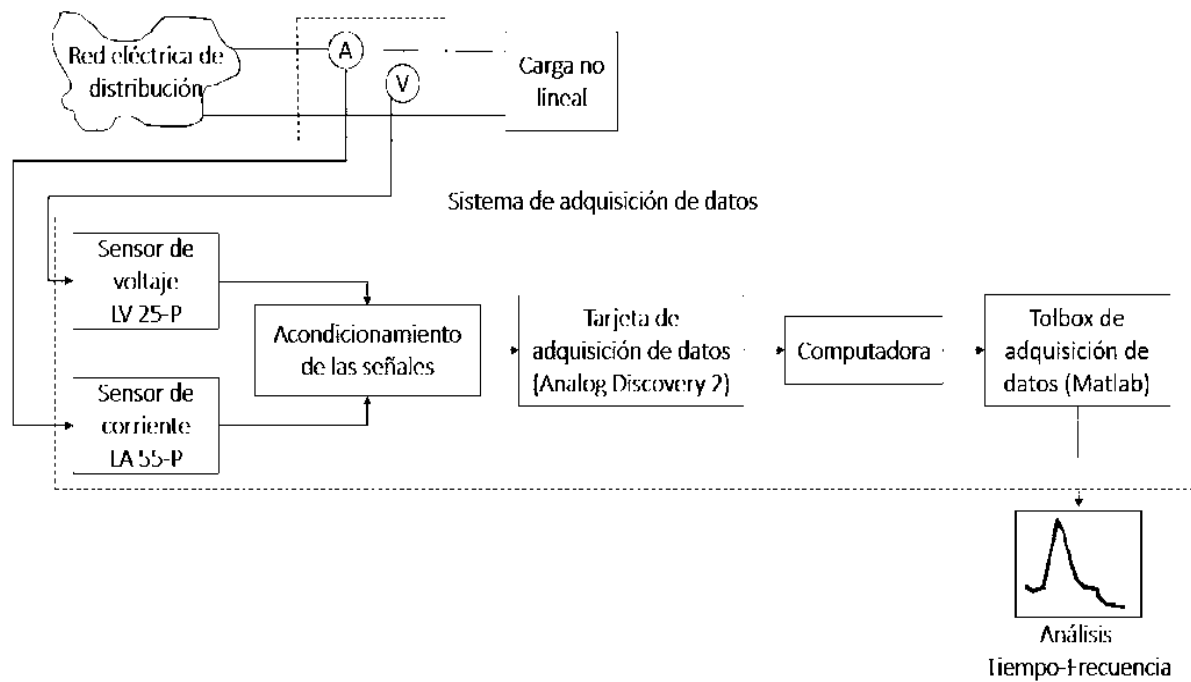


Figura 3.1: Sistema de medición de supra-armónicos

3.2. Sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos se basa en el uso del osciloscopio digital Analog Discovery 2, el cual se utiliza en este trabajo como tarjeta de adquisición de datos. Las características principales de este instrumento de medición se describen en la Tabla 3.1.

El osciloscopio digital Analog Discovery 2 es un instrumento multifunción que permite al usuario medir, visualizar, generar, registrar y controlar circuitos de señales mixtas de todo tipo. Este dispositivo cuenta con sondas de cable simples, las cuales conectan las entradas y salidas analógicas y digitales a un circuito. En este trabajo se hace uso del adaptador BNC de Digilent con la finalidad de evitar la interferencia y la inducción de ruido a las señales medidas. Para facilitar el uso del instrumento Analog Discovery 2 se cuenta con el Software WaveForms, el cual permite operarlo. Esta plataforma permite generar, registrar, visualizar e incluso analizar estas señales. En la Figura 3.2 (a) se observa el dispositivo de adquisición de datos Analog Discovery 2 utilizado en este trabajo y en la Figura 3.2 (b) se muestra el adaptador BNC el cual se conecta al Analog Discovery 2. Por otro lado, la plataforma de programación de Matlab es compatible con el dispositivo Analog Discovery. El conjunto de herramientas denominada "Data Acquisition Toolbox" permite realizar las siguientes tareas en Matlab:

- Leer datos por medio de los dos canales del Osciloscopio (entradas Analógicas).

- Controlar y generar datos desde los dos generadores de forma de onda (Salida Analógica).
- Configurar la frecuencia de muestreo.
- Determinar y mostrar la configuración del dispositivo Digilent Analog Discovery.

Tabla 3.1: Características del osciloscopio digital Analog Discovery 2.

Descripción	Características
Osciloscopio	2 canales, $\pm 25\text{ V}$, resolución 14 bits, frecuencia de muestreo 100 MS/s, impedancia de entrada $1\text{ M}\Omega$.
Generador de forma de onda	2 canales, resolución 14 bits, frecuencia de muestreo 100 MS/s, ancho de banda 12 MHz, rango de voltaje $\pm 5\text{ V}$, impedancia de entrada $1\text{ M}\Omega$.
Fuente de alimentación programable	2 canales, tensión de salida 0.5 V a 5 V o -0.5 V a -5 V , potencia máxima 500 mW total USB, corriente máxima 700 mA por canal usando alimentación externa.
Analizador digital lógico	16 canales, nivel lógico CMOS de $3.3\text{ V}/1.2\text{ V}$, frecuencia de muestreo 100 MS/s.
Analizador de red	1 Hz a 10 MHz.



(a) Analog Discovery 2



(b) Adaptador BNC

Figura 3.2: (a) Osciloscopio digital Analog Discovery 2 y (b) Adaptador BNC para Analog Discovery o 2.

3.3. Sensor de Voltaje: Transductor LEM LV25-P

En este trabajo se utiliza el sensor de voltaje LEM LV 25-P, el cual es un sensor de lazo cerrado basado en efecto Hall [LEM, 2021]. Este sensor provee aislamiento galvánico entre el circuito primario y secundario, adecuada precisión, ancho de banda e inmunidad contra interferencia externa. La corriente nominal RMS en el circuito primario es de 10 mA , mientras que el voltaje a ser medido en el primario puede variar desde 10 V hasta 500 V . La Figura 3.3 describe el diagrama esquemático del sensor de voltaje LEM LV 25-P. El Apéndice A detalla los cálculos realizados para diseñar el circuito del sensor de voltaje.

En la Figura 3.3 se puede observar el diagrama de conexión del transductor LV 25-P. La resistencia R_i representa la resistencia de disipación la cual deberá de ser de alta potencia, mientras que la resistencia R_m conectada en el devanado secundario constituye la resistencia de medición de bajo consumo de potencia. Los puntos $+HV$ y $-HV$ son los puntos de conexión del devanado primario a la red eléctrica en estudio. Las principales características de este transductor se sintetizan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Características principales del transductor LEM LV 25-P.

Características	Valor
Corriente nominal en devanado primario	10 mA .
Tensión nominal en devanado primario	$10 - 500\text{ V}$.
Corriente nominal en devanado secundario	25 mA .
Relación de transformación	$2,500 : 1,000$.
Temperatura ambiente de funcionamiento	$0 - 70\text{ }^{\circ}\text{C}$.
Tensión de alimentación	$\pm 15\text{ VCD}$.

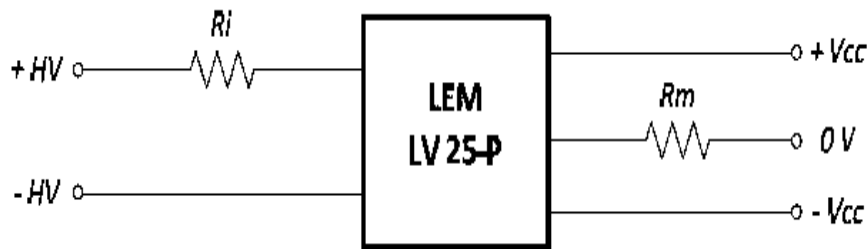


Figura 3.3: Diagrama esquemático del sensor de voltaje LEM LV 25-P.

3.4. Sensor de Corriente: Transductor LEM LA55-P

El sensor de corriente seleccionado en este trabajo es el LEM LA 55-P. Este sensor es de lazo cerrado basado en efecto Hall. La corriente nominal RMS en el circuito primario es de 50 A y posee un ancho de banda de C.C. a 200 kHz [LEM, 2018]. La Figura 3.4 describe el diagrama esquemático y el Apéndice B sintetiza los cálculos realizados para diseñar el circuito de este sensor de corriente. La Tabla 3.3 describe las características principales de este sensor de corriente. La Figura 3.5 describe la tarjeta de medición implementada en este trabajo con los sensores LEM LV 25-P y LEM LA 55-P, así como el transformador y la fuente de corriente directa que alimenta a ambos sensores. Las señales de salida de los sensores de voltaje y corriente son bipolares y varían entre -5V y +5V. Por su parte, la tarjeta Analog Discovery 2 recibe señales analógicas en el rango de ± 25 V.

Tabla 3.3: Características principales del transductor LEM LA 55-P.

Características	Valor
Corriente nominal del conductor primario	I_P 50 A.
Corriente nominal en devanado secundario	50 mA.
Relación de transformación	1 : 1,000.
Temperatura ambiente de funcionamiento	-40 +85 °C.
Tensión de alimentación	± 15 VCD.
Temperatura máxima del conductor principal	90 °C.
Ancho de banda de frecuencia	200 kHz.

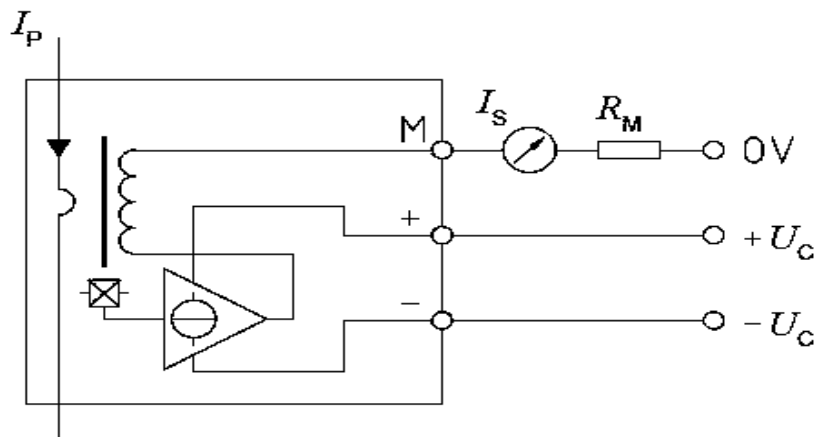


Figura 3.4: Diagrama esquemático del sensor de corriente LEM LA 55-P.

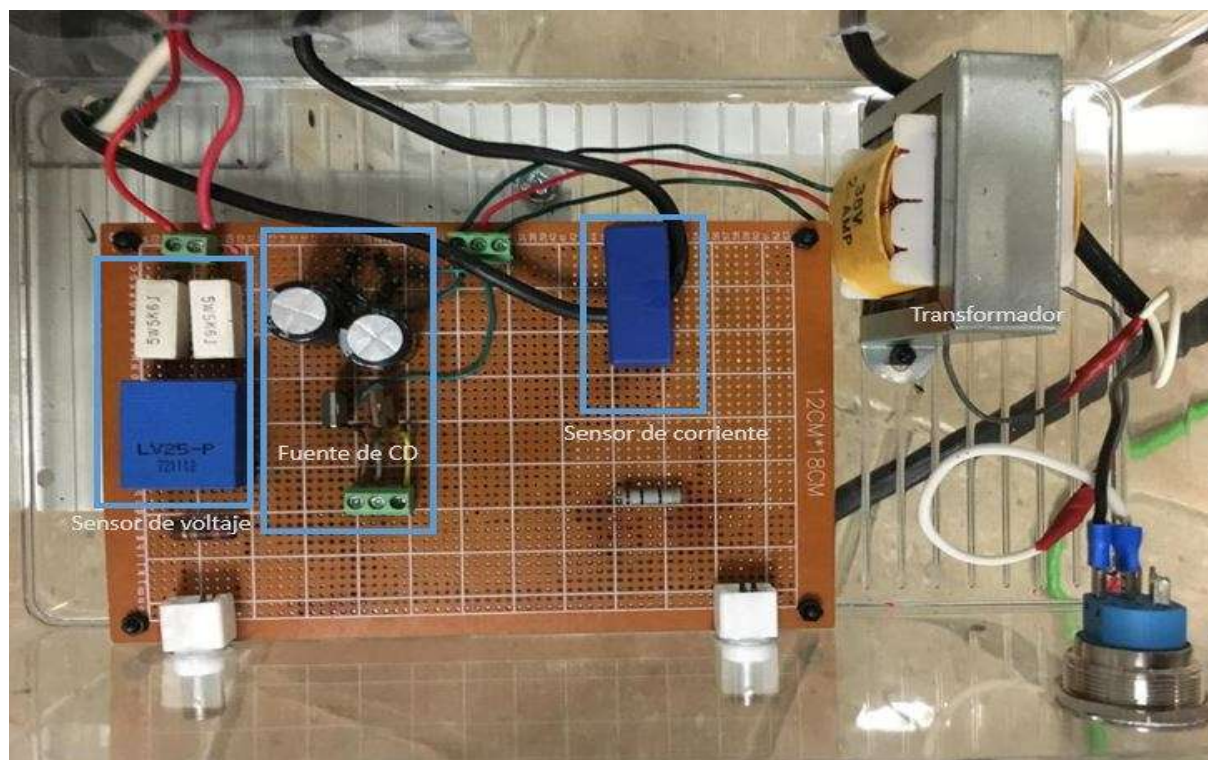


Figura 3.5: Tarjeta de medición implementada para la medición de voltaje y corriente

3.5. Validación del sistema de medición

Para llevar a cabo la validación del sistema de medición y corroborar su buen funcionamiento, se implementó un experimento basado en el uso del generador de señales BK PRECISION modelo 4070A y un Osciloscopio digital Tektronix modelo TDS 2014B. La Figura 3.6 describe el experimento de validación implementado en este trabajo.

Para llevar a cabo la validación del sistema de medición, se hace uso del dispositivo de adquisición de datos Analog Discovery 2. Se muestrea un ciclo completo de la señal sinusoidal generada por el generador de señales BK PRECISION usando la plataforma de Matlab y una frecuencia de muestreo de 960,000 muestras/s equivalente a 16,000 muestras por ciclo. Estas muestras son analizadas por medio de la transformada rápida de Fourier y los resultados obtenidos son comparados con los valores de magnitud y frecuencia que proporciona el Osciloscopio Tektronix.

Con la ayuda del generador de señales BK PRECISION se generan señales sinusoidales con frecuencias de 60 Hz, 50 kHz, 100 kHz y 150 kHz con amplitud de 2 V. Estas señales se muestrean a una frecuencia de 960 kHz y se analiza por medio de la transformada rápida de Fourier para un ciclo completo de la señal de 60 Hz. La Figura 3.7 reporta el espectro de frecuencia de cada señal analizada. Por ejemplo, la Figura 3.7 (a) indica la presencia de una

frecuencia de 60 Hz con una amplitud de 1.9220 V. Por su parte, las mediciones realizadas con el osciloscopio digital Tektronix se muestran en la Figura 3.8. Por ejemplo, para la señal de prueba de 60 Hz la cual se muestra en la Figura 3.8 (a) el osciloscopio digital Tektronix detecta una amplitud de la señal de 1.9800 V y una frecuencia de 60.0030 Hz. La Tabla 3.4 sintetiza los resultados comparativos obtenidos en términos del porcentaje de error entre las mediciones obtenidas con el osciloscopio digital Tektronix y el dispositivo Analog Discovery 2 con Matlab. Se puede apreciar que el error máximo observado en la frecuencia y la magnitud es de 0.16 % y 7.1 %, respectivamente.

Tabla 3.4: Comparación de mediciones obtenidas por los diferentes instrumentos de medición y porcentaje de error entre mediciones.

Señal de prueba	Tektronix TDS 2014B	Analog Discovery 2 y Matlab	%Error en frecuencia	%Error en magnitud
60 Hz, 2 V	60.0030 Hz, 1.9800 V	60.0000 Hz, 1.9220 V	$4,9997 \times 10^{-3}$	2.9292
50 kHz, 2 V	50.0001 kHz, 2.0000 V	49.9200 kHz, 1.9300 V	$160,19 \times 10^{-3}$	3.5000
100 kHz, 2 V	100.000 kHz, 2.0200 V	99.8400 kHz, 1.9030 V	$160,00 \times 10^{-3}$	5.7920
150 kHz, 2 V	150.000 kHz, 2.0000 V	149.8000 kHz, 1.8580 V	$133,33 \times 10^{-3}$	7.1000



Figura 3.6: Experimento de validación.

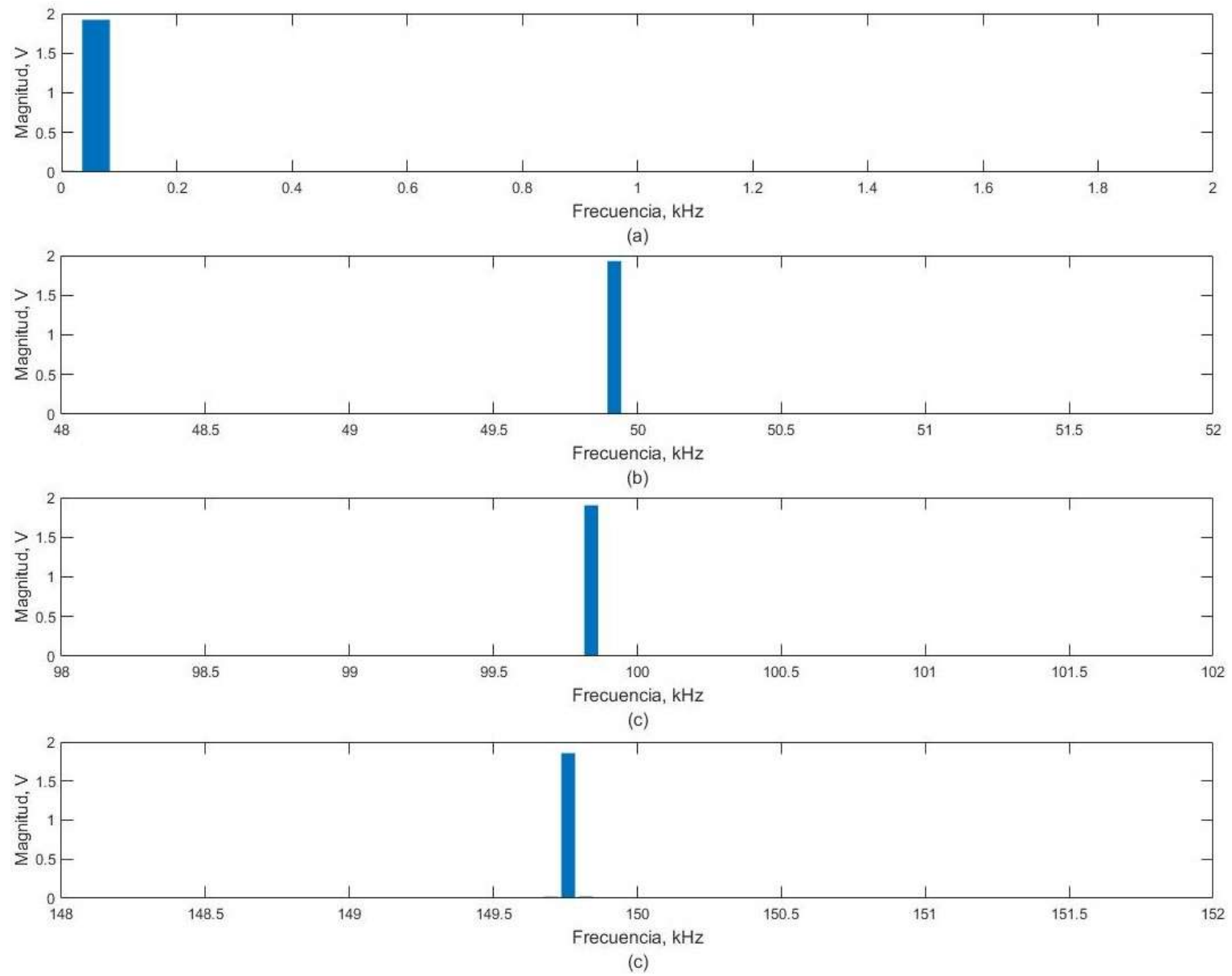


Figura 3.7: Espectros de frecuencia de las señales 60 Hz, 50 kHz, 100 kHz y 150 kHz con amplitud de 2 V.

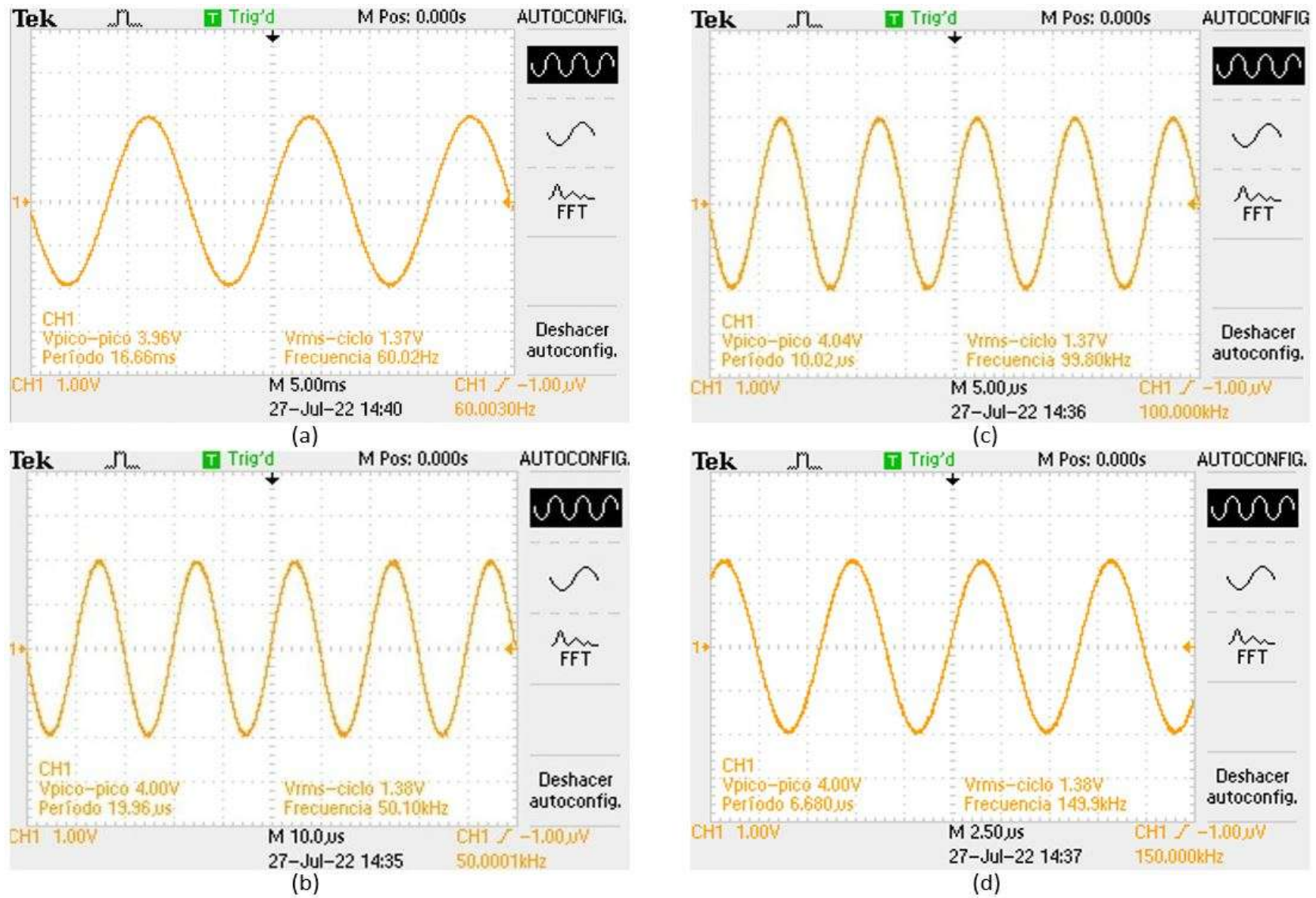


Figura 3.8: Capturas de pantalla de los valores obtenidos por el osciloscopio tektronix para las señal de 60 Hz, 50 kHz, 100 kHz y 150 kHz con amplitud de 2 V.

3.6. Conclusiones

En este capítulo se presenta el sistema de medición de frecuencias supra-armónicas desarrollado en este trabajo. Se utiliza como osciloscopio el dispositivo Analog Discovery 2, el cual permite muestrear la señal hasta a una frecuencia de 100 MS/s. Además, se describió la etapa de medición con los sensores de corriente y voltaje seleccionados. Por último, se presentó la validación del sistema de medición, con la finalidad de verificar su adecuada operación. Se generaron señales a diferentes frecuencias con ayuda de un generador de señales. Estas señales fueron alimentadas individualmente al Analog Discovery 2 y a un Osciloscopio digital Tektronix. Los resultados obtenidos por el analog discovery 2 y Matlab, fueron comparados con los resultados obtenidos por un Osciloscopio digital tektronix modelo TDS 2014B. Los resultados obtenidos indican discrepancias máximas de 0.16 % y 7.1 % en la frecuencia y en la amplitud, respectivamente. Es factible reducir estos porcentajes de error mediante la elevación de la frecuencia de muestreo. En este trabajo no se utiliza una frecuencia de muestreo mayor a 1,000,000 muestras/s, esto debido a que el dispositivo Analog Discovery 2 operando simultáneamente con Matlab, no nos permite utilizar una frecuencia de muestreo mayor.

Capítulo 4

Transformada Wavelet

Las señales de voltaje y corriente son medidas y capturadas en el dominio del tiempo. Sin embargo, el procesamiento de las señales capturadas para estudiar las emisiones supra-armónicas se realiza tanto en el dominio de la frecuencia como en el dominio tiempo-frecuencia. A continuación, se describen las herramientas de análisis utilizadas en este trabajo. La transformada de Fourier se ha convertido en la herramienta fundamental para el procesamiento digital de señales a partir del desarrollo de la versión conocida como transformada rápida de Fourier [Cooley and Tukey, 1965]. Esta importante herramienta de análisis permite determinar el espectro de frecuencia de una señal. Sin embargo, esta herramienta no es capaz de identificar el instante cuando aparecen las componentes de frecuencia en señales con un contenido armónico transitorio. Estas limitaciones se pueden resolver utilizando herramientas tales como la transformada de Fourier de tiempo corto y Wavelets [Navarrete Mejía et al., 2013].

4.1. Transformada de Fourier

La transformada de Fourier para una función continua $f(t)$ se define como,

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (4.1)$$

Con ayuda de la igualdad de Euler se tiene,

$$e^{j\omega} = \cos(\omega) + j\sin(\omega) \quad (4.2)$$

$$e^{-j\omega} = \cos(\omega) - j\sin(\omega) \quad (4.3)$$

De acuerdo a lo anterior se puede entender a la transformada de Fourier como una suma infinita de las componentes exponenciales complejas periódicas que forman a la señal original $f(t)$.

La versión discreta de la transformada de Fourier (DFT por sus siglas en inglés) se implementa mediante la transformada rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés). Para una señal discreta $f(n)$ con una cantidad de muestras N , el algoritmo FFT se define como,

$$F[\omega_k] = \sum_{n=0}^{N-1} f[n]e^{-j\omega_k n} \quad (4.4)$$

Donde ω_k representa la k -ésima muestra en frecuencia. Las corrientes y voltajes se procesan usando la FFT, en donde la resolución en la frecuencia se define como.

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (4.5)$$

y

$$N = \left(\frac{N_p}{f_1} \right) f_s \quad (4.6)$$

en donde,

f_s frecuencia de muestreo

f_1 frecuencia fundamental

N número total de muestras a analizar

N_p número de periodos muestreados

4.2. Transformada de Fourier de tiempo corto

La transformada de Fourier es una herramienta adecuada para identificar las componentes de frecuencia presentes en una señal periódica. Sin embargo, la transformada de Fourier no provee información sobre el instante en el tiempo en que ocurren cambios en la frecuencia. La transformada de Fourier de tiempo corto segmenta la señal y aplica la transformada de Fourier en cada segmento con el propósito de proveer información del tiempo. La transformada de Fourier a la frecuencia ω acotada a la ventana $g(t - u)$ se define como,

$$F(u, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t - u)e^{-j\omega t}dt \quad (4.7)$$

en donde $F(u, \omega)$ son los coeficientes de la transformada de Fourier de tiempo corto (STFT por sus siglas en inglés), u es el parametro que representa una traslación en el tiempo de la función ventana $g(t)$. La ventana $g(t - u)$ es una señal que permanece únicamente durante un intervalo definido, fuera de este intervalo su valor es nulo.

La transformada de Fourier de tiempo corto descompone las señales en un conjunto de formas de onda que poseen la misma resolución en el tiempo y frecuencia. Por lo tanto, esta herramienta de análisis es efectiva para señales que no requieran diferentes resoluciones

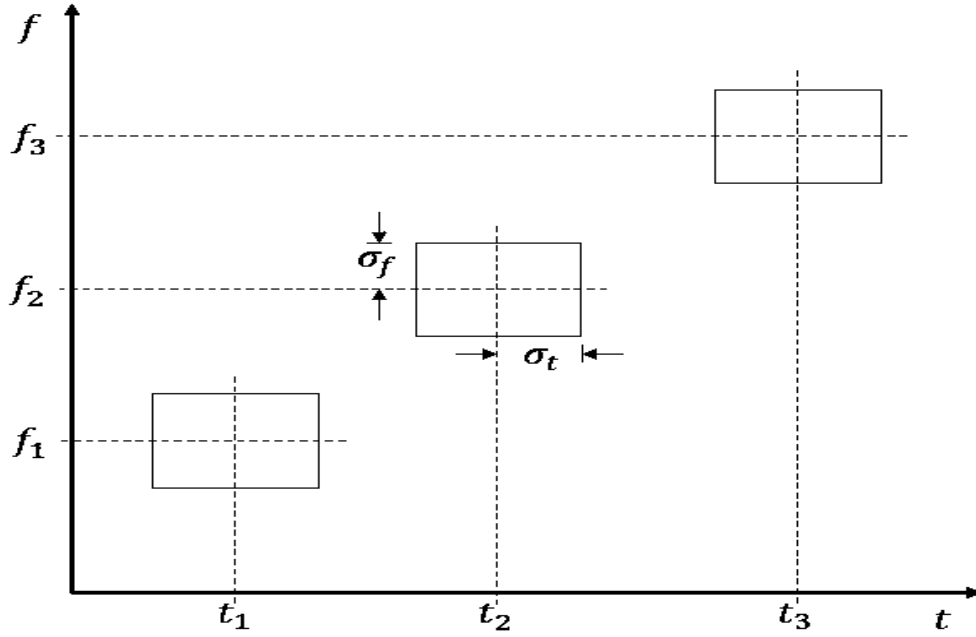


Figura 4.1: Rectángulo Heisenberg en el plano tiempo-frecuencia para la transformada de Fourier de tiempo corto.

en el dominio tiempo-frecuencia. La Figura 4.1 describe la resolución en el dominio tiempo-frecuencia de la transformada de Fourier de tiempo corto en términos de rectángulos Heisenberg. Los rectángulos Heisenberg tienen longitudes de $2\sigma_t$ y $2\sigma_f$. La elección de las longitudes σ_t y σ_f de la ventana es crucial ya que para valores de σ_t pequeños se tiene una buena resolución en el tiempo, pero una mala resolución en la frecuencia. Por el contrario, un valor de σ_t grande produce una mala resolución en el tiempo, pero una buena resolución en la frecuencia.

4.3. Ventanas de procesamiento

El análisis en la frecuencia basado en la Transformada Rápida de Fourier se beneficia de la aplicación de ventanas de procesamiento. Al aplicar una ventana de análisis sobre una señal, esto es equivalente a aplicar una convolución en la frecuencia de los espectros de la ventana y la señal. Existe varias funciones de ventanas que se utilizan comúnmente tales como Kaiser, Bartlett, Blackman, Hamming, Hanning y Rectangular [Putranto et al., 2019].

La ventana rectangular se define como.

$$W_R(n) = \begin{cases} 1, & -\frac{N-1}{2} \leq n \leq \frac{N-1}{2} \\ 0, & \text{resto} \end{cases} \quad (4.8)$$

La ventana de Hamming se define como,

$$W_H(n) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad (4.9)$$

en donde, N = frecuencia de muestreo y como constantes $a_0 = 0,42$ y $a_1 = 0,5$.

Por ejemplo, en la Figura 4.2 se muestra la señal de corriente demandada por 5 luminarias LED de la marca IPSA. En la Figura 4.2 (a) se muestran 12 ciclos de la señal de corriente, mientras que en la Figura 4.2 (b) se muestra esta señal aplicando una ventana rectangular. Se observa que la señal original no es afectada al aplicar la ventana rectangular. Por su parte, la Figura 4.2 (c) muestra la aplicación de la ventana Hamming. Se observa que los extremos de la señal original se atenúan. Esta modulación de amplitud resulta en bandas laterales en su espectro, estas bandas laterales reducen la resolución de frecuencia.

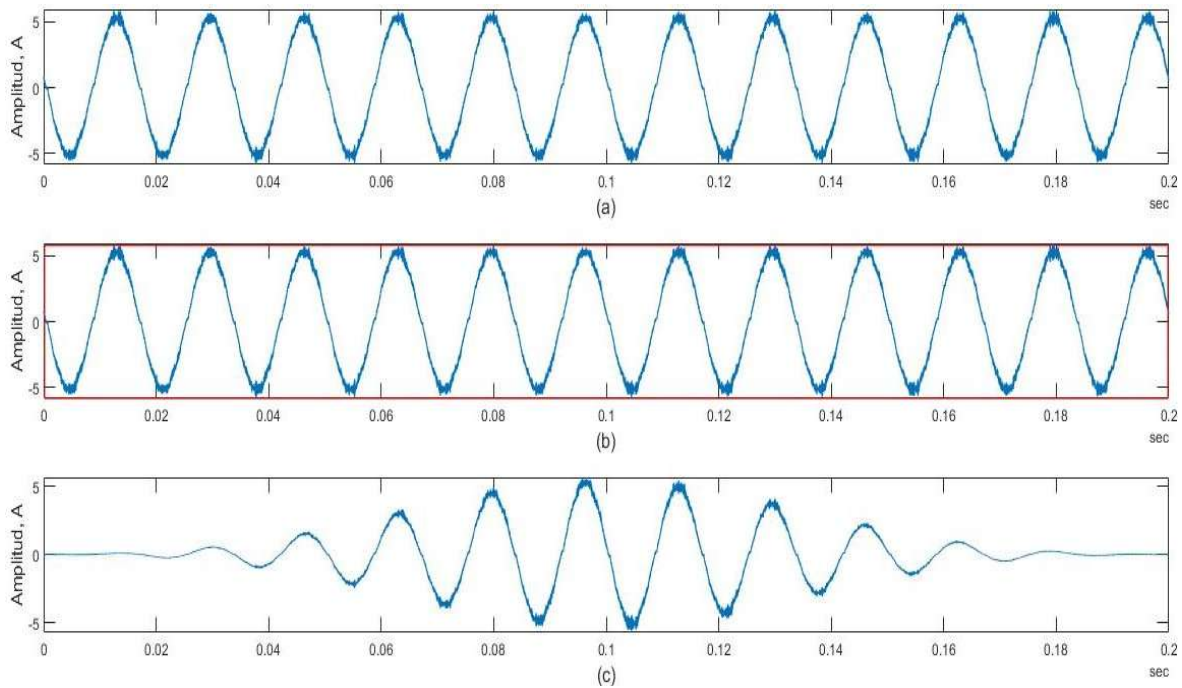


Figura 4.2: Ventanas de procesamiento a).- Señal original, b).- Ventana rectangular y c).- Ventana Hamming.

4.4. Transformada continua Wavelet

La transformada Wavelet es un análisis en el cual pueden establecerse eventos de frecuencia localizados en el tiempo. Sin embargo, a diferencia de la STFT la cual mantiene una resolución constante durante todo el análisis, la WT varía la resolución durante el proceso. La implementación de la transformada Wavelet requiere el uso de una función wavelet $\psi(t)$, la cual se manipula mediante un proceso de traslación y dilatación. La Figura 4.3 describe una selección de cuatro funciones Wavelet comúnmente usadas. Por otra parte, la aplicación de la transformada Wavelet requiere la manipulación de las funciones Wavelet para hacerlas más flexibles. En particular, se requiere implementar versiones de las funciones Wavelet con efectos de desplazamiento en el tiempo y modulación de la amplitud. La dilatación y contracción de la función Wavelet se determina mediante el parámetro a . El desplazamiento de la función Wavelet a lo largo del eje del tiempo se realiza mediante el parámetro b . La Figura 4.4 describe la función Wavelet del tipo “Morlet” en función de la variación del parámetro de traslación (Figura 4.4 (a)) y de dilatación (Figura 4.4 (b)).

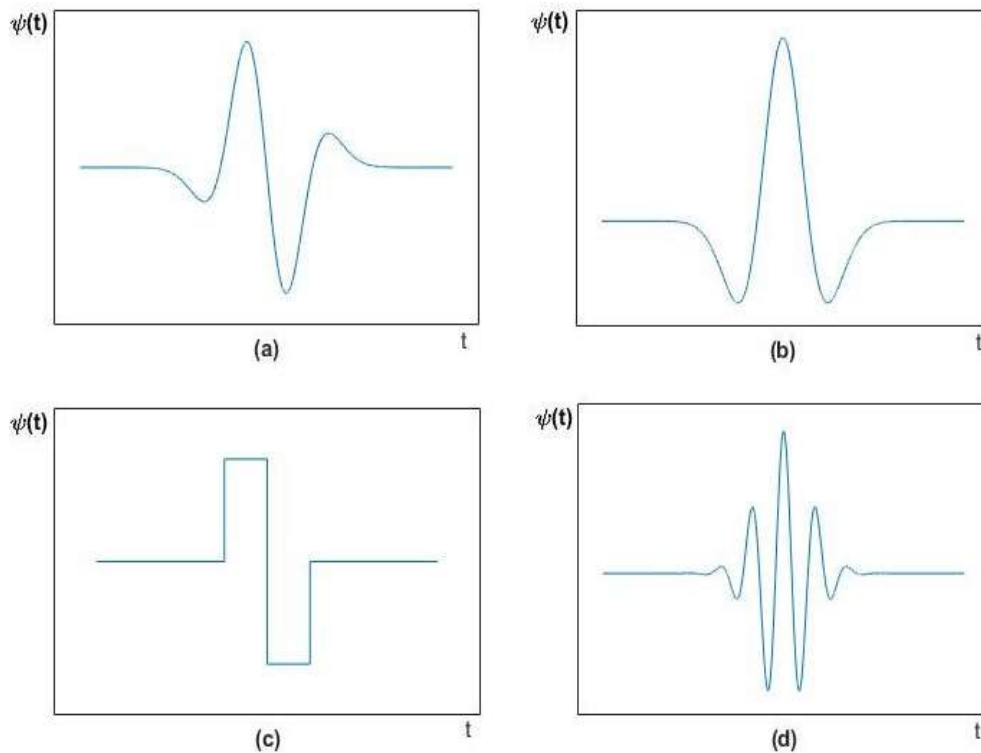


Figura 4.3: Tipos de Wavelets: a) Gaussiana, b) Sombrero Mexicano, c) Haar y d) Morlet.

La transformada Wavelet de una señal continua con respecto a una función Wavelet se define como,

$$T(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (4.10)$$

en donde $\frac{1}{\sqrt{a}}$ es un término de ponderación y ψ^* representa el conjugado de la Wavelet dilatada y trasladada $\psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right)$.

La Figura 4.5 describe los rectángulos Heisenberg en el plano tiempo-frecuencia para la transformada Wavelet. Se puede apreciar que los rectángulos Heisenberg tienen diferentes longitudes $2\sigma_t$ y $2\sigma_f$. Además, se puede apreciar que los rectángulos Heisenberg se encuentran ubicados en puntos del plano tiempo-frecuencia.

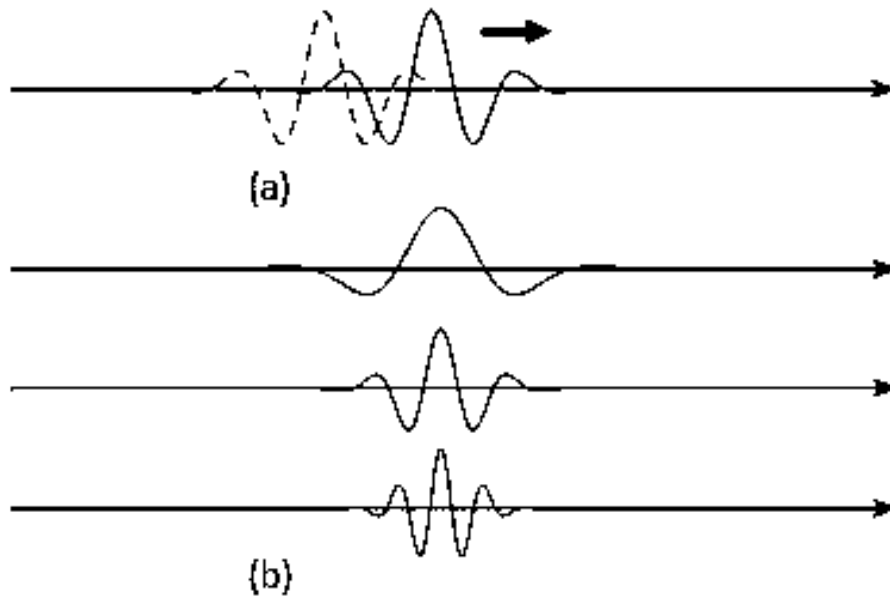


Figura 4.4: Función Wavelet tipo Morlet afectada por: a) parámetro de traslación y b) parámetro de dilatación.

4.5. Transformada Wavelet Discreta

La implementación de la Transformada Wavelet en una computadora se realiza mediante la versión discreta de la transformada Wavelet. Las variables encargadas del escalamiento y desplazamiento se discretizan de forma tal que los coeficientes wavelet se pueden describir mediante dos enteros denominados m y n . Por lo tanto, la Transformada Wavelet Discreta se define como,

$$DWT(m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_{k=0}^{N-1} x[k] \psi[a_0^{-m}n - k] \quad (4.11)$$

en donde $x[k]$ es la versión digital de una señal analógica con índice de muestreo k y Wavelet madre $\psi(n)$. Al variar el término m se obtiene un escalamiento geométrico $\left\{ 1, \frac{1}{a_0}, \frac{1}{a_0^2}, \dots \right\}$.

