

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Facultad de Ingeniería Eléctrica



División de Estudios de Posgrado

**ANÁLISIS WAVELET MULTI-RESOLUCIÓN DEL FENÓMENO
SUPRA-ARMÓNICO EN UNA ESTACIÓN DE RECARGA DE VEHÍCULOS
ELÉCTRICOS**

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

Presenta:

Ing. Daniel Alejandro Ornelas González

Asesor:

Dr. Norberto García Barriga

A mis abuelos Margarita Romero y Alejandro Díaz, a mi madre Elizabeth González. A mi esposa Vanessa Berumen quien ha estado conmigo apoyándome y ayudándome para cumplir todas mis metas, y para mi hijo Fernando Ornelas, quien es mi inspiración para seguir día a día. Quien me motiva a seguir adelante y por quien a pesar de las dificultades, tuve la motivación de culminar este documento.

Agradecimientos

Gracias a mis padres por haberme dado la vida, por permitirme vivir dignamente y por apoyarme en cada decisión que he tomado.

Gracias a mis abuelos por haberme educado, por hacerme una persona de bien, enseñarme el sentido de responsabilidad y que trabajando se puede lograr todo lo que uno se proponga, sin ellos no sería la persona que hoy en día soy, gracias infinitas.

Agradezco infinitamente a mi esposa, por haber estado a mi lado en las buenas y en las malas desde que la he conocido, por brindarme su apoyo incondicional y por siempre impulsarme a ser una mejor persona y dar la mejor versión de mi, sin ella a mi lado muchos de mis logros no hubieran sucedido y no habría podido levantarme de muchos de mis fracasos, siempre estaré agradecido con ella y con su familia por brindarme desinteresadamente lo mejor de ellos.

Esta tesis es completamente dedicada a mi hijo Fernando Ornelas Berumen. Cuando supe que llegarías a mi vida algo dentro de mí cambió, fui y he sido la persona más feliz del mundo y desde ese momento supe que tenía que hacer todo lo posible por darte la mejor vida. Ha sido un camino difícil y se han presentado muchos obstáculos pero sé que por ti siempre encontraré la manera de que salgamos adelante. Te amo infinitamente hijo y espero que estés orgulloso de mí.

A mis amigos que han estado en las buenas y en las malas, ofreciéndome un consejo, una mano cálida en que confiar y su apoyo en todo momento.

Un agradecimiento especial al Dr. Norberto García Barriga por apoyarme y ayudarme en la realización de este proyecto, por su paciencia y por ser un gran profesor del cual aprendí muchas cosas.

Por último, muchas gracias al CONACYT por el apoyo que me brindó para poder continuar con mi sueño de realizar un posgrado en una gran universidad y a la UMSNH por darme la oportunidad de estudiar en sus instalaciones, por contar con una excelente planta de profesores que apoyan e impulsan a los alumnos a seguir creciendo y forman profesionistas de calidad, por eso y por mucho más gracias.

Resumen

En la actualidad, los sistemas eléctricos están sufriendo una serie de cambios y transiciones hacia un entorno más moderno, por lo que deben adaptarse a las nuevas necesidades que surgen día a día. La implementación de infraestructuras de carga para vehículos eléctricos de batería, cada vez más en auge, es beneficiosa para el planeta, pero su acoplamiento al sistema eléctrico implica introducir perturbaciones en la forma de onda de tensión y corriente debido a la aplicación de controladores de electrónica de potencia.

La electrónica de potencia se encarga del diseño de instrumentación y técnicas que permitan los acoplamientos necesarios para la carga/descarga de vehículos eléctricos. De hecho, los dispositivos necesarios para llevar a cabo esta tarea operan con un patrón de conmutación que contamina las señales de voltaje y corriente en la red eléctrica. Se han estudiado y clasificado las componentes armónicas de frecuencia que son generadas por los controladores de electrónica de potencia antes mencionados, así como se han propuesto estándares y técnicas para su mitigación. En los últimos años se ha introducido el término supra-armónicos para los componentes de frecuencia que se encuentran en rangos de frecuencia de hasta 180 kHz, de magnitudes pequeñas pero pueden causar problemas de calidad de energía. Los supra-armónicos son típicamente un fenómeno variante en el tiempo. Por lo tanto, la eficacia del análisis en estado estable para determinar el impacto en las redes de distribución de energía es limitada. Aunque el análisis de Fourier es el enfoque preferido y ampliamente utilizado para realizar análisis de magnitudes eléctricas, esta valiosa herramienta puede proporcionar resultados deficientes para señales con características no estacionarias o que presentan transitorios significativos. Como consecuencia, el estudio de los supraarmónicos requiere una representación de la señal tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia, de forma tal que permita el acceso eficiente a información localizada en la señal.

El objetivo de esta tesis es estudiar la presencia de distorsión supra-armónica en estaciones de recarga conectadas a la red eléctrica para vehículos eléctricos y contribuir a la caracterización tiempo-frecuencia de los supra-armónicos. Se desarrolló una plataforma de medición adecuada para supra-armónicos, donde se recopilan datos de redes de distribución de bajo voltaje utilizando una tarjeta de adquisición de datos y un procedimiento de muestreo en el dominio del tiempo. Además, se aplica un análisis de multi-resolución basado en la transformada wavelet discreta de máxima superposición y la wavelet de Daubechies a mediciones con resolución de 0.1 usec. El voltaje de suministro y la corriente demandada en la infraestructura de carga se descomponen en bandas de frecuencia distintas para investigar la dependencia de la escala de tiempo y su correlación. Los experimentos realizados en este trabajo indican que la estación de carga emite principalmente contenido de frecuencia armónica en el intervalo de frecuencia de 0 a 2.4 kHz, mientras que también se identificó contenido supraarmónico en el rango de frecuencia de 2.4 kHz a 20 kHz. Un experimento con dos vehículos eléctricos cargándose simultáneamente indica que los componentes supra-armónicos más importantes se observan a una frecuencia de 19.53 kHz con una magnitud de 1.20 V y 1.74 A para la tensión de alimentación y la corriente demandada, respectivamente.

Supra-armónicos, wavelet, señal, vehículo eléctrico, estación de recarga

Abstract

Currently, the electrical systems are undergoing a series of changes and transitions towards a more modern environment, therefore, they must adapt to the new needs that arise day by day. The implementation of charging infrastructure for battery electric vehicles, which are increasingly booming, is beneficial for the planet, but their coupling to the electrical system implies introducing disturbances to the voltage and current waveform due to the application of power electronics controllers.

Power electronics is responsible for the design of instrumentation and techniques that allow the necessary couplings for charging/discharging electric vehicles. In fact, the devices needed to carry out this task operate with a switching pattern that contaminate the voltage and current signals in the electrical network. The harmonic frequency components that are generated by the aforementioned power electronics controllers have been studied and classified, as well as standards and techniques have been proposed for their mitigation. In recent years the term Supra-harmonics has been introduced for frequency components found in frequency ranges up to 180kHz, which are of small magnitudes but that can cause power quality problems

Supra-harmonics is typically a time-varying phenomenon. Therefore, the efficacy of steady-state analysis to determine the impact on distribution power networks is limited. Although the Fourier analysis is the preferred and widely used approach to carry out analysis of electrical quantities, this valuable tool may provide poor results for signals with nonstationary characteristics or featuring significant transients. A fundamental limitation of the Fourier transform is that all properties of a signal are global in scope. As a consequence, the study of supra-harmonics requires a representation of the signal in both time and frequency domain, thereby allowing efficient access of localized information about the signal.

The purpose of this thesis is to study the presence of supra-harmonic distortion in distribution networks caused by electric vehicle charging stations and contribute to the time-frequency characterization of supra-harmonics. A measurement platform suitable for supra-harmonics is developed, where data is collected from low-voltage distribution networks using a data acquisition board and a time-domain sampling procedure. Further, multi-resolution analysis based on the maximum overlap discrete wavelet transform and the Daubechies wavelet is applied to resolution measurements. Supply voltage and demanded current in the charging infrastructure are decomposed into distinct frequency bands in order to investigate the time scale dependency and their correlation. The experiments carried-out in this work indicate that the charging station emit mostly harmonic frequency content in the frequency interval 0-2.4 kHz, while supra-harmonic content was also identified in the frequency range 2.4 kHz-20 kHz. An experiment with two electric vehicles charging simultaneously indicate that the most important supra-harmonic components are observed at a frequency of 19.53 kHz with a magnitude of 1.20 V and 1.74 A for supply voltage and demanded current, respectively.

Supraharmonics, wavelet, signal, electric car, charge station

Contenido

Dedicatoria	II
Agradecimientos	IV
Resumen	VI
Abstract	VIII
Lista de Acrónimos	1
Lista de Tablas	2
Lista de Figuras	3
Lista de Símbolos	6
1. Introducción	7
1.1. Descripción del problema	7
1.2. Estado del arte	9
1.2.1. Supra-armónicos en vehículos eléctricos	9
1.2.2. Métodos para procesamiento de supra-armónicos	10
1.3. Objetivos	11
1.4. Metodología	12
1.5. Justificación	12
1.6. Descripción por capítulos	13
2. Fenómeno Supra-armónico	14
2.1. Infraestructura de recarga	14
2.2. Vehículo eléctrico	15
2.2.1. Estación de recarga	15
2.2.2. Cargador nivel 2	16
2.3. Impactos de los vehículos eléctricos	16
2.4. Estándares internacionales	17
2.5. Sumario	18
3. Sistema de adquisición de datos	19
3.1. Plataforma de medición	19
3.1.1. Acondicionamiento de señales	21
3.1.2. Hardware de adquisición de datos	23
3.1.3. Programa de adquisición de datos	24
3.2. Validación	27
3.2.1. Experimento de validación	27
3.3. Conclusiones	32
4. Herramientas matemáticas para el procesamiento de señales	34
4.1. Factor de distorsión	34
4.2. Transformada de Fourier	35
4.3. Transformada Wavelet discreta	36
4.4. Análisis Wavelet Multi-resolución	36
4.4.1. Energía y varianza	39
4.5. Sumario	39

5. Casos de estudio	40
5.1. Caso base	40
5.1.1. Procesamiento con Transformada de Fourier	41
5.1.2. Procesamiento con Análisis Wavelet Multi-resolución	43
5.2. Caso 1: Recarga de un vehículo eléctrico	49
5.2.1. Procesamiento con Transformada de Fourier	50
5.2.2. Procesamiento Con Análisis Wavelet multi-resolución	53
5.3. Caso 2: Dos vehículos eléctricos	59
5.3.1. Procesamiento con Transformada de Fourier	69
5.3.2. Procesamiento con Análisis Wavelet multi-resolución	74
5.4. Discusión	85
5.5. Conclusiones	87
6. Conclusiones	89
6.1. Conclusiones generales	89
6.2. Trabajos futuros	90
Apéndices	91
A. Cálculo de resistencia R_1 y R_M para el sensor de voltaje	91
B. Cálculo de resistencia R_1 y R_M para el sensor de corriente	92
C. Datos de la medición dos del Caso 2	93
C.1. Procesamiento Con Transformada rápida de Fourier	93
C.2. Procesamiento Con Análisis Wavelet multi-resolución	97
D. Datos de la medición tres del Caso 2	106
D.1. Procesamiento Transformada rápida de Fourier	106
D.2. Procesamiento Análisis Wavelet multi-resolución	110
Referencias	119

Lista de Acrónimos

f.p :	Factor de potencia
Ve :	Vehículo eléctrico
THD:	Distorsión armónica total
C.A. :	Corriente alterna
C.D. :	Corriente directa
Hz :	hertz
kHz :	kilo Hertz
Mhz :	Mega Hertz
WMRA :	Análisis multi-resolución Wavelet
FFT :	Transformada rápida de Fourier
SA	Supra-armónicos
STFT :	Transformada de Fourier de tiempo corto
IEEE :	Institute of Electrical and Electronics Engineers
FD:	Factor de Distorsión
MATLAB :	laboratorio de Matrices

Lista de Tablas

3.1. <i>Requerimientos del sistema de medición de frecuencias supra-armónicas.</i>	20
3.2. <i>Características del dispositivo Analog Discovery Pro</i>	24
3.3. <i>Resultados obtenidos para experimento de validación 1</i>	28
5.1. <i>Voltaje RMS y porcentaje de distorsión en las formas de Voltaje de A-B, B-C, y C-A</i>	41
5.2. <i>Componentes de frecuencia detectadas en los voltajes de línea-línea de la red eléctrica.</i>	42
5.3. <i>Número de banda y valor de frecuencia para el análisis multi-resolución Wavelet</i>	43
5.4. <i>Energía y varianza por banda para el voltaje de A-B, B-C y C-A</i>	45
5.5. <i>Componentes de frecuencia detectadas en los voltajes de línea-línea y la corriente del cargador.</i>	52
5.6. <i>Parámetros de calidad de la energía del cargador 1.</i>	53
5.7. <i>Porcentaje de distorsión armónica y supra-armónica total para voltaje y corriente en el cargador 1.</i>	53
5.8. <i>Valores de energía y varianza para la señal de voltaje de C-A.</i>	54
5.9. <i>Valores de energía y varianza para la señal de corriente en la fase C</i>	55
5.10. <i>Valores RMS y distorsión en el cargador 1 durante el proceso de recarga.</i>	65
5.11. <i>Valores RMS y distorsión en el cargador 2 durante el proceso de recarga.</i>	65
5.12. <i>Frecuencias de mayor magnitud detectados en los voltaje de A-B, B-C y C-A</i>	71
5.13. <i>Frecuencias de mayor magnitud detectados en las corrientes de las fases C, B y A</i>	73
5.14. <i>Energía y varianza por banda para los voltajes A-B, B-C y C-A.</i>	74
5.15. <i>Energía y varianza por banda para las corrientes en la fases A, B y C.</i>	78
C.1. <i>Armónicos de mayor magnitud detectados en las tres señales de voltaje entre fases en la medición 2</i>	93
C.2. <i>Armónicos de mayor magnitud detectados en las señales de corriente en la medición 2</i>	95
C.3. <i>Correlación entre las señales de voltaje en la segunda medición del caso 2</i>	97
C.4. <i>Energía y varianza por banda en las señales de voltaje entre fases A-B, B-C y C-A en la segunda medición del caso 2</i>	98
C.5. <i>Correlación entre las señales de corriente en las fases A, B y C en la segunda medición del caso 2</i>	102
C.6. <i>Energía y varianza por banda en las señales de corriente en las fases A, B y C en la segunda medición del caso 2</i>	102
D.1. <i>Armónicos de mayor magnitud detectados en las señales de voltaje en la tercera medición del caso 2</i>	106
D.2. <i>Armónicos de mayor magnitud detectados en las señales de corriente en la tercera medición del caso 2</i>	108
D.3. <i>Correlación entre las señales de voltaje en la tercera medición del caso 2</i>	110
D.4. <i>Energía y varianza por banda en las señales de voltaje entre fases A-B, B-C y C-A en la tercera medición del caso 2</i>	111
D.5. <i>Correlación entre las señales de corriente en la tercera medición del caso 2</i>	115
D.6. <i>Energía y varianza por banda en las señales de corriente en las fases A, B y C en la tercera medición del caso 2</i>	115

Lista de Figuras

1.1. Forma de onda en el tiempo de la corriente demandada durante la recarga de un vehículo eléctrico de baterías	8
1.2. Escalograma de la forma de onda en el tiempo de la corriente demandada durante la recarga de un vehículo eléctrico de baterías	9
2.1. Tecnología de recarga para un vehículo eléctrico	14
2.2. Estación de recarga nivel 2 y vehículo eléctrico	15
2.3. Cargador a bordo del vehículo eléctrico	16
2.4. Diagrama de flujo del estándar IEC 61000-4-7: procedimiento para medir supra-armónicos	17
3.1. Esquema del sistema de medición	20
3.2. Esquema del sistema de medición.	21
3.3. Sensor de voltaje LV-25P	22
3.4. Sensor de corriente LA-100P	22
3.5. Ubicación de los sensores de medición en el interior del tablero de medición de la estación de recarga: a).-tarjeta de sensores de voltaje, b).-tarjeta de sensores de corriente y c).-caja de protección de las tarjetas de medición.	23
3.6. Dispositivo Analog Discovery Pro	24
3.7. Alternativas de uso del dispositivo Analog Discovery Pro.	25
3.8. Diagrama de flujo sobre el programa desarrollado en Python para muestreo	26
3.9. Experimento de validación	27
3.10. Señal de 60 Hz: a).- forma de onda en el tiempo y b).- espectro armónico	29
3.11. Señal de 6 kHz: a).- forma de onda en el tiempo y b).- espectro armónico.	30
3.12. Señal de 120 kHz: a).- forma de onda en el tiempo y b).- espectro armónico.	31
3.13. Resultados obtenidos con el osciloscopio para la señal de entrada de: a).- 60 Hz, b).- 6kHz y c).- 120 kHz	32
4.1. Tipos de wavelets más empleadas. a).- Morlet 1, b).- Sombrero mexicano, c) Daubechies	37
4.2. Diagrama del algoritmo de Mallat aplicado en Wavelet multi-resolución	38
5.1. Forma de onda en el tiempo de los voltajes entre fases de la red eléctrica.	41
5.2. Espectro de frecuencia del voltaje A-B en el rango: a).- 0-2.4kHz, b).- 2.4kHz-12kHz, c).- 12kHz-48kHz, d).- 48kHz-96kHz y e).- 96kHz-180kHz.	42
5.3. Análisis Wavelet multi-resolución del voltaje A-B.	46
5.4. Análisis Wavelet multi-resolución del voltaje B-C.	47
5.5. Análisis Wavelet multi-resolución del voltaje C-A.	48
5.6. Formas de onda en el tiempo de las señales de corriente y voltaje correspondientes al cargador 1	49
5.7. Diagrama de fase de voltaje-corriente para el cargador nivel 2.	50
5.8. Formas de onda en el tiempo de las corrientes en las fases A, B y C.	50
5.9. Espectro de frecuencia del voltaje en el rango: a).- 0-2.4kHz, b).- 2.4kHz-12kHz, c).- 12kHz-48kHz, d).- 48kHz-96kHz y e).- 96kHz-180kHz.	51
5.10. Espectro de frecuencia de la corriente en el rango: a).- 0-2.4kHz, b).- 2.4kHz-12kHz, c).- 12kHz-48kHz, d).- 48kHz-96kHz y e).- 96kHz-180kHz	52
5.11. Análisis Wavelet multi-resolución del voltaje C-A.	56

5.12. Análisis Wavelet multi-resolución de la corriente en la fase C.	57
5.13. Escalograma de la banda B11 de la señal de voltaje de C-A	58
5.14. Escalograma de la banda B11 de la señal de corriente de la fase C	58
5.15. Formas de onda de las corrientes trifásicas demandadas por la estación de recarga con dos vehículos eléctricos.	59
5.16. Formas de onda de los voltajes de la red eléctrica de distribución.	60
5.17. Diagramas de fase V-I para: a).- cargador 1 y b).- cargador 2.	60
5.18. Evolución de las corrientes durante el proceso de recarga de dos vehículos eléctricos: a).- medición 1, b).- medición 2 y c).- Medición 3.	61
5.19. Evolución de los voltajes durante el proceso de recarga de dos vehículos eléctricos: a).- medición 1, b).- medición 2 y c).- medición 3.	62
5.20. Variación en las potencias durante el proceso de recarga en el cargador 1.	64
5.21. Variación en las potencias durante el proceso de recarga en el cargador 2.	64
5.22. Variación del factor de potencia en los cargadores 1 y 2.	65
5.23. Evolución de las formas de onda de Voltaje C-A y corriente fase C para el cargador 1 durante el proceso de recarga: a).- medición 1, b).- medición 2 y c).- medición 3.	67
5.24. Evolución de las formas de onda de Voltaje A-B y corriente fase B para el cargador 2 durante el proceso de recarga: a).- medición 1, b).- medición 2 y c).- medición 3.	68
5.25. Espectro de frecuencias del voltaje A-B en el rango: a).- 0-2.4kHz, b).- 2.4kHz-12kHz, c).- 12kHz-48kHz, d).- 48kHz-96kHz y e).- 96kHz-180kHz.	69
5.26. Espectro de frecuencias del voltaje B-C en el rango: a).- 0-2.4kHz, b).- 2.4kHz-12kHz, c).- 12kHz-48kHz, d).- 48kHz-96kHz y e).- 96kHz-180kHz.	70
5.27. Espectro de frecuencias del voltaje C-A en el rango: a).- 0-2.4kHz, b).- 2.4kHz-12kHz, c).- 12kHz-48kHz, d).- 48kHz-96kHz y e).- 96kHz-180kHz.	70
5.28. Espectro de frecuencias de la corriente fase C, cargador 1 en el rango: a).- 0-2.4kHz, b).- 2.4kHz-12kHz, c).- 12kHz-48kHz, d).- 48kHz-96kHz y e).- 96kHz-180kHz.	72
5.29. Espectro de frecuencias de la corriente fase B, cargador 2 en el rango: a).- 0-2.4kHz, b).- 2.4kHz-12kHz, c).- 12kHz-48kHz, d).- 48kHz-96kHz y e).- 96kHz-180kHz.	72
5.30. Espectro de frecuencias de la corriente fase A, suma del cargador 1 y 2 en el rango: a).- 0-2.4kHz, b).- 2.4kHz-12kHz, c).- 12kHz-48kHz, d).- 48kHz-96kHz y e).- 96kHz-180kHz.	73
5.31. Análisis Wavelet multi-resolución del voltaje A-B.	75
5.32. Análisis Wavelet multi-resolución del voltaje B-C.	76
5.33. Análisis Wavelet multi-resolución del voltaje C-A.	77
5.34. Análisis Wavelet multi-resolución de la corriente en la fase A.	79
5.35. Análisis Wavelet multi-resolución de la corriente en la fase B.	80
5.36. Análisis Wavelet multi-resolución de la corriente en la fase C.	81
5.37. Escalograma de la señal de voltaje de A-B	82
5.38. Escalograma de la señal de Corriente en la fase A	83
5.39. Escalograma de la señal de voltaje de B-C	83
5.40. Escalograma de la señal de Corriente en la fase B	84
5.41. Escalograma de la señal de voltaje de C-A	84
5.42. Escalograma de la señal de Corriente en la fase C	85
C.1. Espectro armónico de la forma de onda de voltaje de A-B. Rango en Hz de a).- 0-2400, b).- 2400-12000, c).- 12000-48000, d).- 48000-96000 y e).- 96000-180000	94
C.2. Espectro armónico de la forma de onda de voltaje de B-C. Rango en Hz de a).- 0-2400, b).- 2400-12000, c).- 12000-48000, d).- 48000-96000 y e).- 96000-180000	94
C.3. Espectro armónico de la forma de onda de voltaje de C-A. Rango en Hz de a).- 0-2400, b).- 2400-12000, c).- 12000-48000, d).- 48000-96000 y e).- 96000-180000	95
C.4. Espectro armónico de la forma de onda de corriente en la fase A. Rango en Hz de a).- 0-2400, b).- 2400-12000, c).- 12000-48000, d).- 48000-96000 y e).- 96000-180000	96
C.5. Espectro armónico de la forma de onda de corriente en la fase B. Rango en Hz de a).- 0-2400, b).- 2400-12000, c).- 12000-48000, d).- 48000-96000 y e).- 96000-180000	96