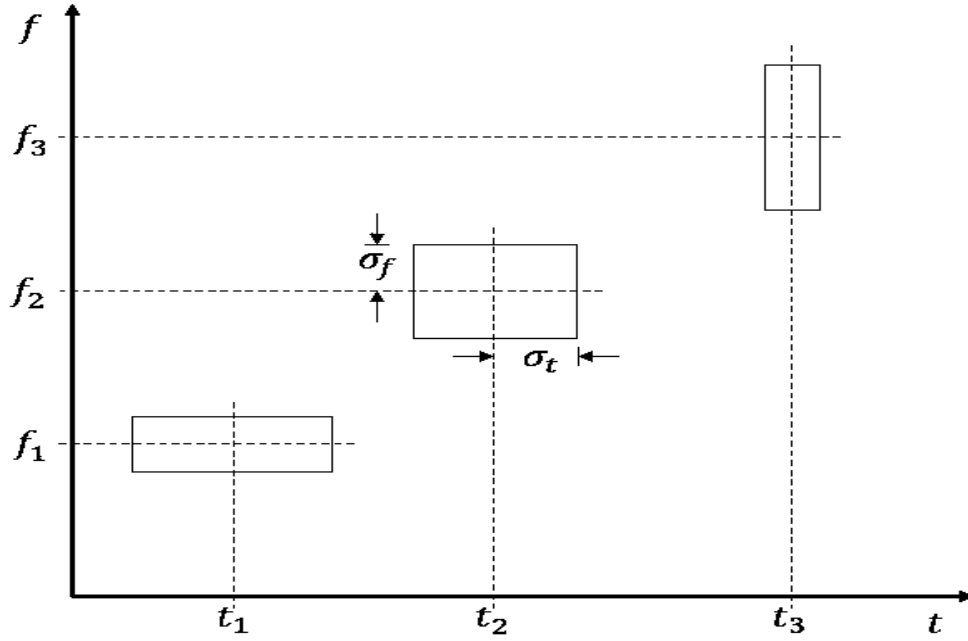


Figura 4.5: Rectángulo Heisenberg en el plano tiempo-frecuencia para la transformada Wavelet.

Este escalamiento le otorga una cobertura logarítmica en la frecuencia a la Transformada Wavelet Discreta, en contraste con la cobertura uniforme en la frecuencia de la Transformada de Fourier de Tiempo Corto. Por otra parte, cuando el término a_0 toma el valor de 2 entonces la Transformada Wavelet Discreta consiste en descomponer una señal en un conjunto de componentes a diferentes niveles de frecuencia relacionados mediante la potencia de 2, también conocida como escala diádica.

4.6. Análisis Wavelet multi-resolución

La primera wavelet discreta fue creada en 1910 por Alfred Haar como una alternativa a la transformada de Fourier. La idea es separar la señal original en secuencias de datos de bajas y altas frecuencias, realizando un submuestreo para descomponer la señal en sus niveles correspondientes. Como resultado de esta operación se tiene una representación que inicia con N muestras de la señal y al término de cada nivel de simplificación resultan dos grupos de datos, uno corresponde a la información de detalle y otro a la de aproximación. Estos dos grupos están representados por una función de escalado $\phi(n)$ y una función wavelet $\psi(n)$, conocidas como Wavelet padre y Wavelet madre [Addison, 2017].

La función Wavelet está definida por,

$$\psi(m, n) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \psi(2^{-m}n - k) \quad (4.12)$$

Por lo tanto, la funcion de escala se define de la siguiente forma,

$$\phi(m, n) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \phi(2^{-m}n - k) \quad (4.13)$$

La transformada Wavelet discreta de una señal discreta $x[n]$ se puede escribir de la siguiente forma,

$$W_\phi(m, n) = \sum_{k=0}^{N-1} x[k] \phi(m, n) \quad (4.14)$$

y

$$W_\psi(m, n) = \sum_{k=0}^{N-1} x[k] \psi(m, n) \quad (4.15)$$

La transformada Wavelet discreta se puede implementar computacionalmente usando la técnica conocida como análisis multi-resolución. El análisis multi-resolución busca construir Wavelets ortogonales a partir de Wavelets padre y Wavelets madre. Mientras que las Wavelets padre son equivalentes a un filtro pasa-bajas, la Wavelet madre describe la presencia de un filtro pasa-altas.

Considérese una señal discreta x_i de longitud finita N , en donde, $i = 0, 1, \dots, N - 1$. Esta señal se adquiere en intervalos de tiempo discreto. La Figura 4.6 muestra el diagrama esquemático del proceso de descomposición multi-resolución de los coeficientes de aproximación y detallados en cada iteración para una señal de entrada arbitraria de longitud finita N . Se puede observar en la Figura 4.6 que para comenzar el proceso de descomposición se deben proveer los coeficientes de aproximación en la escala $m = 0$. Comúnmente se definen los coeficientes de aproximación en la escala $m = 0$ en términos de la señal de entrada muestreada x_i de la siguiente manera,

$$S_{0,n} = x_n \quad (4.16)$$

Para calcular los coeficientes de aproximación $S_{1,n}$ en la escala $m = 1$ como se muestra en la Figura 4.6, inicialmente se proporcionan los coeficientes en la escala $m = 0$ que equivalen a la señal original. Estos coeficientes se calculan con ayuda de la siguiente ecuación,

$$S_{m+1,n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=0}^{N-1} c_{k-2n} S_{m,k} \quad (4.17)$$

$S_{m+1,n}$ representa los coeficientes de aproximación y $\frac{1}{\sqrt{2}} c_k$ representa el filtro pasa-bajas, dejando pasar las frecuencias bajas de la señal $S_{m,k}$ y, por lo tanto, una versión suavizada de la señal.

Para calcular los coeficientes de detalle $T_{1,n}$ en la escala $m = 1$ como se muestra en la Figura 4.6, inicialmente se proporcionan los coeficientes de aproximación $S_{m,k}$ en la escala

$m = 0$ que equivalen a la señal original. Estos coeficientes se calculan con ayuda de la siguiente ecuación,

$$T_{m+1,n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=0}^{N-1} b_{k-2n} S_{m,k} \quad (4.18)$$

$T_{m+1,n}$ representa los coeficientes de detalle y $\frac{1}{\sqrt{2}} b_k$ representa el filtro pasa-altas, dejando pasar las frecuencias altas de la señal.

Para continuar con esta descomposición a una escala $m = 2$ se proporcionan los coeficientes de aproximación $S_{1,n}$ calculados en la escala anterior y con ayuda de las ecuaciones (4.17) y (4.18) se calculan los coeficientes $S_{2,n}$ y $T_{2,n}$. Este proceso continua hasta obtener la escala deseada.

Los coeficientes c y b , los cuales representan los filtros pasa-altas y pasa-bajas, se pueden determinar mediante,

$$c_{m,n} = \sum_{k=0}^{N-1} h_0(k-2n) c_{m+1,k} \quad (4.19)$$

y

$$b_{m,n} = \sum_{k=0}^{N-1} h_1(k-2n) c_{m+1,k} \quad (4.20)$$

El cálculo de $c_{j,n,k}$ requiere determinar promedios, que corresponde a operaciones de filtrado de paso-bajo. Análogamente, para calcular el $b_{j,k}$ es necesario realizar diferencias, correspondientes a operaciones de filtrado de paso alto. Las secuencias de multiplicadores $h_0(m-2k)$ y $h_1(m-2k)$ con valores de m variables, puede considerarse como la respuesta al impulso del filtro. La descomposición de una señal en bases wavelet implica una serie de convolución discreta, estas operaciones se realizan usando respectivamente la respuesta al impulso del filtro de paso-bajo y paso-alto, donde las salidas se submuestrean, de modo que los valores de los coeficientes c y b en el nivel de resolución j resultado de la convolución de los valores anteriores en el nivel $j+1$ con las funciones h_0 y h_1 respectivamente [Palmieri, 2019].

Se puede apreciar de la Figura 4.6 que para un nivel de descomposición arbitrario m , el vector del análisis Wavelet multi resolución al final del proceso de descomposición tiene la forma,

$$W^m = \{S_m, T_m, T_{m-1}, \dots, T_2, T_1\} \quad (4.21)$$

en donde $1 \leq m \leq M-1$ y el término M se relaciona con la longitud de la señal discreta N mediante la expresión $N = 2^M$. Las ecuaciones (4.17) y (4.18) representan el algoritmo del análisis multi-resolución, realizan respectivamente, un filtrado de paso-alto y paso-bajo de la señal de entrada.

Las secuencias $\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) c_k$ y $\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) b_k$ atenúan la señal original de forma tal que representan la presencia de un filtro pasa-bajas y un filtro pasa-altas, respectivamente. En este sentido, la k -ésima componente del análisis Wavelet multi-resolución se puede visualizar como un filtro pasa-banda que permite el paso de la señal original a través de la banda de frecuencias definida por,

$$\left[\frac{f_s}{2^k}, \frac{f_s}{2^{k+1}} \right] \quad (4.22)$$

en donde f_s es la frecuencia de muestreo. La última componente captura la banda de frecuencia,

$$\left[0, \frac{f_s}{2^{m+1}} \right] \quad (4.23)$$

en donde m es el nivel del análisis Wavelet multi-resolución.

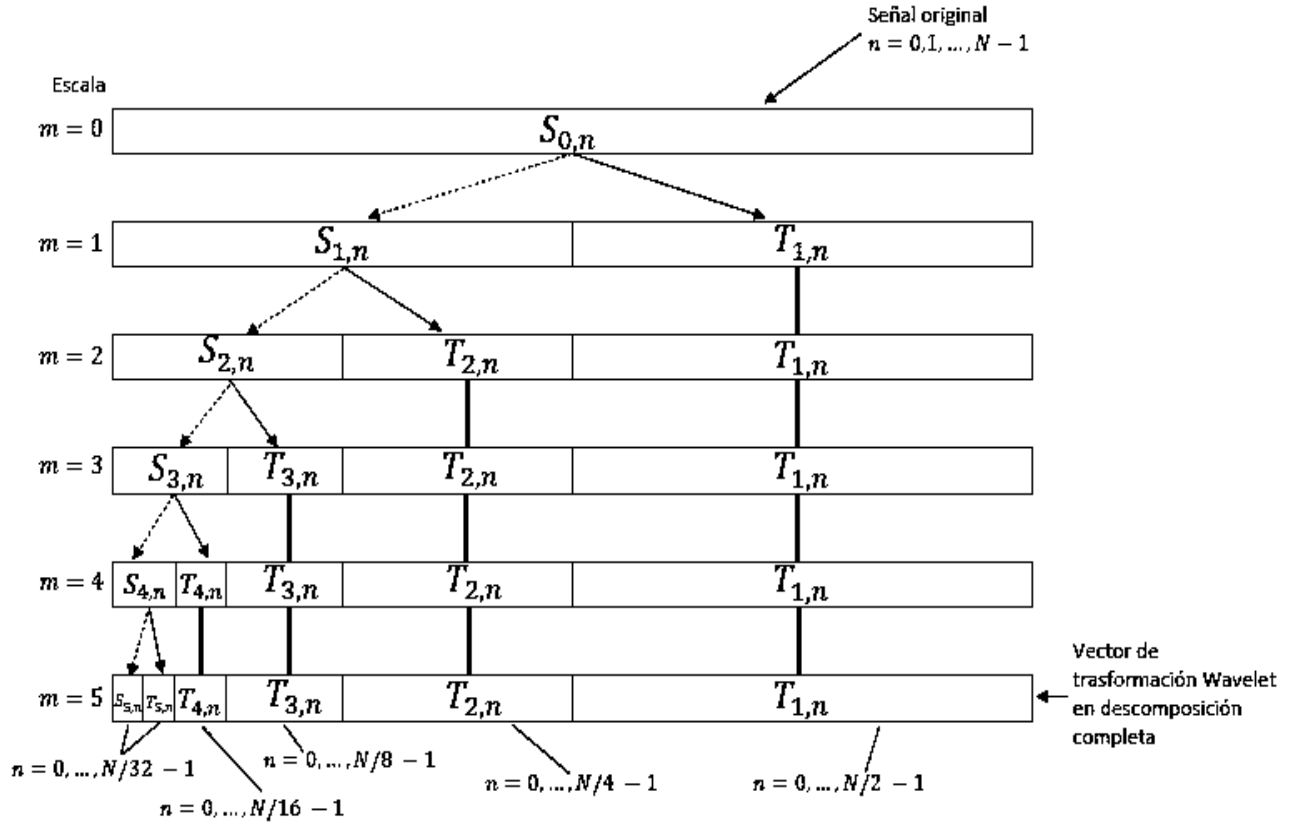


Figura 4.6: Diagrama esquemático del algoritmo Wavelet multi-resolución.

4.7. Validación del análisis multi-resolución

A continuación, se realiza una serie de estudios con el objetivo de validar la herramienta de análisis Wavelet multi-resolución, esto se realiza comparando los resultados con los obtenidos con la transformada discreta de Fourier. La señal de estudio es generada por medio del generador de señales BK PRECISION modelo 4070A, se genera una señal con amplitud de 2

V y una frecuencia de 60 Hz. La adquisición de la señal se realizó por medio del dispositivo analog discovery 2 utilizando una frecuencia de muestreo de 960,000 muestras/s; utilizando esta frecuencia de muestreo equivale a tomar 16,000 muestras/ciclo de la señal fundamental de 60 Hz.

La Figura 4.7 (a) muestra un ciclo completo de la señal generada por el generador de señales BK PRECISION equivalente a 16,000 muestras. Este ciclo es analizado por medio de la transformada discreta de Fourier obteniendo como resultado una frecuencia de 60 Hz con magnitud de 1.9217 V. Se observó que el generador de señales agrega una componente de corriente directa con una magnitud de 0.0176 V. Por otra parte, en la Figura 4.7 (b) se muestra la señal obtenida al aplicar el análisis Wavelet multi-resolución, se aplica este análisis con un nivel de descomposición de 8 bandas, se extrae el último nivel de descomposición el cual está representado por la Figura 4.7 (b). Esta banda N8 cuenta con un rango de frecuencia de 0 a 1,953.28 Hz abarcando todo el rango armónico. Una vez seleccionada la banda N8 esta es procesada por la transformada discreta de Fourier, de los resultados obtenidos se observa la frecuencia fundamental de 60 Hz con una magnitud de 1.9217 y una componente de corriente directa con magnitud 0.0176 V.

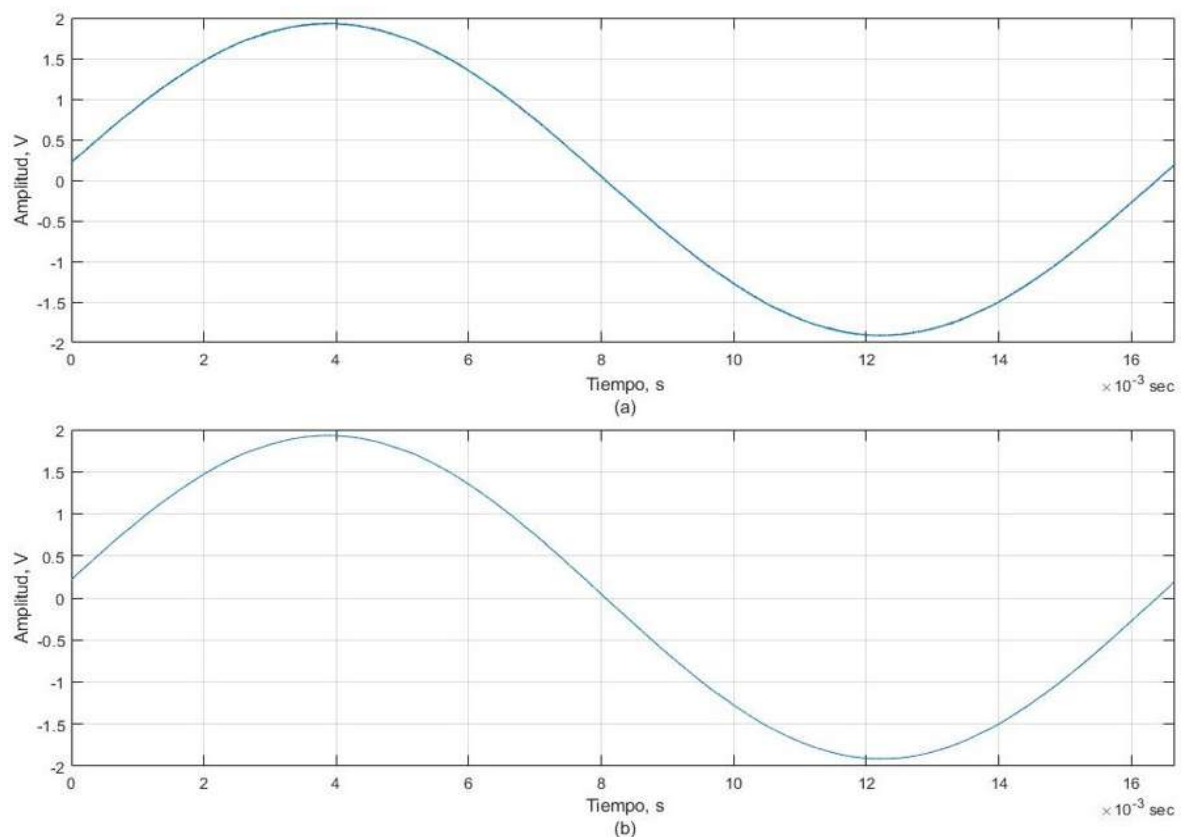


Figura 4.7: a).- Señal generada por el generador BK PRECISION y b).- Resultado del análisis Wavelet multi-resolución.

En la Figura 4.7 (a) se observa contaminación de alta frecuencia en la señal fundamental, esta contaminación es generada por ruido y por la misma electrónica de potencia del generador de señales. Esta contaminación de alta frecuencia es eliminada por medio del análisis Wavelet multi-resolución ya que este actúa como un banco de filtros. El resultado obtenido del análisis multi-resolución se observa en la Figura 4.7 (b) el cual muestra una forma de onda más suavizada sin esa distorsión de alta frecuencia que se observa en la Figura 4.7 (a).

4.8. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado una breve descripción de los métodos de procesamiento de señales utilizados en esta tesis. Se ha presentado el método de la Transformada de Fourier para realizar el procesamiento en el dominio de la frecuencia. Además, se han presentado los métodos de la transformada de Fourier de tiempo corto, transformada continua Wavelet y análisis multi-resolución basado en Wavelets para realizar el procesamiento en el marco tiempo-frecuencia. Por otro lado, se verifica la validación del análisis Wavelet multi-resolución y como este realiza la operación de un banco de filtros.

Capítulo 5

Identificación de supra-armónicos: Emisión simple

En este capítulo se analiza la operación individual de dispositivos no lineales conectados a la red de distribución, en donde cada dispositivo genera un espectro de frecuencias diferente. Con el propósito de caracterizar cada uno de los dispositivos no lineales, se presentan un conjunto de experimentos que consisten en operar un dispositivo no lineal a la vez.

Los experimentos se realizaron en el laboratorio de máquinas eléctricas de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica. La Figura 5.1 muestra el experimento implementado con el vehículo eléctrico y lámparas LED, mientras que en la Figura 5.2 se muestra el experimento realizado con el generador fotovoltaico.

Las herramientas de análisis aplicadas en este trabajo son las siguientes:

1. Transformada de Fourier: Se procesan 3 ciclos de la forma de onda fundamental de 60 Hz de la señal de voltaje y corriente, se utiliza una frecuencia de muestreo de 500,040 muestras/s. Esto equivale a analizar 25,002 muestras, se cuenta con una resolución de 20 Hz y se hace uso de una ventana de análisis Hamming.
2. Transformada de Fourier de tiempo corto: Se procesan 12 ciclos de 60 Hz de las señales de voltaje y corriente utilizando una frecuencia de muestro de 500,040 muestras/s. Esto equivale a analizar 100,008 muestras, se aplica la transformada de Fourier de tiempo corto con una ventana de tiempo de 10 ms y haciendo uso de una ventana de análisis Hamming.
3. Transformada Wavelet continua: Se procesan 12 ciclos de 60 Hz de la señal de voltaje

y corriente utilizando una frecuencia de muestro de 500,040 muestras/s. Esto equivale a analizar 100,008 muestras, se aplica la transformada Wavelet continua a una ventana de análisis de 20 ms haciendo uso de una Wavelet madre tipo Morlet. En este trabajo se hace uso de una Wavelet madre tipo Morlet ya que el comportamiento de esta Wavelet es cosenoidal y las señales que se analizan en este trabajo tienden a tener un comportamiento senoidal. por lo tanto, la similitud entre ondas es muy parecida.

4. Análisis Wavelet multi-resolución: Se procesan 12 ciclos de 60 Hz de la señal de voltaje y corriente utilizando una frecuencia de muestro de 500,040 muestras/s. Esto equivale a analizar 100,008 muestras, se aplica el análisis multi-resolución con un nivel de descomposición de 8 bandas, ya que con este nivel de descomposición es suficiente para detectar las componentes supra-armónicas.



Figura 5.1: *Implementacion del experimento en el laboratorio.*



Figura 5.2: Implementación del experimento en el laboratorio con el generador fotovoltaico.

5.1. Red eléctrica de distribución

A continuación, se presentan los resultados del experimento realizado para estudiar la presencia de emisiones supra-armónicas en la señal de voltaje de la red eléctrica de baja tensión que alimenta al edificio de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Michoacán de San Nicolás de Hidalgo. Este edificio se encuentra dentro de ciudad universitaria. El sistema de adquisición consiste de un sensor de voltaje, un sensor de corriente y una tarjeta de adquisición de datos. Los parámetros utilizados para realizar la adquisición de datos se enlistan en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Parámetros del sistema de adquisición de datos del experimento.

Sistema adquisición de datos	descubrimiento analógico 2, 14 bits, 100 M muestras/s
Sensor de voltaje	LEM LV 25-P
Sensor de corriente	LEM LA 55-P
Ciclos muestreados	12
Frecuencia de muestreo	500,040 Hz

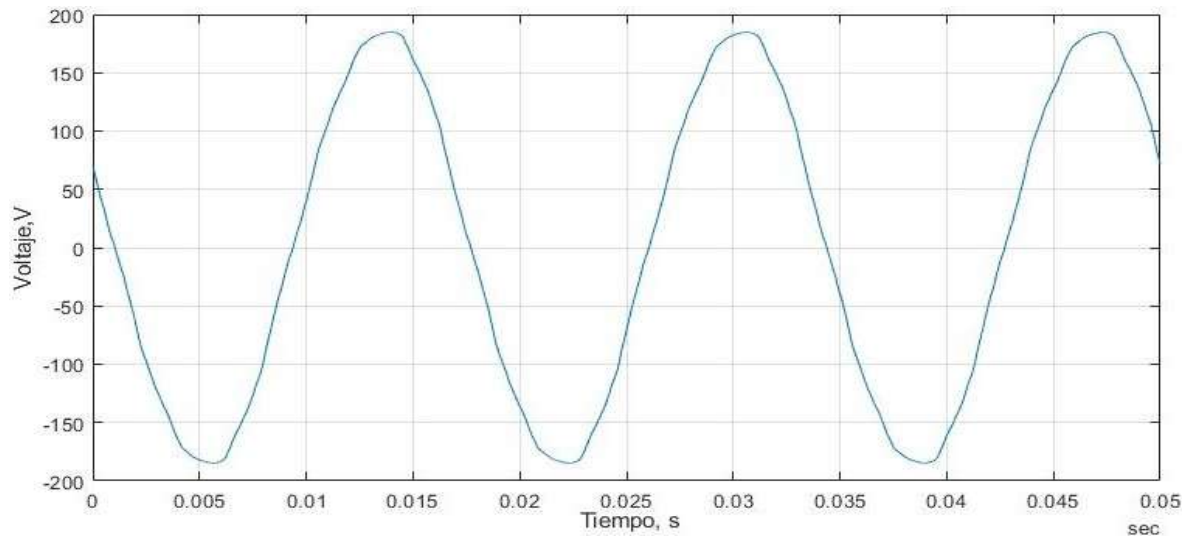


Figura 5.3: Formas de onda en el tiempo de la señal de voltaje de la red de distribución.

5.1.1 Análisis en el dominio de la frecuencia: Transformada discreta de Fourier

La Figura 5.3 muestra 3 ciclos de la forma de onda en el tiempo de la señal de voltaje de la red eléctrica de de baja tensión. Se puede apreciar que la forma de onda de voltaje se encuentra distorsionada. La Figura 5.4 reporta el espectro armónico y supra-armónico de la señal en el dominio de la frecuencia, el cual se divide en tres diferentes rangos de frecuencia: de 0 a 2 kHz, de 2 kHz a 9 kHz y 9 kHz a 150 kHz. En la Figura 5.4 (a) se puede observar la presencia de un par de componentes de frecuencia con magnitudes importantes en el rango armónico de 0 a 2 kHz. Por ejemplo, se pueden apreciar los armónicos 3 y 9 con magnitudes de 2.37 V y 1.80 V, respectivamente. Estas dos componentes son las de mayor magnitud en este rango armónico. De la misma forma se detectan componentes armónicas no solo impares, sino también componentes pares con respecto a la componente fundamental. Se aprecia la aparición de contaminación sub-armónica, inter-armónica y una componente de corriente directa. Respecto a las emisiones reportadas en la Figura 5.4 (b) para el rango supra-armónico de 2 kHz a 9 kHz, se observa que la contaminación supra-armónica más importante se encuentra al inicio de este rango de frecuencias, la magnitud más significativa se encuentra a 2.1 kHz con una magnitud de 0.1313 V. Después de este punto, las magnitudes supra-armónicas decrecen significativamente hatas aproximadamente 5 kHz. Por su parte, se puede apreciar en la Figura 5.4 (c) que en el rango supra-amónico de 9 kHz a 150 kHz sobresalen las frecuencias supra-armónicas de 32.2 kHz, 63.7 kHz, 96.8 kHz, 135.7 kHz y 145.5 kHz. Se desconoce la fuente de emisión de estas frecuencias supra-armónicas. Por lo tanto, en este trabajo se considerarán estas componentes como frecuencias ya existentes en la red de distribución.

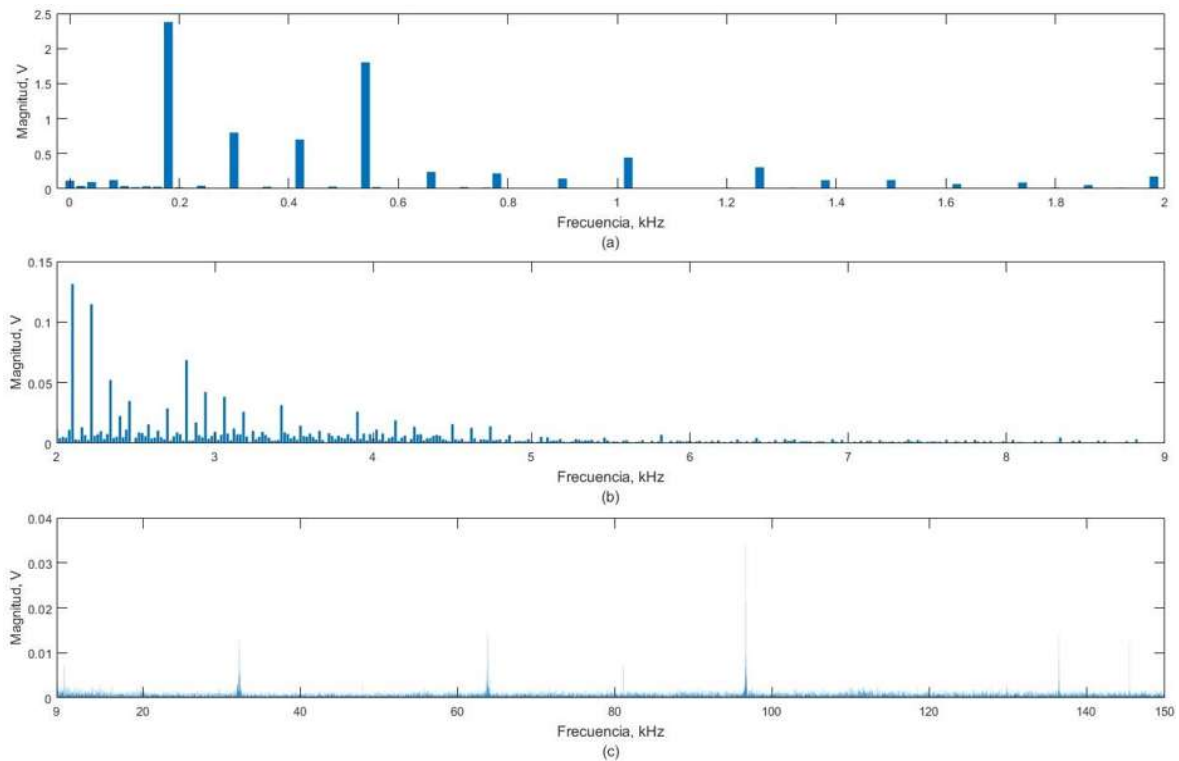


Figura 5.4: Espectro en el dominio de la frecuencia de la señal de voltaje de la red de distribución: a).- 0 a 2 kHz, b).- 2 kHz a 9 kHz y c).- 9 kHz a 150 kHz.

5.1.2 Análisis en el dominio tiempo-frecuencia: Transformada de Fourier de tiempo corto

En esta sección se analiza la forma de onda de voltaje existente en la red de distribución por medio de la transformada de Fourier de tiempo corto. La Figura 5.5 (a) describe la forma de onda en el tiempo del voltaje, mientras que la Figura 5.5 (b) presenta el espectrograma de emisiones hasta la frecuencia de 150 kHz. El espectrograma es una representación bi-dimensional en el marco tiempo-frecuencia de la señal de voltaje e indica la intensidad de la frecuencia conforme la señal de voltaje progresa en el tiempo. Según la escala de colores descrita en la Figura 5.5 (b), las frecuencias en color amarillo presentan un nivel de intensidad mayor. De acuerdo a los resultados reportados en la Figura 5.5 (b), la transformada de Fourier de tiempo Corto no es capaz de detectar la presencia de la componente fundamental de 60 Hz en el rango armónico de 0 a 2 kHz. Además, la TFTC erróneamente detecta un número infinito de frecuencias con magnitudes importantes en el rango de frecuencia de 0 a 3 kHz. Esto se debe a que la segmentación de la señal de voltaje en ventanas de 10 ms provee una buena resolución en el tiempo, pero una mala resolución en la frecuencia. Al incrementar la ventana de segmentación a un valor mayor de 10 ms se mejorará la resolución en la frecuencia, pero se deteriorará la resolución en el tiempo. Por lo tanto, no existe un tamaño de ventana

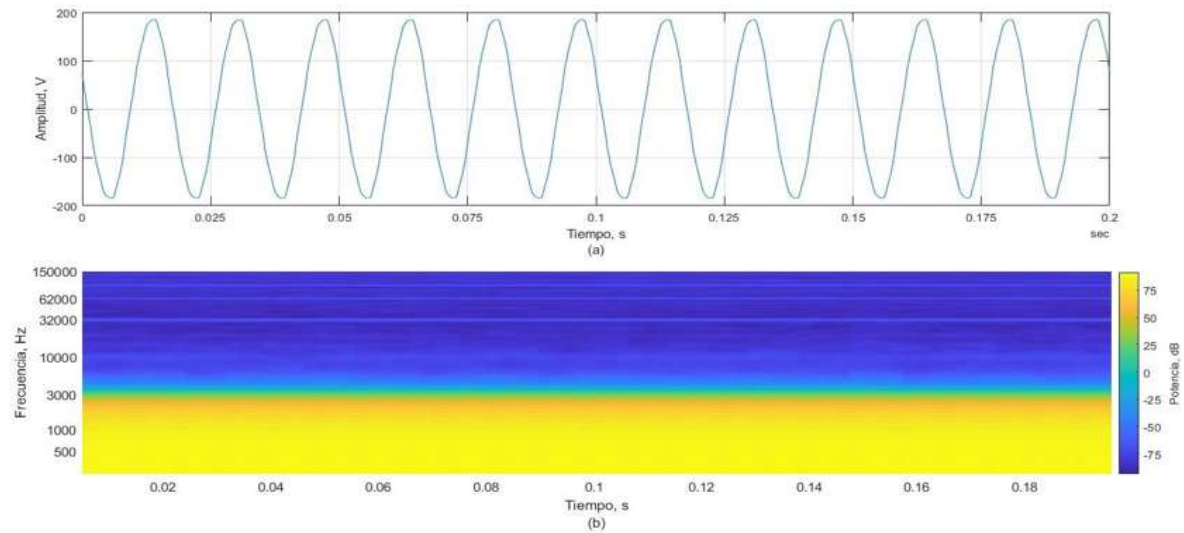


Figura 5.5: Emisión de voltaje en el dominio tiempo-frecuencia. a).- Forma de onda en el tiempo de señal de voltaje y b).- Espectrograma obtenido por medio de la TFTC.

que determine todo el contenido de frecuencias de la señal. Por otra parte, se puede apreciar que las emisiones en el rango supra-armónico son muy bajas, ya que las componentes que se detectan en el rango supra-armónico son muy pequeñas en magnitud.

5.1.3 Análisis en el dominio tiempo-frecuencia: Transformada Wavelet continua

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al utilizar la transformada Wavelet de tiempo continuo para la detección de componentes armónicas y supra-armónicas en el dominio tiempo-frecuencia. La Figura 5.6 (a) describe la forma de onda en el tiempo de la señal de voltaje, mientras que la Figura 5.6 (b) presenta el escalograma de emisiones hasta la frecuencia de 150 kHz. El escalograma representa el valor absoluto de la transformada wavelet continua del voltaje, graficada como función del tiempo y frecuencia. De acuerdo a la Figura 5.6 (b) se observa que las frecuencias más importantes se concentran entorno a 60 Hz. Por ejemplo, se puede apreciar la presencia de la tercera y novena armónica. De igual forma, se pueden apreciar las emisiones en el rango supra-armónico con una muy baja emisión. Estos resultados indican que la TWC produce mejores resultados que la TFTC. Esto se debe a que la transformada Wavelet utiliza una ventana de tamaño ajustable en comparación con la ventana de tamaño fijo que usa la TFTC.

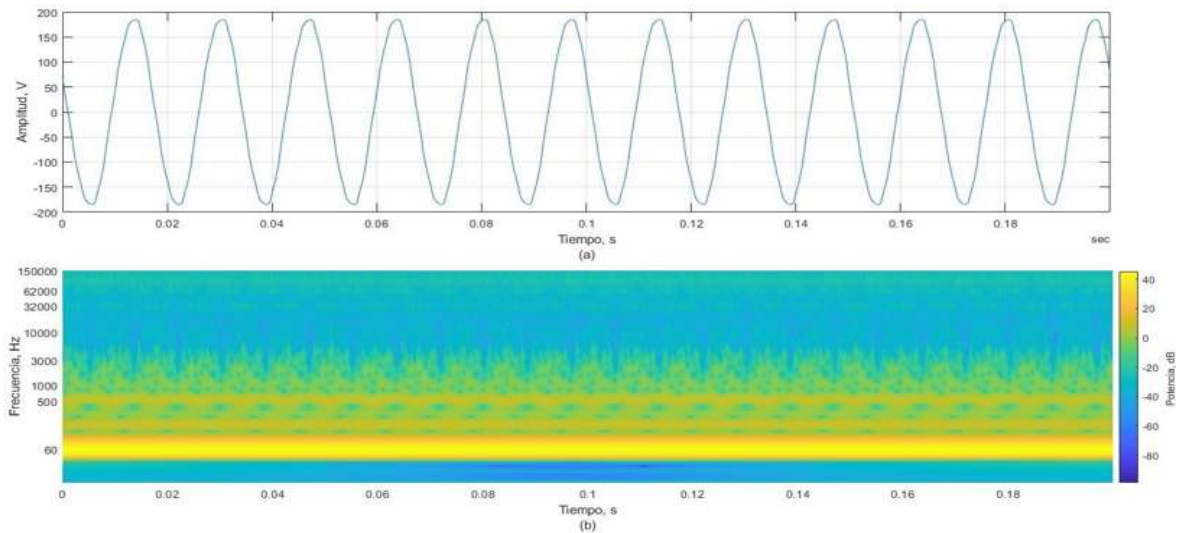


Figura 5.6: Emisión de voltaje en el dominio tiempo-frecuencia. a).- Forma de onda en el tiempo de señal de voltaje y b).- Escalograma con la WTC.

5.1.4 Análisis en el dominio tiempo-frecuencia: Análisis Wavelet multi-resolución

En esta sección se analiza el voltaje de la red eléctrica de distribución utilizando el análisis Wavelet multi-resolución. La Tabla 5.2 detalla las 8 bandas extraídas de la señal original, estas bandas corresponden a los resultados de los filtros pasa-altas los cuales contienen los coeficientes de detalle. Cada uno de estos filtros pasa-altas cuenta con una frecuencia de corte la cual se muestra en la Tabla 5.2 para cada nivel de descomposición. La Figura 5.7 muestra las 8 bandas extraídas de la señal de voltaje. El análisis Wavelet multi-resolución opera de forma análoga a un banco de filtros, separando los armónicos de alta frecuencia, mientras que los armónicos de baja frecuencia se conservan y se siguen procesando. Las primeras bandas incluyen las componentes de alta frecuencia, mientras que los armónicos de baja frecuencia se encuentran en los últimos niveles. Se puede apreciar de la Figura 5.7 que la banda N8 contiene la información más relevante para representar la parte más significativa del espectro de frecuencias armónicas, ya que esta representa un rango de frecuencias armónicas de 0 Hz a 1,953.25 Hz. Las bandas N6 y N7 presentan las mayores magnitudes y representan el rango de frecuencia en el rango supra-armónico. Por otro lado, las frecuencias supra-armónicas que se encuentran en la señal de voltaje se localizan en las bandas N2, N3, N4, N5 y N6, ya que estas contienen las componentes de alta frecuencia en el rango supra-armónico de 2 kHz a 150 kHz. El uso de esta herramienta de procesamiento permite realizar un estudio en el dominio tiempo-frecuencia y así poder visualizar el comportamiento de las componentes de frecuencia en el tiempo.

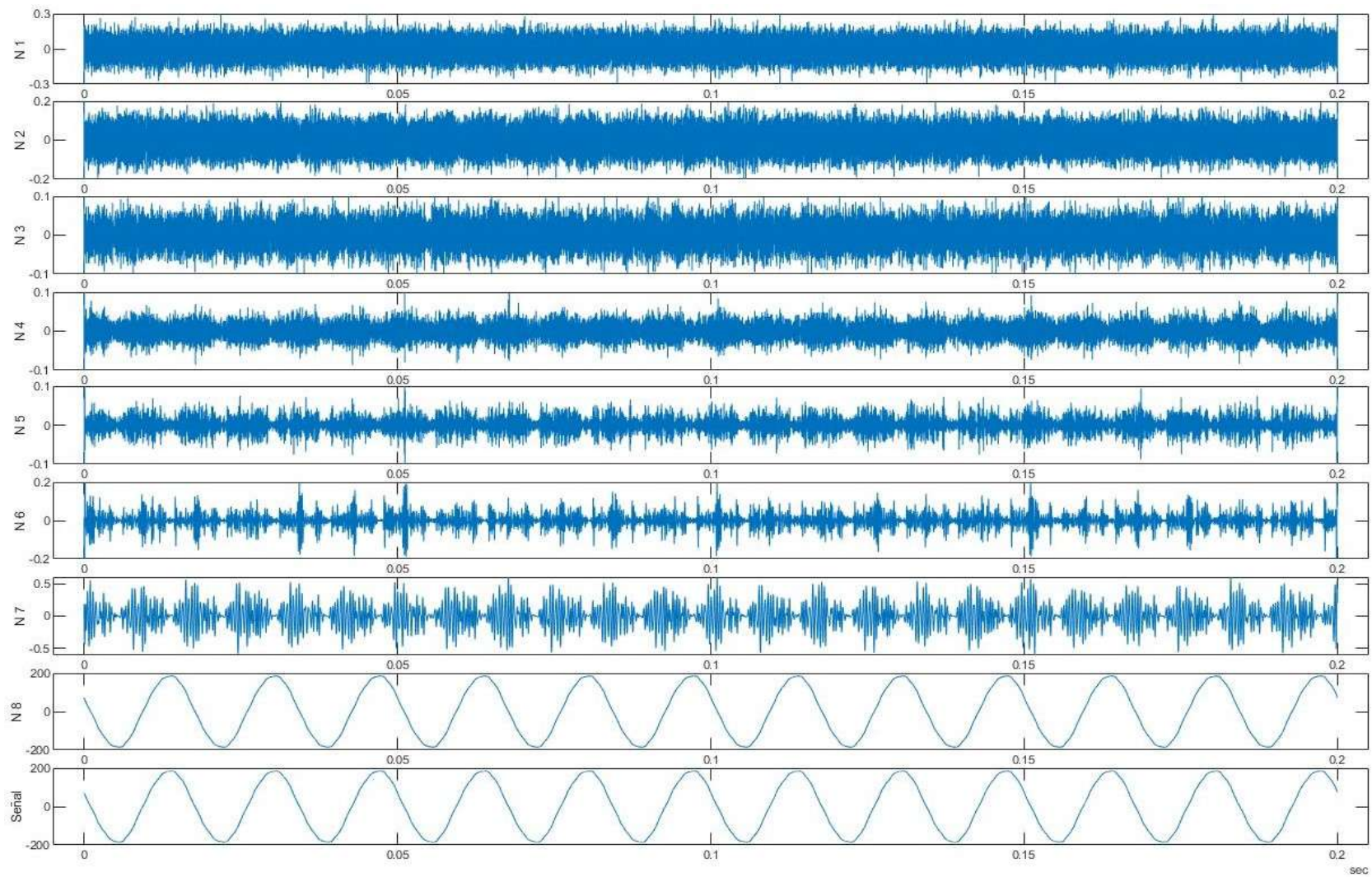


Figura 5.7: Descomposición en dominio del tiempo-frecuencia de la señal de voltaje utilizando análisis Wavelet multi-resolución.

Tabla 5.2: Rangos de frecuencias para las bandas involucradas en el análisis Wavelet multi-resolución.

Nivel	Rango de frecuencia
N1	$125,010 \text{ Hz} < f < 250,020 \text{ Hz}$
N2	$62,505 \text{ Hz} < f < 125,010 \text{ Hz}$
N3	$31,252.50 \text{ Hz} < f < 62,505 \text{ Hz}$
N4	$15,626.25 \text{ Hz} < f < 31,252.50 \text{ Hz}$
N5	$7,813.12 \text{ Hz} < f < 15,626.25 \text{ Hz}$
N6	$3,906.57 \text{ Hz} < f < 7,813.12 \text{ Hz}$
N7	$1,953.28 \text{ Hz} < f < 3,906.57 \text{ Hz}$
N8	$0 \text{ Hz} < f < 1,953.28 \text{ Hz}$

5.2. Lámparas LED

El objetivo de esta sección es investigar el impacto de lámparas modernas de tecnología LED en las redes de distribución de bajo voltaje. Los experimentos consistieron en caracterizar la operación de un conjunto de lámparas del mismo tipo y así poder caracterizar las emisiones correspondientes a cada tipo de lámpara.