C.6. Espectro armónico de la forma de onda de corriente en la fase C. Rango en Hz de a).- 0-2400, b).- 2400-12000, c).- 12000-48000, d).- 48000-96000 y e).- 96000-180000	97
C.7. Primer captura. Descomposición en tiempo-frecuencia de la señal de voltaje de A-B utilizando el análisis multi-resolución Wavelet	99
C.8. Primer captura. Descomposición en tiempo-frecuencia de la señal de voltaje de B-C utilizando el análisis multi-resolución Wavelet	100
C.9. Primer captura. Descomposición en tiempo-frecuencia de la señal de voltaje de C-A utilizando el análisis multi-resolución Wavelet	101
C.10. Primer captura. Descomposición en tiempo-frecuencia de la señal de corriente en la fase A utilizando el análisis multi-resolución Wavelet	103
C.11. Primer captura. Descomposición en tiempo-frecuencia de la señal de corriente en la fase B utilizando el análisis multi-resolución Wavelet	104
C.12. Primer captura. Descomposición en tiempo-frecuencia de la señal de corriente en la fase C utilizando el análisis multi-resolución Wavelet	105
D.1. Espectro armónico de la forma de onda de voltaje de A-B. Rango en Hz de a).- 0-2400, b).- 2400-12000, c).- 12000-48000, d).- 48000-96000 y e).- 96000-180000	107
D.2. Espectro armónico de la forma de onda de voltaje de B-C. Rango en Hz de a).- 0-2400, b).- 2400-12000, c).- 12000-48000, d).- 48000-96000 y e).- 96000-180000	107
D.3. Espectro armónico de la forma de onda de voltaje de C-A. Rango en Hz de a).- 0-2400, b).- 2400-12000, c).- 12000-48000, d).- 48000-96000 y e).- 96000-180000	108
D.4. Espectro armónico de la forma de onda de corriente en la fase A. Rango en Hz de a).- 0-2400, b).- 2400-12000, c).- 12000-48000, d).- 48000-96000 y e).- 96000-180000	109
D.5. Espectro armónico de la forma de onda de corriente en la fase B. Rango en Hz de a).- 0-2400, b).- 2400-12000, c).- 12000-48000, d).- 48000-96000 y e).- 96000-180000	109
D.6. Espectro armónico de la forma de onda de corriente en la fase C. Rango en Hz de a).- 0-2400, b).- 2400-12000, c).- 12000-48000, d).- 48000-96000 y e).- 96000-180000	110
D.7. Primer captura. Descomposición en tiempo-frecuencia de la señal de voltaje de A-B utilizando el análisis multi-resolución Wavelet	112
D.8. Primer captura. Descomposición en tiempo-frecuencia de la señal de voltaje de B-C utilizando el análisis multi-resolución Wavelet	113
D.9. Primer captura. Descomposición en tiempo-frecuencia de la señal de voltaje de C-A utilizando el análisis multi-resolución Wavelet	114
D.10. Primer captura. Descomposición en tiempo-frecuencia de la señal de corriente en la fase A utilizando el análisis multi-resolución Wavelet	116
D.11. Primer captura. Descomposición en tiempo-frecuencia de la señal de corriente en la fase B utilizando el análisis multi-resolución Wavelet	117
D.12. Primer captura. Descomposición en tiempo-frecuencia de la señal de corriente en la fase C utilizando el análisis multi-resolución Wavelet	118

Lista de Símbolos

I	Corriente Eléctrica
V	Voltaje
A	Ampere
W	Watt
P	Potencia Aparente
S	Potencia Aparente
Q	Potencia Reactiva
PD	Potencia de distorsión
VA	Volt Ampere
VAR	Volt Ampere Reactivo
VAD	Volt Ampere de Distorsión
f	Frecuencia
F_s	Frecuencia de Muestreo
db	Decibel
I_p	Corriente en el devanado primario
I_s	Corriente en el devanado secundario
R_M	Resistencia de medición

Capítulo 1

Introducción

1.1. Descripción del problema

El sistema eléctrico moderno se encuentra actualmente en un proceso de transición cuyo objetivo es alcanzar un funcionamiento más eficiente y sostenible. 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 [1]. 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 supra-armónicas en el rango de 2.4kHz a 180 kHz [2] [3] [6].

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 inyectan en las redes eléctricas durante la operación del convertidor. Por ejemplo, la Figura 1.1 describe la corriente demandada durante la recarga de un vehículo eléctrico conectado a la red de distribución en bajo voltaje. Se puede apreciar que el voltaje presenta una forma de onda en el tiempo con una componente fundamental de 60 Hz pero con oscilaciones de alta frecuencia. Además, se observa que las oscilaciones de alta frecuencia son variantes en el tiempo.

En los últimos años, se ha prestado especial atención a las emisiones de frecuencias de 150 kHz y menores, las cuales han sido etiquetados como supra-armónicos. Los supra-armónicos pueden ser responsables del mal funcionamiento y la pérdida de eficiencia en equipos en los sistemas eléctricos de potencia. En este sentido, la proliferación de infraestructura de recarga de vehículos eléctricos en las redes eléctricas podría aumentar la presencia de frecuencias supra-armónicas en la red eléctrica. Mientras que corrientes armónicas se propagan a la red, las corrientes supra-armónicas tienden a permanecer dentro de la instalación y en gran medida se propagan hacia los equipos cercanos debido a la baja impedancia que presenta los equipos electro-domésticos [4]

Por otra parte, los supra-armónicos son típicamente variantes en el tiempo y, por lo tanto, la eficacia de los métodos de análisis estacionarios para la evaluación de su impacto en las redes eléctricas de potencia es muy limitada. La aplicación de la transformada rápida de Fourier puede no conducir a los mejores resultados, especialmente en el caso de señales transitorias. Las emisiones SA no poseen necesariamente la propiedad de estacionariedad y, por lo tanto, se requiere de adoptar ventanas de tiempo cortas, las cuales reducen la precisión en frecuencia [5]. Como consecuencia, se deben considerar métodos alternativos más adecuados para el estudio de señales caracterizadas por fenómenos de alta frecuencia transitorios.

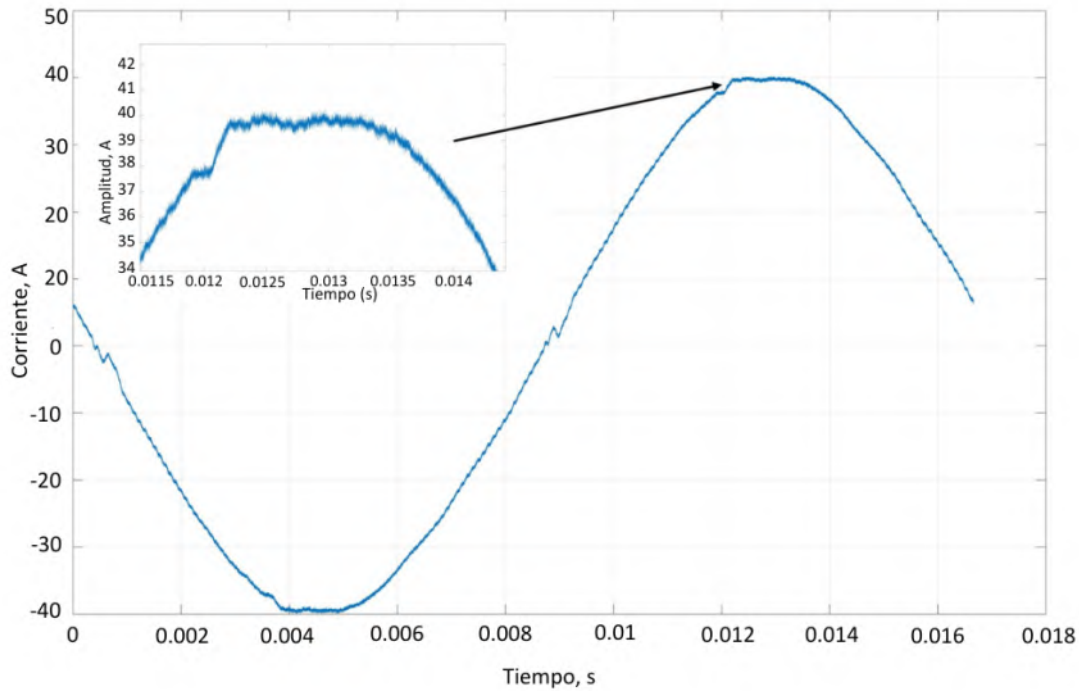


Figura 1.1: *Forma de onda en el tiempo de la corriente demandada durante la recarga de un vehículo eléctrico de baterías*

En la figura 1.2 el escalograma obtenido mediante el análisis multiresolución wavelet revela la presencia de componentes de frecuencia entre 10 y 13 Hz concentradas en los instantes correspondientes a los picos de la señal de corriente. Estas componentes de alta energía indican una distorsión localizada, probablemente originada por la conmutación de dispositivos electrónicos o por la respuesta no lineal de la carga. En el resto del periodo, la señal mantiene una baja densidad espectral, confirmando su carácter predominantemente senoidal.

No obstante, en este resultado no se observan los componentes supraharmónicos, debido a que el escalograma se aplicó directamente sobre la señal de corriente sin realizar previamente el análisis multiresolución wavelet (WMRA). Esta limitación impide separar adecuadamente las diferentes bandas de frecuencia y resaltar las componentes de alta frecuencia asociadas a los procesos de conmutación del inversor. La aplicación del WMRA permitiría descomponer la señal en distintos niveles de detalle, facilitando la identificación y localización temporal de los supraharmónicos presentes en la corriente.