En esta sección se miden y analizan un conjunto de lámparas LED de diferentes fabricantes, topologías y potencias nominales. Las lámparas LED se agrupan de la siguiente manera en términos de emisión electromagnética:

- Tipo A: Lámparas LED marca OSRAM de 14 W con corrector de factor de potencia pasivo y emisiones en el rango armónico y supra-armónico.
- Tipo B: Lámparas LED marca LEDLINE de 100 W con corrector de factor de potencia pasivo y emisiones en el rango armónico y supra-armónico.
- Tipo C: Lámparas LED marca IPSA de 100 W con corrector de factor de potencia activo y emisiones en el rango supra-armónico.

La Figura 5.8 describe la implementación del experimento de medición de las lámparas LED, el cual consiste del sistema de adquisición de datos desarrollado en esta tesis con sensores de voltaje y corriente con anchos de banda adecuados para medir armónicos y supra-armónicos. La operación de la lámpara LED se realizó a temperatura ambiente y se alimentó con el voltaje de la red eléctrica de 127 V a 60 Hz. De esta forma, se cumple con el objetivo de estudiar el impacto de la operación de lámparas LED en la red eléctrica de distribución.

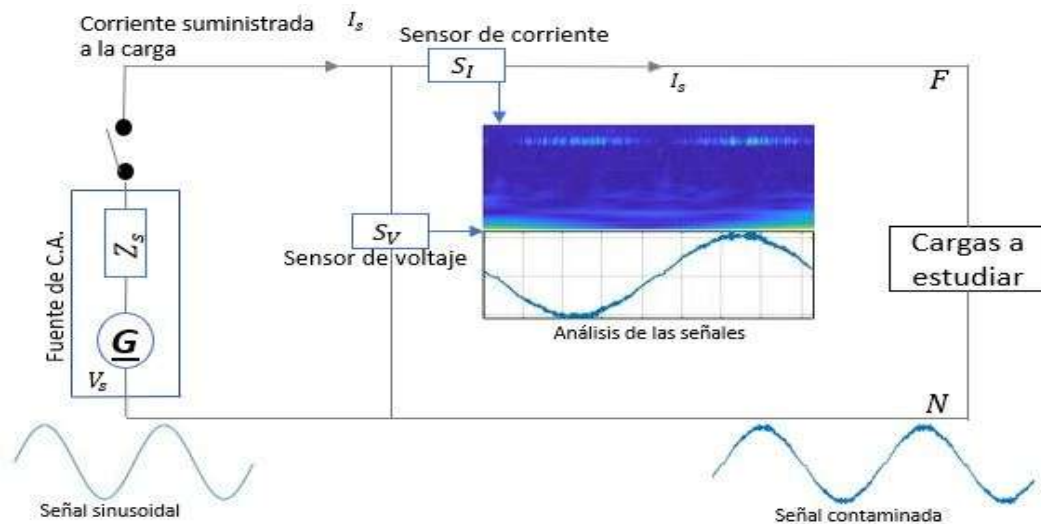


Figura 5.8: Diagrama básico de medición de la lámpara LED.

5.2.1. Lámpara tipo A

La lámpara LED tipo A es muy común debido a su forma tipo foco y a su bajo consumo de potencia de 14 W. La Figura 5.9 describe las formas de onda en el tiempo del voltaje de alimentación y la corriente que demandan 90 lámparas Osram. Se puede apreciar que el voltaje de alimentación presenta un bajo nivel de distorsión en comparación con la señal de voltaje, mientras que la corriente presenta un alto nivel de distorsión de su forma de onda. La Figura 5.10 describe el plano de fase del voltaje de alimentación versus la corriente que demanda la lámpara. El diagrama de fase permite apreciar que la lámpara LED tipo A representa una carga no lineal. Cabe mencionar que en el caso de una carga lineal resistiva el diagrama de fase describe una línea recta, mientras que la carga reactiva describe una forma de anillo [Salles et al., 2012].

5.2.1.1 Análisis en el dominio de la frecuencia: Transformada discreta de Fourier

A continuación, en esta sección se aplica la transformada discreta de Fourier para analizar la señal de voltaje y corriente la cual es demandada por 90 lámparas LED de la marca Osram. Estos resultados se dividen en tres diferentes rangos de frecuencias: 0 a 2 kHz, 2 kHz a 9 kHz y 9 kHz a 150 kHz. De la Figura 5.11 (a) se observan magnitudes importantes para los armónicos 3, 5 y 7 con magnitudes de 6.35 V, 3.35 V y 1.31 V, respectivamente. Estas magnitudes son las más significativas en este rango. De igual forma, se observa contaminación sub-armónica y la componente de corriente directa. Respecto a las emisiones que se encuentran en el rango supra-armónico como se muestra en la Figura 5.11 (b) se observa que la componente más significativa en este rango se encuentra a una frecuencia de 2.1 kHz con magnitud de 0.22

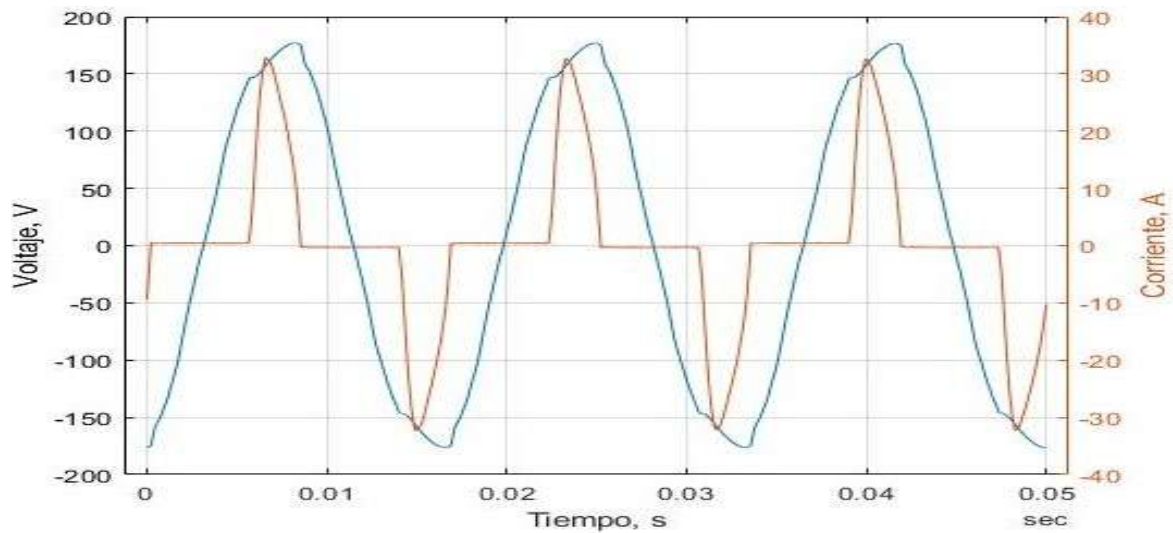


Figura 5.9: Formas de onda en el tiempo de voltaje y corriente para 90 lámparas LED tipo A de la marca Osram.

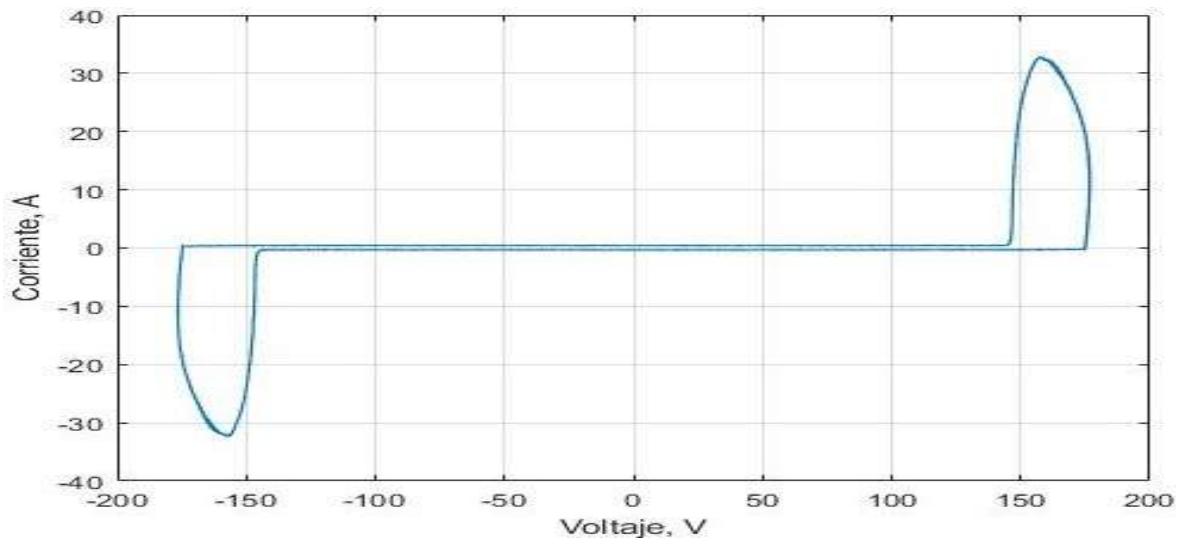


Figura 5.10: Curva característica V-I para lámparas LED tipo A.

V. Después de esta componente las frecuencias tienden a disminuir en su magnitud. Por otra parte, de la Figura 5.11 (c) nos muestra los resultados obtenidos en un rango supra-armónico de 9 kHz a 150 kHz en donde sobresalen las frecuencias de 32.2 kHz, 63.7 kHz, 96.7 kHz, 135.7 kHz y 145.5 kHz. Sin embargo, estas componentes ya habían sido detectadas en la señal de voltaje de la red de distribución sin la presencia de las lámparas LED. Al comparar los espectros de las señales de voltaje de las Figuras 5.11 y 5.4, se observan incrementos en algunas componentes armónicas. Estos incrementos se observan en los rangos de frecuencias de 0 a 2 kHz y 2 kHz a 9 kHz.

En la Figura 5.12 se puede observar la contaminación armónica de la señal de corriente demandada por las 90 lámparas tipo A. Para el rango de 0 a 2 kHz, se aprecian las armónicas

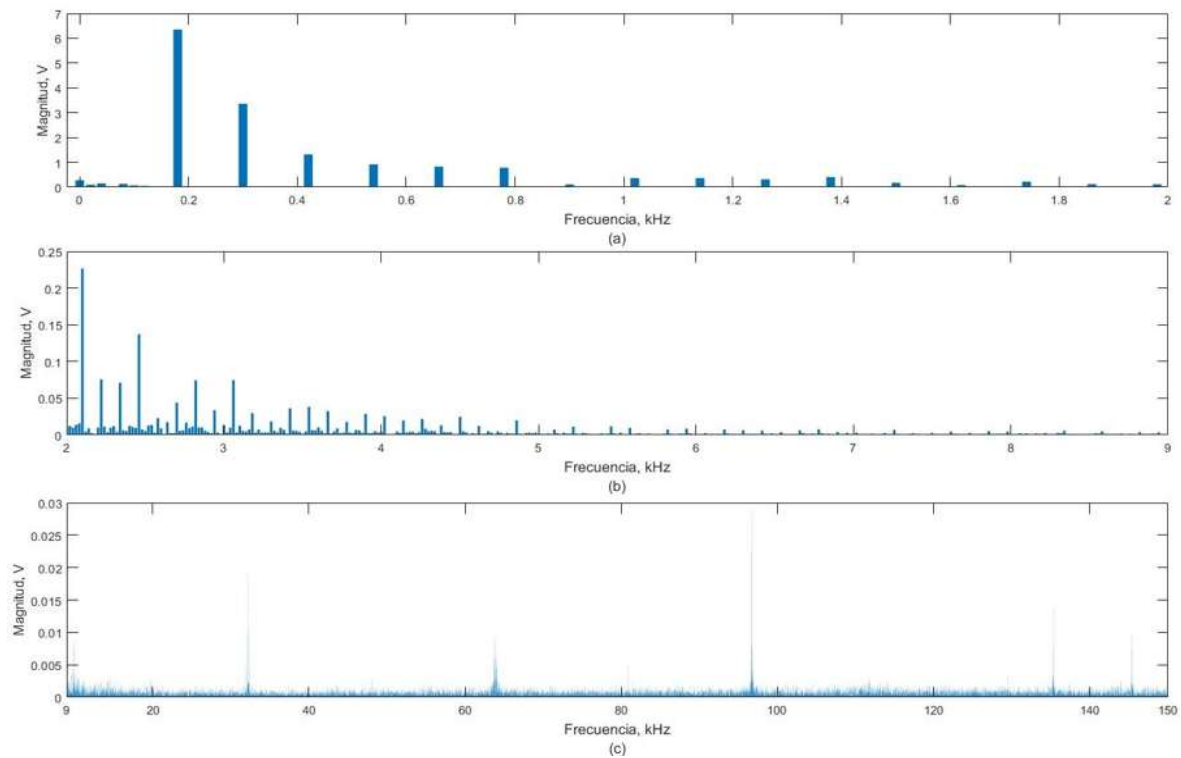


Figura 5.11: Espectro de frecuencia del voltaje para las lámparas LED tipo A para tres rangos de frecuencias diferentes: a).- 0 a 2 kHz, b).- 2 kHz a 9 kHz y c).- 9 kHz a 150 kHz

3, 5, 7, 9, 11 y 13 con magnitudes de 7.62 A, 4.30 A, 1.43 A, 1.10 A, 1.22 A y 0.60 A, respectivamente (ver Figura 5.12 (a)). DE igual forma se percibe la componente de corriente directa. Respecto a las emisiones reportadas en la Figura 5.12 (b) para un rango de 2 kHz a 9 kHz se observa que la componente más sobresaliente en este rango se encuentra a una frecuencia de 2.1 kHz con una magnitud de 0.0649 A. Después de esta frecuencia las componentes de frecuencia tienden a disminuir considerablemente hasta una frecuencia de aproximadamente 8 kHz. Por último, en la Figura 5.12 (c) se presentan los resultados obtenidos en el rango supra-armónico de 9 kHz a 150 kHz. En este rango se muestra una frecuencia importante en 63.7 kHz con magnitud de 0.0075 A. Esta frecuencia supra-armónica se observó previamente en el voltaje de la red de distribución y su origen es desconocido (ver Figura 5.11 y 5.4). La contaminación emitida por estas lámpara se concentra en un rango de frecuencia de 0 a 8 kHz, concentrado su mayor parte en un rango armónico de 0 a 2 kHz.

La Tabla 5.3 presenta un análisis comparativo del porcentaje de distorsión armónica %THD y porcentaje de distorsión supra-armónica %TSHD para el voltaje de la red eléctrica con Presencia de las lámparas tipo A. Se observa que el %THD de la señal de voltaje con las lámparas tipo A se incrementa considerablemente en el rango de 0 a 2 kHz de 2.4700 % a 5.9540 %. Obsérvese que no se viola el límite de 8 % de %THD sugerido por el estándar

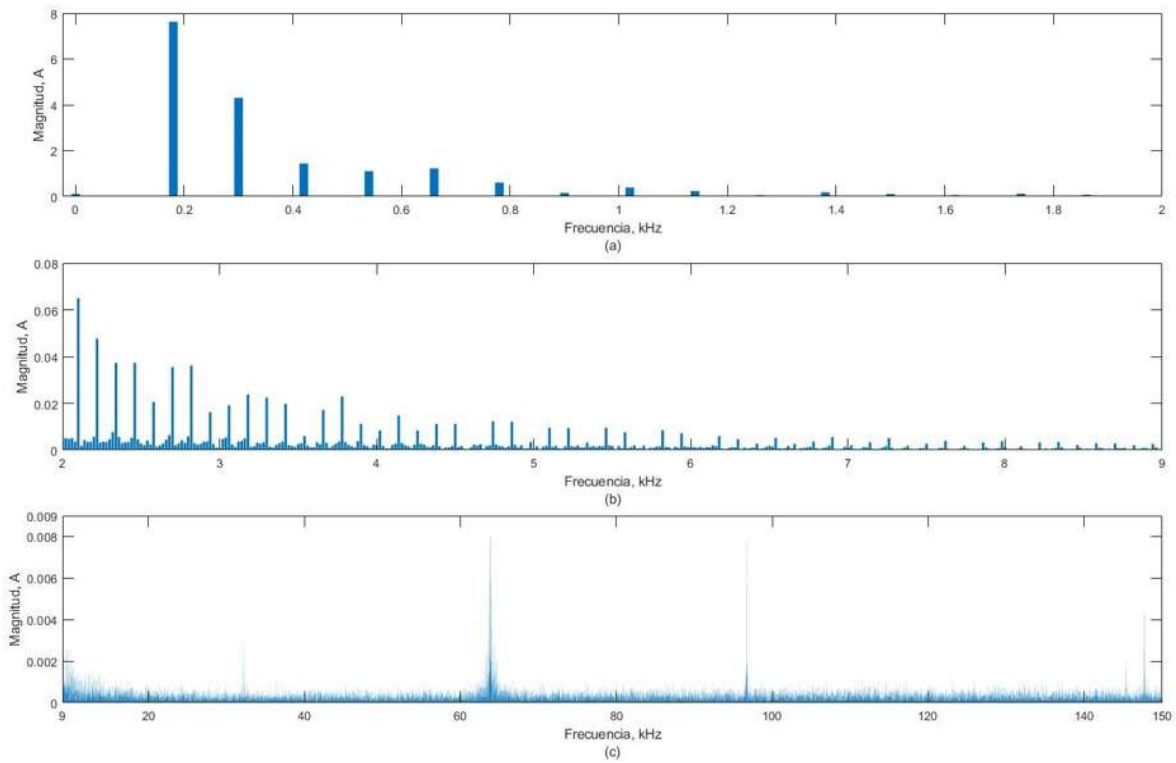


Figura 5.12: Espectro de frecuencia de la corriente para las lámparas LED tipo A para tres rangos de frecuencias diferentes: a).- 0 a 2 kHz, b).- 2 kHz a 9 kHz y c).- 9 kHz a 150 kHz

IEEE-519 [Association et al., 2014]. De forma similar, se observa un ligero incremento de 0.1745 % a 0.2650 % de %TSHD en el rango de 2 kHz a 9 kHz, mientras que en el rango supra-armónico de 9 kHz a 150 kHz cambio de 0.0706 % a 0.0724 %.

5.2.1.2 Análisis en el dominio tiempo-frecuencia: Transformada de Fourier de tiempo corto

A continuación, se analiza la señal de voltaje y corriente demandada por las 90 lámparas tipo A. Las Figuras 5.13 y 5.14 describen la forma de onda de voltaje y corriente demandadas por las 90 lámparas tipo A, así como el espectrograma de ambas formas de onda. La Figura 5.13 (a) presenta la forma de onda en el tiempo del voltaje, mientras que la Figura 5.13 (b) presenta el espectrograma de emisión. Se aprecia que las emisiones en el rango supra-armónico son muy bajas, esto se debe básicamente al hecho de que las lámparas tipo A no cuenta con un circuito corrector de factor de potencia operando a alta frecuencia. De igual forma la Figura 5.14 (a) presenta la forma de onda en el tiempo de la corriente demandada por las lámparas tipo A, mientras que la Figura 5.14 (b) presenta el espectrograma de emisión de esta señal, se llega a percibir la componente de 32.2 kHz y 63.6 kHz. Estas componentes ya se encontraban previamente en la señal de voltaje de la red de baja tensión. Se aprecia que la transformada de

Tabla 5.3: Análisis comparativo del porcentaje de distorsión armónico y porcentaje de distorsión supra-armónico del voltaje de la red eléctrica con la lámpara tipo A.

Rango	Sin lámpara tipo A	Con lámpara tipo A
$0 \text{ Hz} < f < 2 \text{ kHz}$	2.4700	5.9540
$2 \text{ kHz} < f < 9 \text{ kHz}$	0.1745	0.2650
$9 \text{ kHz} < f < 150 \text{ kHz}$	0.0706	0.0724

Fourier de tiempo corto no es capaz de detectar con precisión la presencia de la componente fundamental de 60 Hz de ambas señales.

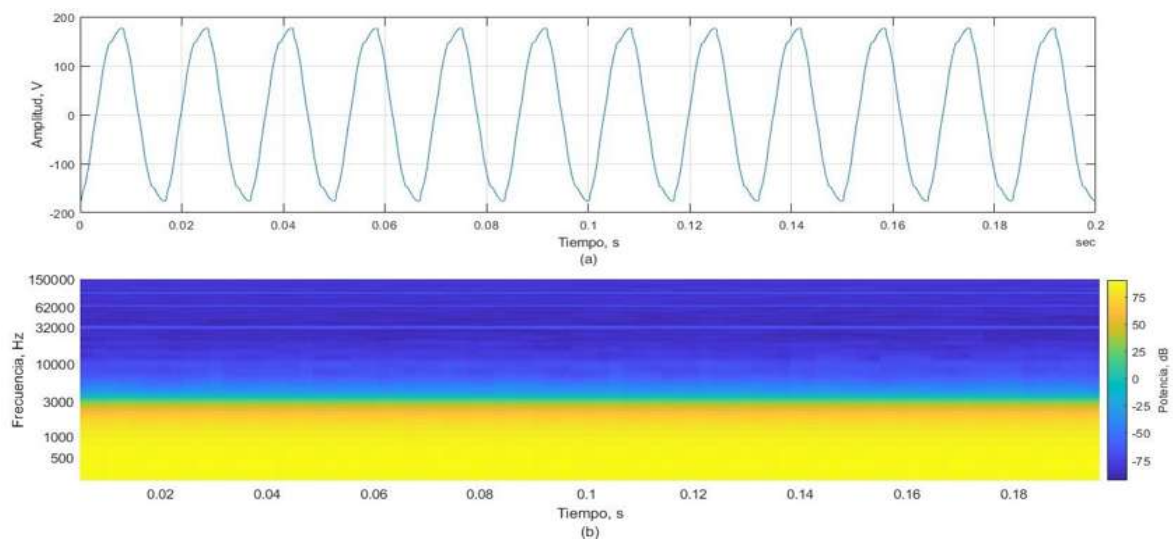


Figura 5.13: Emisión de voltaje para 90 lámparas LED tipo A en el dominio tiempo-frecuencia: a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Espectrograma obtenido con TFTC.

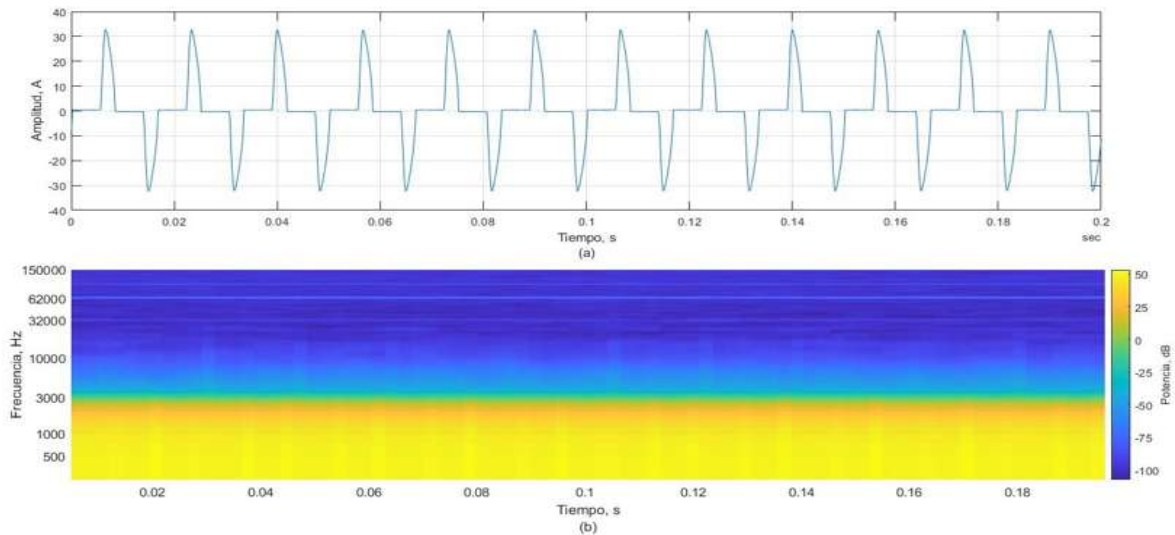


Figura 5.14: Emisión de corriente para 90 lámparas LED tipo A en el dominio tiempo-frecuencia: a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Espectrograma obtenido con TFTC.

5.2.1.3 Análisis en el dominio tiempo-frecuencia: Transformada Wavelet continua

La Figura 5.15 (a) describe la forma de onda en el tiempo del voltaje, mientras que la Figura 5.15 (b) presenta el escalograma de emisiones para la lámpara tipo A. Se puede observar que las emisiones generadas por este tipo de lámparas se encuentran en un rango de frecuencia de 0 a 8 kHz aproximadamente. De igual forma la Figura 5.16 (a) representa la señal de corriente demandada en el tiempo, mientras que la Figura 5.16 (b) presenta el escalograma de emisiones de dicha corriente. Se puede observar que la emisión más importante se encuentra en un rango armónico de 0 a 2 kHz, sin embargo, este método de procesamiento si es capaz de detectar las componentes fundamentales de 60 Hz de ambas señales. Además, se puede apreciar la variabilidad en el tiempo de las componentes supra-armónicas en el rango de 2 kHz a 8 kHz.

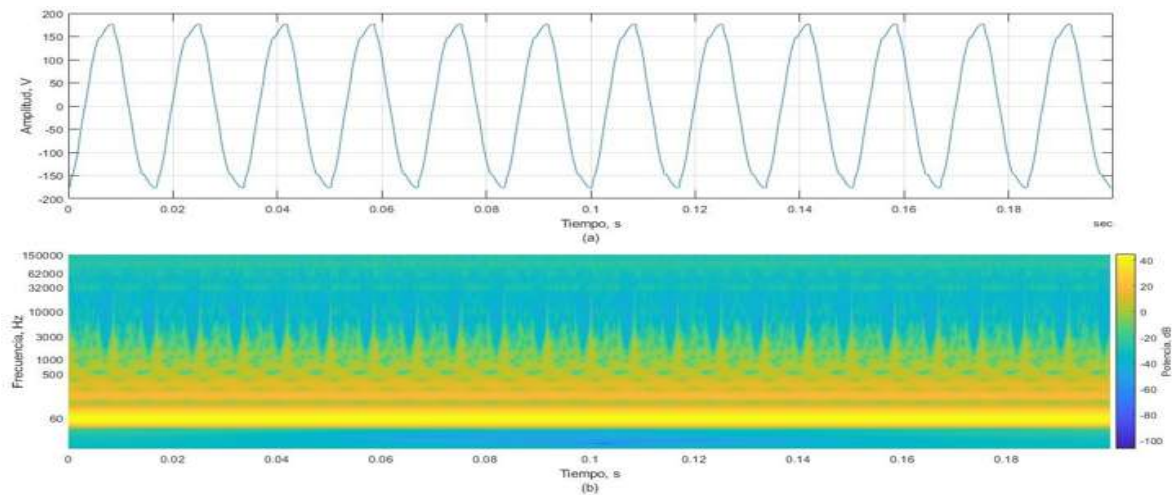


Figura 5.15: Emisión de voltaje para lámparas LED tipo A en el dominio tiempo-frecuencia: a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Escalograma con la WTC.

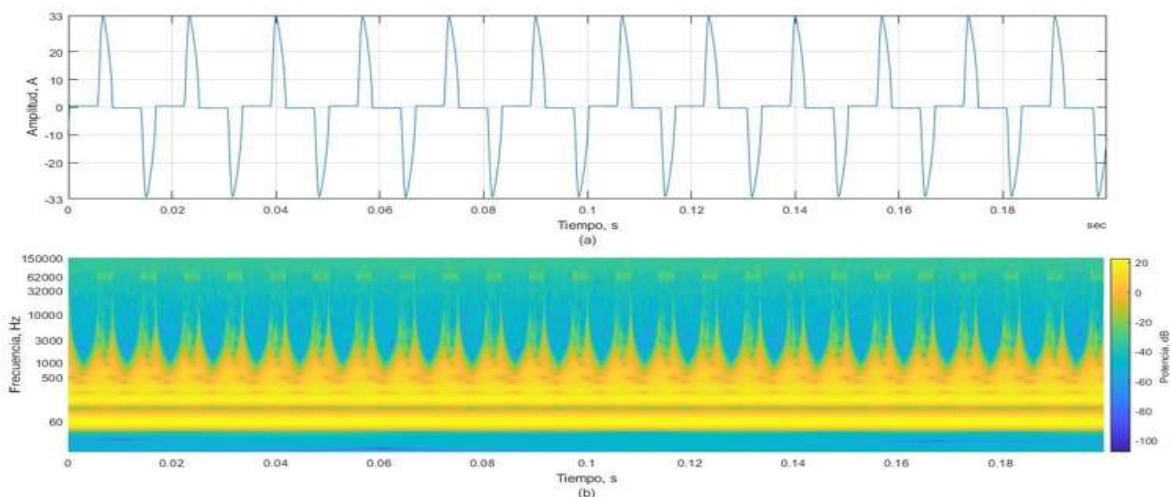


Figura 5.16: Emisión de corriente para lámparas LED tipo A en el dominio tiempo-frecuencia: a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Escalograma con la WTC

5.2.1.4 Análisis en el dominio tiempo-frecuencia: Análisis Wavelet multi-resolución

Se analiza la señal tanto de voltaje como de corriente de la lámpara tipo A utilizando el análisis Wavelet multi-resolución. En este caso de estudio se utiliza un nivel de descomposición de 8 bandas. Al utilizar este nivel de descomposición la señal original se divide en 8 bloques con diferentes rangos de frecuencias y al sumar estos 8 niveles se obtiene como resultado la señal original. Esto nos permite visualizar las señales en el dominio del tiempo y así clasificar cada nivel con un rango de frecuencia. En la Figura 5.17 se muestran las 8 bandas extraídas de la señal original de voltaje mediante el análisis Wavelet multi-resolución. De igual forma se muestra la señal original de voltaje. Se puede apreciar que la contaminación generada por las lámparas tipo A se aloja primordialmente en el rango armónico y, por lo tanto, los niveles

que representa esta contaminación generada por las lámparas se concentra en las bandas N5, N6, N7 y N8. Se observa que los niveles N6, N7 y N8 cuentan con las magnitudes más significativas. De igual forma, la Figura 5.18 reporta las 8 bandas extraídas de la señal original de corriente. Como se aprecia en la Figura 5.18, las bandas N5, N6, N7 y N8 contienen la mayor parte de información asociada a las componentes de frecuencias armónicas y supra-armónicas generadas por las lámparas tipo A. Se observa tanto en la señal de voltaje como de corriente que las señales de mayor magnitud se encuentran en las bandas N5, N6, N7 y N8. De la Tabla 5.2 se observa que en conjunto estas 4 bandas abarcan un rango de frecuencia de 0 a 15,626.25 Hz. Por lo tanto, la emisión de las lámparas tipo A se encuentra en este rango, concentrándose su mayor parte en el rango armónico.

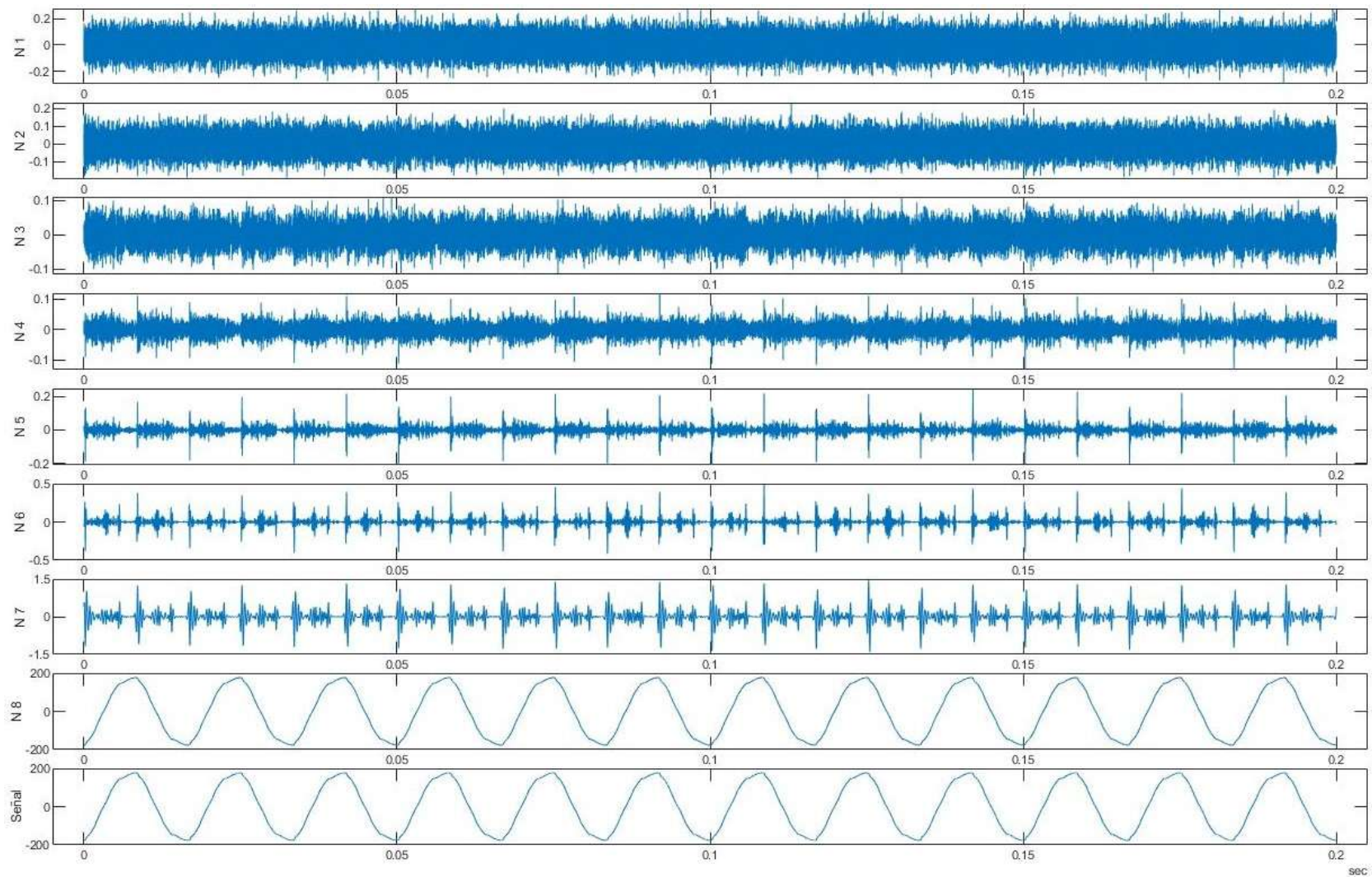


Figura 5.17: Descomposición en el dominio tiempo-frecuencia de la señal de voltaje utilizando el análisis Wavelet multi-resolución.

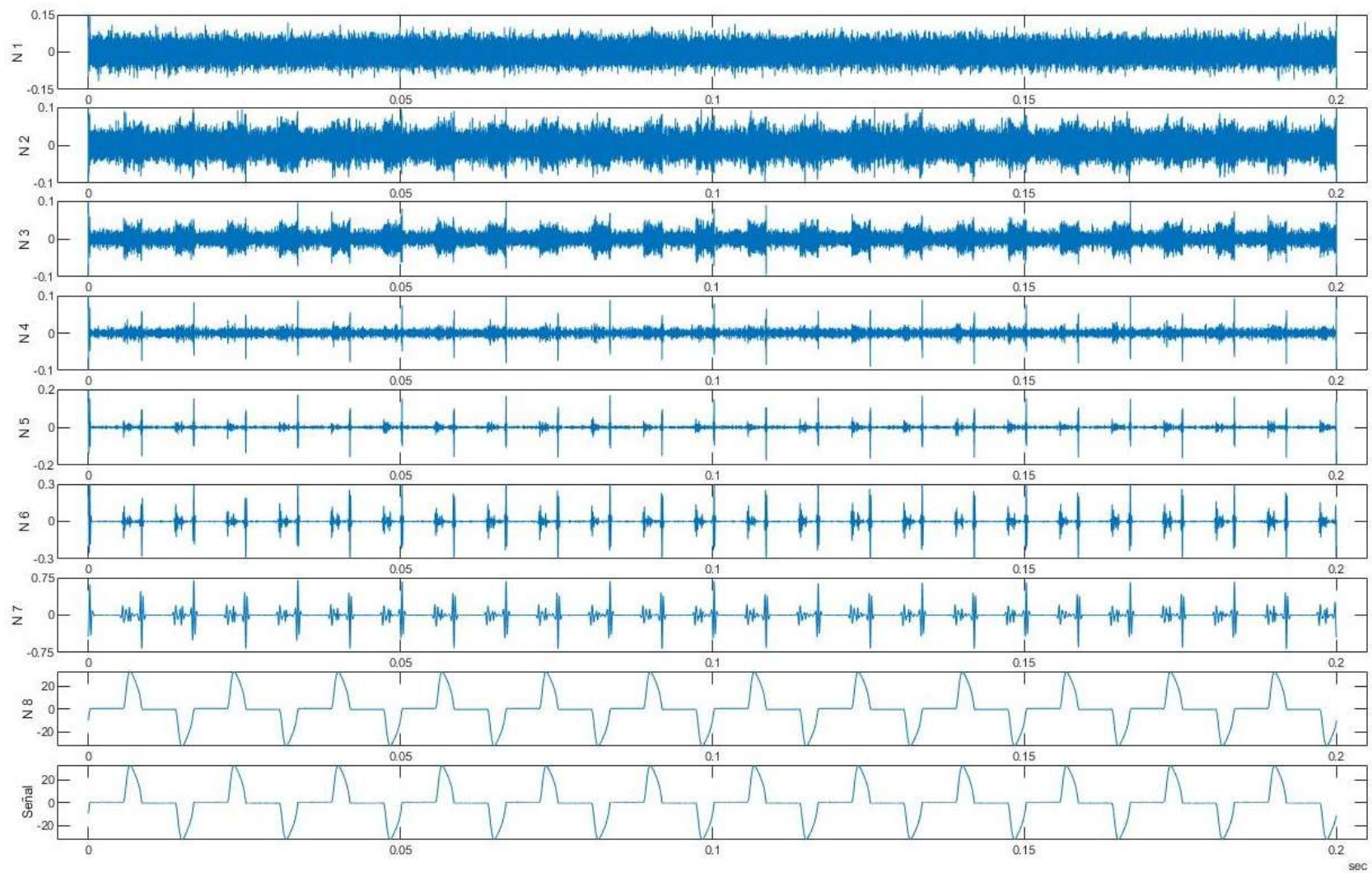


Figura 5.18: Descomposición en el dominio tiempo-frecuencia de la señal de corriente utilizando el análisis Wavelet multi-resolución.

5.2.2. Lámpara tipo B

La lámpara LED tipo B es una lámpara para alumbrado público de la marca LEDLINE, con un consumo de potencia de 100 W, muy económica y de alta intensidad luminosa. La Figura 5.19 describe las formas de onda en el tiempo del voltaje de alimentación y la corriente que demandan 5 lámparas. Se puede apreciar que el voltaje de alimentación presenta un bajo nivel de distorsión, mientras que la corriente presenta un alto nivel de distorsión de su forma de onda. La Figura 5.20 describe el plano de fase del voltaje de alimentación versus la corriente que demanda la lámpara LED tipo B. De este diagrama de fase se observa que este tipo lámpara LED representan una carga no lineal.

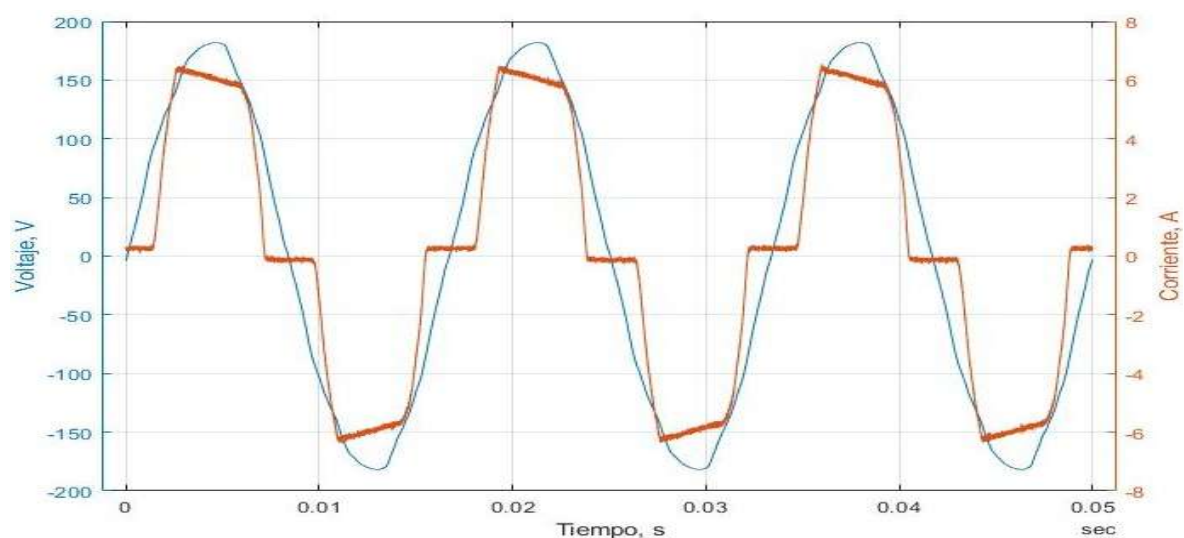


Figura 5.19: Formas de onda en el tiempo del voltaje y corriente para una lámpara LED tipo B.

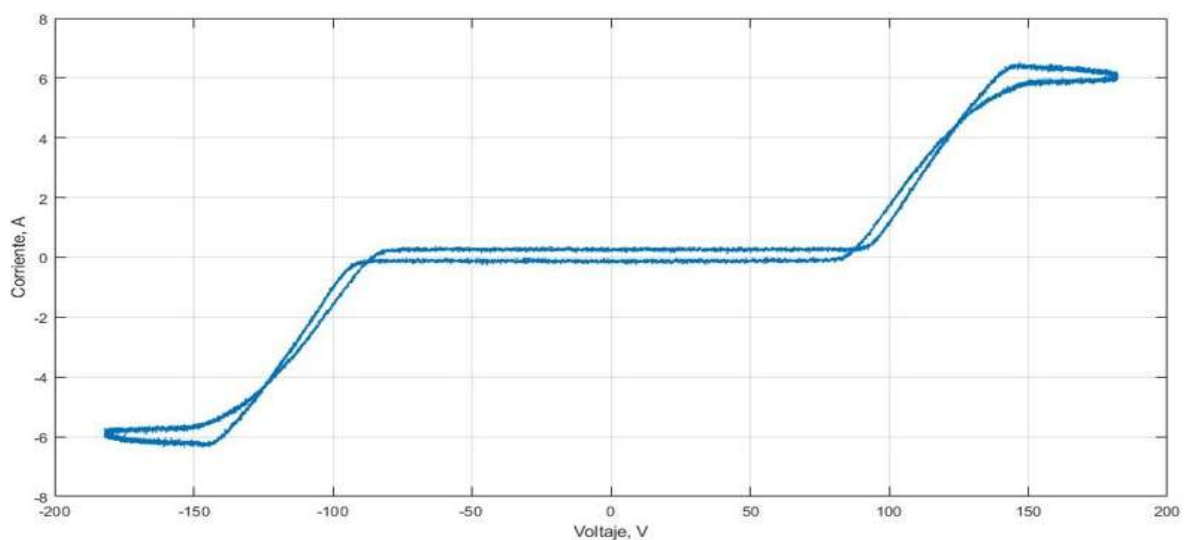


Figura 5.20: Curva característica V-I para 5 lámparas tipo B.

5.2.2.1 Análisis en el dominio de la frecuencia: Transformada discreta de Fourier

En las Figuras 5.21 y 5.22 se reportan los espectros en el dominio de la frecuencia de las señales de voltaje y corriente demandadas por la lámpara tipo A. La Figura 5.21 (a) muestra el espectro de frecuencia de el rango armónico, se observan las componentes armónicas de 3, 5, 7, 9, 11 y 13 presentan magnitudes de 2.3 V, 0.477 V, 0.7272 V, 1.8 V, 0.2439 V y 0.2111 V, respectivamente, De igual forma se detecta la componente de corriente directa y algunas componentes inter-armónicas y sub-armónicas. Respecto a las emisiones reportadas en la Figura 5.21 (b) para el rango de frecuencia de 2 kHz a 9 kHz se observa que la contaminación supra-armónica más significativa se encuentra al inicio de este rango de 2.1 kHz a la cual le corresponde una magnitud de 0.1473 V, al observar este rango de frecuencias se determina que la lámpara tipo B cuenta con una rango de emisión de 0 a 6 kHz aproximadamente. Por otra parte, se puede apreciar en la Figura 5.21 (c) que no existen cambios significativos en este rango de frecuencia de 9 kHz a 150 kHz. De igualforma que en el caso anterior sobresalen las frecuencias supra-armónicas de 32.2 kHz, 63.7 kHz, 96.8 kHz y 135.7 kHz. Sin embargo, estas frecuencias ya se habían detectado en la red eléctrica reportado en la Figura 5.4, en donde el origen de estas frecuencias supra-armónicas es desconocido.

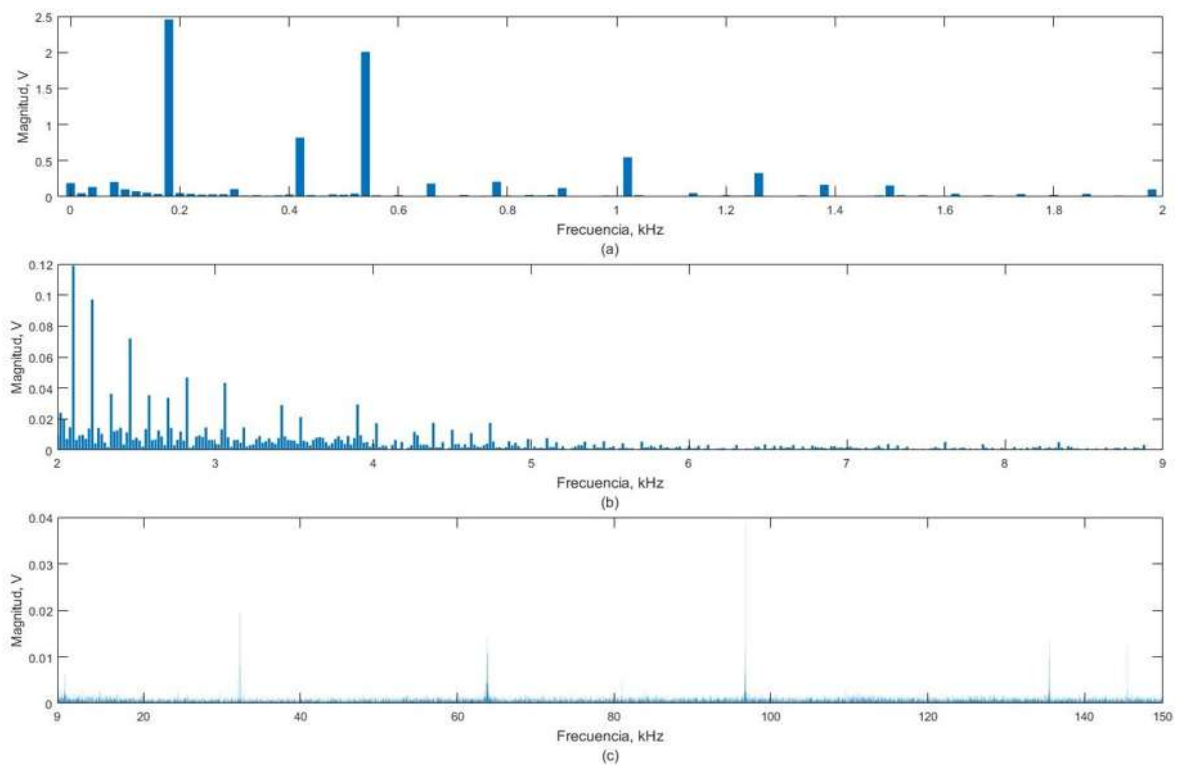


Figura 5.21: Espectro de frecuencia de la señal de voltaje, para lámpara LED tipo B en tres rangos de frecuencias diferentes: a).- 0 a 2 kHz, b).- 2 kHz a 9 kHz y c).- 9 kHz a 150 kHz.

En la Figura 5.22 se muestra el espectro de frecuencia de la señal de corriente demanda por las 5 lámparas LED. Para un rango armónico se aprecian las armónicas 3, 5, 7, 9 y 11 con magnitudes de 0.1096 A, 0.1856 A, 0.0444 A, 0.0633 A y 0.0446 A, respectivamente. se detecta la componente de corriente directa con una magnitud de 0.1015 A y no se observan componentes inter-armónicas y sub-armónicas. Respecto a las emisiones reportadas en la Figura 5.22 (b) para el rango de frecuencia de 2 kHz a 9 kHz se observa que la contaminación supra-armónica más importantes se encuentra al inicio de este rango. La frecuencia más significativa se encuentra a 2.2 kHz con una magnitud de 0.0032 A y 2.4 kHz con magnitud de 0.0025 A. De igual manera, en el rango supra-armónico de 9 kHz a 150 kHz reportado en la Figura 5.22 (c) sobresalen las frecuencias de 32.2 kHz, 63.7 kHz, 96.8 kHz, 135.7 kHz y 145.5 kHz las cuales son también las mismas frecuencias detectadas en la señal de voltaje de la red de baja tensión sin la presencia de estas cargas. La Tabla 5.4 representa el análisis comparativo del porcentaje de %THD de la red de distribución y la red de distribución con presencia de las lámpara tipo B. De la Tabla 5.4 se observa que la emisión de estas lámparas concentra su mayor parte de emisión en un rango armónico, obteniendo un incremento en el %THD de 2.4700 % a 2.6179 %.

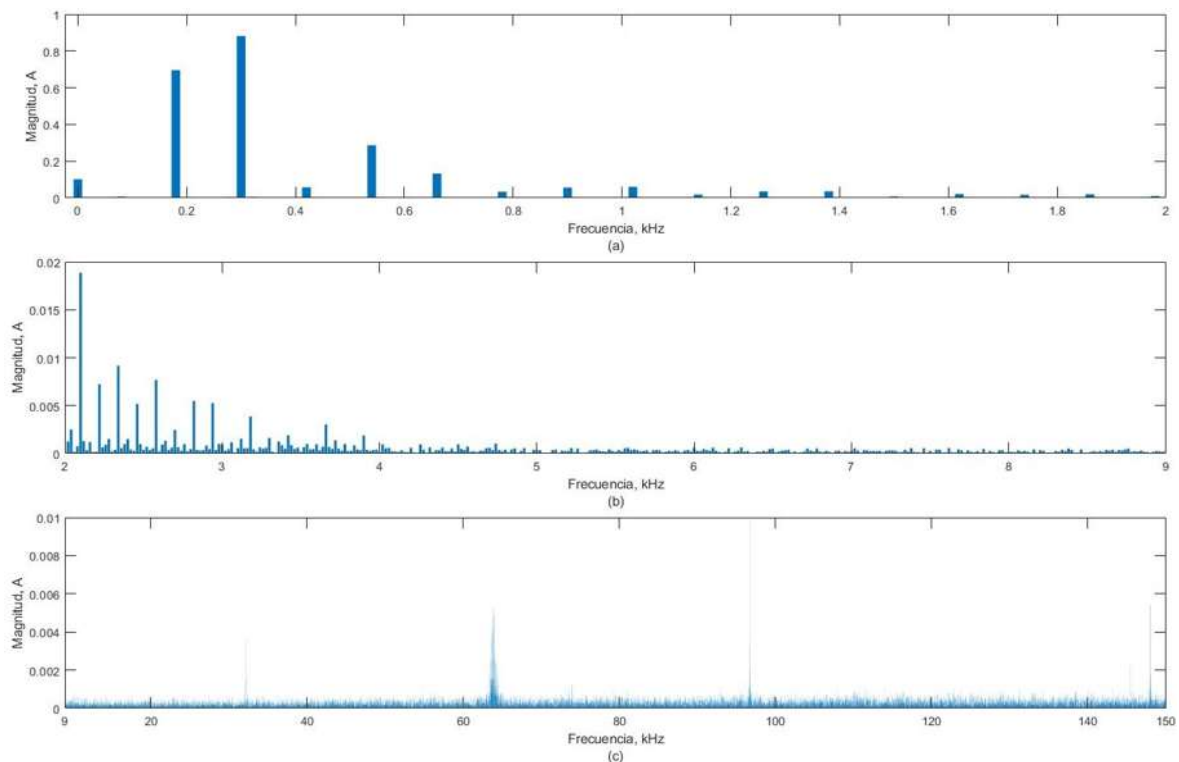


Figura 5.22: Espectro de frecuencia de señal de corriente, lámpara LED tipo B para el rango de frecuencias: a).- 0 a 2 kHz, b).- 2 kHz a 9 kHz y c).- 9 kHz a 150 kHz.

Tabla 5.4: Análisis comparativo del porcentaje de distorsión armónica para el voltaje de la red eléctrica con la lámpara tipo B.

Rango	Sin lámpara tipo B	Con lámpara tipo B
$0 \text{ Hz} < f < 2 \text{ kHz}$	2.4700	2.6179
$2 \text{ kHz} < f < 9 \text{ kHz}$	0.1745	0.1693
$9 \text{ kHz} < f < 150 \text{ kHz}$	0.0706	0.0708

5.2.2.2 Análisis en el dominio tiempo-frecuencia: Transformada de Fourier de tiempo corto

La Figura 5.23 describen el espectrograma de la señal voltaje, así como la forma de onda correspondiente en el dominio del tiempo para la lámpara LED tipo B. La Figura 5.23 (a) describe la forma de onda en el tiempo del voltaje, mientras que la Figura 5.23 (b) presenta el espectrograma de emisiones hasta la frecuencia de 150 kHz para la lámpara tipo B. De este espectrograma se puede apreciar la detección de las componentes supra-armónicas de 32.2 kHz y 63.7 kHz apenas visibles y estas generadas por fuentes desconocidas. De igual forma que en los casos anteriores esta herramienta no es capaz de detectar la componente fundamental ni las componentes armónicas. La Figura 5.24 (a) representa la señal de corriente en el tiempo demandada por estas lámparas LED, mientras que la Figura 5.24 (b) presenta el espectrograma de emisiones. Se puede apreciar que la Transformada de Fourier de Tiempo Corto no es capaz de detectar la presencia de la componente fundamental de 60 Hz en el rango armónico de 0 a 2 kHz. En este sentido, la TFTC erróneamente detecta un número infinito de frecuencias con magnitudes importantes en el rango de frecuencia de 0 a 3 kHz, de igual forma que en el espectrograma de voltaje se perciben las componentes de 32.2 kHz y 63.7 kHz, estas frecuencias ajenas a las emisiones de las lámparas tipo B.

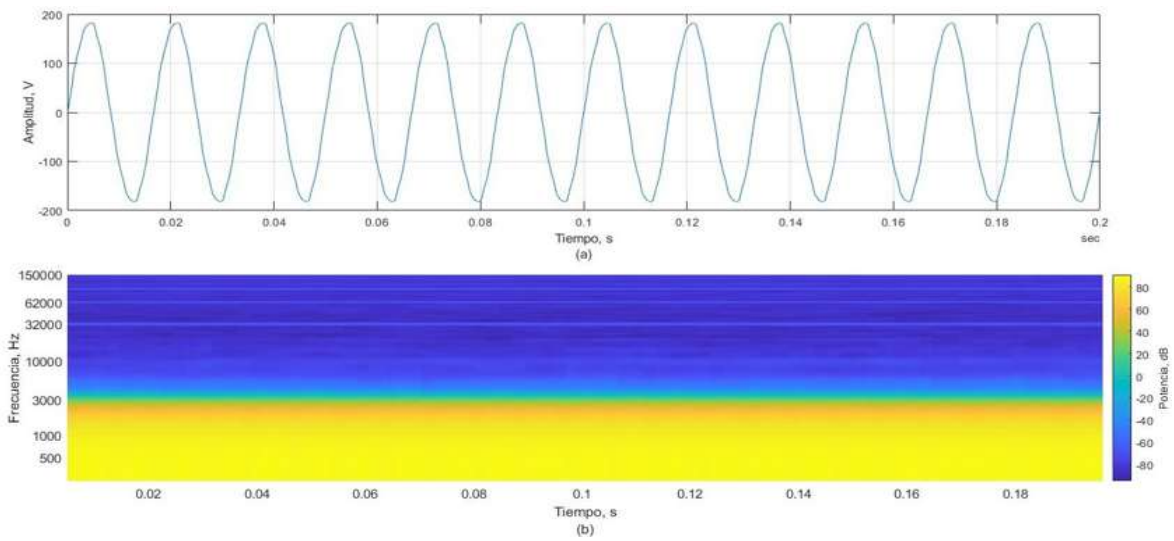


Figura 5.23: Emisión de voltaje para 5 lámparas LED tipo B en el dominio tiempo-frecuencia. a).- Forma de onda en el tiempo de señal de voltaje y b).- Espectrograma con la TFTC.

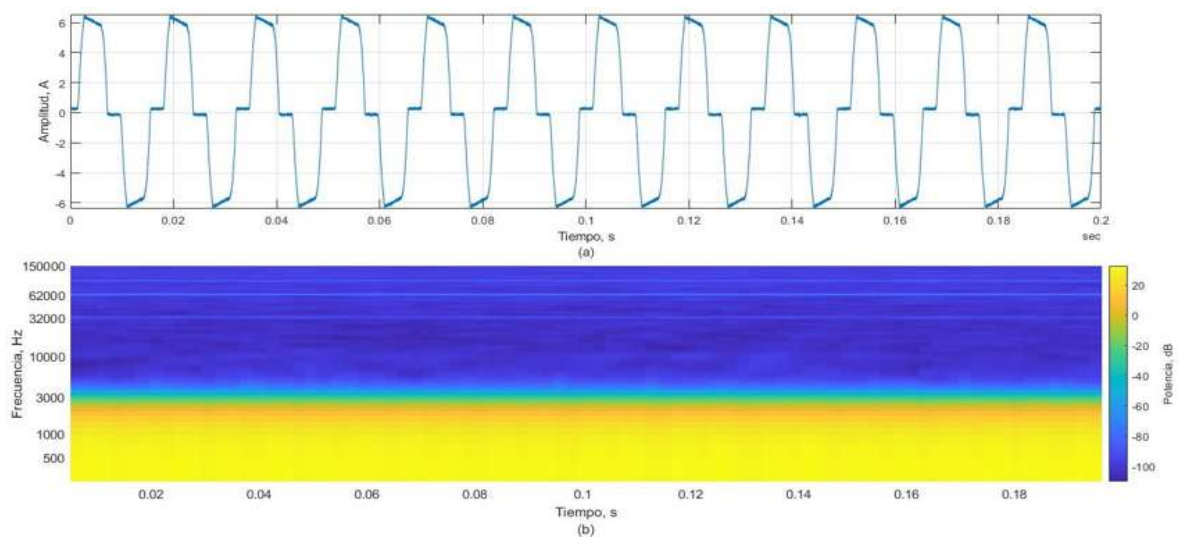


Figura 5.24: Emisión de corriente para 5 lámparas LED tipo B en el dominio tiempo-frecuencia. a).- Forma de onda en el tiempo de señal de corriente y b).- Espectrograma con la TFTC.

5.2.2.3 Análisis en el dominio tiempo-frecuencia: Transformada Wavelet continua

La Figura 5.25 (a) muestra la forma de onda en el tiempo del voltaje, mientras que la Figura 5.25 (b) presenta el escalograma de emisiones para la lámpara tipo B. Se puede observar que las emisiones al inicio del rango supra-armónico de 2 kHz son muy bajas. Esto se debe básicamente al hecho de que la emisión de este tipo de lámparas concentra su mayor parte de contaminación en el rango armónico. De igual forma la Figura 5.26 (a) representa la señal de corriente demandada en el tiempo, mientras que la Figura 5.26 (b) presenta el escalograma de emisiones. Se puede observar que las emisiones de mayor magnitud se concentran en un rango armónico. De los escalogramas de voltaje y corriente se observa que la contaminación emitida por estas lámparas abarca un rango de frecuencia hasta aproximadamente 5 kHz. Se observa la detección de la componente fundamental de 60 Hz, la 3, 5 y 9 armónica en ambos escalogramas.

5.2.2.4 Análisis en el dominio del tiempo-frecuencia: Análisis Wavelet multi-resolución

A continuación, se analiza la señal tanto de voltaje como de corriente de las lámparas tipo B utilizando el análisis Wavelet multi-resolución. En la Figura 5.27 se muestran las 8 bandas extraídas de la señal de voltaje mediante el análisis Wavelet multi-resolución. Se puede apreciar que la contaminación generada por las lámparas tipo B aloja su mayor parte en el rango armónico, este rango se aloja en la banda N8. De igual forma, esta contaminación emitida por las lámparas tipo B se extiende hasta las bandas N6 y N7, ya que estas señales cuentan con las magnitudes más grandes de las 7 bandas restantes. Por ultimo, la Figura 5.28 reporta las 8 bandas extraídas de la señal de corriente. Como se aprecia en la Figura 5.28 las bandas N6, N7 y N8 contienen la información asociada a las componentes de frecuencia, ya que estas cuentan con las mayores magnitudes. De la Tabla 5.2 se observa que estas bandas combinadas abarcan un rango de frecuencia de 0 a 7,813.12 Hz. Estos resultados coinciden con los observados en el espectro de frecuencia y los escalogramas mostrados anteriormente.

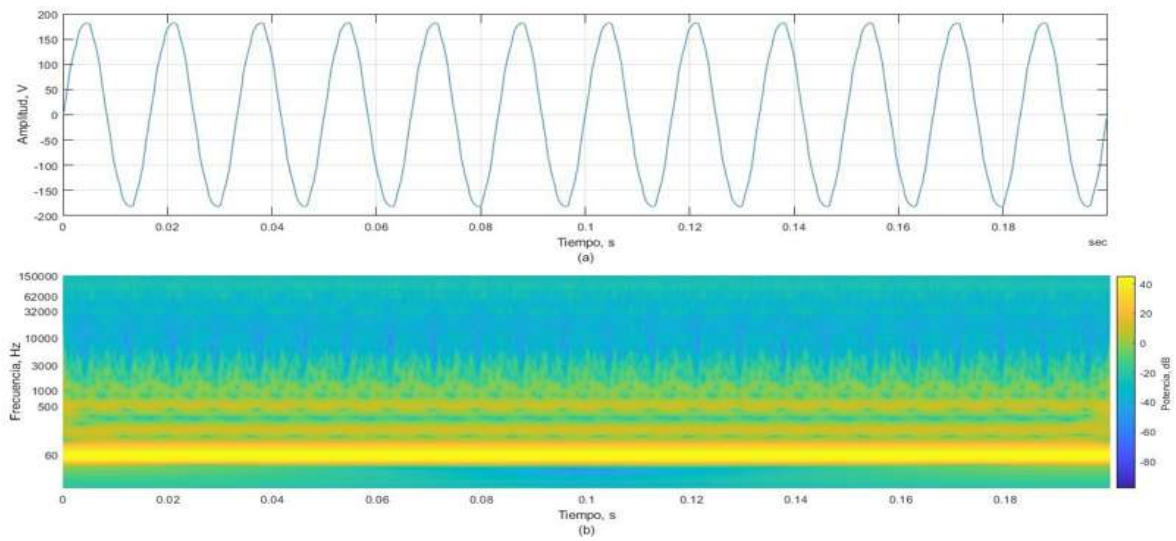


Figura 5.25: Emisión de voltaje para lámparas LED tipo B en el dominio tiempo-frecuencia: a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Escalograma con la WTC.

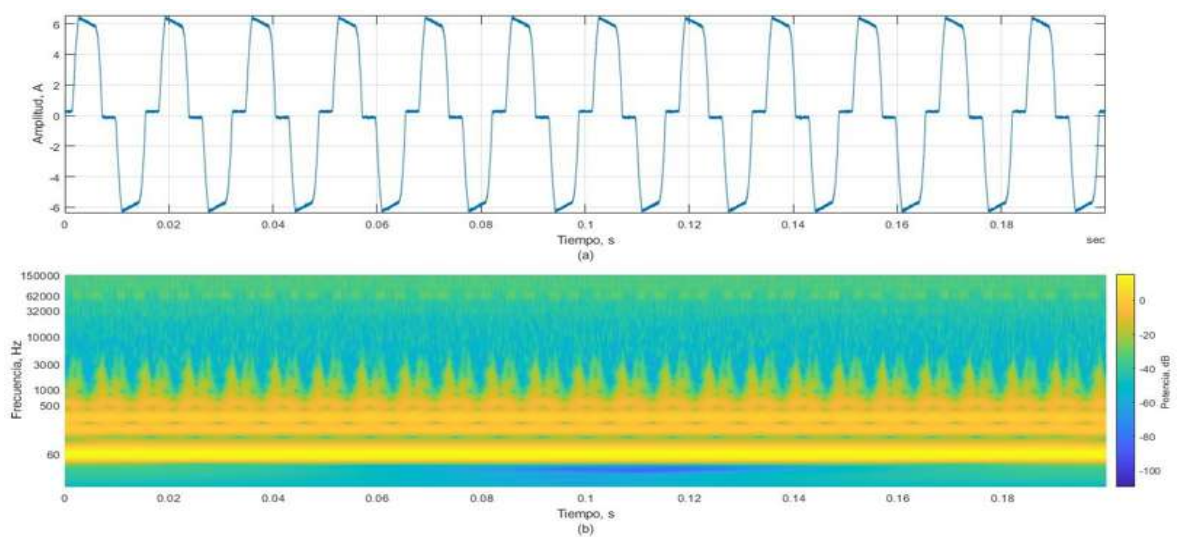


Figura 5.26: Emisión de corriente para lámparas LED tipo B en el dominio tiempo-frecuencia: a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Escalograma con la WTC

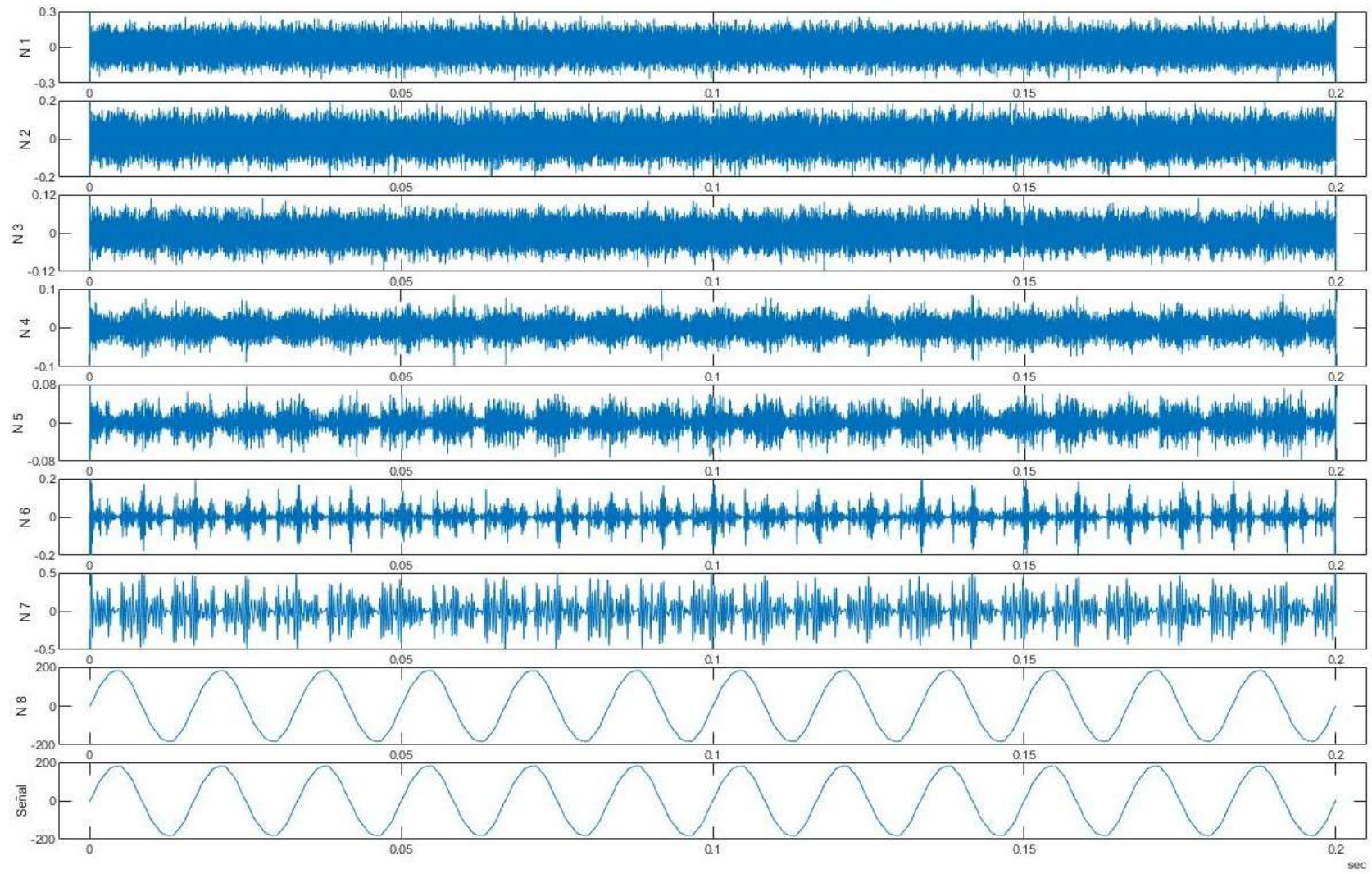


Figura 5.27: Descomposición en dominio del tiempo-frecuencia de la señal de voltaje de la lámpara tipo B utilizando análisis Wavelet multi-resolución.

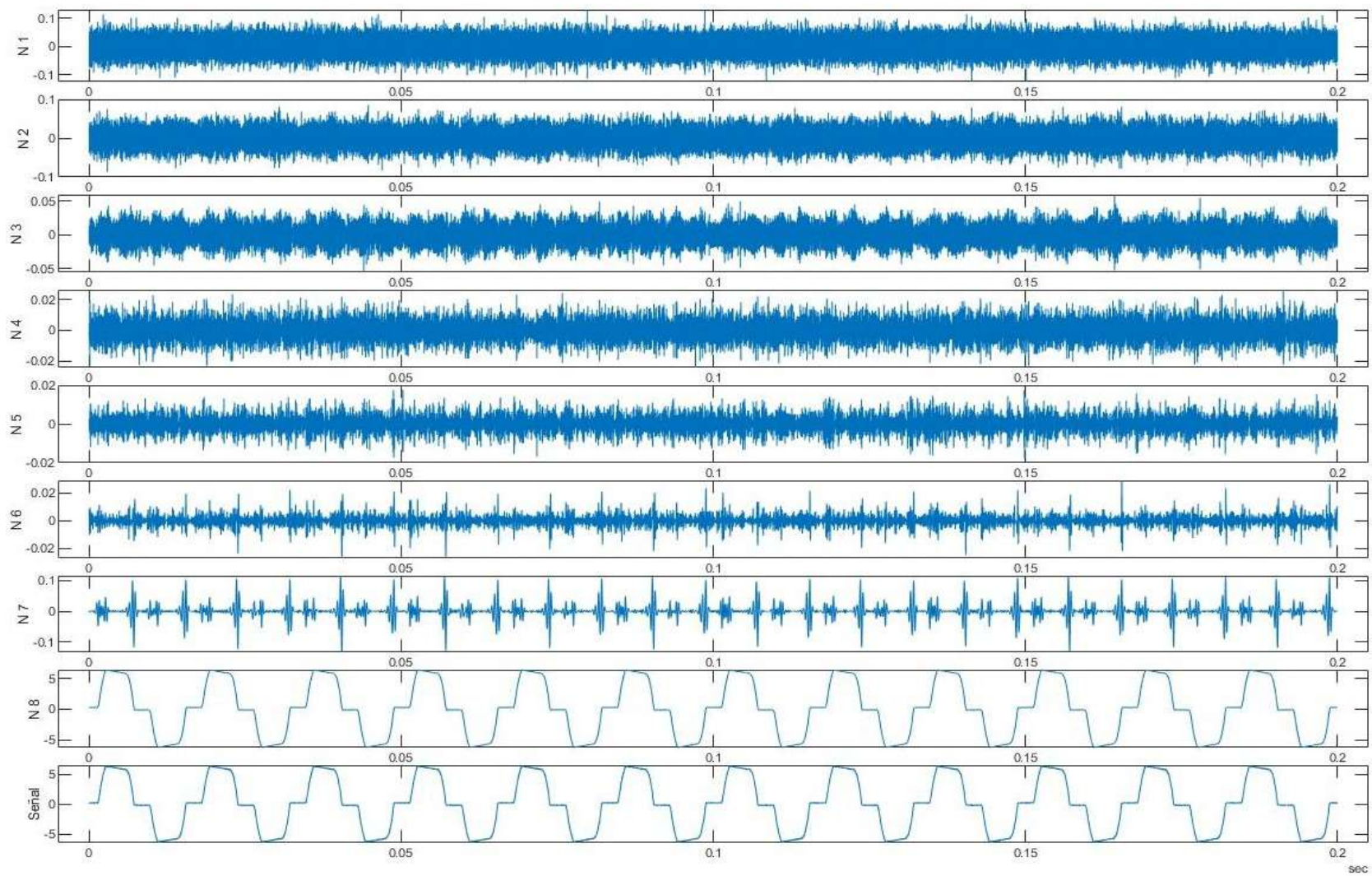


Figura 5.28: Descomposición en dominio del tiempo-frecuencia de la señal de corriente de la lámpara tipo B utilizando la análisis Wavelet multi-resolución.

5.2.3. Lámpara tipo C

En esta sección se estudia la lámpara tipo C de la marca IPSA. Esta lámpara es muy común en zonas urbanas ya que se utilizan comúnmente para el alumbrado público. Cuentan con una potencia nominal de 100 W y una alta intensidad luminosa. La Figura 5.29 describe las formas de onda en el tiempo del voltaje de alimentación y la corriente que demanda la lámpara tipo C. Se puede apreciar que el voltaje de alimentación presenta un bajo nivel de distorsión, de igual forma, la distorsión de la forma de onda de corriente es mucho menor que las formas de onda demandadas por las lámparas A y B. Además se puede apreciar que la forma de onda de la corriente se adelanta ligeramente a la forma de onda del voltaje. La forma de onda de la corriente que demanda esta lámpara se asemeja más al desempeño de una carga lineal. La Figura 5.30 describe el plano de fase del voltaje de alimentación versus la corriente que demandan las lámparas LED tipo C. Se puede apreciar que el plano de fase describe una elipse, por lo tanto, la lámpara LED tipo C se comporta como una carga lineal capacitiva.

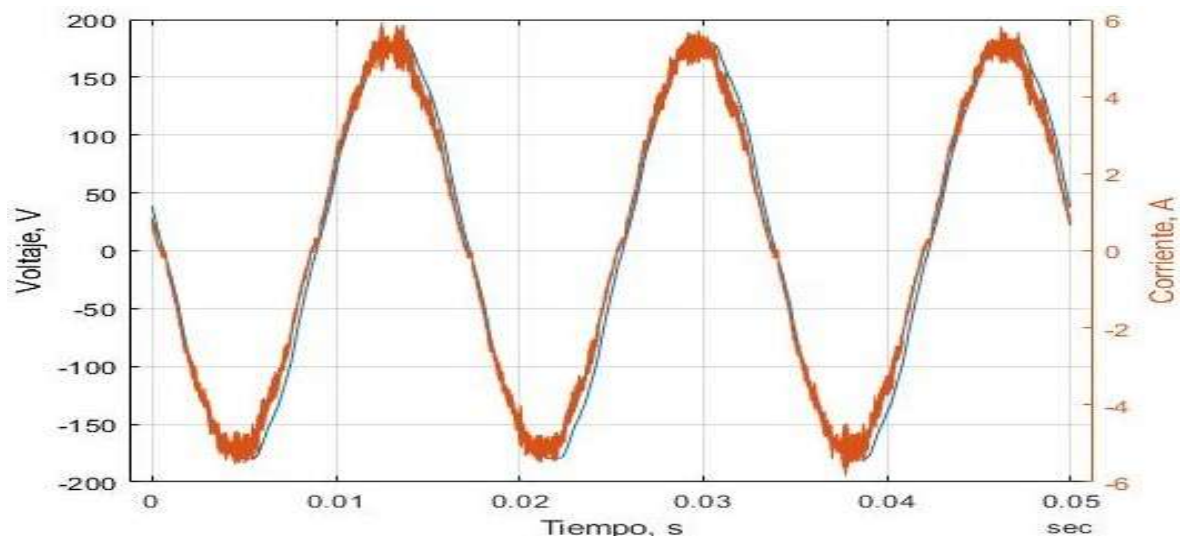


Figura 5.29: Formas de onda en el tiempo de voltaje y corriente demandada por la lámpara LED tipo C.

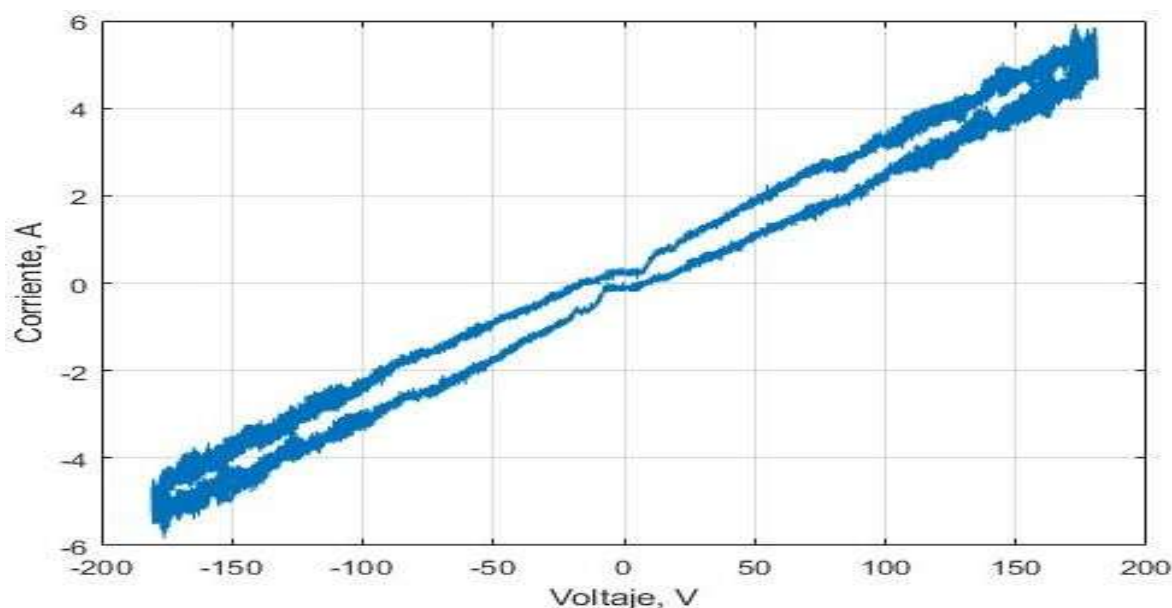


Figura 5.30: Curva característica V - I para lámparas LED tipo C.

5.2.3.1 Análisis en el dominio de la frecuencia: Transformada discreta de Fourier

A continuación, se analiza la señal de voltaje y corriente demandada por 5 lámparas LED de alumbrado público de la marca IPSA. En las Figuras 5.31 y 5.32 se muestran los espectros de frecuencia de ambas señales.

Se puede observar en la Figura 5.31 en un rango armónico la aparición de las componentes armónicas 3 y 9 con magnitudes 2.21 V y 1.82 V, respectivamente, estas componentes cuentan con las mayores magnitudes en este rango, de igual forma hace presencia la componente de corriente directa y componentes inter-armónica y Sub-armónicas. Esta componente de corriente directa cuanta con un valor de 0.1940 V. Sin embargo, estas magnitudes armónicas son pequeñas en comparación con las magnitudes obtenidas con las lámparas tipo A y tipo B para este rango de frecuencia. Respecto a las emisiones reportadas en la Figura 5.31 (b) para el rango de frecuencia de 2 kHz a 9 kHz se observa que la contaminación supra-armónica más significativa aparece a una frecuencia de 2.2 kHz con magnitud de 0.0672 V. Después de esta frecuencia las magnitudes tienden a decrecer hasta una frecuencia de 7 kHz aproximadamente. Por otra parte, se puede apreciar en la Figura 5.31 (c) en el rango de 9 kHz a 150 kHz que sobresalen las frecuencias supra-armónicas de 32.2 kHz, 96.8 kHz, 135.7 kHz y 145.5 kHz. Sin embargo, estas frecuencias ya se habían detectado en la red eléctrica de baja tensión reportado en la Figura 5.4, en donde el origen de estas frecuencias supra-armónicas es desconocido. Adicionalmente se observa la aparición de frecuencias nuevas alrededor de 62.2 kHz. Esta

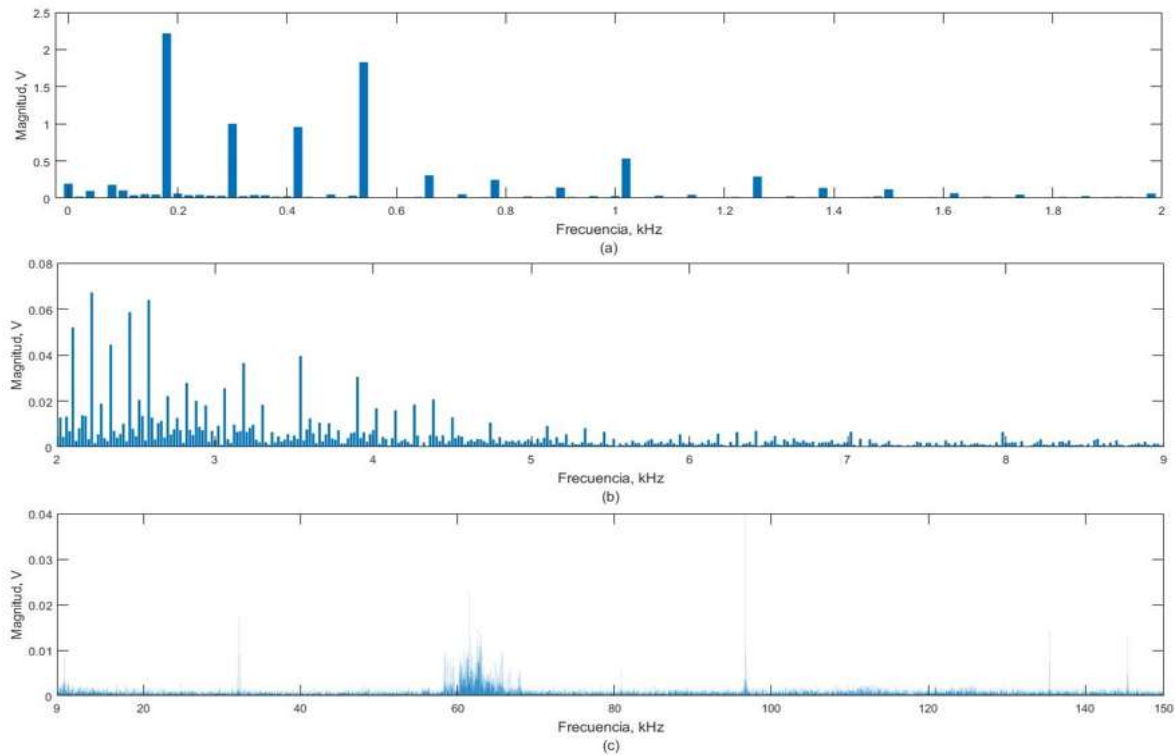


Figura 5.31: Espectro de frecuencia de la señal de voltaje, para lámpara LED tipo C en tres rangos de frecuencias diferentes: a).- 0 a 2 kHz, b).- 2 kHz a 9 kHz y c).- 9 kHz a 150 kHz.

frecuencia está asociada a la frecuencia de conmutación de la electrónica de potencia que contiene el manejador de la lámpara LED tipo C. La magnitud mayor de este rango de frecuencias es de 0.0225 V a 61.4 kHz y abarca un rango de frecuencias desde 57.6 kHz a 69.6 kHz.