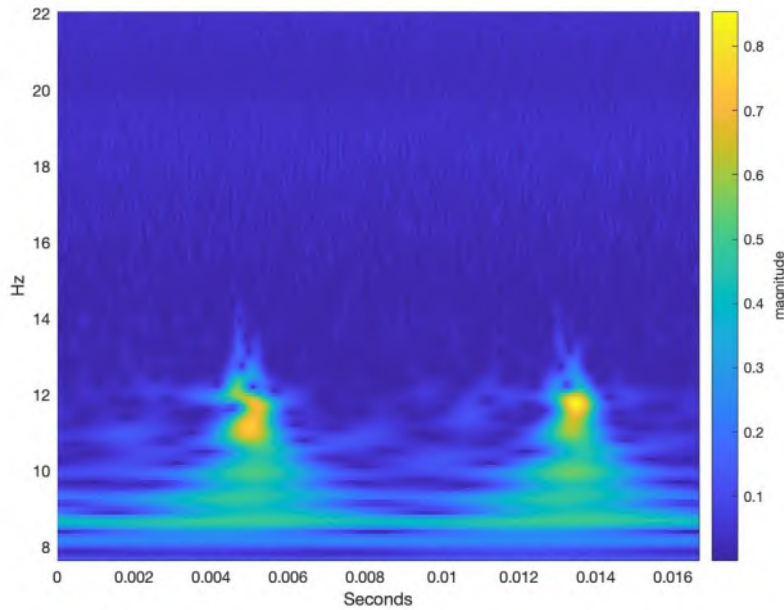


Figura 1.2: Escalograma de la forma de onda en el tiempo de la corriente demandada durante la recarga de un vehículo eléctrico de baterías

1.2. Estado del arte

1.2.1. Supra-armónicos en vehículos eléctricos

La presencia de emisiones electromagnéticas de alta frecuencia en las redes eléctricas de potencia no es un fenómeno nuevo. Desde hace varias décadas surgió el interés de 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 de Eagle Pass localizado en la frontera de México y Estados Unidos falló en su operación poco tiempo después de su puesta en funcionamiento debido a oscilaciones internas de alta frecuencia [7]. Se encontró que dichas frecuencias de alto orden en el voltaje se originaron como resultado de oscilaciones locales inesperadas. Investigaciones posteriores a esta falla revelaron la existencia de altos niveles de distorsión. Esta distorsión fue observada 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. [8].

El creciente incremento de dispositivos como cargadores de vehículos eléctricos y generadores fotovoltaicos 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 [9]. En una nueva investigación se realizó un análisis de 19 cargadores de vehículos eléctricos para determinar la distorsión de la corriente en el rango armónico y supra-armónico empleando como herramienta Matlab y un dispositivo para tomar muestras con una frecuencia de muestreo de 1 M muestras/ segundo. En dicho estudio se encontró una considerable emisión armónica en el tercer, quinto y séptimo armónico. Además, debido a que el diseño del circuito de cargadores incluye un controlador que opera a alta frecuencia para la corrección del factor de potencia (PF), se observa que la emisión supra-armónica es muy alta para la mayoría de los cargadores analizados. En particular, se determinó que hay un incremento en las frecuencias del rango supra-armónico en un rango de hasta 50 kHz producidas por los distintos tipos de cargadores y las diferentes frecuencias a las que operan. Una preocupación latente es como las componentes de frecuencia supra-armónicas pueden interactuar y afectar a otros equipos, por ejemplo equipos domésticos, por lo que se sugiere considerar

estas interacciones, la impedancia de la red eléctrica así como otras cargas conectadas a la red. [10]

Slinger et al. Emplearon un instrumento de adquisición de datos de la marca DEWE 800 creado por la empresa Dewetron con una frecuencia de muestreo de 300k muestras/s y se procesaron las señales con Matlab. Se estudiaron las baterías de los vehículos eléctricos y se obtuvieron mediciones de corriente y voltaje. Con ese estudio se encontraron componentes de frecuencia de 10kHz, 20kHz, y 40kHz en las señales de corriente y voltaje, los cuales están en el espectro supra-armónico. [11]

Se ha abordado el tema de como los dispositivos UPS (Uninterruptable Power Supply) indispensables para la operación del data center generan supra-armónicos con los diferentes modos de operación del UPS. Un data center debe garantizar todo el tiempo el suministro de energía eléctrica, por lo que las UPS son de vital importancia. Los propietarios de los data center utilizan cada vez más energía limpia, por ejemplo, mediante el uso de energía solar en sus instalaciones, lo que lleva a la introducción de inversores adicionales que emplean técnicas de modulación por ancho de pulso (PWM) en el interior de las instalaciones. El uso de PWM ayuda a reducir la distorsión de frecuencia por debajo de los 2 kHz (rango armónico), pero en cambio, añade distorsión en la región de alta frecuencia (supra-armónico). La conmutación PWM se realiza generalmente en el rango de frecuencia de 2kHz a 150 kHz, lo que se denomina supra-armónicos. [13]

Se tomaron mediciones conectando un medidor PQube3 a ambos lados del transformador y la salida común de las salas de UPS. El PQube3 proporciona valores promedio y máximos con agrupaciones de 2 kHz cada minuto. Se utilizó un osciloscopio Yokogawa para registrar las señales, con una frecuencia de muestreo de 1 MS/seg. Las mediciones se realizaron para una ventana de 200 ms con una resolución de 5 Hz de acuerdo con IEC 61000-4-30.

Los resultados muestran que el impacto en la magnitud y propagación de los supra-armónicos difiere de muchos otros tipos de dispositivos. Cada modo de funcionamiento debe tratarse por separado, y se deben considerar tanto el lado de la red como el de la carga. Se observó en las mediciones que los supra-armónicos emitidos por las cargas conectadas al SAI no se propagan al lado de la red en modo en línea y fuera de línea. La propagación de los supra-armónicos varía significativamente según los modos operativos del UPS, como el modo de línea interactiva y el modo de doble conversión. Estos modos no solo afectan la distribución de las frecuencias de los supra-armónicos, sino también la calidad general de la energía en el data center y se enfatiza la necesidad de considerar factores como las cargas conectadas y las impedancias de entrada/salida para mitigar los efectos de los supra-armónicos.

Se ha reportado que el aumento de cargas no lineales y la integración de la energía renovable en las redes de distribución eléctrica generan emisiones supra-armónicas, lo cual provoca muchos problemas de interrupción en la red eléctrica moderna [14]. Mencionan que el mayor problema de los componentes de alta frecuencia en los sistemas de energía es la expansión del estrés térmico, que acorta la vida útil del equipo eléctrico. Además, clasifican las emisiones supra-armónicas como primarias y secundarias, es decir, las emisiones primarias son causadas por una fuente principal mientras que las emisiones secundarias son provocadas por fuentes secundarias que se integran a un sistema inicial.

1.2.2. Métodos para procesamiento de supra-armónicos

De acuerdo con un trabajo presentado por Noshahr que usa la STFT para analizar el efecto del aumento en el componente de capacitancia de las cargas de la red en la tasa de oscilación del rango supra-armónico (2-150 kHz), lo cual significa que la presencia de más elementos capacitivos (como filtros o capacitores) en un sistema eléctrico afecta las oscilaciones de alta frecuencia que caracterizan a los supra-armónicos. Este aumento de capacitancia puede amplificar estas oscilaciones, resultando en mayor interferencia electromagnética y posibles problemas de estabilidad en la red eléctrica, ya que los capacitores tienden a resonar con estas frecuencias. Debido a la conmutación del convertidor de potencia, se muestreo con una frecuencia de 50 microsegundos y se procesó mediante Matlab. Se determinó, que a pesar de la generación de un gran espectro de armónicos en el rango de frecuencia (2-150 kHz) por el convertidor de frecuencia de una turbina eólica con la que se experimentó, debido a la resonancia de los elementos de la red y el transformador de acoplamiento, la emisión de estos armónicos sobre la red es baja. Sin embargo, los armónicos en el rango (2-150 kHz) eran tan grandes que podían causar disfunciones en los sistemas de comunicaciones por línea eléctrica. [15]

Rodrigues et al presentan un estudio de caso de la medición de supra-armónicos en una instalación comercial del sector bancario. Se utiliza la herramienta Wavelet Packet Transform para la extracción de in-

formación que pueda caracterizar eficientemente el fenómeno. Con dicho experimento se observó que los supra-armónicos presentes en la señal distorsionada están contenidos principalmente en los coeficientes en el rango de frecuencia 3,75 kHz a 5kHz, y en el rango de frecuencia 7,5 kHz a 8,75 kHz, mientras que el punto (3,7) presentó frecuencias que no tenían una característica periódica típica del supra-armónico. El análisis que se realizó solo tuvo como objetivo determinar las bandas de frecuencia donde estaba cada pico de la frecuencia de conmutación y las frecuencias en su entorno. Sin embargo, si se necesita un análisis más preciso del espectro de frecuencia, se puede aumentar la cantidad de niveles de descomposición para proporcionar una frecuencia de mayor resolución. [16]

Se ha publicado un nuevo método para la medición simultánea de distorsión armónica y supraarmónica con robustez mejorada. Esta propuesta está basada en el análisis Wavelet y Wavelet packet decomposition, y se propone procesar un intervalo de medición de 10 ciclos para la medición simultánea de contenidos armónicos y supraarmónicos. El método propuesto simplifica el equipo de medición y muestra robustez general frente a fluctuaciones de voltaje y desviaciones de frecuencia de potencia, lo que es un inconveniente importante de los métodos basados en DFT propuestos en las normas IEC. Los resultados del método propuesto son constantes e independientes de la modulación de amplitud de voltaje y el valor de frecuencia de potencia, se demostró que el método WPD propuesto no se ve afectado por tensiones residuales bajas durante cualquier tipo de evento de tensión. Esta característica hace que el método sea adecuado para un monitoreo continuo de los armónicos sin importar del valor de amplitud. Por lo tanto, la robustez mejorada de esta implementación hace que el algoritmo propuesto sea adecuado para entornos con alta volatilidad de voltaje y frecuencia. [18]

La transformada wavelet discreta se utiliza para reconocer bandas de supra-armónicos con y sin inversor fotovoltaico en la línea y se demuestra que es un método muy poderoso para mostrar la frecuencia de conmutación del inversor fotovoltaico. [23] Este método también es apropiado para el diseño de filtros para la reducción de ruido de las bandas de HF (High frequency). Se ha destacado la aplicación de Wavelet Packet Transform (WPT) y Empirical Mode Decomposition (EMD) ya que con ellos se pueden obtener una mejor resolución de frecuencia, una descomposición compacta de la energía de la señal y un soporte de tiempo más corto. [24] Se analizaron emisiones conducidas de fuentes de alimentación conmutadas (SMPS) utilizando datos muestreados en el dominio del tiempo, se utilizó una frecuencia de muestreo de 10 Mmuestras/s) y se determinó que WPT muestra una consistencia y robustez general con respecto al cambio del número de niveles. En otro trabajo publicado, se describe el uso del análisis Wavelet multi-resolución para estudiar la presencia supra-armónicos en redes eléctricas de distribución debido a cargas monofásicas tales como vehículos eléctricos y lámparas LED, así como también inversores trifásicos fotovoltaicos. [25]

El enfoque de este trabajo de tesis es experimental y analítico. Se basa en el diseño y desarrollo de una tarjeta de medición equipada con sensores de voltaje y corriente, destinada a la adquisición de datos en las fases de alimentación de cargadores para vehículos eléctricos. La información obtenida se procesa mediante herramientas computacionales, principalmente Python y MATLAB, con el fin de aplicar transformadas en el dominio de la frecuencia y del tiempo-frecuencia, como la FFT, la STFT y el análisis wavelet multirresolución. Este enfoque permite caracterizar y evaluar la presencia de componentes armónicas y supra-armónicas en las señales eléctricas durante la operación simultánea de dos cargadores, aportando así información relevante sobre el impacto de este tipo de cargas en la calidad de la energía eléctrica.

1.3. Objetivos

El objetivo general de esta tesis es estudiar e identificar frecuencias supra-armónicas en las redes eléctricas de distribución con presencia de cargadores de vehículos eléctricos nivel 2 mediante una plataforma de medición en el tiempo y herramientas de análisis tipo Wavelet en el dominio tiempo-frecuencia.

Los objetivos específicos son:

- * Desarrollar una herramienta de análisis de supra-armónicos basada en el análisis Wavelet multi-resolución.
- * Desarrollar una plataforma de medición de señales de corriente y voltaje en baja tensión mediante un sistema de adquisición de datos con un ancho de banda superior a 1 MHz.

- * Diseñar experimentos basados en la operación de estaciones de recarga de vehículos eléctricos nivel 2 en las redes eléctricas de distribución.

1.4. Metodología

Se implementará una etapa de adquisición de datos basado en el equipo Analog Discovery Pro. Se usarán frecuencias de muestreo máximas en el orden de 10 MHz. Además, se usarán sensores de corriente LEM LA-100P y de voltaje LEM LV-5P, los cuales poseen un ancho de banda en el orden de 200 kHz.

Se realizará un programa en el software Python que permita controlar el dispositivo Analog Discovery Pro para llevar a cabo el muestreo de señales obtenidas de los sensores de voltaje y corriente empleando una frecuencia de muestreo de 10MHz, lo cual corresponde a 166,668 muestras para un periodo correspondiente a una frecuencia fundamental de 60 Hz.

Posteriormente, las señales muestreadas se procesarán mediante el software Matlab empleando herramientas como la transformada rápida de Fourier (FFT), Transformada de Fourier de tiempo corto (STFT), con una ventana Hanning, el Wavelet análisis multi-resolución (WMRA). El análisis multi-resolución Wavelet es una técnica que consiste en descomponer la señal original en diferentes componentes a diferentes escalas utilizando funciones wavelet, separando los cambios rápidos en la señal en bandas de baja y alta frecuencia para posteriormente filtrarlas y reconstruir la señal original combinando los detalles y las tendencias a diferentes escalas. Se seleccionarán 11 bandas más la de baja frecuencia y la transformada Wavelet Discreta con máxima superposición, la cual es una variante de la transformada Wavelet discreta para mejorar el procesamiento de la señal. Se diseñarán experimentos que involucren la operación de estaciones de recarga de vehículos eléctricos de nivel 2 alimentadas por medio de la red de distribución de baja tensión. Por una parte, se desarrollará un experimento para caracterizar el espectro supra-armónico de un vehículo a la vez. Por otra parte, se desarrollará un experimento para evaluar la operación simultánea de dos estaciones de recarga de nivel 2 y, de esta forma, estudiar la interacción supra-armónica de dos vehículos eléctricos diferentes.

1.5. Justificación

Uno de los principales puntos para estudiar el impacto de los supra-armónicos en la red eléctrica es la gran inmersión de vehículos eléctricos en el mercado actual, dado que los mercados de coches eléctricos están experimentando un crecimiento exponencial, ya que las ventas superaron los 10 millones en 2022. Un total de 14% de todos los coches nuevos vendidos fueron eléctricos en 2022. Tres mercados dominaron las ventas globales. China fue el líder una vez más, representando alrededor del 60% de las ventas mundiales de coches eléctricos. En Europa, el segundo mercado más grande, las ventas de coches eléctricos aumentaron más del 15% en 2022, lo que significa que más de uno de cada cinco coches vendidos fue eléctrico. Las ventas de coches eléctricos en Estados Unidos, el tercer mercado más grande, aumentaron un 55% en 2022, alcanzando una cuota de ventas del 8%.[27]

Se espera que las ventas de coches eléctricos sigan creciendo con fuerza durante 2023. En el primer trimestre se vendieron más de 2,3 millones de coches eléctricos, un 25% más que en el mismo periodo del año pasado. Actualmente se espera ver 14 millones de ventas para finales de 2023, lo que representa un aumento interanual del 35%. Como resultado, los coches eléctricos podrían representar el 18% de las ventas totales de coches en todo el año [26].

En el IEA "Global EV outlook 2023" se menciona que a fines de 2022, había 2,7 millones de puntos de carga públicos en todo el mundo, más de 900 000 de los cuales se instalaron en 2022, un aumento de aproximadamente el 55% con respecto a las existencias de 2021 y comparable a la tasa de crecimiento prepandémica del 50% entre 2015 y 2019. Además, que a nivel mundial, en 2022 se instalaron más de 600 000 puntos públicos de carga lenta, 360 000 de los cuales estaban en China, lo que elevó el stock de cargadores lentos en el país a más de 1 millón. El número de cargadores rápidos aumentó en 330 000 a nivel mundial en 2022, aunque nuevamente la mayor parte (casi el 90%) del crecimiento provino de China.

En nuestro país, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales estima que para el lapso de 2022-2024 las grandes ciudades de México tendrán 650 vehículos eléctricos así como 30 unidades eléctricas de carga de oportunidad [27]. Para el año 2030 se espera un incremento del 50% en la venta y fabricación

de vehículos eléctricos para México [22], por lo que el impacto de tantos cargadores inyectando supra-armónicos en la red eléctrica puede traer consecuencias negativas. Actualmente se está investigando más a detalle la generación, el impacto, las consecuencias y como mitigar las componentes de frecuencia en el rango supra-armónico.

La electrónica de potencia inmersa en los cargadores de vehículos eléctricos junto con el control necesario para el ajuste de la carga son los principales encargados de las conmutaciones de alta frecuencia y por consiguiente la inyección de componentes supra-armónicas en la red eléctrica. Por lo tanto, una masiva inclusión de vehículos eléctricos al mercado significa más cargadores con diferentes tecnologías de recarga y distintas técnicas de control representando una enorme cantidad de supra-armónicos en la red eléctrica.

Si bien los supra-armónicos son componentes de alta frecuencia y magnitudes muy pequeñas, cabe recalcar que si los supra-armónicos coinciden con la frecuencia de resonancia de algún componente del sistema pueden amplificarse, dañando equipos y provocando sobretensiones.

Por todo lo antes mencionado se tiene que considerar el impacto que tendrá en la red eléctrica la implementación masiva de vehículos eléctricos y por consiguiente las estaciones de recarga para vehículos eléctricos. Es necesario poder evaluar de la inyección de frecuencia en el rango supra-armónico a la red eléctrica a través de los procesos de recarga. Por lo tanto, es de vital importancia el estudio del fenómeno supra-armónico y de la adecuación de nuevas normas o estándares para la regulación y mitigación de componentes de frecuencia supra-armónicas.

1.6. Descripción por capítulos

En el capítulo **II** se mencionan temas referentes al fenómeno a estudiar es decir, antecedentes de estudios supra-armónicos, estándares a nivel internacional existentes para los fenómenos supra-armónicos y su influencia en la calidad de la energía.

En el capítulo **III** se habla sobre los pasos requeridos para realizar la plataforma de adquisición de datos, el desarrollo de las tarjetas con los sensores de corriente y voltaje, el dispositivo de muestreo Analog Discovery Pro y sus características así como el proceso de validación para determinar la confiabilidad del sistema de medición.

En el capítulo **IV** se describen las herramientas matemáticas empleadas para el procesamiento de señales, las fórmulas que se emplean y como funcionan para visualizar que es lo que se le aplica una señal para llegar a los resultados.

En el capítulo **V** se describen los casos de estudio desarrollados en esta tesis. Los resultados obtenidos con el análisis Wavelet multi-resolución se reportan en este capítulo.

En el capítulo **VI** se describen las conclusiones generales de esta tesis y se plantean algunos trabajos futuros que se pueden realizar con base a los resultados obtenidos.

Capítulo 2

Fenómeno Supra-armónico

Los supra-armónicos son señales con frecuencias que se ubican por encima del rango armónico, en un rango de frecuencia de 2 kHz, a 150 kHz. Mientras que los armónicos son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental, los supra-armónicos no son necesariamente múltiplos de la frecuencia fundamental del sistema eléctrico. Los sistemas no lineales generan distorsión, esta distorsión puede incluir contenido de frecuencia armónica y supra-armónica y pueden ser indicativos de fenómenos como la intermodulación o la distorsión no lineal (alteración en la forma de onda de una señal cuando pasa por un sistema que no tiene una relación lineal entre entrada y salida). Se pueden detectar en las formas de onda distorsionadas de voltaje o corriente y se generan principalmente debido a la gran demanda de dispositivos de electrónica de potencia [28].

Algunas de las consecuencias de los supra-armónicos son las siguientes[28] :

- * Interferencia electromagnética
- * Sobrecalentamiento en transformadores y cables
- * Disparos intempestivos en protecciones
- * Malas lecturas al momento de realizar mediciones
- * Mala calidad de la energía

2.1. Infraestructura de recarga

La electrónica de potencia es la responsable de la generación de componentes armónicas y supra-armónicas en la red eléctrica. A continuación se muestran algunos de los principales dispositivos responsables de la generación de contenido supra-armónicos. La Figura 2.1 muestra la tecnología de recarga para un vehículo eléctrico, principal generadora de contenido supra-armónico.