Por otra parte, el espectro armónico correspondiente de la corriente se observa en la Figura 5.32. Los resultados reportados en la Figura 5.32 (a) para el rango armónico de 0 a 2 kHz no indica componentes armónicas significativas. Las componentes armónicas de mayor magnitud son 3, 7 y 9 con magnitudes de 0.0696 A, 0.0430 A y 0.0712 A, respectivamente. A diferencia de los espectros de frecuencia mostrados por las lámparas tipo A y tipo B, estas lámparas tipo C generan contaminación inter-armónica, sub-armónica y mayormente un incremento muy significativo de la componente de corriente directa. Respecto a las emisiones reportadas en la Figura 5.32 (b) para el rango de frecuencia de 2 a 9 kHz se observa que la contaminación supra-armónica más significativa se encuentra al inicio de este rango, con una frecuencia de 2.1 kHz y una magnitud de 0.0091 A. Por último, la Figura 5.32 (c) reporta el rango supra-armónico de 9 kHz a 150 kHz. En este rango se observan las frecuencias generadas por las lámparas LED tipo C. Este primer conjunto de frecuencias cuenta con un rango de frecuencia de 57.6 kHz a 69.6 kHz, en donde la mayor magnitud detectada en este rango es de 0.03 A a

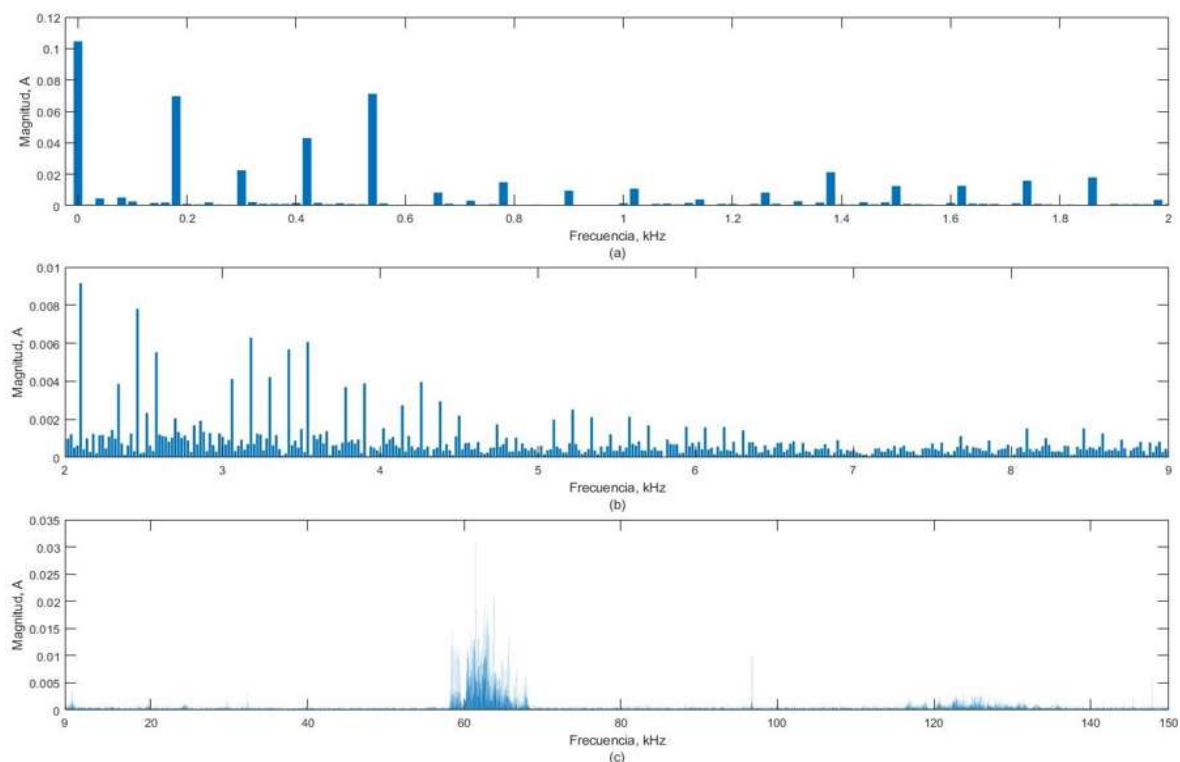


Figura 5.32: Espectro de frecuencia de la señal de corriente, para lámpara LED tipo C en tres rangos de frecuencias diferentes: a).- 0 a 2 kHz, b).- 2 kHz a 9 kHz y c).- 9 kHz a 150 kHz.

una frecuencia de 61.4 kHz. El segundo conjunto de frecuencias provocado 'por estas lámparas se detecta es un múltiplo del doble del primer conjunto de frecuencias. Se observan magnitudes mucho menores en comparación con las frecuencias del primer conjunto. Este segundo rango de frecuencias abarca un rango de 115.4 kHz a 139.2 kHz. La mayor magnitud encontrada en este rango es de 0.0023 A a una frecuencia de 122.8 kHz. Las frecuencias mostradas en este rango coinciden con la frecuencia de conmutación de la electrónica de potencia que contienen las lámparas tipo C. Esto se debe básicamente al hecho de que la lámpara tipo C posee un circuito corrector de factor de potencia operando a alta frecuencia.

La Tabla 5.5 presenta un análisis comparativo del porcentaje de %THD y %TSHD para el voltaje de la red de distribución y el voltaje de la red de distribución con existencia de las lámparas tipo C. De la Tabla 5.5 se muestra que la emisión de las lámparas tipo C se concentra en un rango armónico de 0 a 2 kHz y un rango supra-armónico de 9 kHz a 150 kHz, esto se puede corroborar comparando los %THD y %TSHD de estos dos rangos de frecuencia.

Tabla 5.5: Análisis comparativo del porcentaje de distorsión armónica y porcentaje de distorsión supra-armónica para el voltaje de la red eléctrica con la lámpara tipo C.

Rango	Sin lámpara tipo C	Con lámpara tipo C
$0 \text{ Hz} < f < 2 \text{ kHz}$	2.4700	2.5778
$2 \text{ kHz} < f < 9 \text{ kHz}$	0.1745	0.1382
$9 \text{ kHz} < f < 150 \text{ kHz}$	0.0706	0.0991

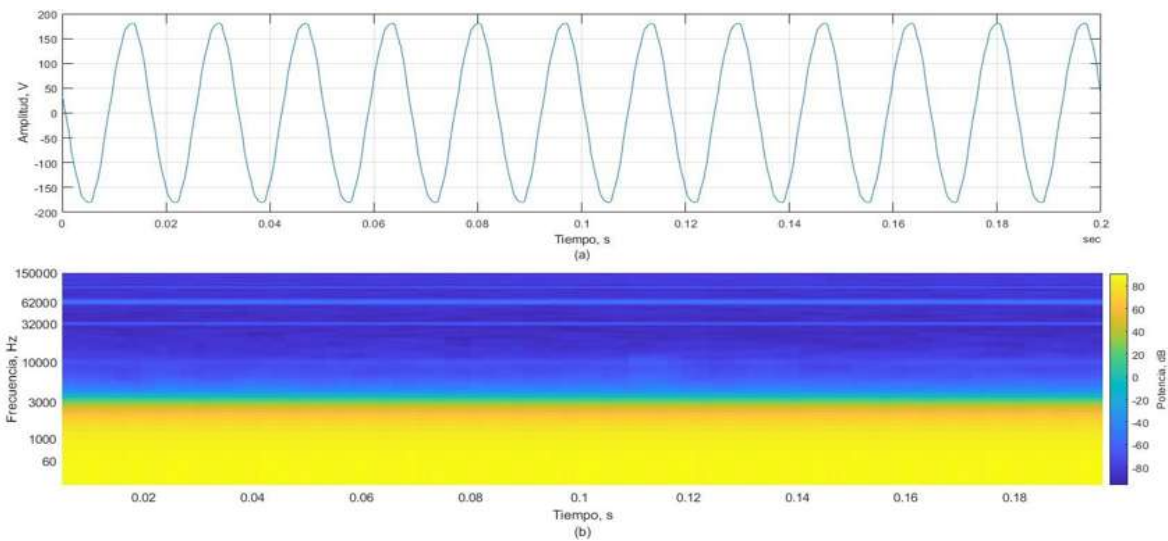


Figura 5.33: Emisión de voltaje para 5 lámparas LED tipo C en el dominio tiempo-frecuencia. a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Espectrograma con la TFTC.

5.2.3.2 Análisis en el dominio tiempo-frecuencia: Transformada de Fourier de tiempo corto

Se analiza por medio de la transformada de Fourier de tiempo corto las señales de voltaje y corriente demandadas por 5 lámparas LED de la marca IPSA. La Figura 5.33 (a) describe la forma de onda en el tiempo del voltaje, mientras que la Figura 5.33 (b) presenta el espectrograma de emisiones. De este espectrograma de voltaje se puede apreciar la emisión correspondiente a las lámparas a la frecuencia de 62 kHz. Además, se observan las componentes supra-armónicas generadas por fuentes desconocidas a frecuencias de 32 kHz y 97 kHz. Por otra parte, la Figura 5.34 (a) describe la forma de onda en el tiempo de la señal de corriente demandada por las lámparas tipo C, en donde se observa que la forma de onda tiende a ser sinusoidal, pero con un pequeño rizado en las crestas de la señal. La Figura 5.34 (b) presenta el espectrograma de emisiones de esta señal de corriente, en donde se aprecia la emisión correspondiente a la frecuencia de conmutación de las lámparas tipo C a una frecuencia de 62 kHz

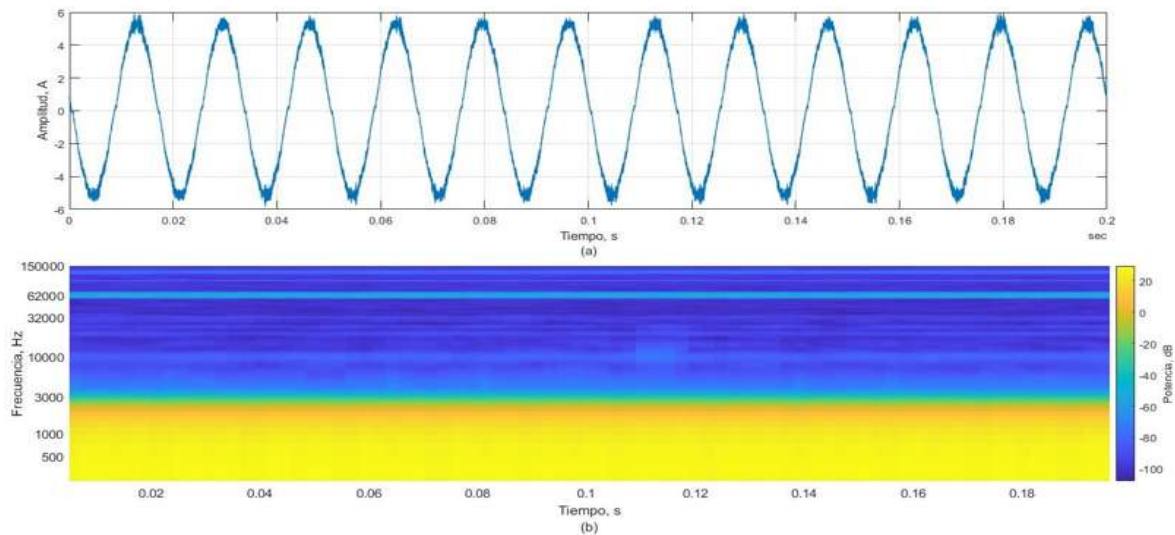


Figura 5.34: Emisión de corriente para 5 lámparas LED tipo C en el dominio tiempo-frecuencia. a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Espectrograma con la TFTC.

y su múltiplo a 124 kHz. La TFTC erróneamente detecta un número infinito de frecuencias con magnitudes importantes en el rango de frecuencia de 0 a 3 kHz.

5.2.3.3 Análisis en el dominio tiempo-frecuencia: Transformada Wavelet continua

Las Figuras 5.35 y 5.36 describen la forma de onda y escalogramas de las señales de voltaje y corriente para la lámpara LED tipo C obtenidas con la transformada Wavelet de tiempo continuo. La Figura 5.35 (a) describe la forma de onda en el tiempo del voltaje, mientras que la Figura 5.35 (b) presenta el escalograma de emisiones. Se puede observar débilmente las emisiones en un rango supra-armónico. Esto se debe básicamente al hecho de que las emisiones son muy débiles en la señal de voltaje, sin embargo, en un rango armónico se detecta adecuadamente la componente fundamental de 60 Hz y los armónicos 3 y 9. De igual forma la Figura 5.36 (a) representa la señal de corriente demandada en el tiempo, mientras que la Figura 5.36 (b) presenta el escalograma de emisión. Se puede observar la detección de la componente fundamental de 60 Hz en un rango armónico, además de la 3 y 9 armónica. Mientras que en un rango supra-armónico se detectan las emisiones generadas por las lámparas a una frecuencia de 62 kHz aproximadamente. Al observar los resultados obtenidos de los escalogramas de voltaje y corriente se detectan estas componentes de supra-armónicas generadas por la conexión de las lámparas tipo C en la señal de voltaje y corriente. La aparición de esta contaminación supra-armónica coincide en tiempo con las crestas de ambas señales. Por lo tanto, el rizado que se observa en las crestas de la señal de corriente esta asociado a esta contaminación supra-armónica. En contraste, los resultados reportados en la Figura 5.34 usando la transformada de Fourier de tiempo corto indican erróneamente que existe contaminación supra-armónica

constante en todo instante de tiempo.

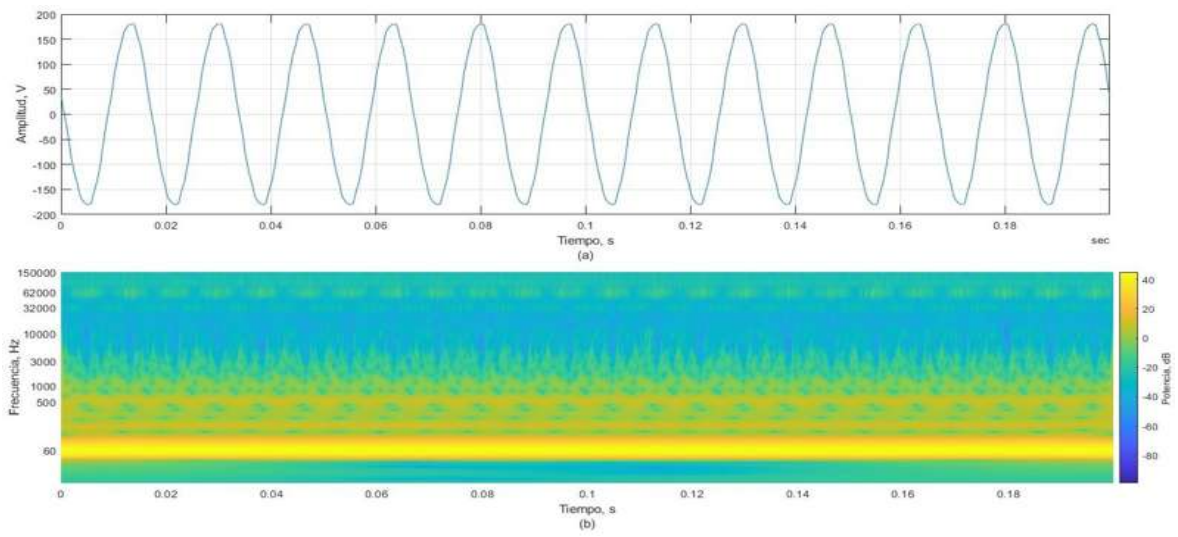


Figura 5.35: Emisión de voltaje para lámparas LED tipo C en el dominio tiempo-frecuencia. a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Escalograma con la WTC.

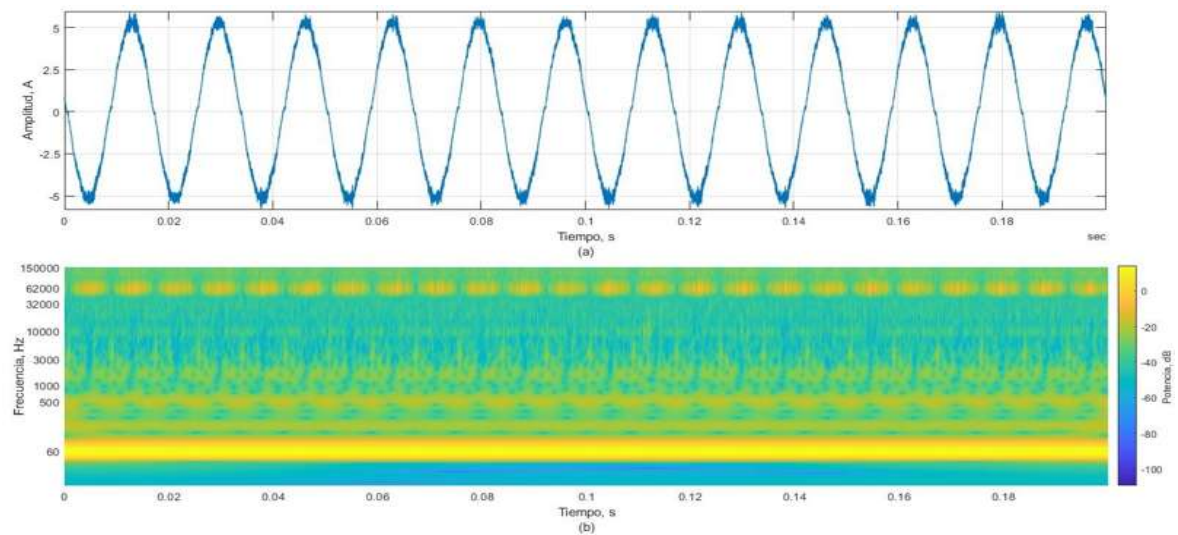


Figura 5.36: Emisión de corriente para lámparas LED tipo C en el dominio tiempo-frecuencia. a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Escalograma con la WTC

5.2.3.4 Análisis en el dominio tiempo-frecuencia: Análisis Wavelet multi-resolución

Se analizan ahora las formas de onda tanto de voltaje como de corriente de la lámpara tipo C utilizando el análisis Wavelet multi-resolución. Se puede apreciar en la Figura 5.37 que la contaminación generada por la lámpara tipo C se aloja en el rango supra-armónico. Por lo tanto, la contaminación generada por las lámparas se detecta en las bandas N2 y N3. Estas bandas presentan magnitudes en el orden de ± 0.3 V y ± 0.2 V, respectivamente. Se observan claramente la característica variante en el tiempo de las emisiones supra-armónicas existentes en las formas de ondas de estas dos bandas. De igual forma, se aprecia en la Figura 5.38 las bandas N2 y N3 contienen la característica variante en el tiempo asociada a las componentes de frecuencia supra-armónicas generadas por las lámparas tipo C ya que este tipo de lámparas emite componentes de frecuencia en este rango de emisión. Se puede apreciar en la Figura 5.38 que las bandas N2 y N3 presentan magnitudes en el rango de ± 0.3 y ± 0.3 , respectivamente. Por lo tanto, de la Tabla 5.2 se observa que estas dos bandas en combinación cuentan con un rango de frecuencia de 31,252.5 a 125,010 Hz, dentro de este rango de frecuencia se encuentra el conjunto de frecuencias emitido por operación de las lámparas LED tipo C.

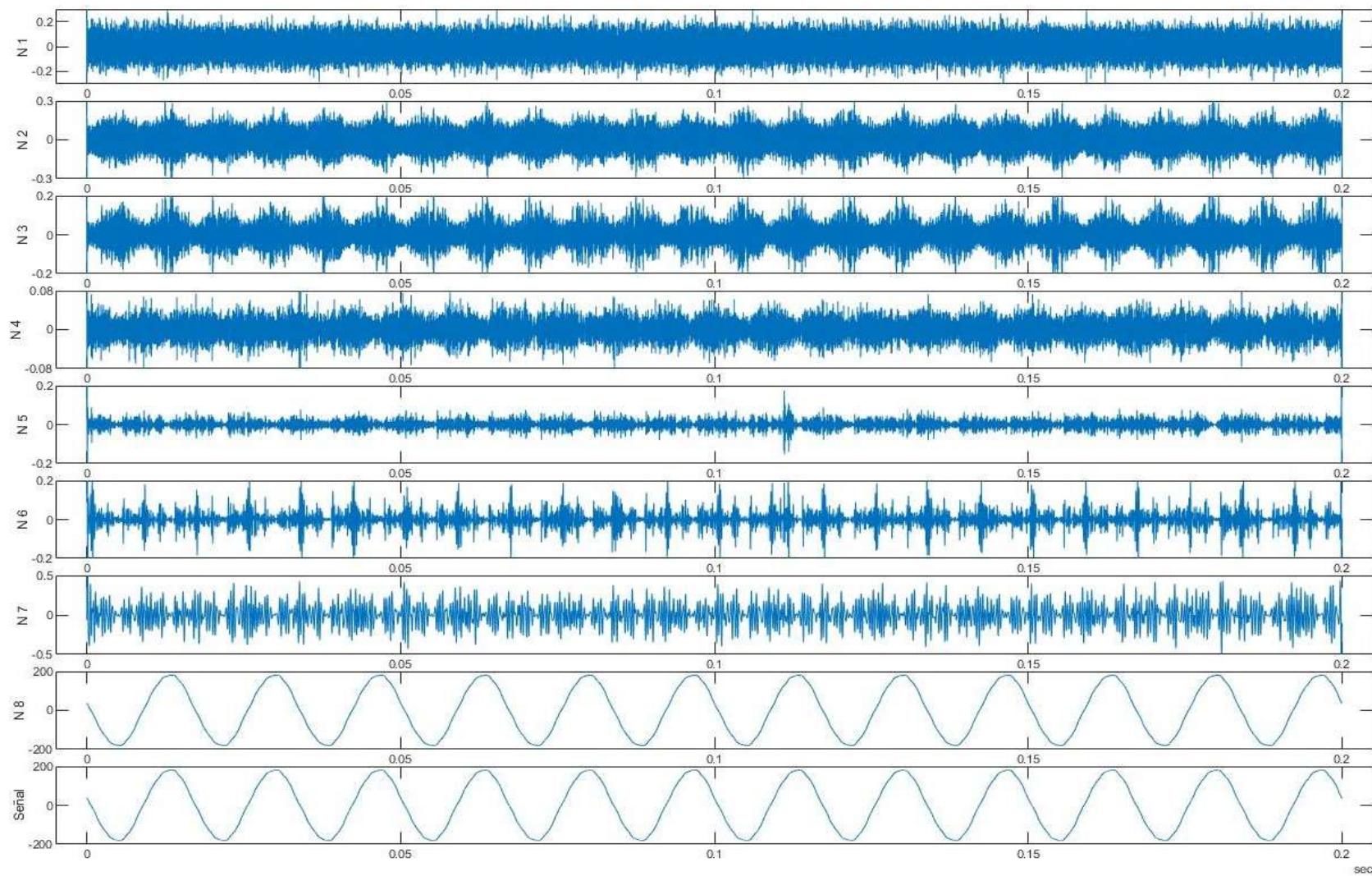


Figura 5.37: Descomposición en dominio de tiempo-frecuencia de la señal de voltaje utilizando análisis Wavelet multi-resolución.

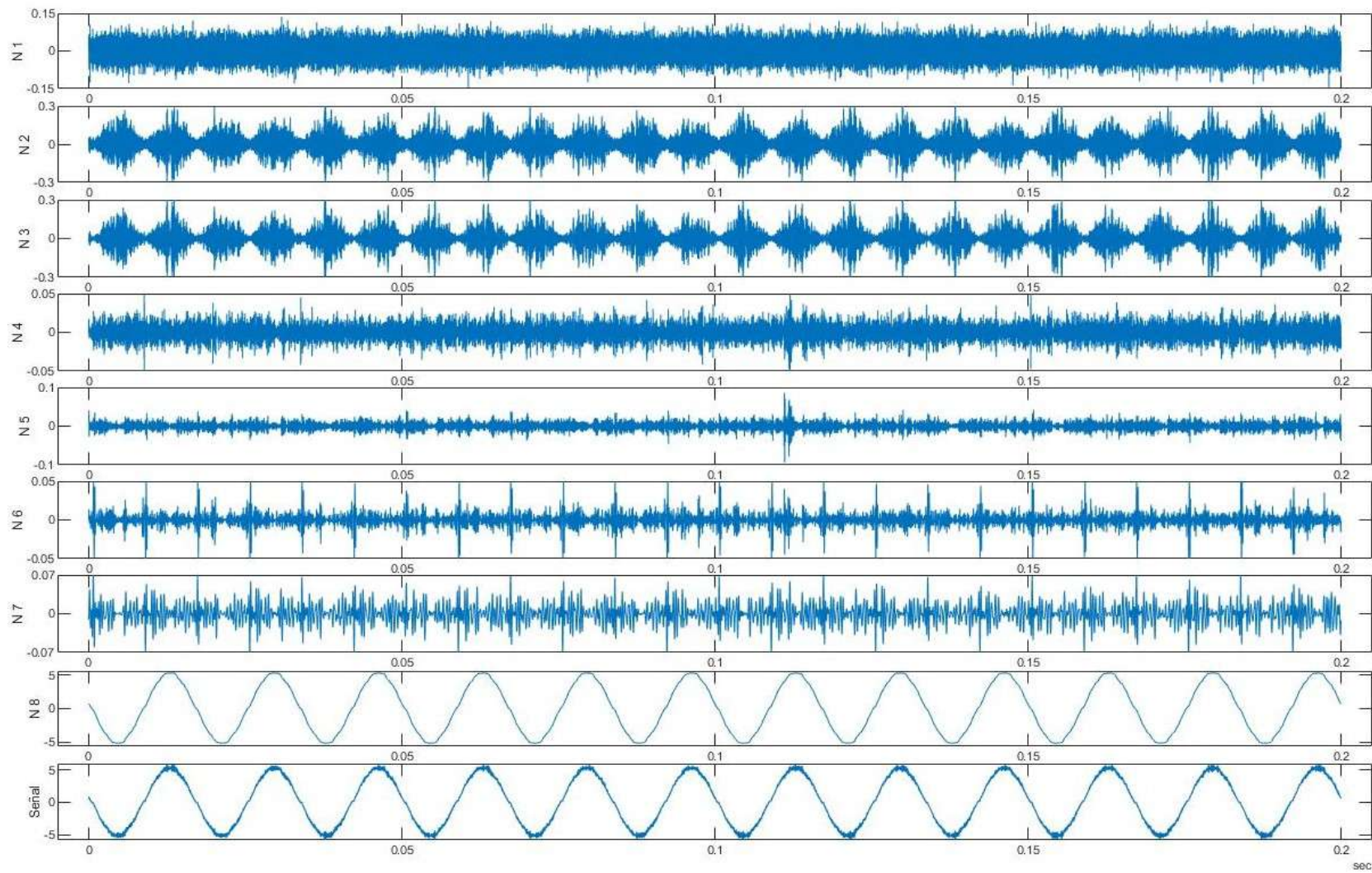


Figura 5.38: Descomposición en dominio de tiempo-frecuencia de la señal de corriente utilizando la transformada Wavelet multi-resolución.

5.3. Vehículo eléctrico

A continuación, se analizan los resultados del experimento de laboratorio que involucran al vehículo eléctrico conectado a la red eléctrica de distribución. La Tabla 5.6 sintetiza las características del cargador del vehículo eléctrico. La Figura 5.39 describe la forma de onda en el tiempo de tres ciclos de la señal de voltaje de la red de distribución a la cual se encuentra conectado el cargador. Además, se muestran tres ciclos de la señal de corriente demandada por el vehículo eléctrico. Se puede apreciar que el voltaje de alimentación presenta un bajo nivel de distorsión. Además, se observa que la forma de onda de corriente presenta una muesca después de cada cruce por cero, tanto en el semiciclo positivo como semiciclo negativo. En el plano de fase del voltaje de alimentación versus la corriente que demanda el cargador del vehículo eléctrico mostrado en la Figura 5.40 se observa este efecto causado por las muescas que se generan al momento de conectar el vehículo eléctrico a la red de baja tensión. Sin la existencia de estas muescas el comportamiento del cargador del vehículo eléctrico sería similar al de una carga lineal.

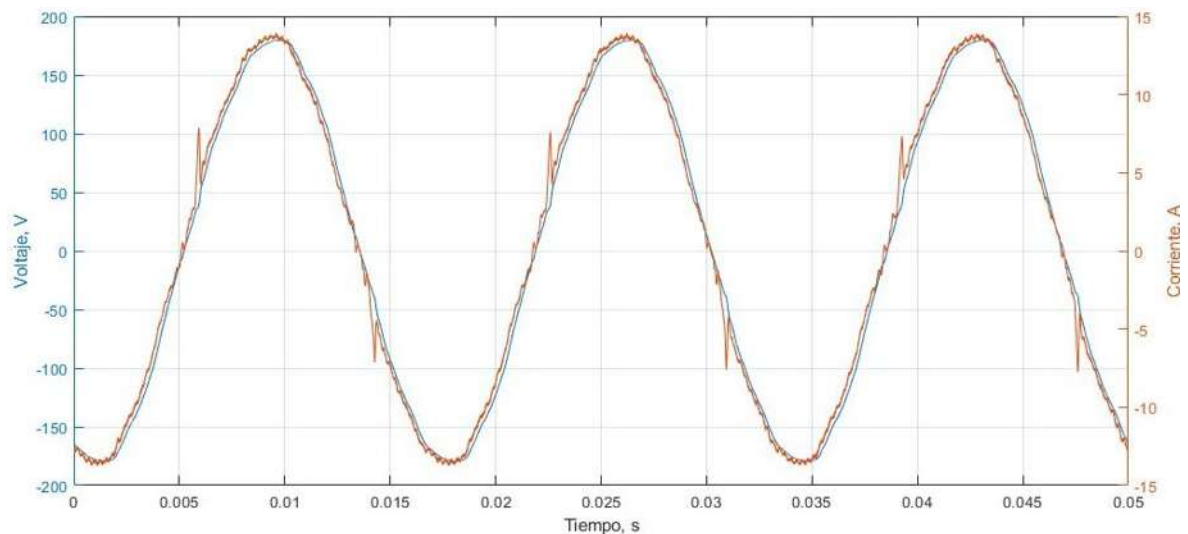


Figura 5.39: Formas de onda en el tiempo de voltaje y corriente demandada por el cargador de vehículo eléctrico nivel 1.

Tabla 5.6: Características del vehículo eléctrico

Estación de carga		Vehículo eléctrico	
Característica	Dato	Característica	Dato
Marca	DELPHI y Electric	Marca	BMW
Modelo	IC-CPD	Modelo	i3s
Potencia nominal	1.2 kW	Año	2020
Voltaje nominal	120 V, 60 Hz	Potencia motor	135 kW/184 HP
Corriente máxima	10 A	Batería	Li-ion, 42.2 kWh, 352 V
No. conectores	1	Cargador a bordo	7.4 kW

5.3.1 Análisis en el dominio de la frecuencia: Transformada discreta de Fourier

Se analiza la señal de voltaje y corriente la cual es demandada por el cargador de vehículos eléctricos nivel 1. Se puede observar en la Figura 5.41 la aparición de las armónicas 3 y 9 con magnitudes de 2.0600 V y 1.7170 V, respectivamente, estas armónicas son las de mayor magnitud. Sin embargo, estas magnitudes son pequeñas en comparación con las magnitudes obtenidas con las lámparas A y B para el rango de frecuencia de 0 a 2 kHz. De igual forma, se observan componentes sub-armónicas y la componente de corriente directa con una magnitud de 0.2591 V. Respecto a las emisiones reportadas en la Figura 5.41 (b) para el rango de frecuencia de 2 a 9 kHz se observa la aparición de las componentes de frecuencias supra-armónicas más significativas. La componente de mayor magnitud en este rango se encuentra a una frecuencia de 2.58 kHz con magnitud 0.1756. Sin embargo, la contaminación en este rango de 2 kHz a 9 kHz se observa claramente que aumenta en comparación con los espectros de frecuencia de las lámparas LED, se muestra una contaminación hasta aproximadamente 7 kHz. Por otra parte, de la Figura 5.41 (c) se observa que la contaminación generada por el vehículo eléctrico se concentra en el rango de 9 a 20 kHz. En el rango de 20 a 150 kHz sobresalen las frecuencias 32.2 kHz, 96.6 kHz, 135.7 kHz y 145.5. Sin embargo, estas frecuencias ya se habían detectado en la red eléctrica de baja tensión los resultados reportados en la Figura 5.4, en donde el origen de estas frecuencias supra-armónicas es desconocido.

Por otra parte, en la Figura 5.42 (a) se muestra el rango armónico de 0 a 2 kHz para la corriente demandada por el vehículo eléctrico. Las componentes más significativas son 3, 5, 7 y 9 con magnitudes de 0.0991 A, 0.1197 A, 0.1016 A y 0.1781 A, respectivamente. De igual forma, se detectan componentes sub-armónicas y la corriente de componente directa con una

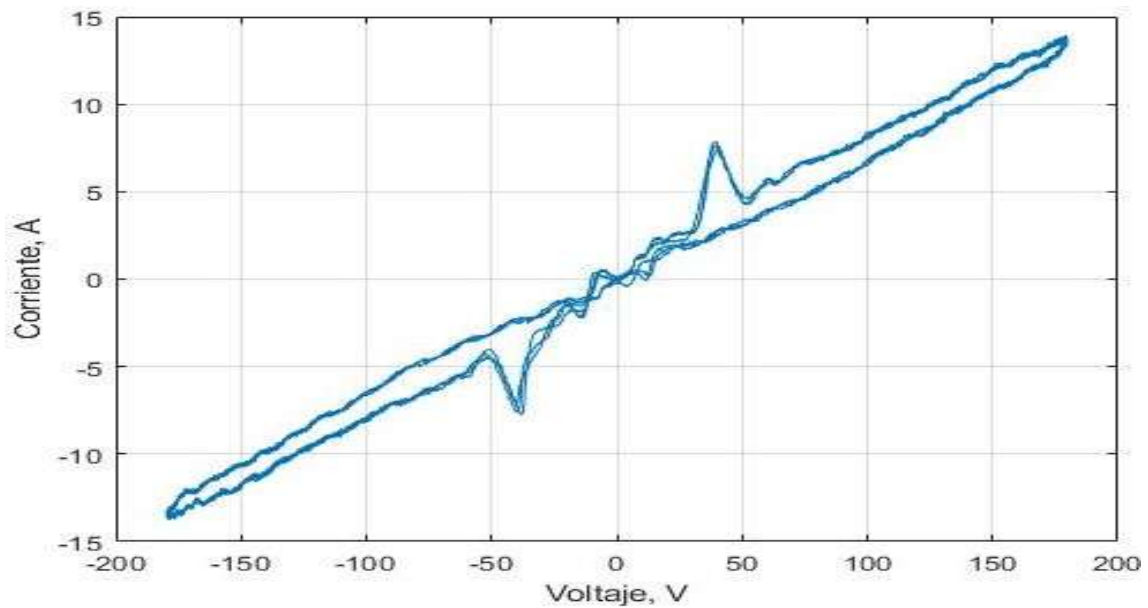


Figura 5.40: Curva característica V-I para cargador de vehículo eléctrico nivel 1.

magnitud de 0.1162 A. Respecto a las emisiones reportadas en la Figura 5.42 (b) para el rango de frecuencia de 2 kHz a 9 kHz se observa que en este rango de frecuencia se encuentran las magnitudes supra-armónicas más sobresalientes. La componente de mayor magnitud se encuentra a una frecuencia de 2.1 kHz con magnitud de 0.0728 A. Además, se aprecia que las emisiones con las magnitudes más importantes se localizan con una separación de 120 Hz. Por último, se muestra en la Figura 5.42 (c) el rango supra-armónico de 9 kHz a 150 kHz, en donde se observa una nueva frecuencia supra-armónica al inicio de este rango de 9 kHz a 20 kHz, con una magnitud de 0.0063 A y una frecuencia de 10.14 kHz. De los espectros armónicos mostrados anteriormente tanto de señal de voltaje como de corriente se observó que la contaminación generada por el cargador nivel 1 de vehículos eléctricos se concentra principalmente en un rango supra-armónico de 2 a 20 kHz.

La Tabla 5.7 representa el análisis comparativo entre el voltaje de la red de distribución sin el vehículo eléctrico y la red de distribución con presencia del vehículo eléctrico. De la Tabla 5.7 se observa que la emisión generada por el vehículo eléctrico se concentra mayormente en el rango supra-armónico de 2 kHz a 9 kHz, ya que se tiene un incremento en el %TSHD de 0.1745 % a 0.3885 %.

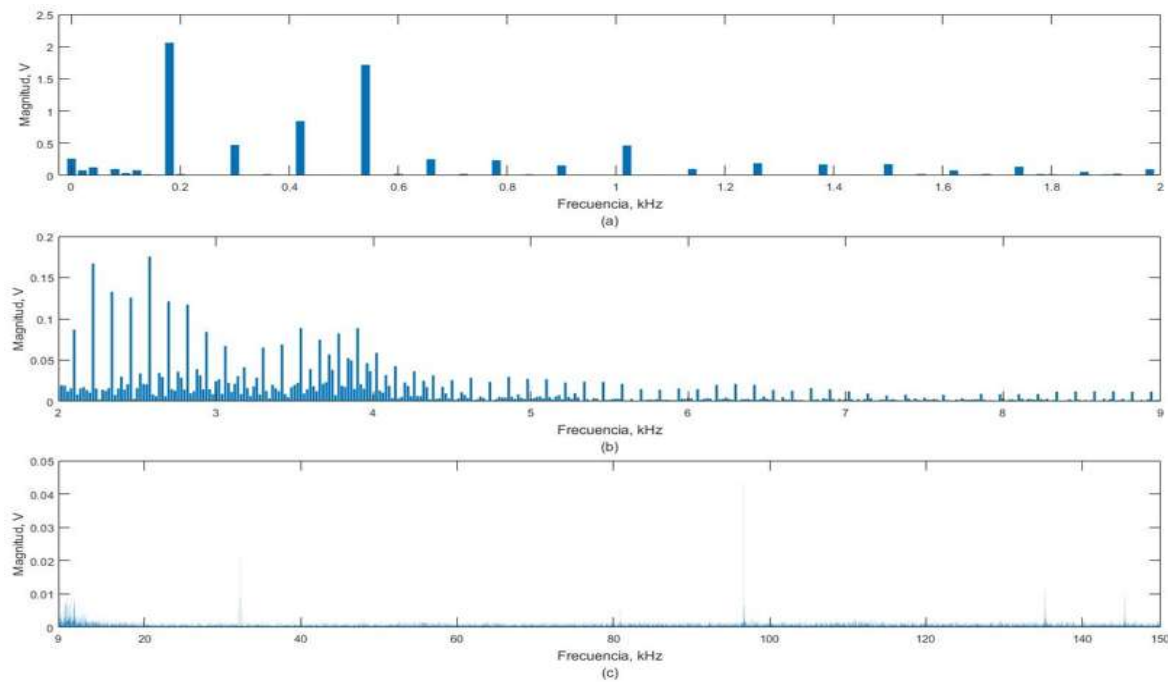


Figura 5.41: Espectro de frecuencia de señal de voltaje, para cargador de vehículo eléctrico nivel 1, se muestran en tres rangos de frecuencias diferentes: a).- 0 a 2 kHz, b).- 2 kHz a 9 kHz y c).- 9 kHz a 150 kHz.

Tabla 5.7: Análisis comparativo del porciento de distorsión armónica total y distorsión supra-armónica total para el voltaje de la red eléctrica con el vehículo eléctrico.

Rango	Sin el vehículo eléctrico	Con el vehículo eléctrico
$0 \text{ Hz} < f < 2 \text{ kHz}$	2.4700	2.3180
$2 \text{ kHz} < f < 9 \text{ kHz}$	0.1745	0.3885
$9 \text{ kHz} < f < 150 \text{ kHz}$	0.0706	0.0765

5.3.2 Análisis en el dominio tiempo-frecuencia: Transformada de Fourier de tiempo corto

Se analiza el voltaje de la red de distribución y la corriente demandada por el cargador de vehículos eléctricos nivel 1. La Figura 5.43 (a) describe la forma de onda en el tiempo del voltaje, mientras que la Figura 5.43 (b) presenta el espectrograma de emisiones. Se puede apreciar la detección de dos componentes supra-armónicas ya existentes en la red de distribución 32.2 kHz y 96.6 kHz. Estas son componentes supra-armónicas generadas por fuentes desconocidas.

De igual forma la Figura 5.44 (a) representa la señal de corriente en el tiempo demandada, se aprecian las muescas generadas por el cargador nivel 1 después de cada cruce por cero de la

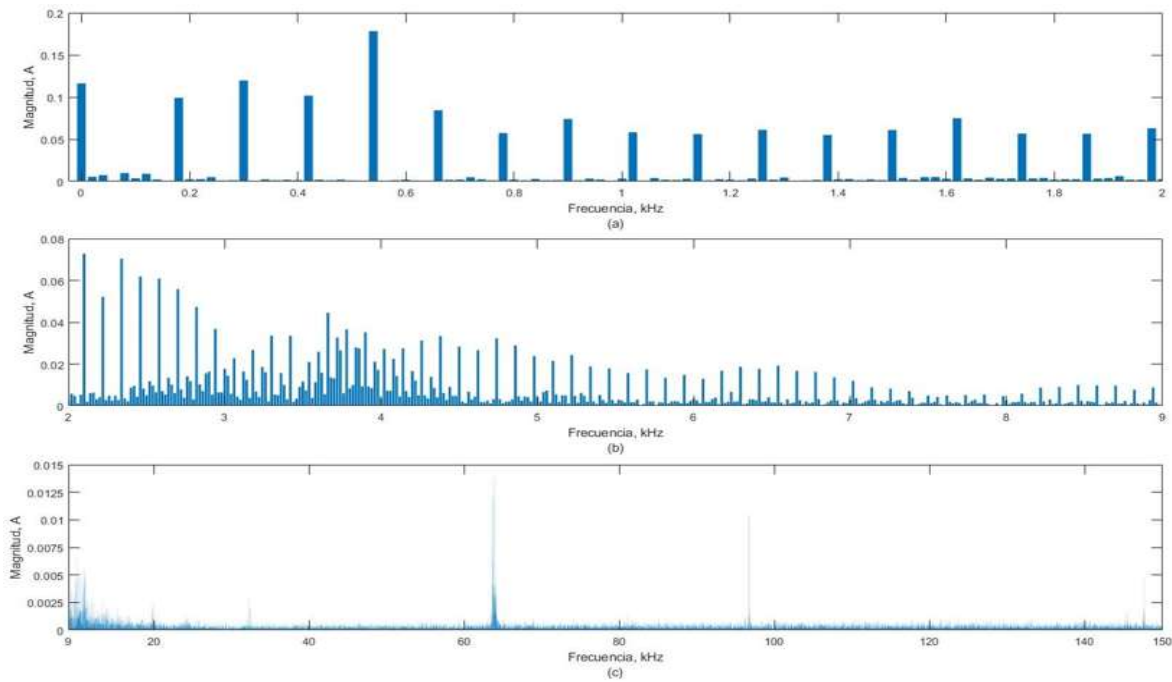


Figura 5.42: Espectro de frecuencia de señal de corriente, para cargador de vehículo eléctrico nivel 1, se muestran en tres rangos de frecuencias diferentes: a).- 0 a 2 kHz, b).- 2 kHz a 9 kHz y c).- 9 kHz a 150 kHz.

señal de corriente, mientras que la Figura 5.44 (b) presenta el espectrograma de emisiones. En ambos espectrogramas se observa que la mayor parte de emisiones generadas por el cargador se concentran en un rango de frecuencia de 2 kHz a 15 kHz aproximadamente.