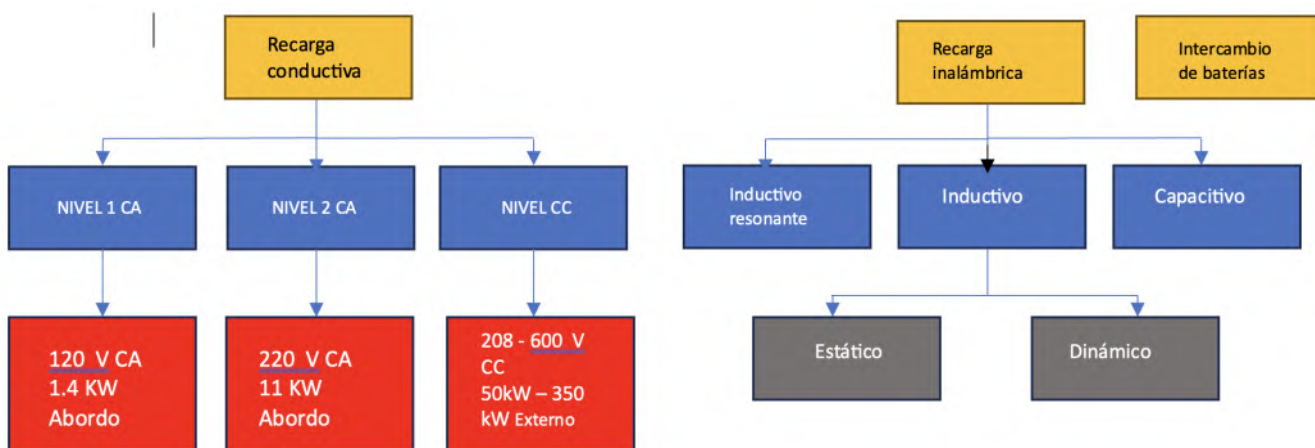


Figura 2.1: Tecnología de recarga para un vehículo eléctrico

2.2. Vehículo eléctrico

El vehículo eléctrico moderno posee un conjunto de elementos básicos tales como el motor eléctrico, controladores de electrónica de potencia, baterías, sistema de protección y sistema de medición. En particular, los convertidores de electrónica de potencia son los responsables de garantizar la adecuada recarga de la batería del vehículo eléctrico. Dichos convertidores de electrónica de potencia están diseñados para cumplir con los índices de calidad de la energía estipulados en estándares internacionales. Sin embargo, son precisamente estos convertidores de electrónica de potencia los responsables de introducir oscilaciones de alta frecuencia en las redes eléctricas de potencia. A continuación, se describen los convertidores de electrónica de potencia que utilizan los vehículos eléctricos modernos.

2.2.1. Estación de recarga

La Figura 2.2 muestra el esquema de conexión y funcionamiento entre una estación de recarga nivel 2 (EVSE, Electric Vehicle Supply Equipment) y un vehículo eléctrico. En el lado izquierdo se representa la estación de recarga, la cual recibe la alimentación en corriente alterna (CA) desde la red eléctrica y la distribuye hacia el vehículo a través de los conductores de fase y neutro. Esta estación cuenta con un módulo de control (Control de ERVE) encargado de gestionar el contacto o relevador principal, que conecta o desconecta la energía según las condiciones de seguridad y el estado de la comunicación con el vehículo.

En el lado derecho del diagrama se observa el vehículo eléctrico, que incluye un cargador interno y una batería. El cargador realiza la conversión de corriente alterna a corriente continua (CD) para almacenar energía en la batería. Además, se incorpora un controlador de comunicación que intercambia información con el EVSE mediante una señal de modulación por ancho de pulso (PWM) transmitida por las líneas de control (3 y 4).

Dicha comunicación permite determinar el estado de conexión, el nivel de carga permitido y la capacidad de corriente disponible, garantizando una recarga segura y coordinada. En conjunto, el diagrama ilustra el principio de operación de una estación de recarga nivel 2, destacando tanto el flujo de potencia como el intercambio de señales de control que permiten la correcta interacción entre el sistema de suministro y el vehículo eléctrico. El cargador nivel 2 se encuentra alojado al interior del vehículo eléctrico y por lo tanto no forma parte de la estación de recarga. Este cargador está diseñado para operar con un voltaje de 220V CA. Un cable de potencia en conjunto con un conector SAE J1772 permiten realizar la conexión entre la estación de recarga y el vehículo eléctrico.

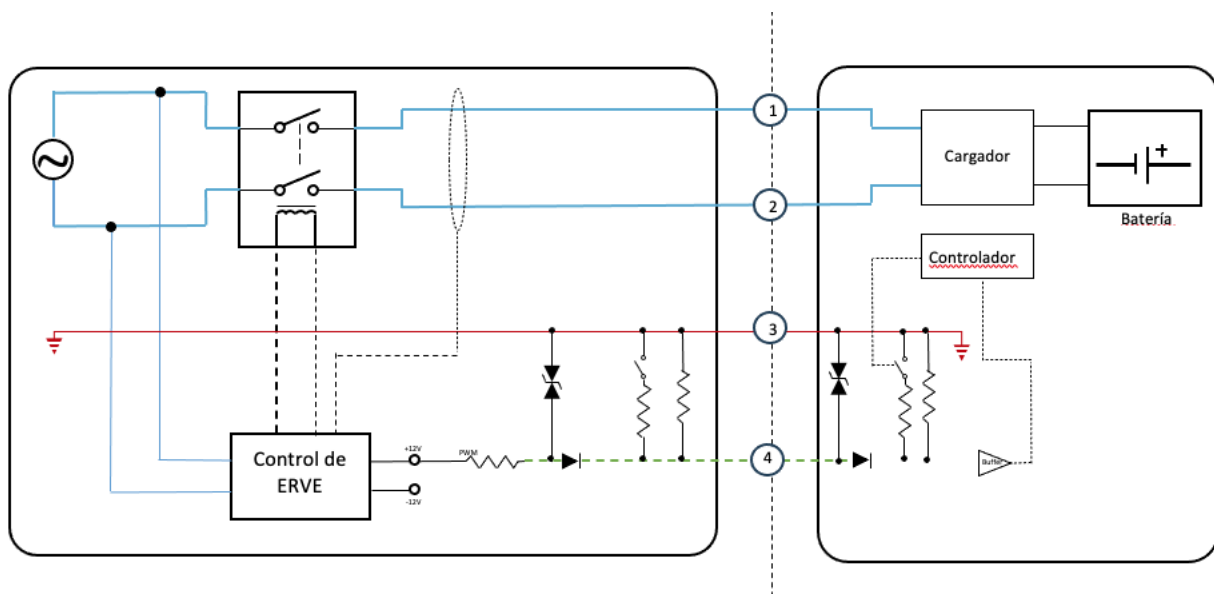


Figura 2.2: Estación de recarga nivel 2 y vehículo eléctrico

2.2.2. Cargador nivel 2

En el proceso de recarga de un vehículo eléctrico mediante el uso de la red eléctrica de distribución interviene un cargador que se encuentra a bordo del vehículo eléctrico. Este cargador se encarga de realizar el proceso de rectificación de CA/CC y la regulación de la corriente de recarga. El diseño del cargador debe considerar la calidad del factor de potencia, la calidad de la energía entregada y la seguridad del proceso de recarga. La Figura 2.3 describe una de las topologías más comúnmente utilizadas que considera la eficiencia y la corrección del factor de potencia. Se puede observar que el corrector de factor de potencia funciona como una primera etapa de conversión de potencia seguida de una segunda etapa constituida por un convertidor de CC-CC. En este cargador el corrector de factor de potencia se encarga de regular la corriente de entrada de CA para que tenga una forma sinusoidal y en fase con el voltaje. Además el voltaje de salida del corrector de factor de potencia se regula para seguir cierto voltaje de referencia establecido como parte del diseño del cargador. Los controladores de electrónica de potencia opera normalmente con esquemas de conmutación a altas frecuencias. Una etapa muy importante del cargador de vehículo eléctrico es el sistema de control que se encarga de controlar la operación de las diferentes etapas de conversión con el propósito de realizar la recarga de la batería del vehículo eléctrico.

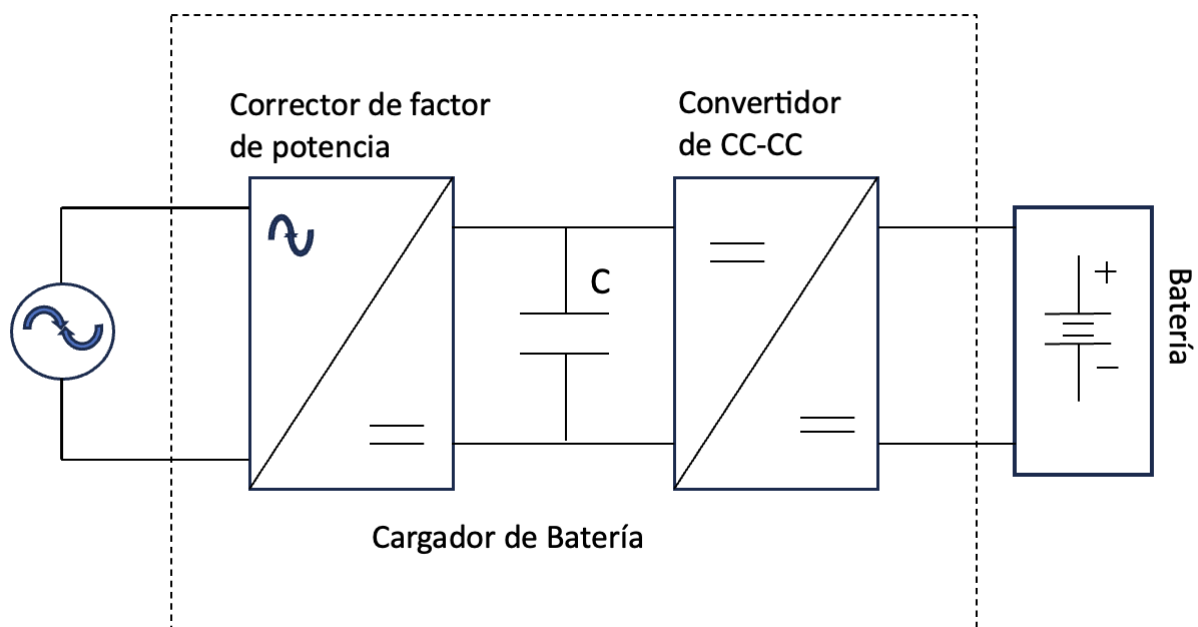


Figura 2.3: Cargador a bordo del vehículo eléctrico

2.3. Impactos de los vehículos eléctricos

Los impactos positivos vinculados a la operación de vehículos eléctricos en las redes eléctricas de distribución son los siguientes:

- Los vehículos eléctricos pueden almacenar y devolver energía a la red cuando se requiere (tecnología llamada V2G-Vehicle-to-Grid).
- Los VE pueden suavizar la curva de carga si se cargan en horarios de baja demanda, evitando sobrecargas y permitiendo un uso más eficiente de la infraestructura eléctrica existente.
- Los VE pueden actuar como baterías móviles para almacenar excedentes de energía renovable, ayudando a la red.

Los principales impactos negativos asociados a la introducción masiva de vehículos eléctricos en las redes eléctricas de potencia son las siguientes:

- Aumento de la demanda máxima
- Inestabilidad de voltaje y desbalance de fases
- Distorsión armónica
- Sobrecarga de elementos de la red de distribución
- Incremento de las pérdidas del sistema

2.4. Estándares internacionales

El rango de frecuencias menores de 2 kHz se aborda con detalle en diversos estándares internacionales. Sin embargo, el intervalo de frecuencias de 2 kHz a 150 kHz no se aborda o no se aborda adecuadamente en la gran mayoría de los estándares internacionales o en normas nacionales. Existen estándares internacionales que abordan 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.