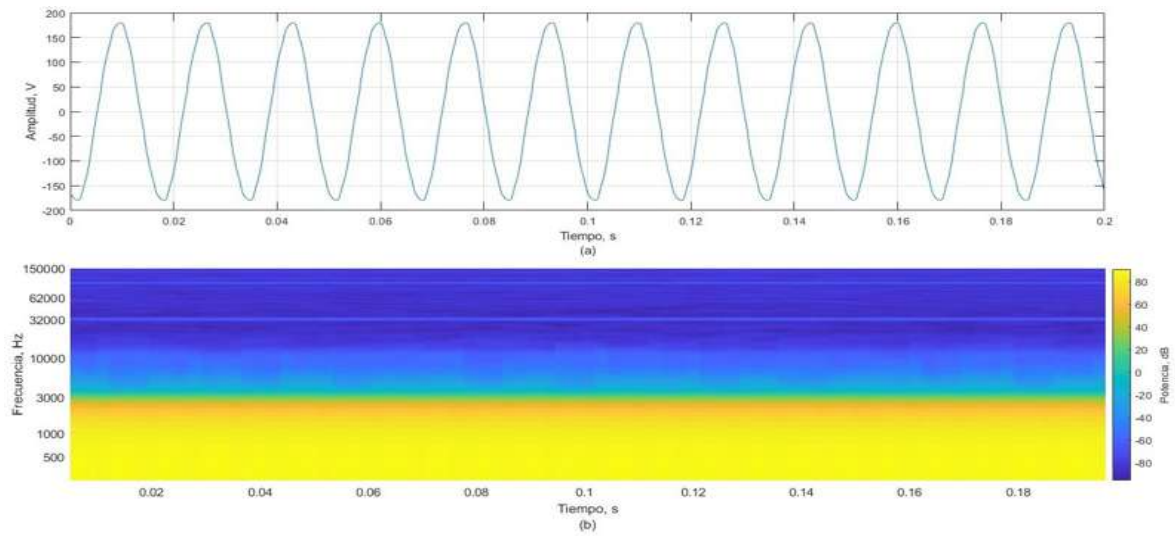


Figura 5.43: Emisión de voltaje para cargador de vehículos eléctricos nivel 1 en el dominio tiempo-frecuencia. a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Espectrograma con la TFTC.

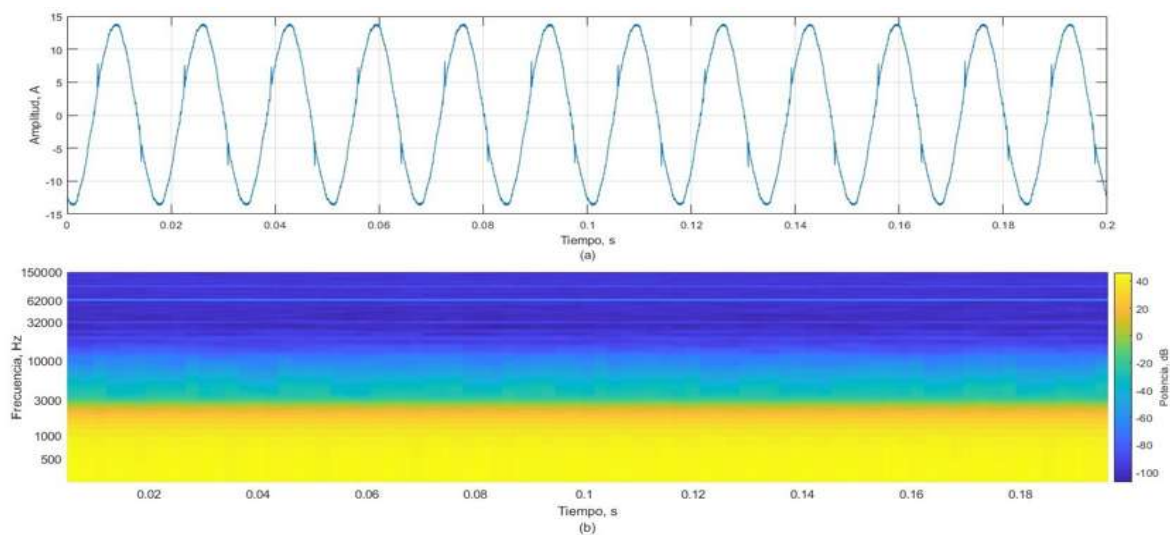


Figura 5.44: Emisión de corriente para cargador de vehículos eléctricos nivel 1 en el dominio tiempo-frecuencia. a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Espectrograma con la TFTC.

5.3.3 Análisis en el dominio tiempo-frecuencia: Transformada Wavelet continua

Las Figuras 5.45 y 5.46 describen la forma de onda y escalograma de las señales de voltaje y corriente para el cargador de vehículos eléctricos nivel 1. La Figura 5.45 (a) describe la forma de onda en el tiempo del voltaje. Por otro lado, en la Figura 5.45 (b) presenta el escalograma de emisiones para el cargador de vehículos eléctricos. Se puede observar la detección de las componentes supra-armónicas ya detectadas anteriormente de 32.2 kHz y 96.8 kHz. De igual forma, se detecta adecuadamente las armónicas 3 y 9 así como la componente fundamental de 60 Hz, se perciben componentes supra-armónicas las cuales coinciden con la aparición de las muescas en la señal de corriente. En la señal de voltaje no se llegan apercibir a simple vista estas muestras, pero sin en cambio, al obtener el escalograma nos revela contaminación en estos determinados instantes de tiempo. En la Figura 5.46 (a) se reporta la señal de corriente demandada en el tiempo, mientras que la Figura 5.46 (b) presenta el escalograma de emisiones. De este escalograma se observa la existencia de contaminación debido a la conexión del cargador nivel 1 a la red de baja tensión. El escalograma describe adecuadamente en el dominio tiempo-frecuencia la aparición de las muescas en la señal de corriente, las cuales se aprecian en el rango de 1,000 Hz a 15,000 Hz. Asimismo, se aprecia la correcta detección de la componente de frecuencia a 60 Hz.

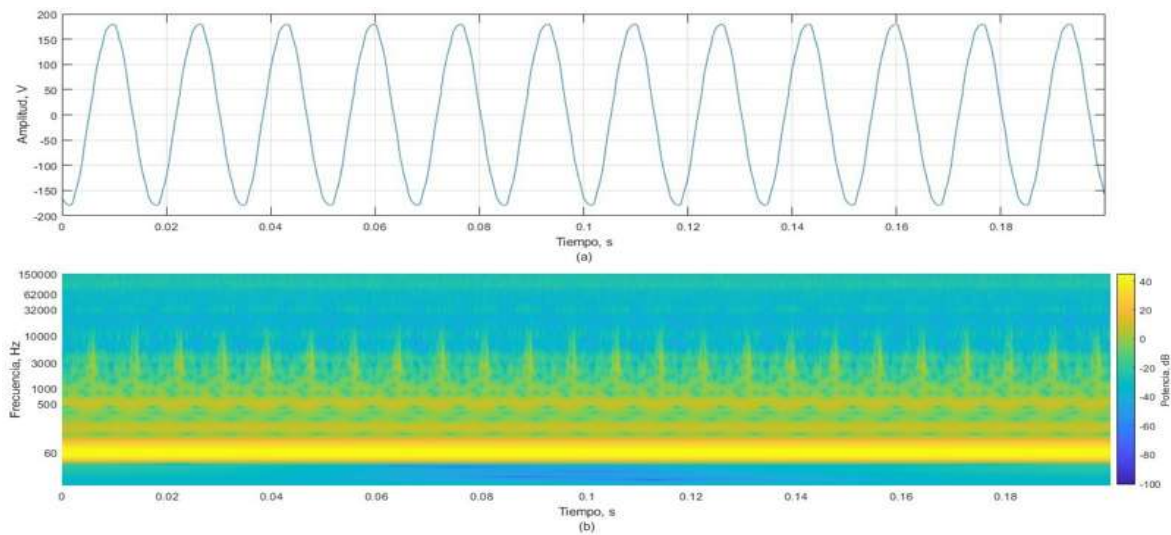


Figura 5.45: Emisión de voltaje para cargador de vehículo eléctrico nivel 1 en el dominio tiempo-frecuencia: a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Escalograma con la WTC.

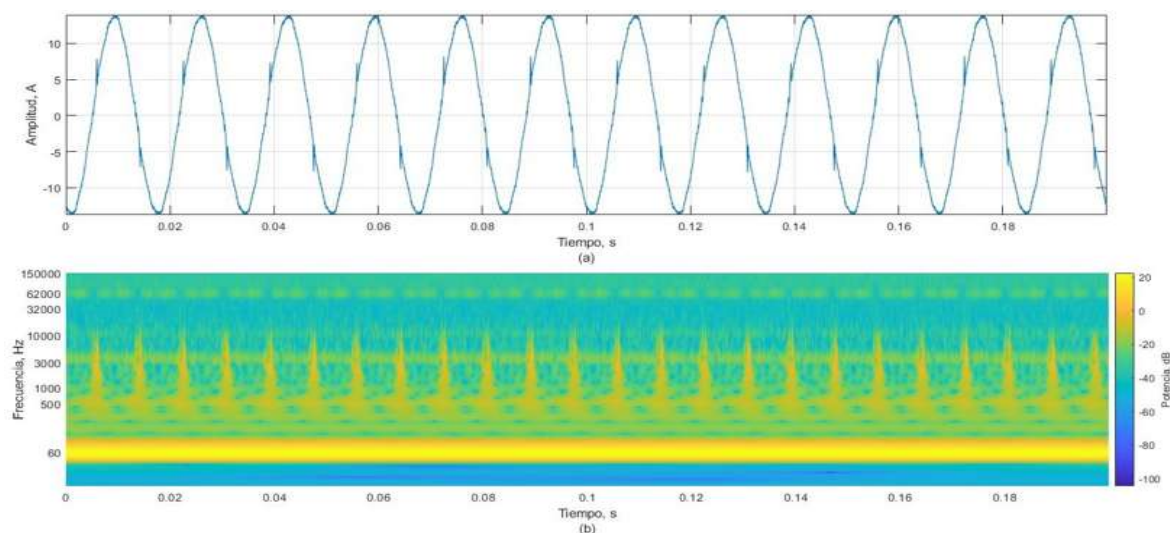


Figura 5.46: Emisión de corriente para cargador de vehículo eléctrico nivel 1 en el dominio tiempo-frecuencia: a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Escalograma con la WTC

5.3.4 Análisis en el dominio tiempo-frecuencia: Análisis Wavelet multi-resolución

Se analiza la señal tanto de voltaje como de corriente demandada por el cargador de vehículos eléctricos utilizando el análisis Wavelet multi-resolución. En la Figura 5.47 se muestran las 8 bandas extraídas de la señal de voltaje. Se puede apreciar que la contaminación generada por el cargador de vehículos eléctricos se aloja en el rango armónico y supra-armónico. Por lo tanto, los niveles que representa esta contaminación se detectan en las bandas N5, N6, N7 y N8. Se puede observar el incremento de las magnitudes, el cual coincide en tiempo con la aparición de las muescas en las bandas N5, N6, N7 y N8. De igual forma, la Figura 5.48 reporta las 8 bandas extraídas de la señal de corriente. Como se aprecia en la Figura 5.48 las bandas N5, N6, N7 y N8 contienen la información asociada a la contaminación generada por el vehículo eléctrico. Estas bandas presentan magnitudes de ± 0.3 A, ± 1 A, ± 1 A y ± 15 A, respectivamente. Se puede apreciar que en estas 4 bandas se detectan los instantes en donde la forma de onda de la corriente presenta muescas. Consultando la Tabla 5.2 se observa que estas 4 bandas abarcan un rango de frecuencia de 0 a 15,626.25 Hz lo cual coincide con los resultados obtenidos en el espectro de frecuencia, espectrograma y escalograma.

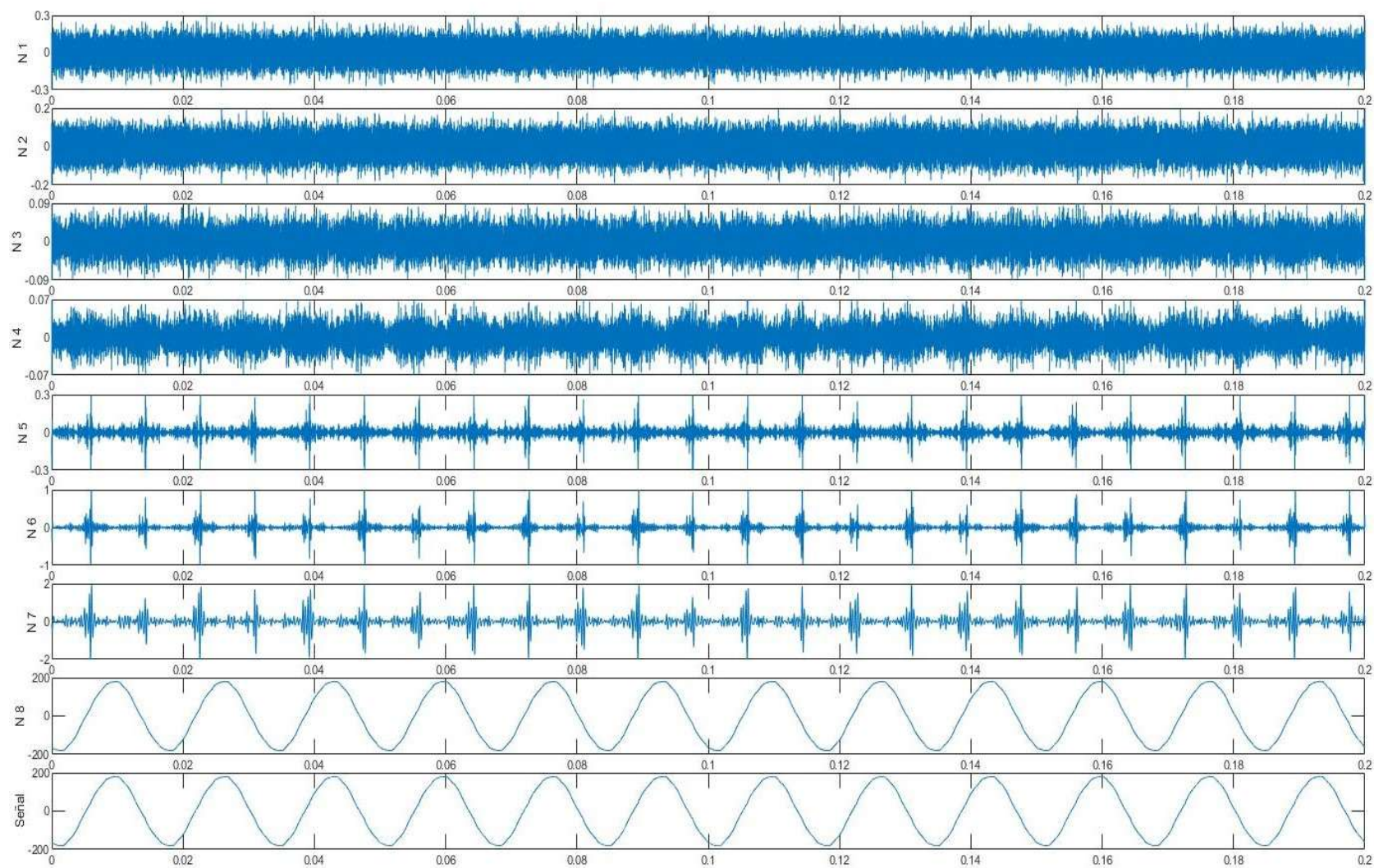


Figura 5.47: Descomposición en dominio del tiempo-frecuencia de la señal de voltaje utilizando análisis Wavelet multi-resolución.

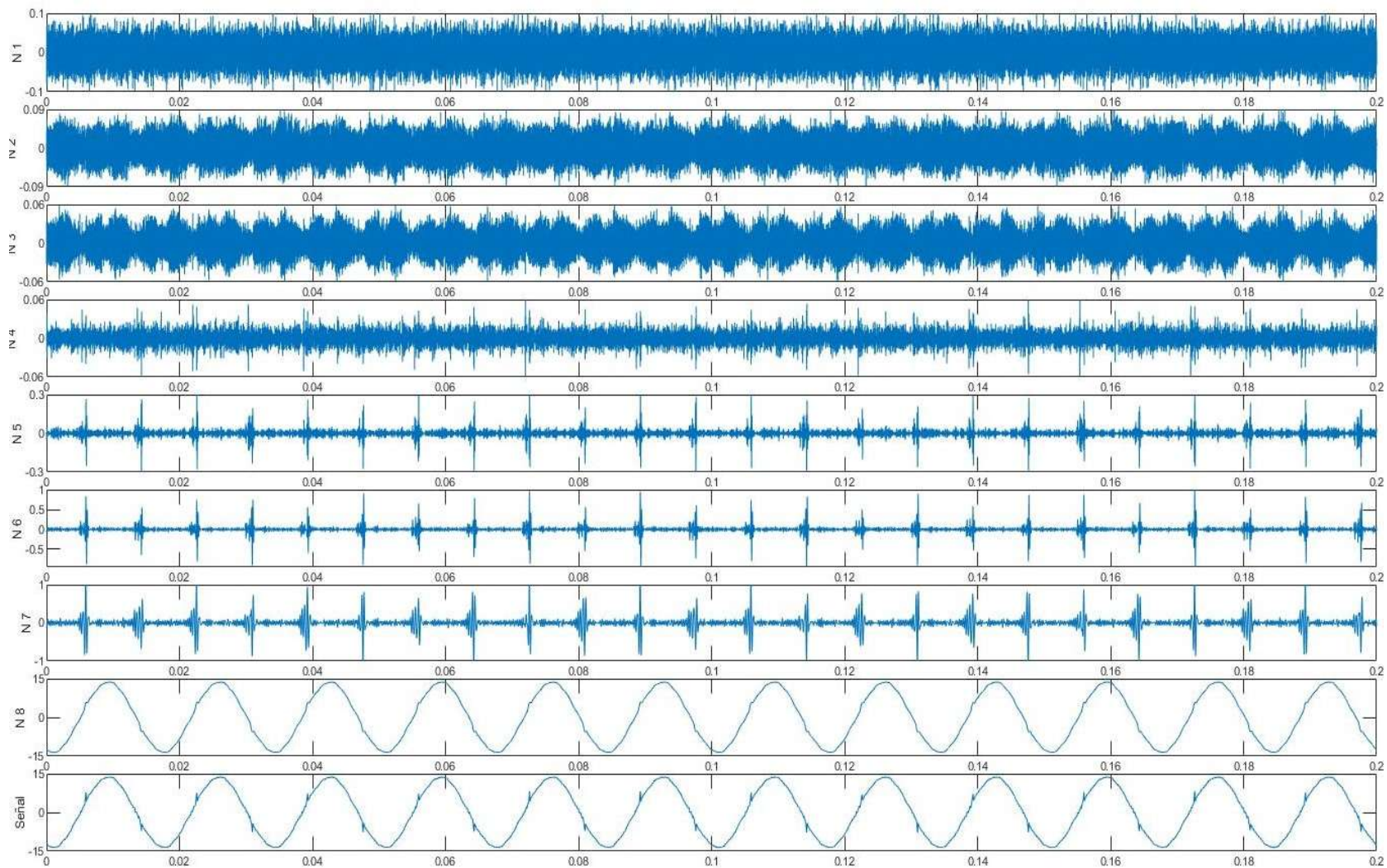


Figura 5.48: Descomposición en dominio del tiempo-frecuencia de la señal de corriente utilizando el análisis Wavelet multi-resolución.

5.4. Generador fotovoltaico

Tabla 5.8: Características del generador fotovoltaico.

Componente	Características
Módulo fotovoltaico	Iusasol 250W Policristalino
Arreglo	36 módulos, 9x4
Inversor trifásico	10 kVA Fronius Symo

Se analiza la señal de voltaje de la red de distribución y corriente generada por un generador fotovoltaico el cual cuenta con las características descritas en la Tabla 5.8. Este generador se encuentra ubicado en la estación de recarga de vehículos eléctricos del edificio de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica. La Figura 5.49 describe la forma de onda en el tiempo de tres ciclos de la señal de voltaje de la red de baja tensión a la cual se encuentra conectado el inversor fotovoltaico. De igual forma, se muestran tres ciclos de la señal de corriente generada. Se puede apreciar que el voltaje de alimentación presenta un bajo nivel de distorsión. Además, se observa que la forma de onda de corriente tiende a ser sinusoidal. Sin embargo, se observan oscilaciones de alta frecuencia en las crestas de la señal de corriente. La Figura 5.50 describe el plano de fase del voltaje de alimentación versus la corriente generada por el generador fotovoltaico en donde se observa una forma de onda muy cercana a una línea recta. Esta figura indica que la red eléctrica de distribución percibe al generador fotovoltaico como una carga lineal ya que los voltajes y corrientes suministrados tienden a ser sinusoidales.

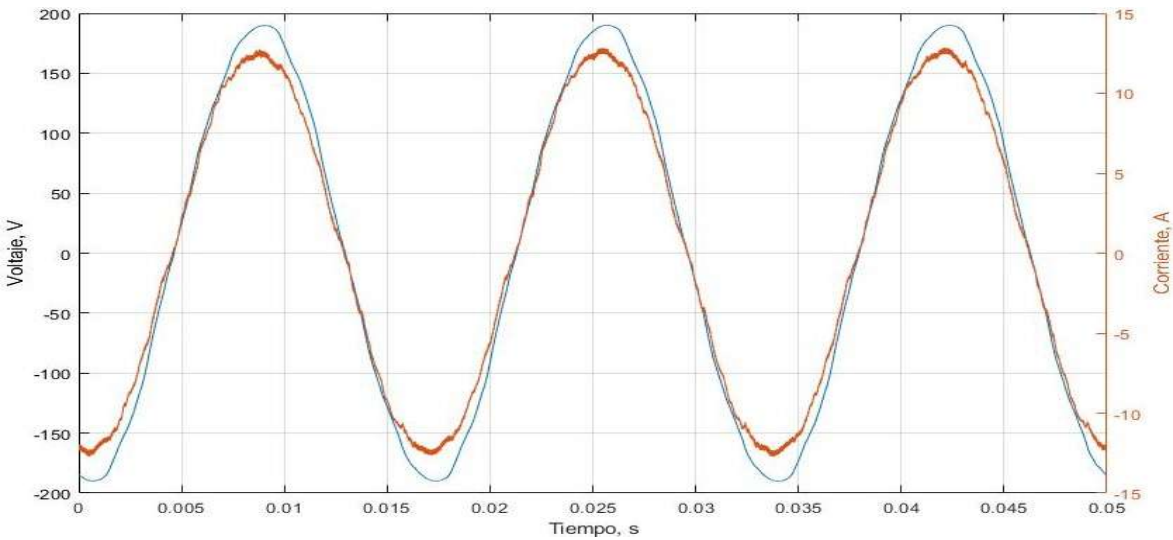


Figura 5.49: Formas de onda en el tiempo de voltaje y corriente generada por el generador fotovoltaico.

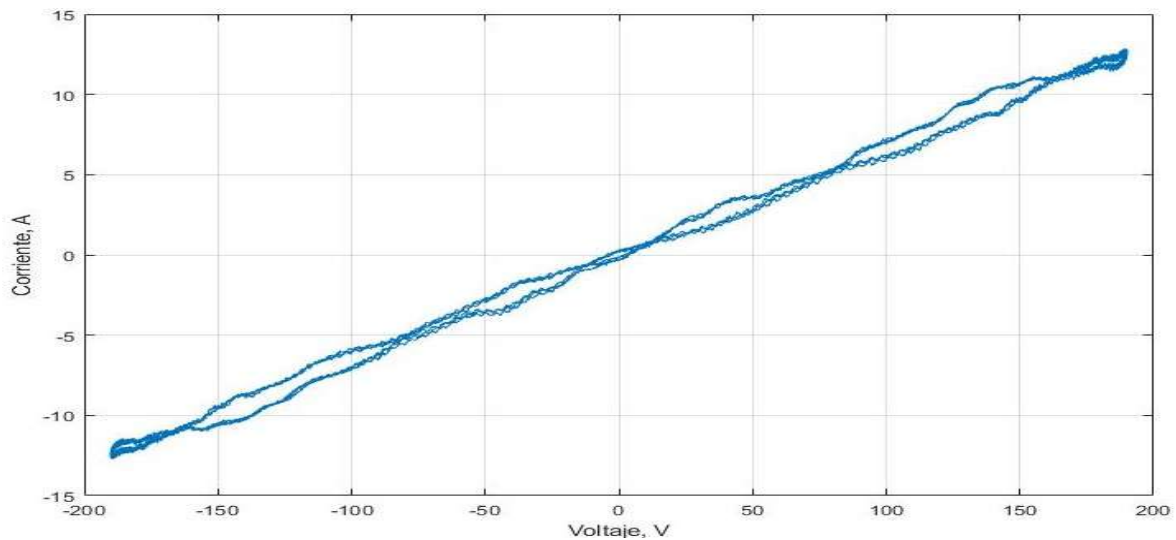


Figura 5.50: Curva característica V - I para el generador fotovoltaico.

5.4.1 Análisis en el dominio de la frecuencia: Transformada discreta de Fourier

Se analiza la señal de voltaje y corriente de la fase A demandada por el generador fotovoltaico. Se analiza la señal de voltaje y corriente de la fase A demandada por el generador fotovoltaico. Se puede observar en la Figura 5.51 (a) correspondiente a un rango de frecuencia armónica la aparición de las componentes armónicas 3 y 9 con magnitudes 1.99 V y 1.60 V, respectivamente, estas magnitudes son las más significativas en este rango. Estas magnitudes son pequeñas en comparación con las magnitudes obtenidas con las lámparas A y B. De igual forma, se detectan componentes sub-armónicas y una pequeña componente de corriente directa. Respecto a las emisiones reportadas en la Figura 5.51 (b) para el rango de frecuencia de 2 kHz a 9 kHz no se observan magnitudes significativas. La componente de mayor magnitud se encuentra a una frecuencia de 2.2 kHz con magnitud de 0.088 V. Por otra parte, en el rango de 9 kHz a 150 kHz sobresalen las frecuencias 32.2 kHz, 96.6 kHz, 138.5 kHz y 145.5 kHz (ver Figura 5.51 (c)). Sin embargo, estas frecuencias ya se habían detectado en la red eléctrica de baja tensión los resultados son reportados en la Figura 5.4, en donde el origen de estas frecuencias supra-armónicas es desconocido. Además de estas frecuencias se observa una nueva componente generada por el generador fotovoltaico, la cual se encuentra a 20 kHz con una magnitud de 0.0160 V. Esta componente se encuentra asociada a la frecuencia de conmutación del inversor fotovoltaico.

Por otra parte, la Figura 5.52 (a) indica que para el rango armónico de 0 a 2 kHz se observan componentes armónicas. Por ejemplo, la 5, 7, 11 y 17 con magnitudes de 0.1323 A, 0.0691 A, 0.0640 A y 0.0782 A, respectivamente. También se detectan componentes sub-

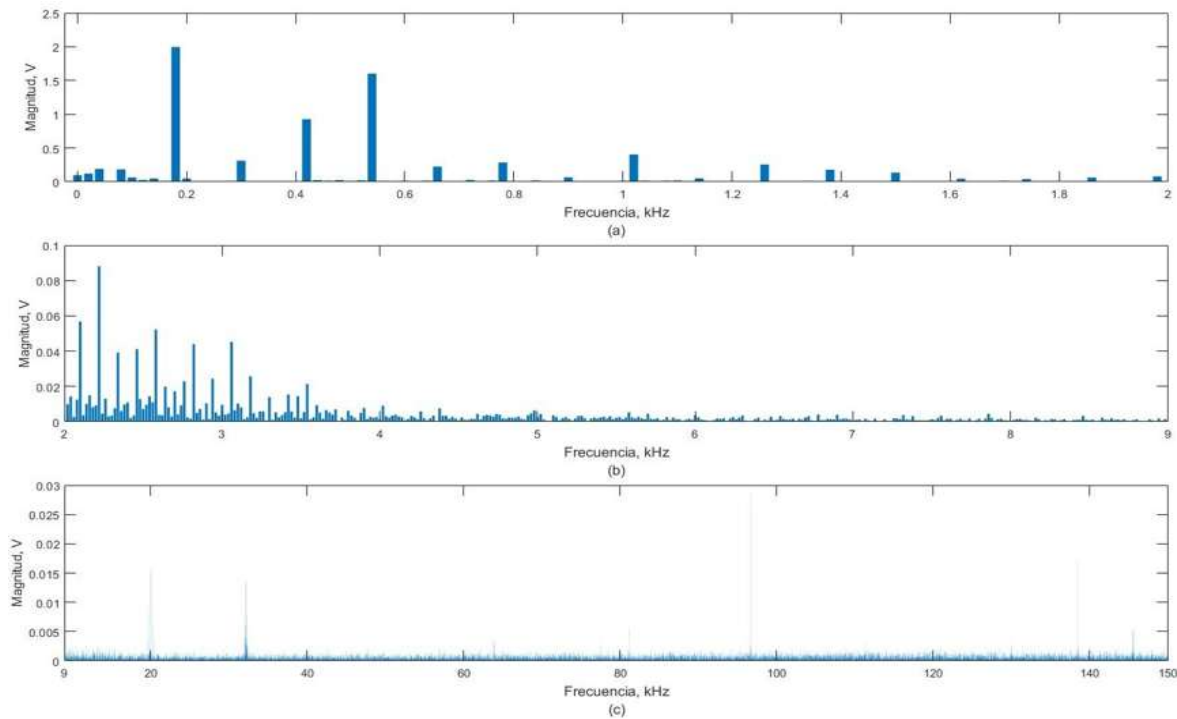


Figura 5.51: Espectro de frecuencia de la señal de voltaje, para generador fotovoltaico, se muestran tres rangos de frecuencias diferentes: a).- 0 a 2 kHz, b).- 2 kHz a 9 kHz y c).- 9 kHz a 150 kHz.

armónicas, inter-armónicas y una componente de corriente directa con magnitud de 0.0660 A, en este caso siendo las componentes sub-armónicas de mayor magnitud que las componentes inter-armónicas. De las emisiones reportadas en la Figura 5.52 (b) para el rango de frecuencia de 2 kHz a 9 kHz se observa que las componentes supra-armónicas de mayor magnitud se encuentran alrededor de una frecuencia de 3 kHz con la mayor magnitud de 0.0247 A. Por último, se muestra en la Figura 5.52 (c) el rango supra-armónico de 9 kHz a 150 kHz, en donde se detecta una nueva componente de frecuencia supra-armónica centrada a una frecuencia de 20 kHz, con una magnitud máxima de 0.0398 A. Esta frecuencia es la única componente encontrada en este rango de frecuencias y corresponde a la operación del inversor fotovoltaico. La Tabla 5.9 representa el análisis comparativo del porcentaje de distorsión del voltaje de la red de baja tensión con y sin la presencia del generador fotovoltaico. De la Tabla 5.9 no se alcanzan a percibir cambios significativos en las señales de voltaje, esto debido a que el conjunto de frecuencias supra-armónica generada por el inversor no es de gran magnitud.

5.4.2 Análisis en el dominio tiempo-frecuencia: Transformada de Fourier de tiempo corto

Se analiza el voltaje de la red de distribución y la corriente generada por el generador fotovoltaico por medio de la transformada de Fourier de tiempo corto. La Figura 5.53 (a)

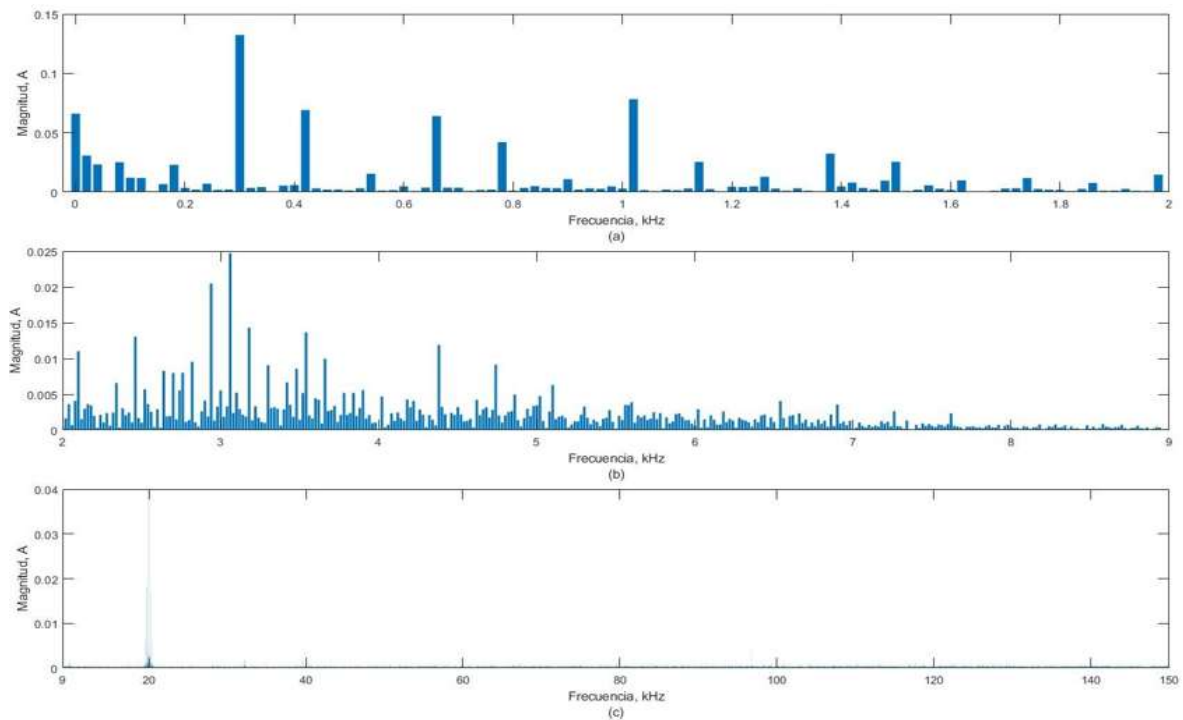


Figura 5.52: Espectro de frecuencia de la señal de corriente, para generador fotovoltaico, se muestran tres rangos de frecuencias diferentes: a).- 0 a 2 kHz, b).- 2 kHz a 9 kHz y c).- 9 kHz a 150 kHz.

Tabla 5.9: Análisis comparativo del porcentaje de distorsión armónica y supra-armónica para el voltaje de la red eléctrica con el generador fotovoltaico.

Rango	Sin el generador fotovoltaico	Con el generador fotovoltaico
$0 \text{ Hz} < f < 2 \text{ kHz}$	2.4700	2.1109
$2 \text{ kHz} < f < 9 \text{ kHz}$	0.1745	0.1275
$9 \text{ kHz} < f < 150 \text{ kHz}$	0.0708	0.0606

describe la forma de onda en el tiempo del voltaje, mientras que la Figura 5.53 (b) presenta el espectrograma de emisiones. Se aprecian componentes supra-armónicas ya existentes en la red de distribución 32.2 kHz y 96.6 kHz, las cuales son frecuencias supra-armónicas generadas por fuentes desconocidas. Además de estas frecuencias se detecta la componente supra-armónica generada por el inversor fotovoltaico entorno a la frecuencia de 20 kHz. De igual forma la Figura 5.54 (a) describe la señal de corriente en el tiempo. De esta señal de corriente se logran percibir oscilaciones de alta frecuencia en las crestas de los semiciclos tanto positivos como negativos, mientras que la Figura 5.54 (b) presenta el espectrograma de emisiones hasta la frecuencia de 150 kHz. En este espectrograma se puede apreciar más claramente la componente supra-armónica emitida por el inversor. En ambos espectrogramas se observa que las emisiones

generadas por el inversor se concentra en 20 kHz.

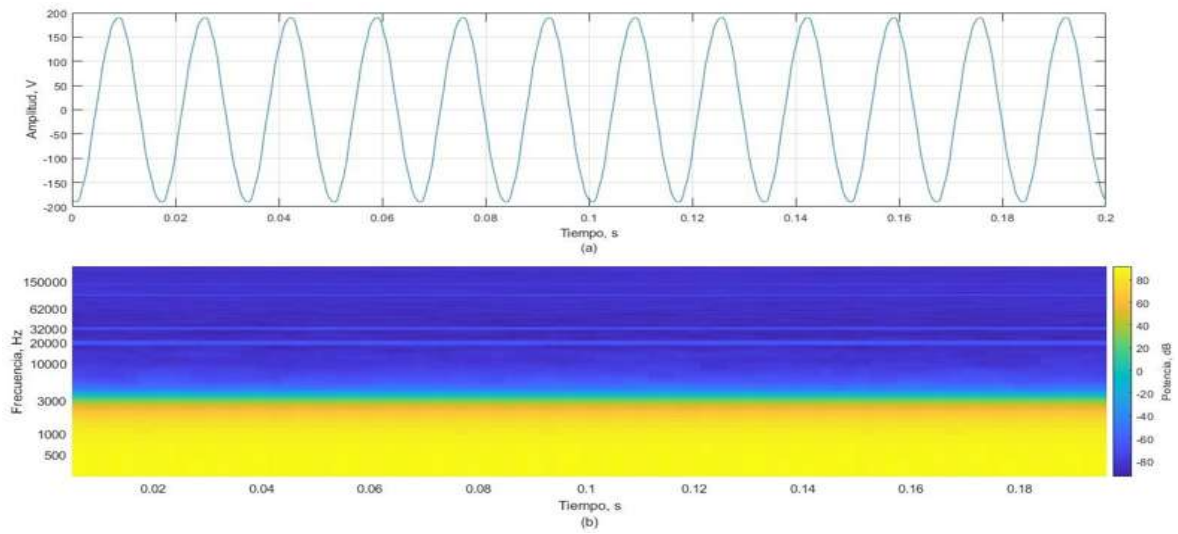


Figura 5.53: Emisión de voltaje para el generador fotovoltaico en el dominio tiempo-frecuencia. a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Espectrograma con la TFTC.

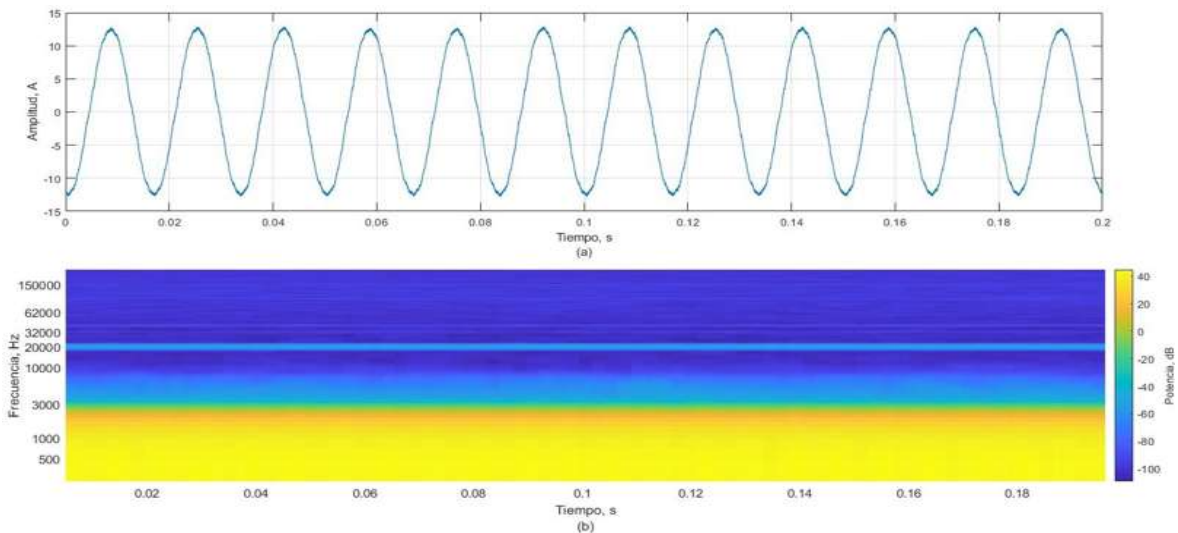


Figura 5.54: Emisión de corriente para el generador fotovoltaico en el dominio tiempo-frecuencia. a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Espectrograma con la TFTC.

5.4.3 Análisis en el dominio tiempo-frecuencia: Transformada Wavelet continua

A continuación, se aplica la transformada Wavelet continua tanto a la señal de voltaje como de corriente generada por el generador fotovoltaico. La Figura 5.55 (a) describe la forma de onda en el tiempo del voltaje de la red de baja tensión, mientras que la Figura 5.55 (b) presenta el escalograma de emisiones para el generador fotovoltaico. Se puede apreciar la detección de la componente supra-armónica generada por el generador fotovoltaico. De igual forma, se detecta adecuadamente la componente fundamental de 60 Hz, así como la 3 y 9 armónica. De este escalograma se observa la existencia de contaminación a una frecuencia de 20 kHz debido a la conexión del generador fotovoltaico, estas emisiones coinciden en tiempo con la aparición de las oscilaciones de alta frecuencia en las crestas de la señal de corriente. De igual forma, se observa este fenómeno variante en el tiempo el cual es una de las características que describe de los supra-armónicos.

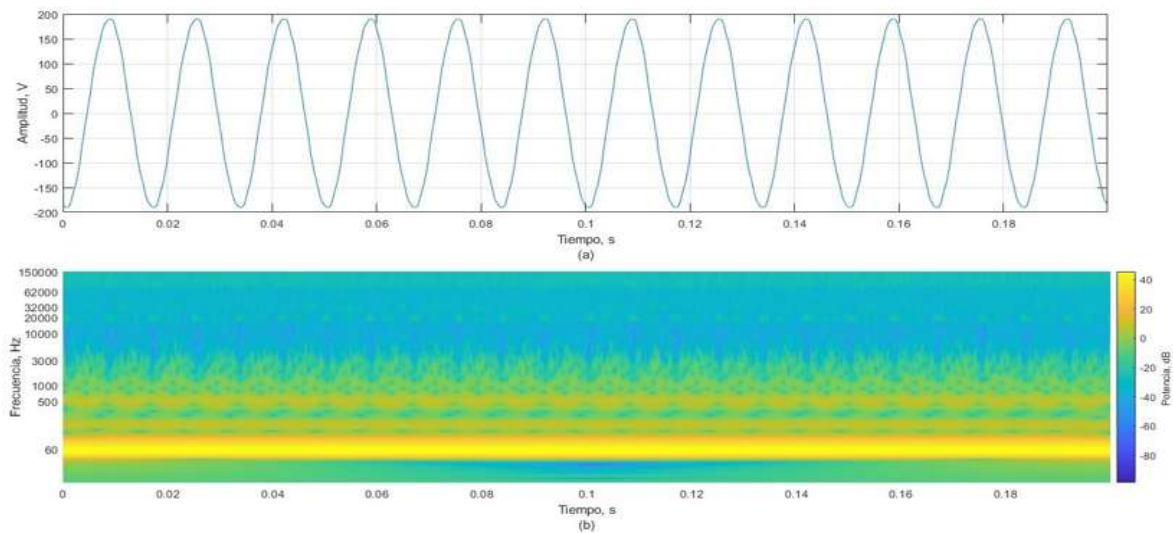


Figura 5.55: Emisión de voltaje para el generador fotovoltaico en el dominio tiempo-frecuencia: a).- Forma de onda en el tiempo de señal de voltaje y b).- Escalograma con la WTC.