Los principales estándares internacionales que abordan el fenómeno supra-armónico son :

- * **Estándar IEC 61000-4-7** Este estándar propone pruebas y técnicas de medición para armónicos e interarmónicos así como mediciones e instrumentación para potencia, sistemas de suministro y equipos conectados a ellos. Sin embargo, este estándar no sugiere límites de supra-armónicos. La Figura 2.4 presenta el procedimiento propuesto en este estándar para medir supra-armónicos.
- * **Estándar IEC 61000-4-19** Técnicas de prueba y medición. Prueba de inmunidad a perturbaciones y señalización en el rango de frecuencia de 2 kHz a 150 kHz [43].

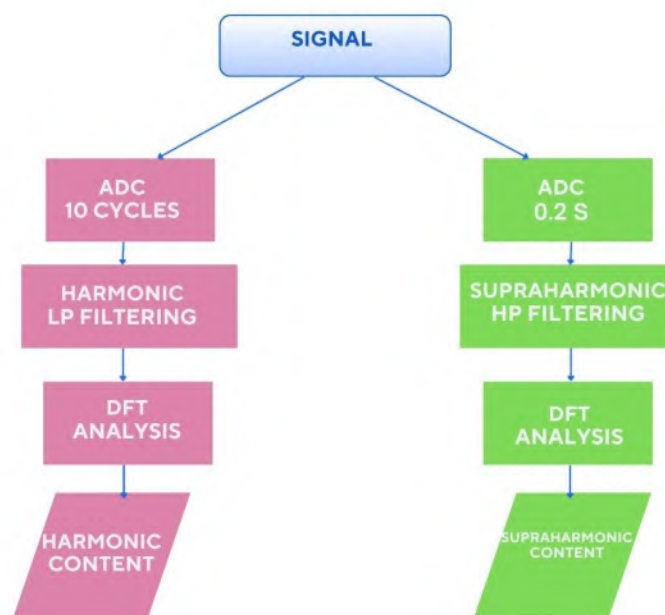


Figura 2.4: Diagrama de flujo del estándar IEC 61000-4-7: procedimiento para medir supra-armónicos

2.5. Sumario

En este capítulo se estudiaron los fenómenos supra-armónicos, el rango en que se encuentran, algunos de los dispositivos que los ocasionan, el impacto que causan en la red eléctrica y algunos estándares internacionales donde se les hace mención. Este capítulo es de suma importancia ya que da un preámbulo sobre lo que se desea detectar en este proyecto de tesis.

Capítulo 3

Sistema de adquisición de datos

En este capítulo se abordará el diseño del sistema de adquisición de datos, tanto la implementación necesaria de hardware como la elaboración de software requerido para llevar a cabo las mediciones en la estación de recarga de vehículos eléctricos. Además, se corroborará mediante una serie de pruebas si la plataforma de medición que se diseñó funciona de manera correcta y es viable emplearlo para el desarrollo de esta tesis.

3.1. Plataforma de medición

La Figura 3.1 describe los elementos 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 el sistema de adquisición de datos el encargado de sensar, acondicionar y convertir las señales eléctricas analógicas a señales digitales de forma tal que una computadora digital pueda procesar y extraer la información relevante. El costo de los componentes esenciales del sistema de medición son los siguientes:

- Analog Discovery Pro ADP3250 \$895.00 USD
- 3 sensores de corriente LEM LA 100-P \$111.00 USD
- 3 sensores de voltaje LEM LV 25-P \$165.00 USD

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

- Acondicionamiento de señales: incluye los sensores de corriente y de voltaje, circuitería básica para adecuar los niveles de voltaje y una fuente de alimentación de CC.
- Hardware de adquisición de datos: Esta constituido por la tarjeta de adquisición de datos.
- Programa de adquisición de datos: consiste de un programa de adquisición de datos desarrollado en Python con el cual se muestrean señales reales de la estación de recarga de vehículos eléctricos
- Herramienta de análisis: consiste de un conjunto de algoritmos basados en la transformada de Fourier y la transformada Wavelet que permiten analizar las señales muestreadas usando un marco de referencia en la frecuencia o tiempo-frecuencia.

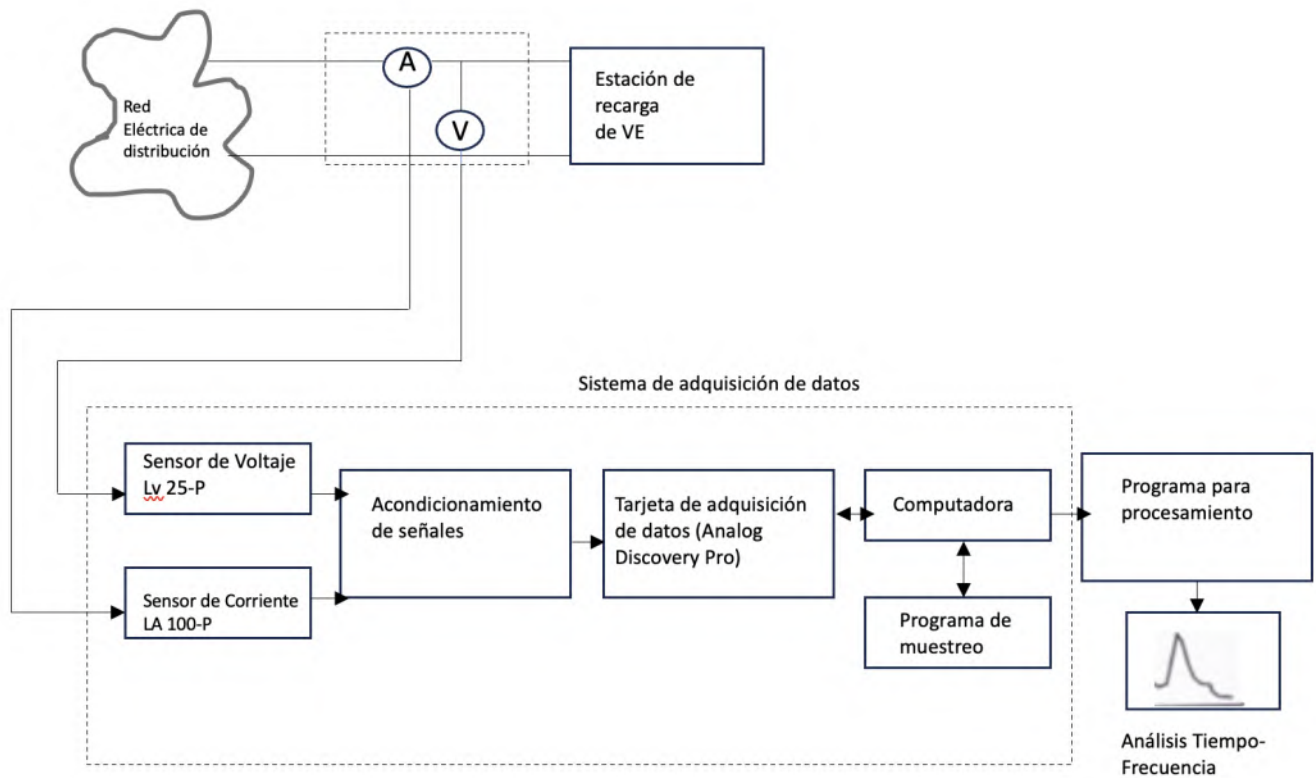


Figura 3.1: Esquema del sistema de medición

La Tabla 3.1 sintetiza los requerimientos del sistema de medición de frecuencias supra-armónicas desarrollado en este trabajo. Como se desean medir contenido de frecuencia supra-armónicos, el sistema está diseñado para medir componentes de frecuencia de 2400Hz a 180000Hz.

Tabla 3.1: Requerimientos del sistema de medición de frecuencias supra-armónicas.

Parámetro	Valor
VRMS CA	220 V
Corriente RMS máxima de CA	100 A
Frecuencia de Muestreo	100 MHz
Máxima frecuencia medible	180 kHz
Mínima frecuencia medible	2.4 kHz

La Figura 3.1 describe el diagrama de la instalación eléctrica de la estación de recarga de vehículos eléctricos ubicada en el campus universitario de la Universidad Michoacana. La estación de recarga consta de dos cargadores nivel 2 de 7kW cada uno y un generador fotovoltaico de 9kW. Además, se puede apreciar que los cargadores nivel 2 se alimentan por medio de dos fases en baja tensión, mientras que el generador fotovoltaico posee una configuración trifásica.

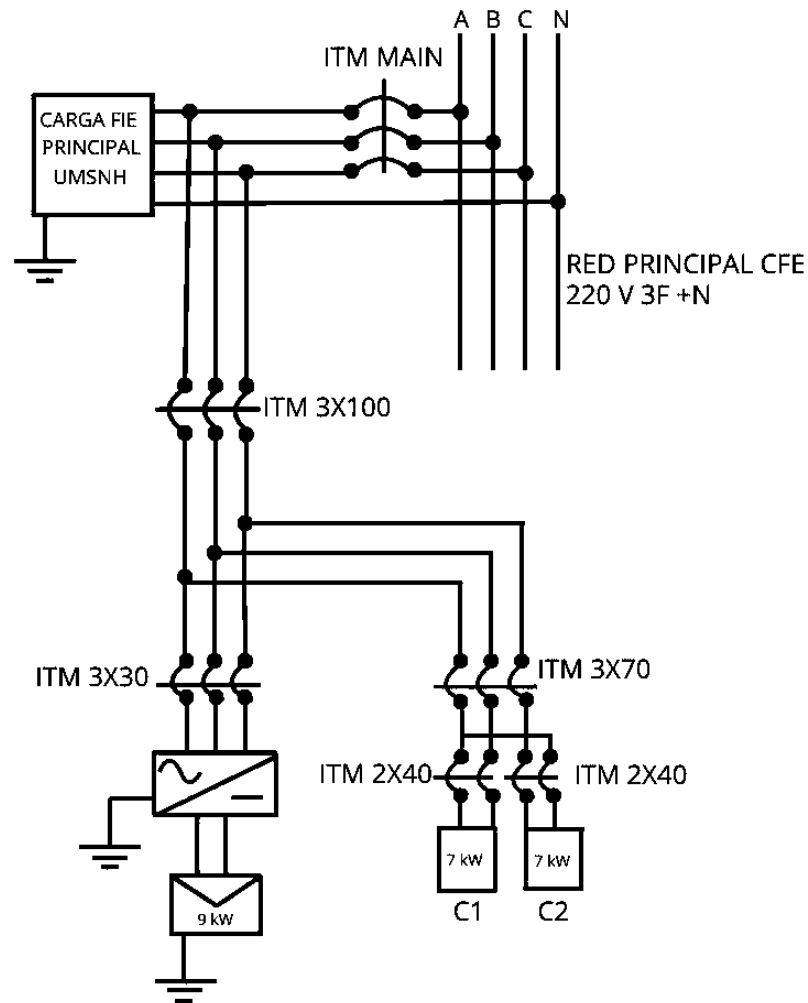


Figura 3.2: Esquema del sistema de medición.