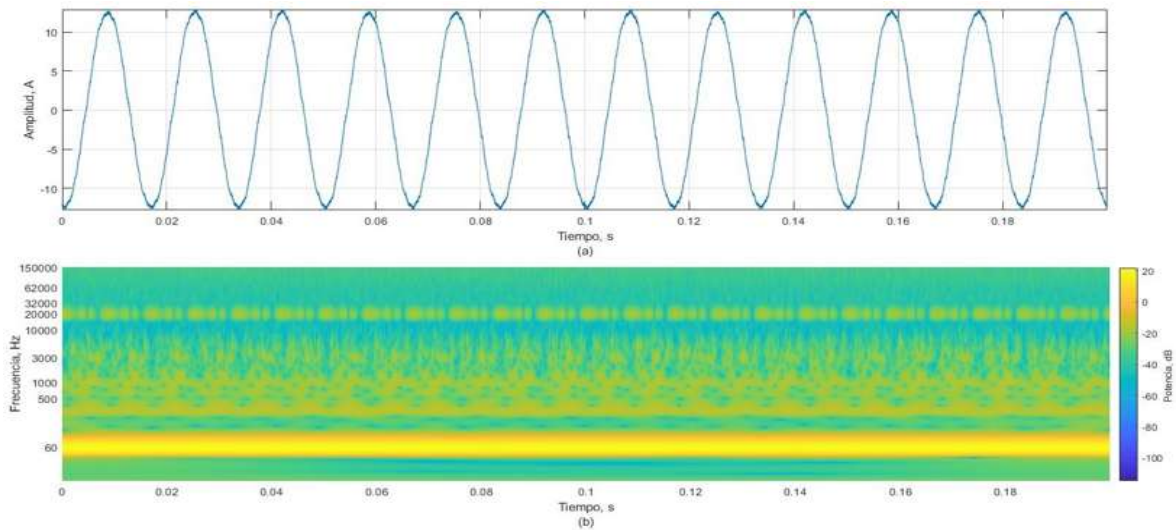


Figura 5.56: Emisión de corriente para el generador fotovoltaico en el dominio tiempo-frecuencia: a) Forma de onda en el tiempo de señal de corriente y b) Escalograma con la WTC

5.4.4 Análisis en el dominio tiempo-frecuencia: Análisis Wavelet multi-resolución

En la Figura 5.57 se muestran las 8 bandas extraídas de la señal de voltaje mediante el análisis Wavelet multi-resolución. La contaminación generada por el inversor se aloja en el rango supra-armónico, en este caso se encuentra en la banda N4. De la Tabla 5.2 se observa que la señal en N4 contiene un rango de frecuencia de 15,625.25 a 31,252.5 Hz, dentro de este rango se encuentra la banda supra-armónica generada por el generador fotovoltaico. De igual forma, la Figura 5.58 reporta las 8 bandas extraídas de la señal de corriente. Como se aprecia en la Figura 5.58 la banda N4 contiene la información asociada a la contaminación generada por el generador fotovoltaico, esta señal cuenta con magnitud en el rango de ± 0.15 A. También, de la banda N4 se puede observar el comportamiento de las componentes supra-armónicas generadas por el inversor fotovoltaico en donde se puede apreciar claramente el comportamiento de los supra-armónicos el cual es variante en el tiempo y repetitivo en cada semiciclo.

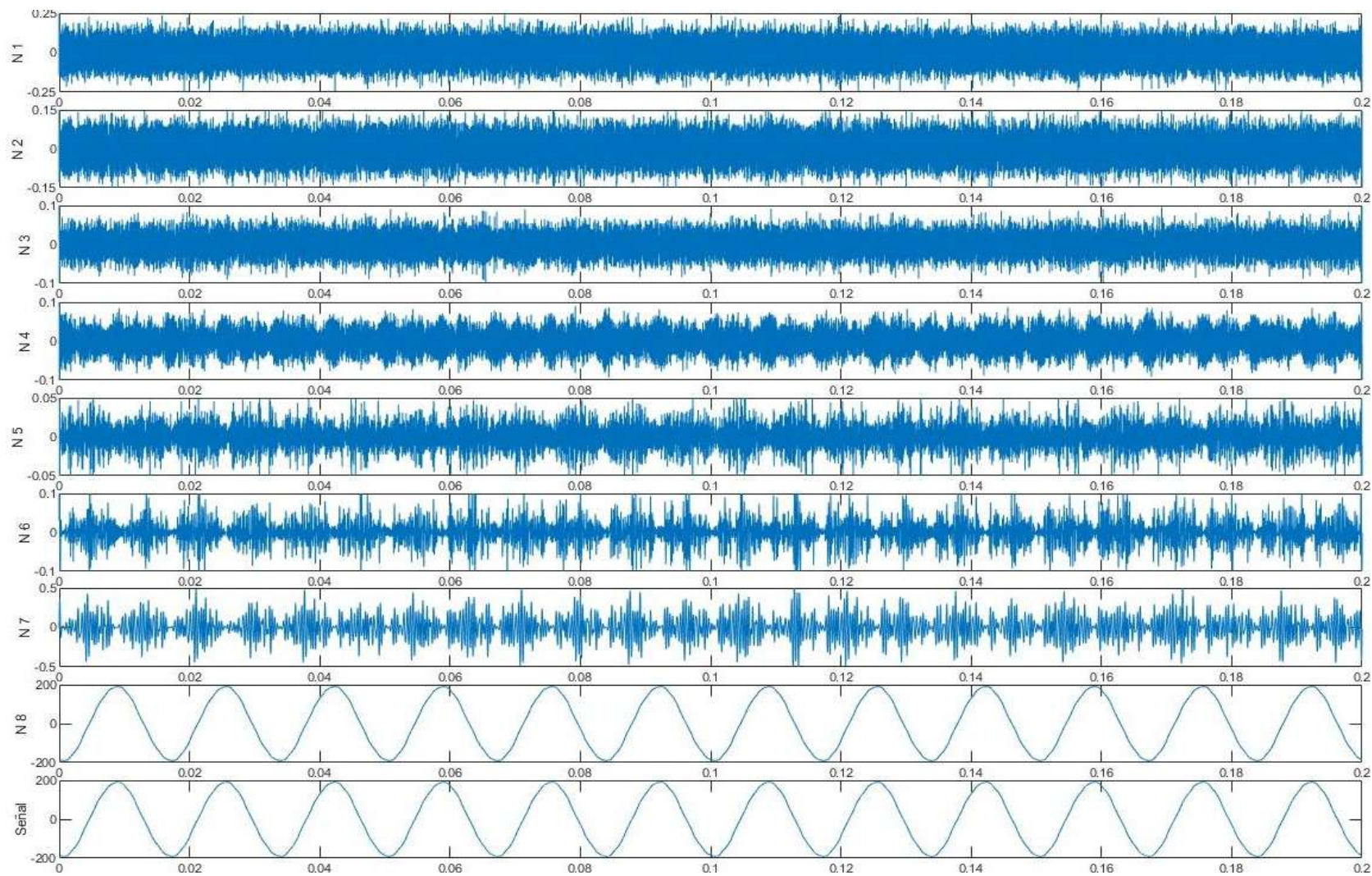


Figura 5.57: Descomposición en dominio del tiempo-frecuencia de la señal de voltaje utilizando análisis Wavelet multi-resolución.

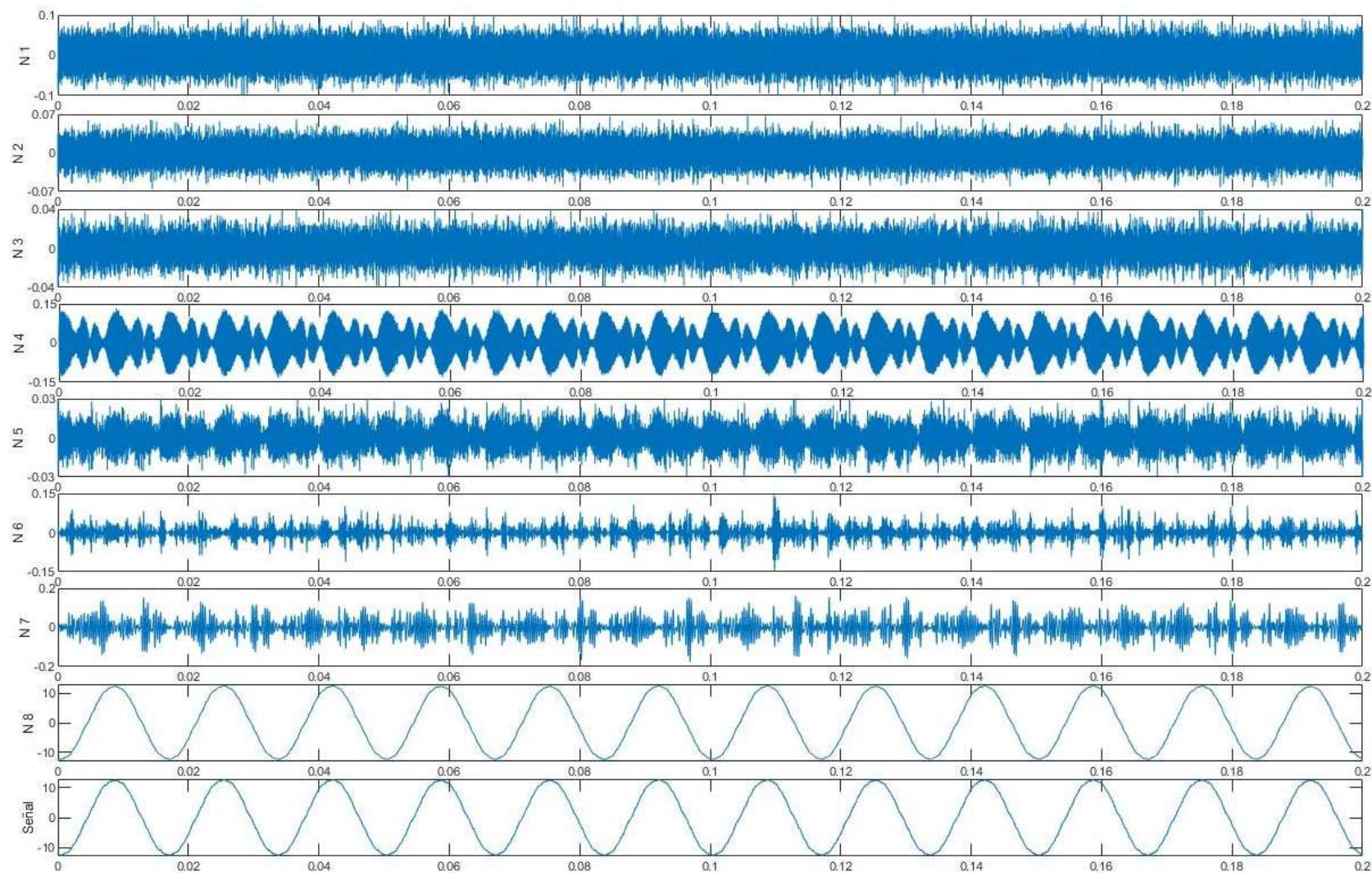


Figura 5.58: Descomposición en dominio del tiempo-frecuencia de la señal de corriente utilizando el análisis Wavelet multi-resolución.

5.5. Conclusiones

En este capítulo se realizó la identificación de emisiones armónica y supra-armónica de tres diferentes lámparas LED, un cargador de vehículo eléctrico y un inversor fotovoltaico, todas estas cargas operando de forma individual. Se observa que la señal de voltaje que alimenta a las cargas se encuentra contaminada por diferentes fuentes de distorsión tanto armónica como supra-armónica, De igual forma, contiene contaminación sub-armónica, inter-armónica y la componente de corriente directa. El origen de esta contaminación es desconocida. Por otra parte, se estudio la contaminación armónica y supra-armónica generada por 90 lámparas Osram, en donde se determino que la contaminación generada por estas lámparas se concentra en su mayor parte en un rango armónico de 0 a 2 kHz. Los resultados obtenidos por medio de la WTC para la señal de corriente indican que la emisión de estas lámparas se encuentra dentro de un rango armónico y supra-armónico de 0 a 8 kHz. De igual forma, la emisión de las lámparas de la marca LEDLINE se encuentra dentro de estos rangos, esto se visualiza más claramente al analizar la señal de corriente por medio de la trasformada discreta de Fourier y utilizando la trasformada Wavelet continua. Los resultados obtenidos por medio de la trasformada discreta de Fourier y la trasformada Wavelet continua se corroboran al comparar los %THD y %TSHD de la señal de voltaje sin la conexión de estas cargas no lineales y de la señal de voltaje con la conexión de estas cargas no lineales.

Respecto a las lámparas de la marca IPSA, se reportan resultados totalmente diferentes a las lámparas de la marca Osram y LEDLINE. La corriente demandada por esta lámpara tiende a ser sinusoidal, lo cual indica una baja emisión armónica y una emisión importante en el rango supra-armónico. Estos resultados se deben a que la lámpara cuenta con un corrector de factor de potencia operando a una alta frecuencia de conmutación. Al analizar por medio de la trasformada Wavelet continua las señales de voltaje y corriente demandadas por las lámparas de la marca IPSA, se observa la contaminación emitida por estas lámparas a una alta frecuencia, estas frecuencias se encuentran a 61.4 kHz y su múltiplo 122.8 kHz. Los resultados de la WTC muestran esta característica variante en el tiempo la cual caracteriza a los supra-armónicos, la aparición de estos coincide en tiempo con el rizado que se presenta en las crestas de la señal de corriente.

Al analizar la señal de voltaje y corriente demandada por el cargador de vehículos eléctricos, se observó que este genera impulsos tanto en la señal de voltaje como de corriente y dichos impulsos se ven reflejados en el espectro de frecuencia en un rango supra-armónico principal-

mente de 2 kHz a 15 kHz. Lo antes mencionado se puede verificar al comparar el %TSHD de la señal de voltaje en el rango de 2 kHz a 9 kHz sin la presencia del vehículo eléctrico el cual es de 0.1745 %. Este porcentaje al momento de conectar el vehículo eléctrico se incrementan a 0.3882 %. Al analizar la señal de corriente por medio del análisis multi-resolución se observa que la aparición de estas componentes supra-armónicas coinciden en tiempo con la aparición de los impulsos.

Por último se analizó el voltaje y corriente demandada por un generador fotovoltaico y se observó por medio de la transformada rápida de Fourier que este genera una frecuencia supra-armónica alrededor de 20 kHz, así como un incremento en magnitud en las componentes en un rango de 2 kHz a 9 kHz. Estos resultados Se corroboran con los métodos de análisis de la transformada discreta de Fourier, la transformada Wavelet continua y el análisis Wavelet multi-resolución.

De lo anterior se puede concluir que la transformada WTC es bastante eficiente para la detección de componentes armónicas y supra-armónicas, mientras que la TFTC no es capaz de detectar componentes a bajas frecuencias y las componentes supra-armónicas las detecta constantes en todo el intervalo de estudio, siendo que en realidad estas componentes supra-armónicas se encuentran variando en el tiempo. Estas variaciones en el tiempo se puede observar en los resultados obtenidos al utilizar el análisis Wavelet multi-resolución y la transformada Wavelet continua.

Capítulo 6

Interacción de supra-armónicos: Emisión múltiple

En este capítulo se analiza la emisión múltiple de los dispositivos no lineales conectados a la red de distribución analizados en el capítulo anterior, en donde cada dispositivo genera un espectro de frecuencias diferente. Por lo tanto, el caso de estudio propuesto en este capítulo tiene como propósito analizar el efecto combinado de estas cargas no lineales en la red de baja tensión.

6.1. Lámparas LED y vehículo eléctrico

El objetivo de esta sección consiste en investigar el impacto de la operación de las lámparas LED en combinación con el vehículo eléctrico en la red de distribución de bajo voltaje. El experimento consiste en analizar la emisión múltiple de estas dos cargas no lineales y como estas afectan a la red de baja tensión.

En este experimento se alimentan simultáneamente 45 lámparas de la marca Osram, 5 lámparas de la marca LEDLINE, 5 lámparas de la marca IPSA y el vehículo eléctrico con un cargador nivel 1. En la Figura 6.1 se describe la forma de onda en el tiempo del voltaje de alimentación y la corriente que demandan el conjunto de lámparas LED y el cargador del vehículo eléctrico. Se aprecia que el voltaje cuenta un mayor nivel de distorsión en comparación con los casos en emisión simple. Por otro lado, se aprecia que la señal de corriente demandada por este conjunto de cargas es altamente distorsionada. Esto se corrobora en el plano de fase del voltaje de alimentación versus la corriente demandada que se reporta en la Figura 6.2. Se puede apreciar que el diagrama de fase indica la presencia de una carga altamente no lineal,

de este diagrama de fase se observa el efecto de las lámparas Osram y LEDLINE, así como el efecto del cargador del vehículo eléctrico.

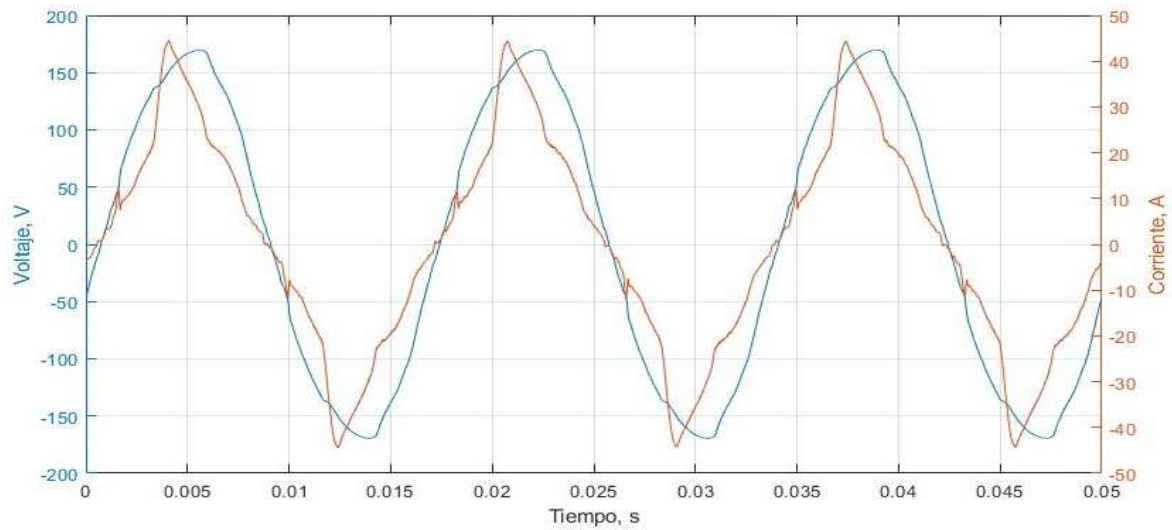


Figura 6.1: Formas de onda en el tiempo de voltaje y corriente para 45 lámparas LED tipo A, 5 lámparas LED tipo B, 5 lámparas LED tipo C y un cargador de vehículo eléctrico nivel 1.

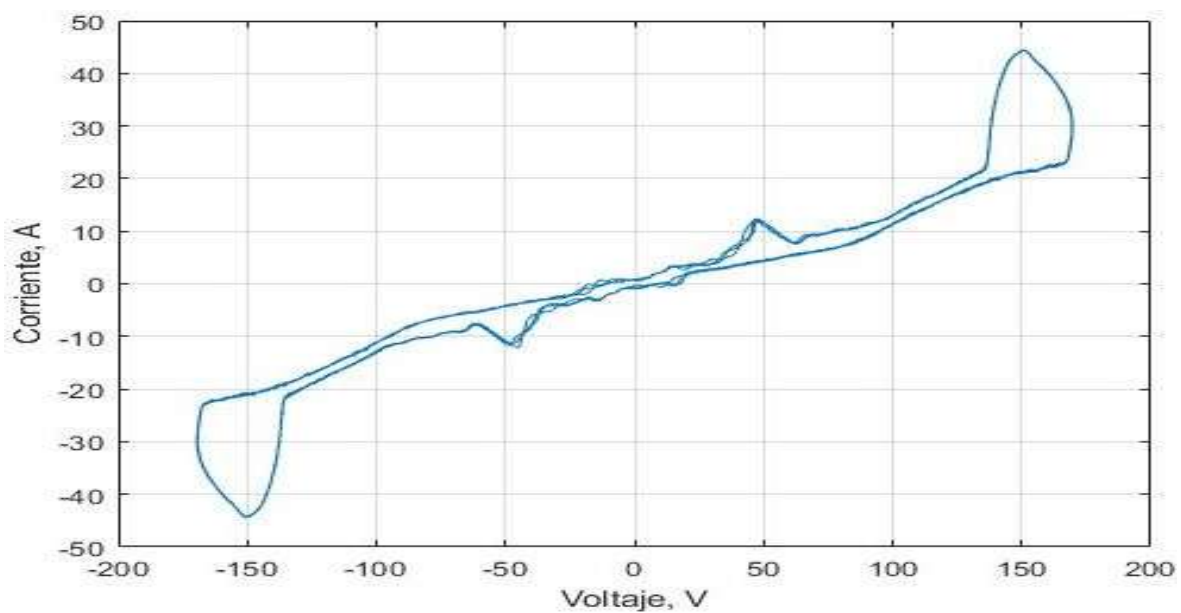


Figura 6.2: Curva característica V-I para 45 lámparas tipo A, 5 lámparas tipo B, 5 lámparas tipo C y un cargador de vehículo eléctrico nivel 1.

6.1.1. Análisis en el dominio de la frecuencia: Transformada discreta de Fourier

En esta sección se reportan los resultados obtenidos con la transformada discreta de Fourier al analizar tanto la señal de voltaje como de corriente demandada por 45 lámparas de la marca Osram, 5 lámparas de la marca LEDLINE, 5 lámparas de la marca IPSA y un vehículo eléctrico con cargador nivel 1. Se procesan un total de 3 ciclos de la señal de voltaje y corriente, lo cual equivale a 25,002 muestras a una frecuencia de muestreo de 500,040 Hz. En la Figura 6.3 (a) se observan el espectro de frecuencia de la señal de voltaje el cual cuenta con magnitudes importantes para los armónicos 3, 5, 7 y 9 con magnitudes de 4.27 V, 1.65 V, 1.59 V y 1.27 V, respectivamente. De igual forma, se detecta una componente de corriente directa con una magnitud de 0.2496 V. Respecto a las emisiones en el rango de frecuencia de 2 kHz a 9 kHz (ver Figura 6.3 (b)), se observa que la componente más significativa en este rango de frecuencia se encuentra a una frecuencia de 2.1 kHz con una magnitud de 0.2043 V. Se observa que la mayor parte de contaminación supra-armónica en este rango se encuentra concentrada en un rango de 2 kHz a 7 kHz. Por otra parte, la Figura 6.3 (c) muestra los resultados en un rango supra-armónico de 9 kHz a 150 kHz se detecta contaminación supra-armónica importante al inicio de este rango de frecuencia de 9 kHz a 20 kHz, las cuales están asociadas a la operación del cargador de vehículo eléctrico, esto observado en operación simple. De este rango se aprecia la aparición de el conjunto de frecuencias asociado a la operación de las lámparas de la marca IPSA, el cual se concentra alrededor de 61.4 kHz.

En la Figura 6.4 (a) se aprecia el espectro de frecuencia de la señal de corriente demandada por el conjunto de cargas de un rango de 0 a 2 kHz se aprecian las armónicas 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 y 17 con magnitudes de 4.49 A, 2.43 A, 1.46 A, 0.74 A, 0.84 A, 0.64 A, 0.47 A y 0.31 A, respectivamente, así como una pequeña componente de corriente directa con magnitud de 0.1147 A. Respecto a las emisiones correspondientes a la Figura 6.4 (b) para un rango de frecuencias de 2 kHz a 9 kHz, se observa que las componentes supra-armónicas más sobresalientes en este rango se encuentran a frecuencias de 2.1 kHz, 2.3 kHz, 2.8 kHz, 3.06 kHz y 3.5 kHz con magnitudes de 0.0947 A, 0.0842 A, 0.0634 A, 0.0835 A y 0.0668 A, respectivamente. Por último, en la Figura 6.4 (c) se presentan los resultados obtenidos en un rango supra-armónico de 9 kHz a 150 kHz. Se observan las frecuencias supra-armónicas emitidas por la lámpara tipo C. El primer rango de frecuencias cuenta con un rango de 57.6 kHz a 69.6 kHz en donde la mayor magnitud detectada en este rango es de 0.0055 A a una frecuencia de 61.4 kHz. El segundo conjunto de frecuencias se detecta en torno al doble de la frecuencia de 61.4 kHz en donde se observan magnitudes mucho menores en comparación con el primer grupo de frecuencias, este segundo rango de frecuencias abarca de 115.4 a 139.2

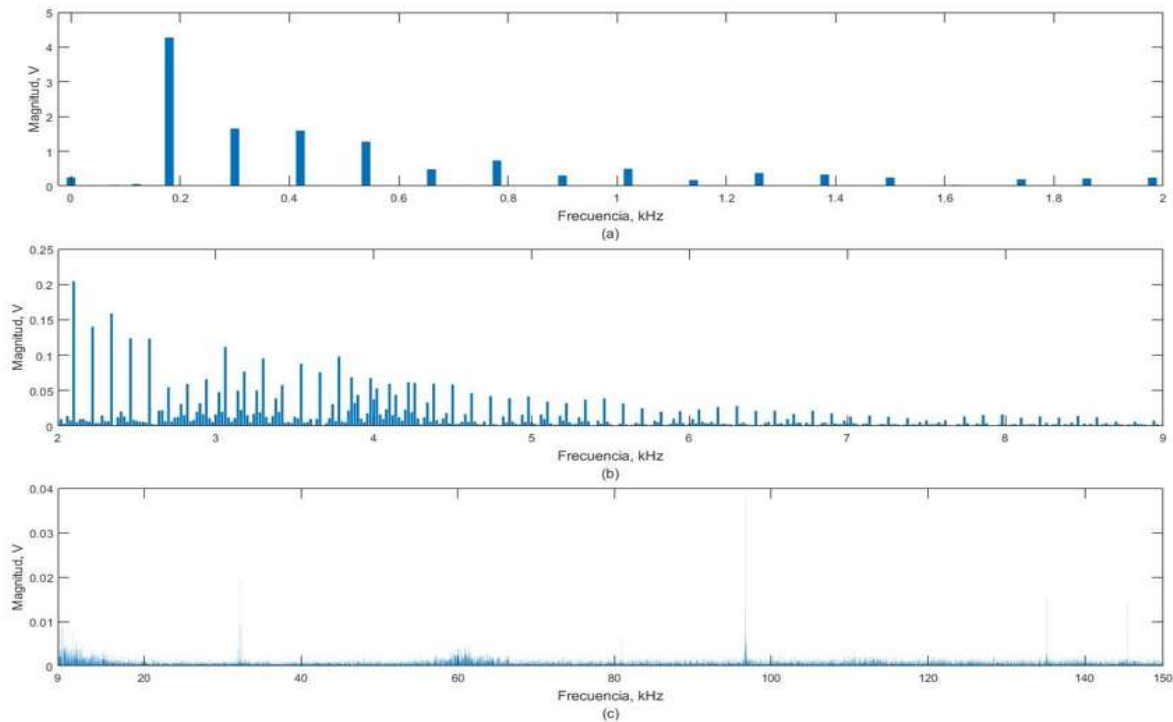


Figura 6.3: Espectro de frecuencia del voltaje para las lámparas LED tipo A, lámparas tipo B, lámparas tipo C y un vehículo eléctrico, para tres rangos de frecuencias diferentes: a).- 0 a 2 kHz, b).- 2 kHz a 9 kHz y c).- 9 kHz a 150 kHz

kHz. La mayor magnitud encontrada en este rango es de 0.0025 A a una frecuencia de 122.8 kHz. De igual forma, se observa una contaminación supra-armónica importante en un rango de frecuencia de 9 kHz a 20 kHz esta correspondiente a la operación del cargador del vehículo eléctrico. Del espectro obtenido de la señal de corriente se observa que la mayor parte de contaminación se concentra en un rango armónico de 0 a 2 kHz y un rango supra-armónico de 2 a 20 kHz. Esto debido a que las lámparas de la marca Osram, LEDLINE y el cargador de vehículo eléctrico generan emisiones tanto en un rango armónico de 0 a 2 kHz como supra-armónico de 2 kHz a 20 kHz. De igual forma, se observa la contaminación generada por la lámpara tipo C en un rango supra-armónico de 9 kHz a 150 kHz.

La Tabla 6.1 presenta un análisis comparativo del porcentaje de THD para el voltaje de la red de distribución y los voltajes de la red de distribución con existencia de las cargas no lineales en operación simple y operación múltiple. Para el caso 6 en operación múltiple, en el rango armónico se observa un incremento de 2.4700 % a 4.3273 %, en el rango supra-armónico de 2 kHz a 9 kHz se observa un incremento de 0.1745 % a 0.4334 % y en el rango de 9 kHz a 150 kHz de 0.0706 % a 0.0843 %.

Los casos de estudio reportados en la Tabla 6.1 son:

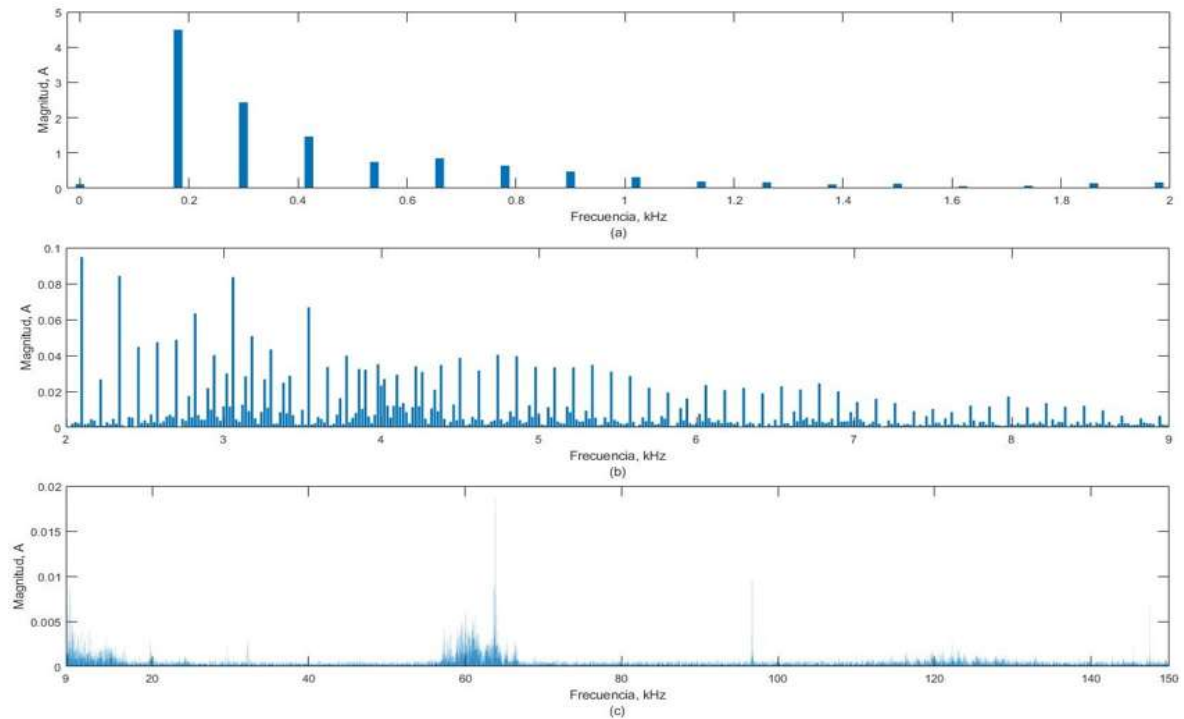


Figura 6.4: Espectro de frecuencia de la corriente para las lámparas LED tipo A, lámparas tipo B, lámparas tipo C y un vehículo eléctrico, para tres rangos de frecuencias diferentes: a).- 0 a 2 kHz, b).- 2 kHz a 9 kHz y c).- 9 kHz a 150 kHz

- Base: Porciento THD y TSHD sin cargas no lineales.
- Caso 1: Porciento THD y TSHD de lámparas tipo A.
- Caso 2: Porciento THD y TSHD de lámparas tipo B.
- Caso 3: Porciento THD y TSHD de lámparas tipo C.
- Caso 4: Porciento THD y TSHD del cargador de un vehículo eléctrico.
- Caso 5: Porciento THD y TSHD de un generador fotovoltaico.
- Caso 6: Porciento THD y TSHD de lámparas y cargador de vehículo eléctrico en operación múltiple.

Tabla 6.1: Análisis comparativo del porcentaje de distorsión armónica para el voltaje de la red eléctrica, lámparas tipo A, lámparas tipo B, lámparas tipo C, vehículo eléctrico, generador fotovoltaico y lámparas con vehículo eléctrico en operación múltiple.

Rango	Base	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
$0 \text{ Hz} < f < 2 \text{ kHz}$	2.4700	5.9540	2.6179	2.5778	2.3180	2.1109	4.3273
$2 \text{ kHz} < f < 9 \text{ kHz}$	0.1745	0.2650	0.1693	0.1382	0.3885	0.1275	0.4334
$9 \text{ kHz} < f < 150 \text{ kHz}$	0.0706	0.0724	0.0708	0.0991	0.0765	0.0606	0.0843

6.1.2. Análisis en el dominio tiempo-frecuencia: Transformada de Fourier de tiempo corto

Las Figuras 6.5 y 6.6 describen el espectrograma de las señales de voltaje y corriente, así como la forma de onda correspondiente en el dominio del tiempo para el conjunto de cargas no lineales operando de manera simultánea. La Figura 6.5 (a) describe la forma de onda en el tiempo de la señal de voltaje, mientras que la Figura 6.5 (b) presenta el espectrograma de emisión hasta una frecuencia de 150 kHz. Se puede apreciar la emisión correspondiente a las lámparas tipo C a una frecuencia de 61.4 kHz, así como las frecuencias de 32.2 kHz y 96.7 kHz generadas por fuentes desconocidas. Por otra parte, la Figura 6.6 (a) representa la forma de onda en el tiempo de la señal de corriente demandada por estas cargas operando simultáneamente. En esta señal se puede observar a simple vista los impulsos provocados por el funcionamiento del cargador del vehículo eléctrico. La forma de onda de la señal tiende a tomar una forma triangular. La Figura 6.6 (b) presenta el espectrograma de emisión hasta la frecuencia de 150 kHz, se aprecia la emisión correspondiente a la lámpara tipo C a una frecuencia de 61.4 kHz y su múltiplo a 122.8 kHz. De igual forma, se detecta la componente de 96.7 kHz, esta generada por fuentes desconocidas. Del espectrograma mostrado en la Figura 6.6 (b) se observa una mayor emisión en un rango de frecuencia de 3 kHz a 10 kHz, en comparación con los espectrogramas obtenidos en una emisión simple.

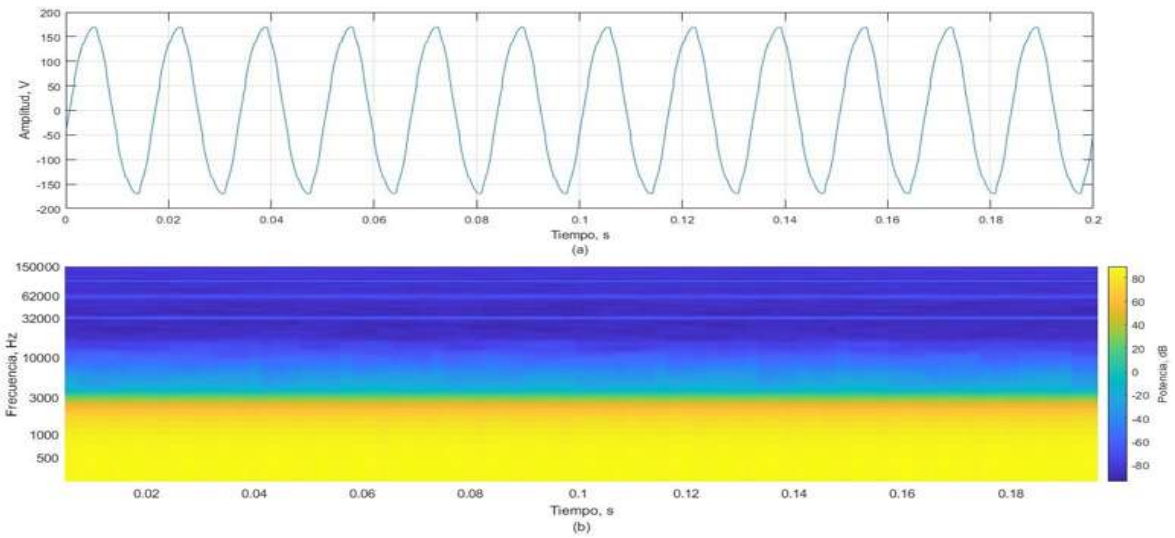


Figura 6.5: Emisión de voltaje para 45 lámparas tipo A, 5 lámparas tipo B, 5 lámparas tipo C y un vehículo eléctrico con cargador nivel 1 en el dominio tiempo-frecuencia. a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Espectrograma con la TFTC.

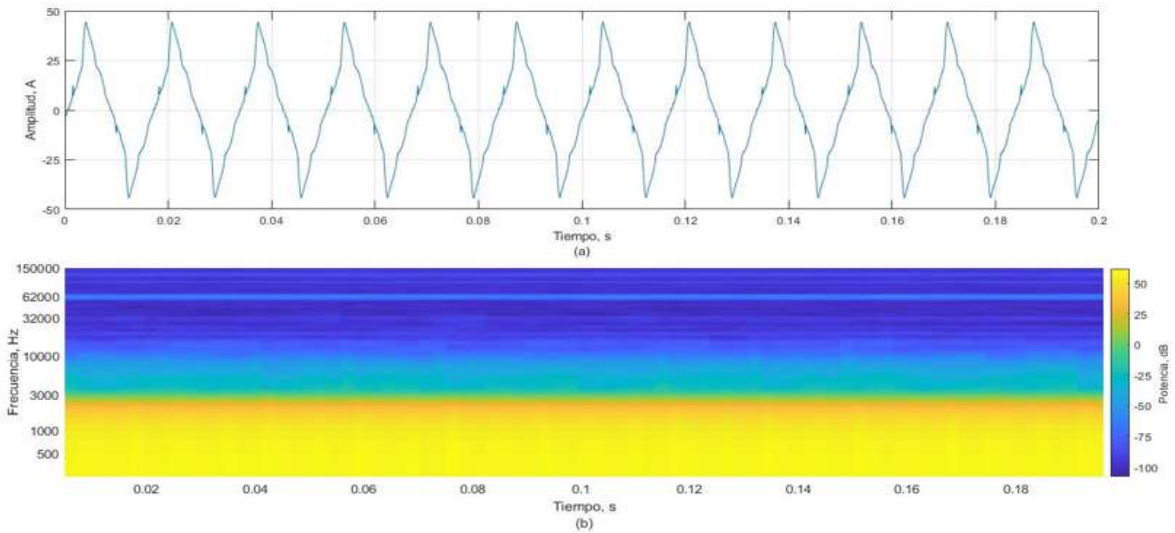


Figura 6.6: Emisión de corriente para 45 lámparas tipo A, 5 lámparas tipo B, 5 lámparas tipo C y un vehículo eléctrico con cargador nivel 1 en el dominio tiempo-frecuencia. a).- Forma de onda en el tiempo y b).- Espectrograma con la TFTC.

6.1.3. Análisis en el dominio tiempo-frecuencia: Transformada Wavelet continua

A continuación, se analiza la señal de voltaje como de corriente por medio de la transformada Wavelet de tiempo continuo. Las Figuras 6.7 y 6.8 describen la forma de onda y escalograma de las señales de voltaje y corriente para el grupo de cargas operando de forma simultánea. La Figura 6.7 (a) describe la forma de onda en el tiempo de la señal de voltaje, mientras que la Figura 6.7 (b) presenta el escalograma de emisión. Se aprecia la componente de frecuencia generada por las lámparas tipo C a una frecuencia de 61.4 kHz, así como las frecuencias de 32.2 kHz y 96.7 kHz las cuales se desconocen las fuentes que las emiten. De igual forma, se observa que se detecta perfectamente la componente fundamental de 60 Hz, así como 3 y 9 armónica. Se observa que la contaminación más significativa se encuentra en un rango de 60 Hz a 10 kHz aproximadamente.

La Figura 6.8 (a) representa la señal de corriente demanda en el tiempo por las cargas no lineales, mientras que la Figura 6.8 (b) presenta el escalograma de emisión. Se puede observar la detección de la componente fundamental de 60 Hz, así como las principales armónicas 3, 7 y 9. Mientras que en un rango supra-armónico se detectan las emisiones generadas por las lámparas tipo C a una frecuencia de 61.4 kHz y su múltiplo 122.8 kHz. De igual forma que en el escalograma de voltaje se observa que la mayor parte de la contaminación generada por estas cargas no lineales se encuentra en un rango de 60 Hz a 10 kHz aproximadamente. Al utilizar este método de procesamiento de las señales se observa que la contaminación supra-armónica se encuentra variando en el tiempo. De igual forma, la contaminación supra-armónica generada por el vehículo eléctrico coincide en tiempo con los impulsos que aparecen tanto en la señal de voltaje como de corriente.

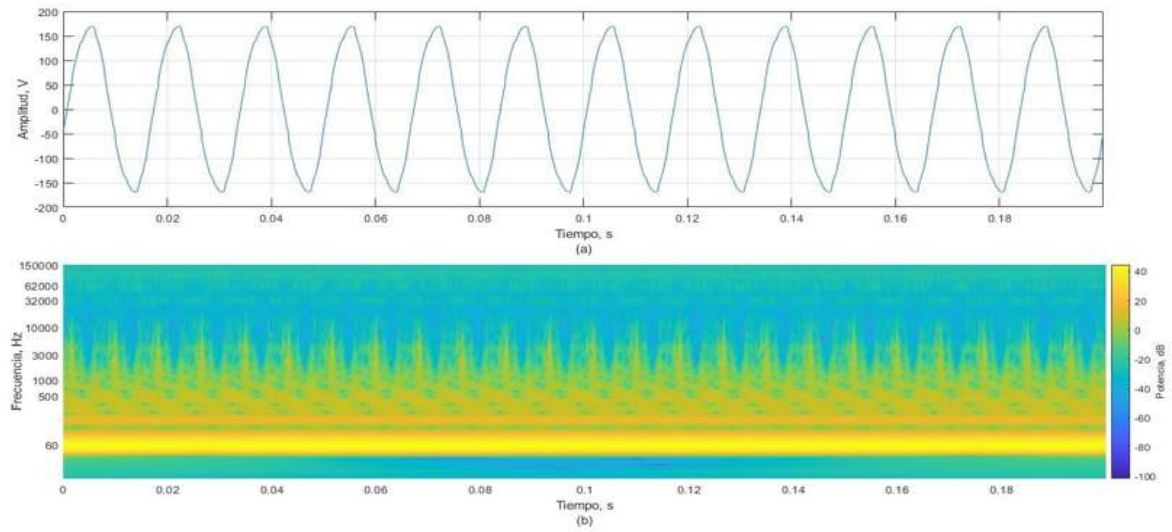


Figura 6.7: Emisión de voltaje para 45 lámparas tipo A, 5 lámparas tipo B, 5 lámparas tipo C y un vehículo eléctrico con cargador nivel 1 en el dominio tiempo-frecuencia: a).- Forma de onda en el tiempo de señal de voltaje y b).- Escalograma con la WTC.

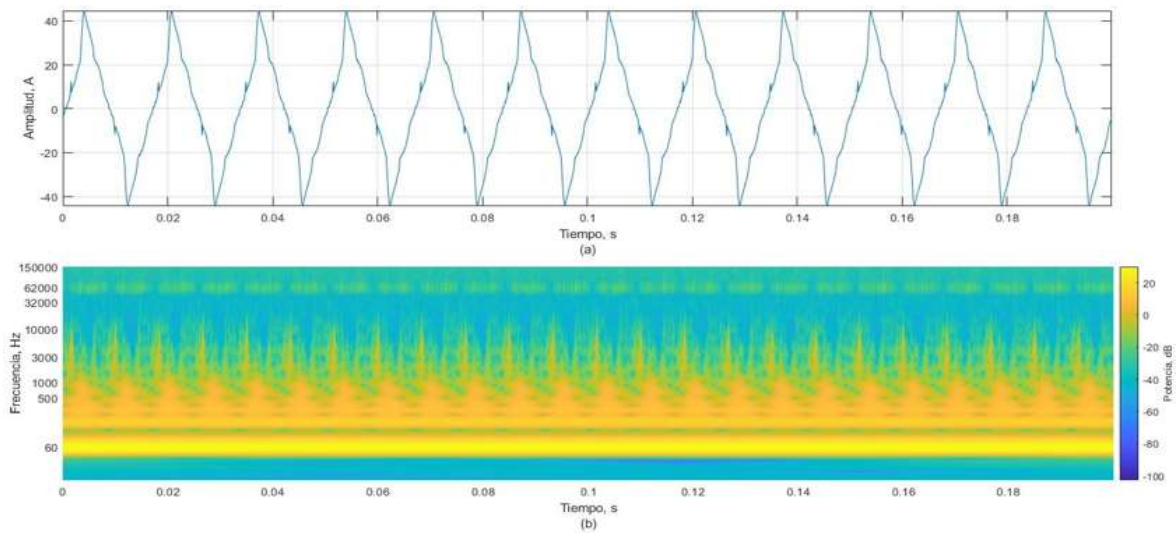


Figura 6.8: Emisión de corriente para 45 lámparas tipo A, 5 lámparas tipo B, 5 lámparas tipo C y un vehículo eléctrico con cargador nivel 1 en el dominio tiempo-frecuencia: a).- Forma de onda en el tiempo de señal de corriente y b).- Escalograma con la WTC.

6.1.4. Análisis en el dominio tiempo-frecuencia: análisis Wavelet multi-resolución

En esta sección se analiza la señal de voltaje y de corriente de las siguientes cargas operando simultáneamente: 45 lámparas de la marca Osram, 5 lámparas de la marca LEDLINE, 5 lámparas de la marca IPSA y un vehículo eléctrico con cargador nivel 1. Se hace uso del análisis Wavelet multi-resolución utilizando un nivel de descomposición de 8 niveles. En la Figura 6.9 se muestran las 8 bandas extraídas de la señal original de voltaje. Se puede apreciar que la contaminación en la señal de voltaje generada por estas cargas no lineales se concentra principalmente en las últimas 4 bandas N5, N6, N7 y N8 ya que estas bandas cuentan con las mayores magnitudes de ± 0.5 V, ± 2 V, ± 2.5 V y ± 169.5 V, respectivamente. De la Tabla 5.2 se observa que estas bandas abarcan un rango de frecuencia de 0 a 15,626.25 Hz. De igual forma, la Figura 6.10 reporta las 8 bandas extraídas de la señal corriente. Como se aprecia en la Figura 6.10, las bandas N5, N6, N7 y N8 presentan magnitudes en el rango de ± 0.3 A, ± 1.3 A, ± 1.5 A y ± 44.13 A, respectivamente. Estas bandas concentran la mayor parte de contaminación tanto armónica como supra-armónica generada por estas cargas, estas 4 bandas abarcando el mismo rango de frecuencia de 0 a 15,626.25 Hz. De igual forma, se observa la contaminación generada específicamente por las lámparas tipo C, a lo cual corresponden las bandas N2 y N3 con magnitudes de ± 0.12 A y ± 0.1 A. La banda N2 cuenta con un rango de frecuencia de 62,505 a 125,010 Hz y la banda N3 cuenta con un rango de frecuencia de 31,252.5 a 62,505 Hz. Dentro de estos dos rangos de frecuencia se encuentran las frecuencias emitidas por el controlador de la lámpara LED tipo C, la frecuencia de conmutación y su múltiplo del doble de la frecuencia de conmutación. Se observa que la mayor parte de contaminación se concentra en un rango de frecuencias de 0 a 15,626.25 Hz. Esto coincide con los resultados obtenidos en los espectros de frecuencia, espectrogramas y escalogramas.

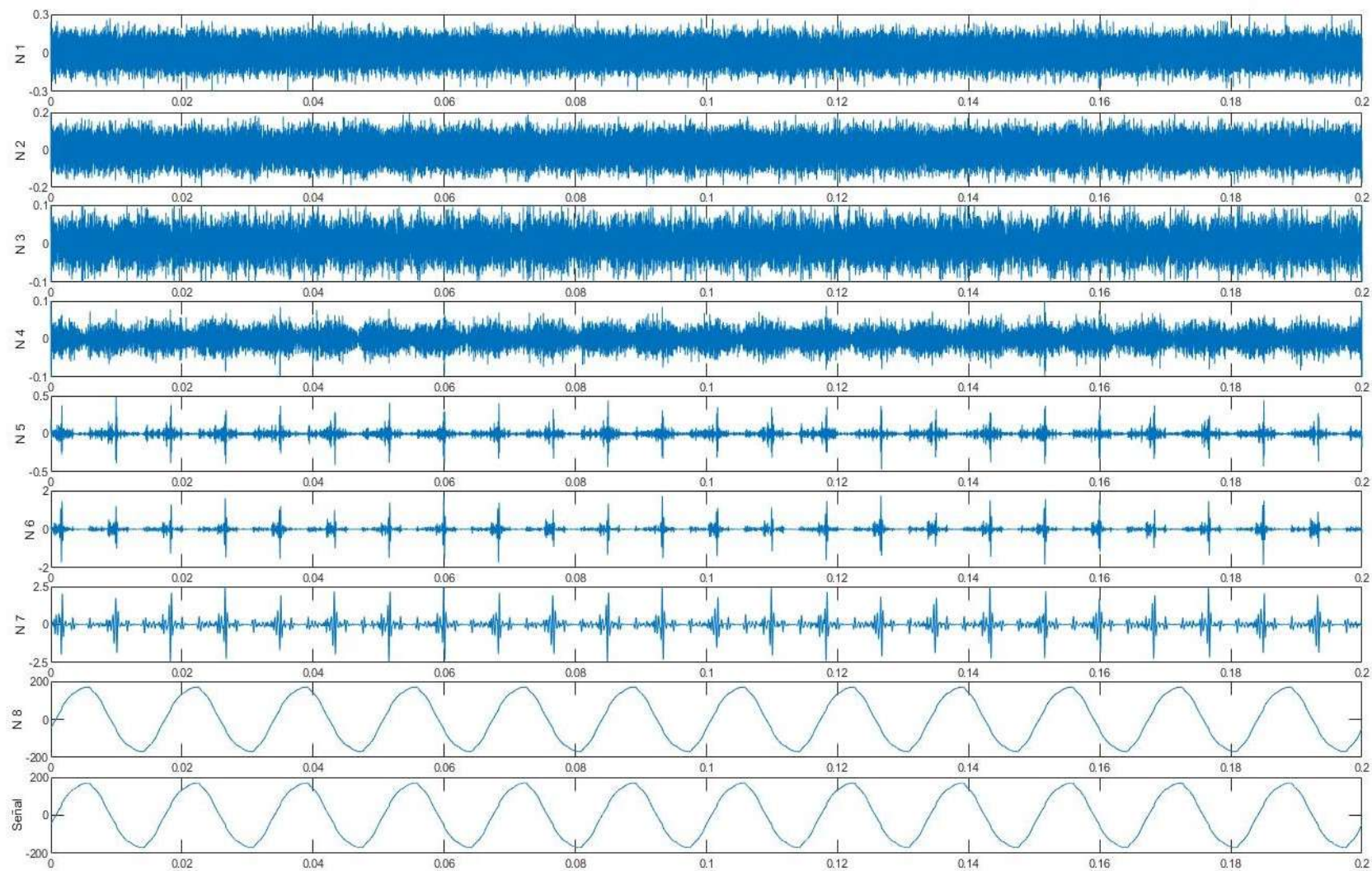


Figura 6.9: Descomposición en dominio del tiempo-frecuencia de la señal de voltaje utilizando análisis Wavelet multi-resolución.

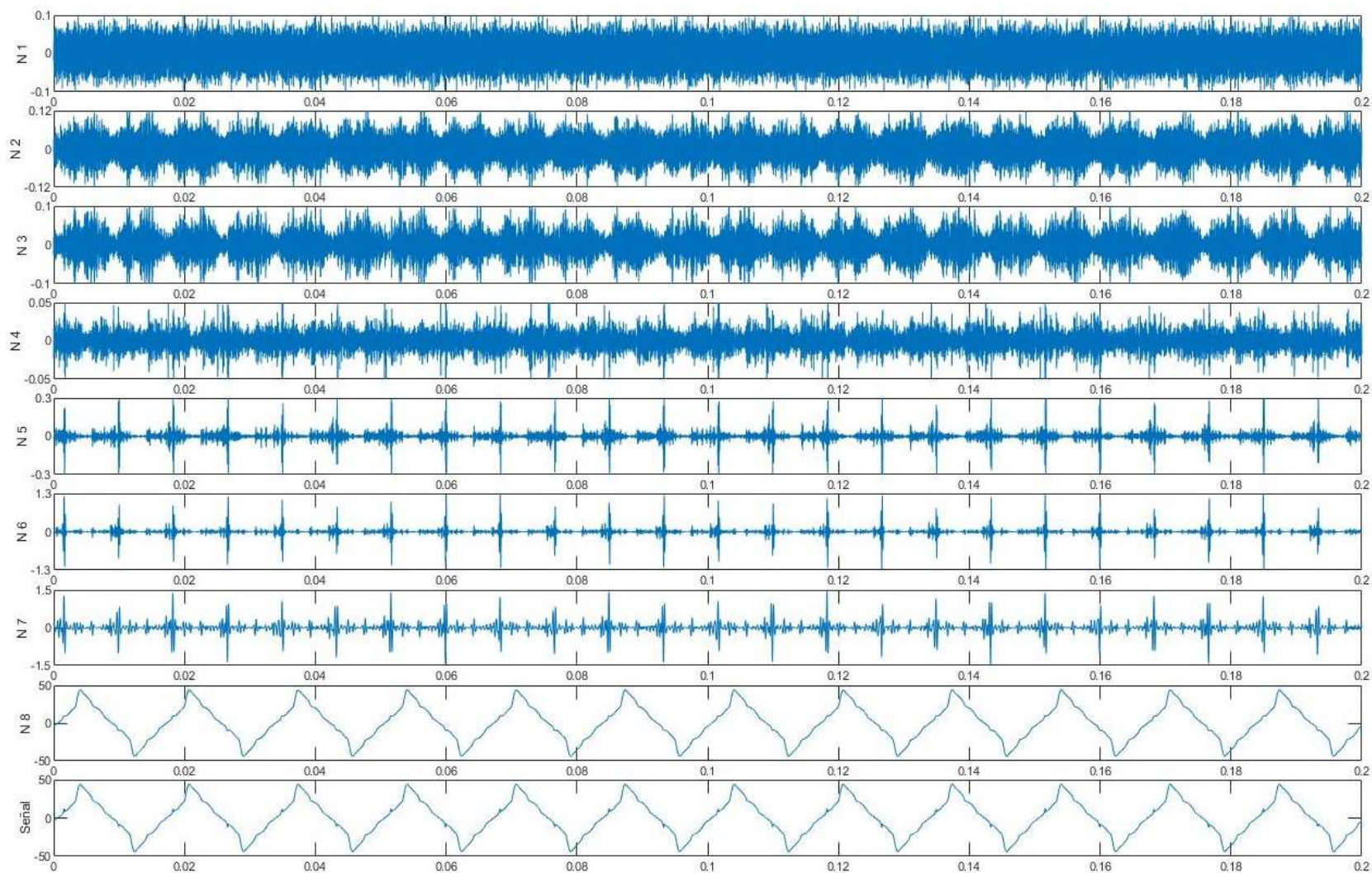


Figura 6.10: Descomposición en dominio del tiempo-frecuencia de la señal de corriente utilizando el análisis Wavelet multi-resolución.

6.2. Conclusiones

En este capítulo se identificó la emisión armónica y supra-armónica en operación simultánea de 45 lámparas de la marca Osram, 5 lámparas de la marca LEDLINE, 5 lámparas de la marca IPSA y un vehículo eléctrico con cargador nivel 1. Se observa que se detectan las mismas frecuencias supra-armónicas encontradas en la señal de voltaje de la red de distribución de la cual se desconocen los dispositivos que las generan. Por otra parte, se observa la contaminación armónica y supra-armónica generada por las lámparas tipo A, tipo B y el vehículo eléctrico, ya que la mayor parte de contaminación generada por estas cargas se concentra en un rango armónico de 0 a 2 kHz, lo cual se observa en el incremento de las magnitudes de las componentes armónicas. Sin embargo, los resultados obtenidos de la transformada discreta de Fourier nos muestran que la mayor parte de contaminación emitida por estas 3 cargas combinadas se concentra en un rango de 0 a 20 kHz. Esto se puede corroborar observando la tabla de análisis comparativo de %THD y %TSHD, ya que se observa un incremento de 2.4700 % a 4.3260 % y de 0.1745 % a 0.4334 %, en el rango armónico de 0 a 2 kHz y supra-armónico de 2 kHz a 9 kHz. Al analizar las señales de voltaje y corriente por medio de WTC se aprecia la contaminación generada por las lámparas tipo A y tipo B ya que estas incrementan las magnitudes de las principales componentes armónicas. De igual forma, en ambos escalogramas tanto de voltaje como de corriente se observa la contaminación generada por el vehículo eléctrico, ya que los impulsos que aparecen por la operación del cargador de vehículo eléctrico en ambas señales coinciden en tiempo con las emisiones armónicas y supra-armónicas mostradas. De igual forma, se muestra la emisión generada por las lámparas tipo C, esta lámpara genera principalmente emisiones en el rango supra-armónico. Estas emisiones son generadas a frecuencias de 61.4 kHz y su múltiplo 122.8 kHz. La contaminación generada por estas lámparas se aprecia en las crestas de la forma de onda en el tiempo de la señal de corriente.

Al analizar la señal de voltaje por medio del análisis Wavelet multi-resolución se observa principalmente la contaminación generada por el vehículo eléctrico, ya que los impulsos que genera coinciden en tiempo con el incremento de las señales en las últimas 4 bandas. Esta contaminación se encuentra en las bandas N5, N6, N7 y N8 abarcando un rango de frecuencia de 0 a 15,626.25 Hz.

Capítulo 7

Conclusiones

Las emisiones supra-armónicas son principalmente causadas por dispositivos no lineales, tales como lámparas LED, cargadores de vehículos eléctricos e inversores foto-voltaicos. Las perturbaciones generadas por esas cargas podrían producir interferencias en equipos susceptibles expuestos a este tipo de perturbación. En este trabajo se identifican las emisiones supra-armónicas no intencionales de un conjunto de lámparas LED comerciales disponibles en el mercado mexicano, un cargador de vehículo eléctrico y un inversor foto-voltaico. Estas cargas se conectan a la red de baja tensión. Estas cargas utilizan circuitos de electrónica de potencia para reducir el tamaño de los circuitos y aumentar su eficiencia energética. En las siguientes subsecciones se describen las conclusiones encontradas en este trabajo.

7.1. Sistema de medición

Se implementó un sistema de medición para la detección de componentes supra-armónicas en redes de baja tensión tanto en señal de corriente como de voltaje. Esta plataforma de medición cuenta con un sensor de voltaje LEM LV25-P y un sensor de corriente LEM LA55-P. La adquisición de las muestras de las señales se realiza con ayuda del dispositivo analog discovery 2, el cual permite muestrear ambas señales a una frecuencia de muestreo de 100,000,000 muestras/s. Este dispositivo de adquisición de datos es controlado desde la plataforma de programación de Matlab. Las muestras son tomadas y almacenadas para posteriormente ser analizadas. Se realizó la validación de la plataforma de medición, para esto, se generaron 4 señales con el generador de señales BK PRECISION con amplitud de 2 V y frecuencias de 60 Hz, 50 kHz, 100 kHz y 150 kHz, respectivamente. Estas señales fueron alimentadas individualmente al dispositivo analog discovery 2 para ser muestreadas y analizadas por medios de la transformada discreta de Fourier. Los valores obtenidos de frecuencia y amplitud son compa-

rados con los resultados arrojados por un Osciloscopio digital tektronix modelo TDS 2014B. Al llevar a cabo la validación se observó que el generador de señales no entrega exactamente la amplitud de la señal a 2 V y de igual forma existen pequeñas variaciones en frecuencia, esto provoca un aumento en los porcentajes de error entre ambas mediciones.

Al llevar a cabo la validación del sistema de medición se observó que entre mayor sea la frecuencia de muestreo de la señal se detectan con mayor precisión las magnitudes de las componentes de alta frecuencia. Por lo tanto, entre mayor sea la frecuencia de muestreo de la señal, se detectarán las magnitudes de las componentes supra-armónicas con una mayor precisión. Este es un aspecto a mejorar del sistema de medición ya que el sistema de adquisición de datos operado desde Matlab cuenta con una frecuencia de muestreo máxima de 1,000,000 muestras/s. Este aspecto representa un área de oportunidad para mejorar el sistema de medición para poder adquirir las señales a una mayor frecuencia de muestreo.

7.2. Identificación de supra-armónicos: Emisión simple

Se realizó la identificación de la emisión armónica y supra-armónica de las siguientes cargas: tres diferentes tipos de lámparas LED, cargador de vehículo eléctrico y inversor fotovoltaico. Se analizó la señal de voltaje de la red de distribución y se observó que este voltaje se encuentra contaminada por innumerables fuentes de distorsión desconocidas tanto armónica como supra-armónica. Por ejemplo, se detectan frecuencias supra-armónicas de 32.2 kHz, 63.7 kHz, 96.8 kHz, 135.7 kHz y 145.5 kHz, respectivamente. De igual forma, se detectan sub-armónicas, inter-armónicas y la componente de corriente directa.

Al analizar estas cargas por medio de la transformada discreta de Fourier nos muestra que la lámpara tipo A concentra su mayor contaminación en un rango armónico de 0 a 2 kHz. Sin embargo, la contaminación emitida por esta lámpara se extiende hasta aproximadamente 8 kHz. El %THD de la señal de voltaje en un rango armónico se incrementa de 2.4700 % a 5.9510 % pero no se sobrepasa el límite de 8 % de THD sugerido por el estándar IEEE-519. Por su parte, la lámpara tipo C contiene un comportamiento totalmente diferente al de las lámparas tipo A y tipo B. Disminuyen considerablemente las magnitudes armónicas en comparación con las lámparas A y B, pero como consecuencia se obtiene un incremento en la componente de corriente directa y la aparición de sub-armónicos e inter-armónicos. De igual forma, se detectan nuevas componentes a altas frecuencias, la aparición de estas frecuencias nuevas corresponde a la operación del corrector de factor de potencia operando a alta frecuencia de conmutación. Estos dos nuevos conjuntos de frecuencias se concentran al rededor de 61.4 kHz y su múltiplo del doble a 122.8 kHz. La visualización del comportamiento de es-

tos supra-armónicos generados por las lámparas tipo C se visualiza utilizando la transformada Wavelet continua y el análisis Wavelet multi-resolución, al utilizar estas dos herramientas de procesamiento se visualiza el instante en el cual hacen presencia estos supra-armónicos los cuales coinciden en tiempo con el rizado en las crestas de las señales de voltaje y corriente.

El cargador de vehículo eléctrico nivel 1 genera impulsos tanto en la señal de voltaje como de corriente después de cada cruce por cero de cada semiciclo. Como consecuencia, aparecen emisiones en un rango armónico y supra-armónico de 60 Hz a 15 kHz. Al analizar las señales por medio de la transformada Wavelet continua se observa que la aparición de esta contaminación va desde 60 Hz hasta 15 kHz, el incremento de estas emisiones coinciden en tiempo con la aparición de los impulsos. La emisión correspondiente a la operación del inversor fotovoltaico se detectó a una frecuencia alrededor de 20 kHz, esto se observó en los resultados de la transformada discreta de Fourier. Sin embargo, esta transformada no nos entrega información sobre el tiempo en el cual hace presencia esta contaminación generada por el inversor. Para resolver esta limitación se hace uso de la transformada Wavelet continua y el análisis Wavelet multi-resolución, estos dos métodos nos muestran en que instante de tiempo hacen aparición estos supra-armónicos y se observa esa característica variante en el tiempo de los supra-armónicos.

7.3. Interacción de supra-armónicos: Emisión múltiple

En el capítulo 6 se analizaron los resultados armónicos y supra-armónicos obtenidos de la operación múltiple de 45 lámparas tipo A, 5 lámparas tipo B, 5 lámparas tipo C y un cargador de vehículo eléctrico nivel 1. De los resultados obtenidos al operar estas cargas combinadas se determina un incremento del %THD en la señal de voltaje de 2.4700 % a 4.3260 %, en este rango armónico se concentra la mayor parte de contaminación ya que las lámparas tipo A, tipo B y el vehículo eléctrico cuentan con su mayor emisión en este rango. Al analizar la señal de voltaje y corriente por medio de la WTC se observa la contaminación generada por las lámparas tipo A, tipo B y el cargador de vehículo eléctrico. Del escalograma de corriente mostrado en el capítulo 6 se determinaron las emisiones generadas por el cargador. Del escalograma de voltaje se observa la eficiencia de esta herramienta de procesamiento ya que a simple vista en la señal de tensión no se perciben estos impulsos generados por el vehículo eléctrico. Sin embargo, si tiene presencia esta contaminación en la señal de tensión, esto se observa en el escalograma de voltaje. De igual forma, se detectan las emisiones generadas

por las lámparas tipo C, estas lámparas generan principalmente emisiones en el rango supra-armónico, estas emisiones son generadas a frecuencias de 61.4 kHz y su múltiplo a 122.8 kHz. En los escalogramas de voltaje y corriente se observa que la aparición de esta contaminación supra-armónica coincide en tiempo con las crestas de las señales. Por lo tanto, el rizado que se observa en las crestas de las señales corresponde a esta contaminación supra-armónica.

El análisis de las señales por medio del análisis Wavelet multi-resolución muestra la descomposición de la señal dividida en 8 bandas con rangos de frecuencias diferentes. Con la ayuda de esta herramienta se obtiene la descomposición en el tiempo de la señal original para poder observar fragmentos de esta a diferentes frecuencias con la misma escala de tiempo. Para obtener una reconstrucción de la señal original basta con realizar una sumatoria de todas estas bandas.

7.4. Trabajos futuros

Los trabajos futuros que se proponen a partir de los resultados obtenidos en este trabajo son:

- Desarrollar un sistema de adquisición de datos con frecuencias de muestreo mayores 1,000,000 muestras/s.
- Aplicar el análisis Wavelet multi-resolución para localizar y detectar características transitorias durante la operación dinámica de dispositivos no lineales.
- Evaluar y comparar el desempeño del análisis multi-resolución respecto al algoritmo "Wavelet packet multi-resolution analysis".
- Implementar y evaluar algoritmos basados en datos adaptivos para el estudio de supra-armónicos tales como la "Empirical Wavelet Transform", "Empirical Mode Decomposition" y "Varational Mode Decomposition". Esto con la finalidad de mejorar la detección de componentes supra-armónicas y eventos transitorios en el tiempo en las señales de voltaje y corriente.
- Aplicar herramientas de correlación-cruzado tipo Wavelet para comparar señales e identificar la presencia de emisiones supra-armónicas.
- Desarrollar modelos de los dispositivos emisores de frecuencias supra-armónicas a partir de los resultados del análisis multi-resolución.

Apéndice A

Cálculo de resistencia R_1 y R_M para el sensor de voltaje.

El voltaje y la corriente demandada por el sensor de voltaje cuentan con las siguientes magnitudes RMS,

$$I_{pn} = 10 \times 10^{-3} A \quad (\text{A.1})$$

y

$$V_{pn} = 120V \quad (\text{A.2})$$

La resistencia R_1 se define con,

$$R_1 = \frac{V_{pn}}{I_{pn}} = \frac{120}{10 \times 10^{-3}} = 12,000 \Omega \quad (\text{A.3})$$

La potencia disipada por R_1 es,

$$P = I_{pn}^2 * R_1 = (10 \times 10^{-3})^2 * 12,000 = 1,2W \quad (\text{A.4})$$

Para la potencia de la resistencia R_1 , se recomienda que sea su valor de tres veces la potencia calculada, es decir,

$$P_1 = 3 * P = 3 * 1,2 = 3,6W \quad (\text{A.5})$$

La relación de transformación y el voltaje de salida en devanado secundario se define como,

$$Ni = \frac{N_p}{N_s} = \frac{2,500}{1,000} = 2,5 \quad (\text{A.6})$$

y

$$V_M = 5V \quad (\text{A.7})$$

Considerando la relación de transformación definida en (A.6), se tiene que la corriente en el secundario es,

$$I_S = N_i * I_{pn} = 2,5 * 10x10^{-3} = 25x10^{-3}A \quad (\text{A.8})$$

La resistencia R_M de salida es,

$$R_M = \frac{V_M}{I_S} = \frac{5V}{25x10^{-3}A} = 200\Omega \quad (\text{A.9})$$

La potencia disipada por R_M es,

$$P = I_S^2 * R_M = (25x10^{-3})^2 * 200 = 0,125W \quad (\text{A.10})$$

y la potencia recomendada para R_M es,

$$P_M = 3 * P = 3 * 0,125 = 0,375W \quad (\text{A.11})$$

Apéndice B

Cálculo de resistencia R_M para el sensor de corriente.

La corriente nominal que puede circular por el conductor en el devanado primario es,

$$I_{pn} = 50A \quad (\text{B.1})$$

Considérese que la relación de transformación y voltaje de salida en el devanado secundario son,

$$Ni = \frac{N_p}{N_s} = \frac{1}{1,000} = 1x10^{-3} \quad (\text{B.2})$$

y

$$V_M = 5V \quad (\text{B.3})$$

La corriente en el devanado secundario se define como,

$$I_S = Ni * I_{pn} = 1x10^{-3} * 50 = 50x10^{-3}A \quad (\text{B.4})$$

La resistencia de medición R_M se calcula con,

$$R_M = \frac{V_M}{I_S} = \frac{5V}{50x10^{-3}A} = 100\Omega \quad (\text{B.5})$$

La potencia disipada por R_M es,

$$P = I_S^2 * R_M = (50x10^{-3})^2 * 100 = 0,25W \quad (\text{B.6})$$

Por lo tanto, la potencia recomendada para R_M es,

$$P_M = 3 * P = 3 * 0,25 = 0,75W \quad (\text{B.7})$$

Referencias

- [61000-3-2:2018, 2018] 61000-3-2:2018, I. (2018). Electromagnetic compatibility (emc) part 3-2: Limits - limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 a per phase). pages 1–173.
- [Acha et al., 2019] Acha, E., Roncero-Sánchez, P., de la Villa-Jaen, A., Castro, L. M., and Kazemtabrizi, B. (2019). *VSC-FACTS-HVDC: Analysis, modelling and simulation in power grids*. John Wiley & Sons.
- [Addison, 2017] Addison, P. S. (2017). *The illustrated wavelet transform handbook: introductory theory and applications in science, engineering, medicine and finance*. CRC press.
- [Agudelo Martínez, 2020] Agudelo Martínez, D. (2020). Supraharmonics in low voltage networks.
- [Agudelo-Martínez et al., 2018] Agudelo-Martínez, D., Garzón, C., and Pavas, A. (2018). Interaction of power quality disturbances within 2–150 khz (supraharmonics): Analytical framework. In *2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, pages 1–7. IEEE.
- [Amaripadath et al., 2018] Amaripadath, D., Roche, R., Joseph-Auguste, L., Istrate, D., Fortune, D., Braun, J., and Gao, F. (2018). Measurement of supraharmonic emissions (2-150 khz) in real grid scenarios. In *2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*, pages 1–2. IEEE.
- [Association et al., 2014] Association, I. S. et al. (2014). 519-2014-ieee recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems. *New York, IEEE*.
- [Bollen et al., 2014a] Bollen, M., Meyer, J., Amaris, H., Blanco, A. M., de Castro, A. G., Desmet, J., Klatt, M., Kocewiak, Ł., Rönnberg, S., and Yang, K. (2014a). Future work on harmonics-some expert opinions part i-wind and solar power. In *2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, pages 904–908. IEEE.

- [Bollen et al., 2014b] Bollen, M., Meyer, J., Amaris, H., Blanco, A. M., de Castro, A. G., Desmet, J., Klatt, M., Kocewiak, Ł., Rönnberg, S., and Yang, K. (2014b). Future work on harmonics-some expert opinions part i-wind and solar power. In *2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, pages 904–908. IEEE.
- [Carneiro et al., 2020] Carneiro, R. K., Ota, J. I. Y., and Pomilio, J. A. (2020). Field measurements of non-intentional emissions above 2 khz in photovoltaic inverter installations. In *2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pages 1503–1508. IEEE.
- [Cassano et al., 2019] Cassano, S., Silvestro, F., De Jaeger, E., and Leroi, C. (2019). Modeling of harmonic propagation of fast dc ev charging station in a low voltage network. In *2019 IEEE Milan PowerTech*, pages 1–6. IEEE.
- [Chicco et al., 2015] Chicco, G., Russo, A., and Spertino, F. (2015). Supraharmonics: Concepts and experimental results on photovoltaic systems. In *2015 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation (ISNCC)*, pages 1–6. IEEE.
- [Commission et al., 2003] Commission, I. E. et al. (2003). Electromagnetic compatibility (emc)-part 4-30: Testing and measurement techniques-power quality measurement methods. *IEC 61000-4-30*.
- [Cooley and Tukey, 1965] Cooley, J. W. and Tukey, J. W. (1965). An algorithm for the machine calculation of complex fourier series. *Mathematics of computation*, 19(90):297–301.
- [Darmawardana et al., 2019] Darmawardana, D., Perera, S., Robinson, D., David, J., Meyer, J., and Jayatunga, U. (2019). Impact of high frequency emissions (2–150 khz) on lifetime degradation of electrolytic capacitors in grid connected equipment. In *2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, pages 1–5. IEEE.
- [Espín-Delgado et al., 2020] Espín-Delgado, Á., Letha, S. S., Rönnberg, S. K., and Bollen, M. H. (2020). Failure of mv cable terminations due to supraharmonic voltages: A risk indicator. *IEEE Open Journal of Industry Applications*, 1:42–51.
- [Espín-Delgado et al., 2021] Espín-Delgado, Á., Rönnberg, S., Letha, S. S., and Bollen, M. (2021). Diagnosis of supraharmonics-related problems based on the effects on electrical equipment. *Electric Power Systems Research*, 195:107179.

- [García et al., 2020] García, D., Ignacio, R., et al. (2020). Medida y análisis de la distorsión armónica en cargas no lineales aisladas y combinadas en los rangos 0-2 khz y 2-9 khz.
- [Jian et al., 2019] Jian, Z., Fang, L., Weijun, Z., Yi, Z., and Zhengxin, R. (2019). Simulation of pv grid-connected inverter based on pscad. In *2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia)*, pages 3860–3865. IEEE.
- [Kaptan and CANSEVER, 2018] Kaptan, D. and CANSEVER, G. (2018). Battery chargers in electric vehicles. In *2018 6th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT)*, pages 1–3. IEEE.
- [Khokhlov et al., 2019] Khokhlov, V., Meyer, J., and Schegner, P. (2019). Thermal interactions in modern lighting equipment due to disturbances in the frequency range 2–150 khz. In *2019 IEEE Milan PowerTech*, pages 1–6. IEEE.
- [Klatt et al., 2014] Klatt, M., Meyer, J., and Schegner, P. (2014). Comparison of measurement methods for the frequency range of 2 khz to 150 khz. In *2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, pages 818–822. IEEE.
- [Kotschenreuther, 2018] Kotschenreuther, R. (2018). White leds for lighting applications. In *Nitride Semiconductor Light-Emitting Diodes (LEDs)*, pages 531–552. Elsevier.
- [Larsson, 2006] Larsson, A. (2006). *High frequency distortion in power grids due to electronic equipment*. PhD thesis, Luleå tekniska universitet.
- [Larsson, 2011] Larsson, A. (2011). *On high-frequency distortion in low-voltage power systems*. PhD thesis, Luleå tekniska universitet.
- [Leferink et al., 2016] Leferink, F., Keyer, C., and Melentjev, A. (2016). Static energy meter errors caused by conducted electromagnetic interference. *IEEE electromagnetic compatibility magazine*, 5(4):49–55.
- [LEM, 2018] LEM (2018). Curren transducer la 55-p. pages 1–3.
- [LEM, 2021] LEM (2021). Voltage transducer lv 25-p. pages 1–4.
- [Lodetti et al., 2020] Lodetti, S., Bruna, J., Melero, J. J., Khokhlov, V., and Meyer, J. (2020). A robust wavelet-based hybrid method for the simultaneous measurement of harmonic and supraharmonic distortion. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(9):6704–6712.

- [Martínez and Pavas, 2015] Martínez, D. A. and Pavas, A. (2015). Current supraharmonics identification in commonly used low voltage devices. In *2015 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)*, pages 1–5. IEEE.
- [Meyer et al., 2013] Meyer, J., Haehle, S., and Schegner, P. (2013). Impact of higher frequency emission above 2khz on electronic mass-market equipment.
- [Meyer et al., 2016] Meyer, J., Mueller, S., Ungethuem, S., Xiao, X., Collin, A., and Djokic, S. (2016). Harmonic and supraharmonic emission of on-board electric vehicle chargers. In *2016 Ieee Pes Transmission & Distribution Conference and Exposition-Latin America (Pes T&D-La)*, pages 1–7. IEEE.
- [Misra, 2014] Misra, R. (2014). *Impact of plug-in electric vehicles and wind generators on Harmonic Distortion of electric distribution systems*. Michigan Technological University.
- [Mohos and Ladányi, 2018] Mohos, A. and Ladányi, J. (2018). Emission measurement of a solar park in the frequency range of 2 to 150 khz. In *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, pages 1024–1028. IEEE.
- [Moreno-Munoz et al., 2015] Moreno-Munoz, A., Gil-de Castro, A., Romero-Cavadal, E., Rönnberg, S., and Bollen, M. (2015). Supraharmonics (2 to 150 khz) and multi-level converters. In *2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, pages 37–41. IEEE.
- [Navarrete Mejía et al., 2013] Navarrete Mejía, M. G. et al. (2013). Estudio y análisis de la teoria wavelet enfocado al tratamiento de señales unidimensionales.
- [Novitskiy et al., 2018] Novitskiy, A., Schlegel, S., and Westermann, D. (2018). Analysis of supraharmonic propagation in a mv electrical network. In *2018 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, pages 1–6. IEEE.
- [Novitskiy et al., 2019] Novitskiy, A., Schlegel, S., and Westermann, D. (2019). Measurements and analysis of supraharmonic influences in a mv/lv network containing renewable energy sources. In *2019 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ) & 2019 Symposium on Electrical Engineering and Mechatronics (SEEM)*, pages 1–6. IEEE.
- [Pai et al., 2014] Pai, K.-J., Chien, M.-D., Hsieh, C.-C., Cheng, M.-Y., Liang, C.-K., Lo, Y.-K., Liu, Y.-C., and Tseng, P.-J. (2014). Implementation and design of high-power fast charger for lithium-ion battery pack. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 42(11):1154–1171.

- [Palmieri, 2019] Palmieri, F. (2019). A distributed flow correlation attack to anonymizing overlay networks based on wavelet multi-resolution analysis. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 18(5):2271–2284.
- [Putranto et al., 2019] Putranto, P., Desvasari, W., Daud, P., Wijayanto, Y. N., Mahmudin, D., Kurniadi, D. P., Rahman, A. N., Hardiati, S., Setiawan, A., Darwis, F., et al. (2019). Performance comparison of blackman, bartlett, hanning, and kaiser window for radar digital signal processing. In *2019 4th International Conference on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE)*, pages 391–394. IEEE.
- [Recinos, 2018] Recinos, J. A. (2018). Medición de supraarmónicos durante la puesta en marcha de una planta de generación solar de 5mva conectados a 13 kv en el salvador. El Salvador.
- [Rodrigues and de Lima Tostes, 2018] Rodrigues, C. E. M. and de Lima Tostes, M. E. (2018). Characterization of supraharmónicos using the wavelet packet transform. In *2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, pages 1–6. IEEE.
- [Rönnberg, 2013] Rönnberg, S. (2013). *Emission and interaction from domestic installations in the low voltage electricity network, up to 150 kHz*. PhD thesis, Luleå tekniska universitet.
- [Rönnberg and Bollen, 2017] Rönnberg, S. and Bollen, M. (2017). Propagation of supraharmónicos in the low voltage grid. *Energiforsk AB: Stockholm, Sweden*, page 461.
- [Rönnberg et al., 2014] Rönnberg, S., Bollen, M., and Gil-de Castro, A. (2014). Harmonic distortion from energy-efficient equipment and production in the low-voltage network.
- [Rönnberg et al., 2018] Rönnberg, S., Gil-De-Castro, A., and Medina-Gracia, R. (2018). Supraharmónicos in european and north american low-voltage networks. In *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*, pages 1–6. IEEE.
- [Rönnberg and Bollen, 2012] Rönnberg, S. K. and Bollen, M. H. (2012). Emission from four types of led lamps at frequencies up to 150 khz. In *2012 IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, pages 451–456. IEEE.
- [Rönnberg et al., 2017a] Rönnberg, S. K., Bollen, M. H., Amaris, H., Chang, G. W., Gu, I. Y., Kocewiak, Ł. H., Meyer, J., Olofsson, M., Ribeiro, P. F., and Desmet, J. (2017a). On waveform distortion in the frequency range of 2 khz–150 khz—review and research challenges. *Electric Power Systems Research*, 150:1–10.

- [Rönnberg et al., 2017b] Rönnberg, S. K., Bollen, M. H., Amaris, H., Chang, G. W., Gu, I. Y., Kocewiak, L. H., Meyer, J., Olofsson, M., Ribeiro, P. F., and Desmet, J. (2017b). On waveform distortion in the frequency range of 2 khz–150 khz—review and research challenges. *Electric Power Systems Research*, 150:1–10.
- [Sakar et al., 2019] Sakar, S., Rönnberg, S., and Bollen, M. (2019). Interferences in ac–dc led drivers exposed to voltage disturbances in the frequency range 2–150 khz. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(11):11171–11181.
- [Salles et al., 2012] Salles, D., Jiang, C., Xu, W., Freitas, W., and Mazin, H. E. (2012). Assessing the collective harmonic impact of modern residential loads—part i: Methodology. *IEEE transactions on power delivery*, 27(4):1937–1946.
- [Sandrolini and Mariscotti, 2020] Sandrolini, L. and Mariscotti, A. (2020). Signal transformations for analysis of supraharmmonic emi caused by switched-mode power supplies. *Electronics*, 9(12):2088.
- [Singh et al., 2017] Singh, G., Collins, E. R., Rönnberg, S. K., Larsson, E. A., and Bollen, M. H. (2017). Impact of high frequency conducted voltage disturbances on led driver circuits. In *2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pages 1–5. IEEE.
- [Singh et al., 2021] Singh, G., Sharp, F., and Teh, W. Y. (2021). Effects of supraharmionics immunity testing on led lighting. In *2021 IEEE Madrid PowerTech*, pages 1–6. IEEE.
- [Slangen et al., 2020a] Slangen, T., van Wijk, T., Čuk, V., and Cobben, J. (2020a). The harmonic and supraharmmonic emission of battery electric vehicles in the netherlands. In *2020 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, pages 1–6. IEEE.
- [Slangen et al., 2020b] Slangen, T., van Wijk, T., Čuk, V., and Cobben, S. (2020b). The propagation and interaction of supraharmionics from electric vehicle chargers in a low-voltage grid. *Energies*, 13(15):3865.
- [std 1547-2018, 2018] std 1547-2018, I. (2018). *IEEE Standard For Interconnection And Interoperability of Distributed Energy Resources With Associated Electric Power Systems Interfaces*.
- [Strack et al., 2014] Strack, J. L., Juan Antonio, S., Di Mauro, G. F., and Jacob, S. B. (2014). Impacto de la iluminación residencial eficiente en la calidad de la energía de una red de distribución.

- [Streubel et al., 2019] Streubel, T., Kattmann, C., Eisenmann, A., and Rudion, K. (2019). Detection and monitoring of supraharmonic anomalies of an electric vehicle charging station. In *2019 IEEE Milan PowerTech*, pages 1–5. IEEE.
- [Sun et al., 2019] Sun, K., Yao, W., Fang, J., Ai, X., Wen, J., and Cheng, S. (2019). Impedance modeling and stability analysis of grid-connected dfig-based wind farm with a vsc-hvdc. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 8(2):1375–1390.
- [Tapia and García, 2013] Tapia, A. and García, N. (2013). Time-domain analysis of custom power parks based on the poincaré map method. *Electric power systems research*, 105:20–32.
- [Yang et al., 2018] Yang, X., Hu, H., Ge, Y., Aatif, S., He, Z., and Gao, S. (2018). An improved droop control strategy for vsc-based mvdc traction power supply system. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(5):5173–5186.
- [Zhang et al., 2010] Zhang, L., Harnefors, L., and Nee, H.-P. (2010). Interconnection of two very weak ac systems by vsc-hvdc links using power-synchronization control. *IEEE transactions on power systems*, 26(1):344–355.
- [Zolett and Leborgne, 2020] Zolett, B. and Leborgne, R. C. (2020). Propagation of supraharmonics generated by pmsg wind power plants into transmission systems. In *2020 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition-Latin America (T&D LA)*, pages 1–6. IEEE.