3.1.1. Acondicionamiento de señales

La medición de voltajes en las redes eléctricas de baja tensión se realizó con el sensor de voltaje LEM LV-25P, el cual es un sensor de efecto Hall. La Figura 3.3 muestra el diagrama esquemático de este sensor de voltaje. Este sensor de voltaje se usa para medir voltajes de línea a línea en redes eléctricas de baja tensión. Este sensor de voltaje garantiza el aislamiento entre el sistema eléctrico de potencia y el sistema de medición. Además, se puede observar que contiene una resistencia R_m , la cual es una resistencia de medición y la cual tiene que calcularse en base a las necesidades de diseño. Los cálculos para el diseño de las resistencias de medición para el sensor de voltaje se muestran en el apéndice A.

Las características principales del sensor LEM LV-25P son las siguientes:

- * Corriente nominal en el devanado primario de 10 mA
- * Corriente nominal en el devanado secundario 25 mA
- * Voltaje nominal en el devanado primario en el rango de 10v-500v
- * Voltaje de alimentación de ± 15 Vcd
- * Relación de transformación 2500:1000

- * Temperatura ambiente de 0-70 °C

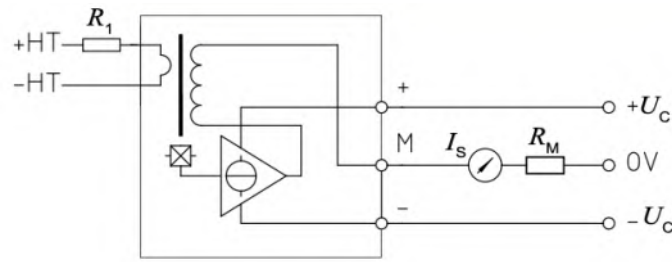


Figura 3.3: Sensor de voltaje LV-25P

Por su parte, la medición de las corrientes en las redes eléctricas se realizó con el sensor de corriente LEM LA-100P. Este sensor de corriente es de efecto Hall, lo cual garantiza el aislamiento entre el sistema eléctrico de potencia y el equipo de medición. Además, este sensor convierte la corriente medida en un voltaje de salida. La Figura 3.4 presenta el diagrama esquemático del sensor de corriente, en el se observa requiere diseñar dos resistencias. El procedimiento de diseño de las resistencias del sensor de corriente se reporta en el apéndice B.

Las características del sensor LEM LA-100P son las siguientes:

- * Corriente nominal en el devanado primario de 100 A
- * Corriente nominal en el devanado secundario 50 mA
- * Voltaje de alimentación de ± 15 Vcd
- * Relación de transformación 1:2000
- * Ancho de banda 0-200 kHz

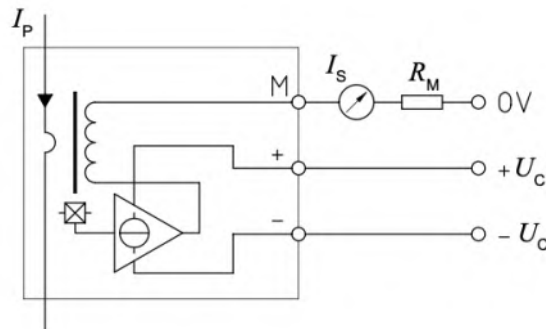
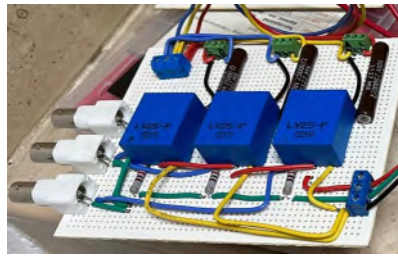
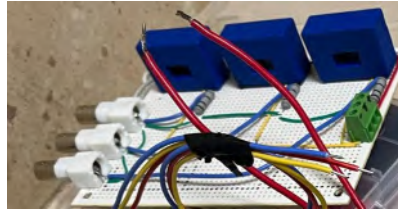


Figura 3.4: Sensor de corriente LA-100P

Las Figuras 3.5 (a) y (b) muestran las tarjetas de los sensores de voltaje y corriente, respectivamente. Ambas tarjetas las señales de salida en terminales tipo BNC que se acoplan al hardware de adquisición de datos. Las tarjetas de los sensores de voltaje y corriente se alojan en el interior de una caja aislante de acrílico para garantizar su integridad a lo largo de su operación y se ubica en el tablero de medición de la estación de recarga, como se puede apreciar en la Figura 3.5.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.5: Ubicación de los sensores de medición en el interior del tablero de medición de la estación de recarga: a).-tarjeta de sensores de voltaje, b).-tarjeta de sensores de corriente y c).-caja de protección de las tarjetas de medición.

3.1.2. Hardware de adquisición de datos

La Figura 3.6 presenta el dispositivo Analog Discovery Pro usado en este trabajo para desarrollar la etapa de adquisición de datos. Este equipo posee dos canales de entrada analógicos. Mientras que al canal 1 se conecta la salida del sensor de voltaje, en el canal 2 se acopla el sensor de corriente. Por su parte, la Tabla 3.2 enlista las características principales de este equipo. El dispositivo Analog Discovery Pro de Digilent cuenta con una resolución de 14 bits en sus canales analógicos. Además, al utilizar técnicas de sobremuestreo, es posible alcanzar una resolución de 16 bits a frecuencias de muestreo de hasta 25 MS/s. Por lo tanto, con 14 bits se tendría una relación señal-ruido de aproximadamente 86 dB y, dada las magnitudes de las señales que se analizan 14 bits son suficientes para identificar componentes de frecuencia supra-armónicas.



Figura 3.6: Dispositivo Analog Discovery Pro

5Estándar de salida lógica:

Tabla 3.2: Características del dispositivo Analog Discovery Pro

Dispositivo	Analog Discovery Pro
Canales de entrada analógica	2
Máximo voltaje de entrada	± 25 V
Frecuencia máxima de muestreo	0.5 GS/s
Ancho de banda analógico	55 MHz a 3 dB
Filtro de ancho de banda de hardware limitador de ruido	20 MHz
Total de muestras en modo grabación	120 MS
Muestras por canal en los modos repetido/cambio/pantalla	32 kS
Estándar de entrada lógica	LVC MOS (ajustable a 1,2 V a 3,3 V, tolerable 5 V)
Estándar de salida lógica	LVC MOS (ajustable de 1,2 V a 3,3 V, 8 mA)
Número de bits del convertidor A/D	14 bits
Relación señal/ruido (SNR)	86 dB

3.1.3. Programa de adquisición de datos

El sistema Analog Discovery Pro incorpora un paquete conocido como WaveForms, el cual permite interactuar con el dispositivo. Este software incorpora una suite de instrumentos gráficos conocida como WaveForms, la cual permite acceder los instrumentos analógicos y digitales del dispositivo. Además, el paquete WaveForms provee una interfaz para programar aplicaciones desarrolladas por el usuario conocida como WaveForms SDK API. La interfaz WaveForms SDK API se puede usar con lenguajes de programación tales como C/C++, C, Python y Visual Basic. [39]

En la Figura 3.7 se muestran las alternativas de uso del dispositivo Analog Discovery Pro, así como las diferentes formas en que puede establecerse la comunicación entre el hardware y las aplicaciones de usuario. Tanto la suite gráfica WaveForms como las aplicaciones desarrolladas por el usuario (por ejemplo, en Python, LabVIEW o MATLAB) utilizan el WaveForms Runtime para comunicarse con el dispositivo, tal como se aprecia en el diagrama.

El WaveForms Runtime está compuesto por una librería dinámica DWE, una librería estática y varios archivos de configuración. A su vez, la librería dinámica DWF hace uso del Adept Runtime de Digilent, el cual proporciona una interfaz de programación de aplicaciones (API) que permite controlar y acceder a las funciones de los dispositivos Digilent, incluido el Analog Discovery Pro.

La interfaz de WaveForms es intuitiva y permite configurar con facilidad las herramientas integradas del dispositivo. Entre sus principales funciones se encuentran el generador de onda y el osciloscopio digital, los cuales permiten generar y visualizar señales simultáneamente. En el módulo de osciloscopio, el usuario puede definir el número de muestras, la frecuencia de muestreo y los modos de adquisición, optimizando así la resolución temporal y espectral de las mediciones.

Además, WaveForms ofrece herramientas para realizar el procesamiento de señales en el dominio del tiempo y de la frecuencia, incluyendo la Transformada Rápida de Fourier (FFT), el muestreo de señales externas, y la aplicación de filtros digitales que permiten reducir la distorsión y mejorar la calidad de las mediciones.

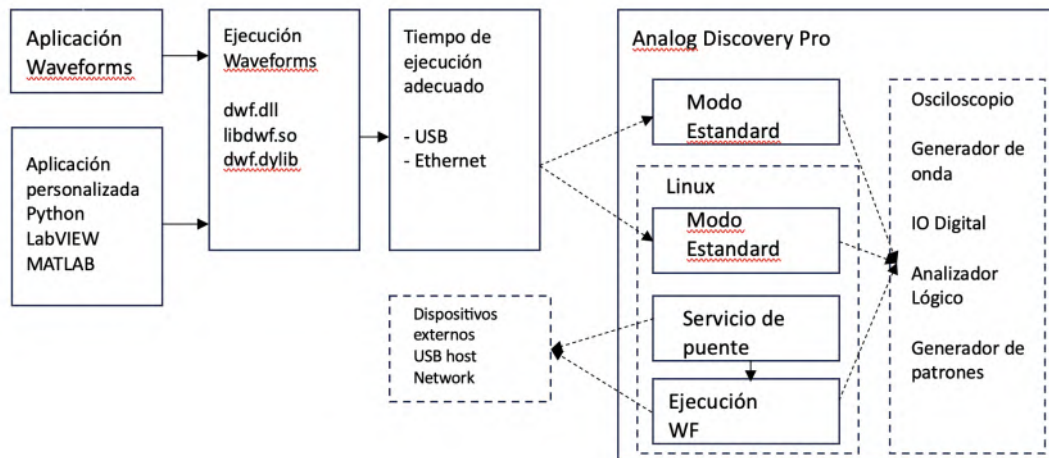


Figura 3.7: Alternativas de uso del dispositivo Analog Discovery Pro.

La Figura 3.8 muestra el diagrama de flujo del programa desarrollado en Python para el muestreo de señales eléctricas. El código en python consiste en adquirir datos utilizando la API (Application Programming Interface) de Digilent WaveForms y la biblioteca dwfconstants.

El algoritmo del código consiste en lo siguiente :

- Captura una señal de voltaje o corriente según sea el caso y las guarda para su análisis posterior.
- Importa las librerías para la ejecución de los comandos, inicializa las variables que permiten almacenar las muestras adquiridas y el número de iteraciones del ciclo.
- Establece un ciclo while en el que el contador sea menor al número de muestras n para evitar que capture más de una sola vez la adquisición.
- Establece los valores de frecuencia de muestreo, número de muestras que se desean obtener y las variables para almacenar datos y monitorear el estado de la adquisición.
- Configura que la señal se muestre como una señal sinusoidal. Activa la entrada analógica y configura un rango de medición de 5V.
- Establece modo de adquisición continua, configura la frecuencia de muestreo y ajusta la duración de la adquisición para leer los datos.
- Controla pérdidas y corrupciones al momento de realizar el proceso de muestreo. Guarda las muestras en una variable y permite exportarlas como un archivo .txt

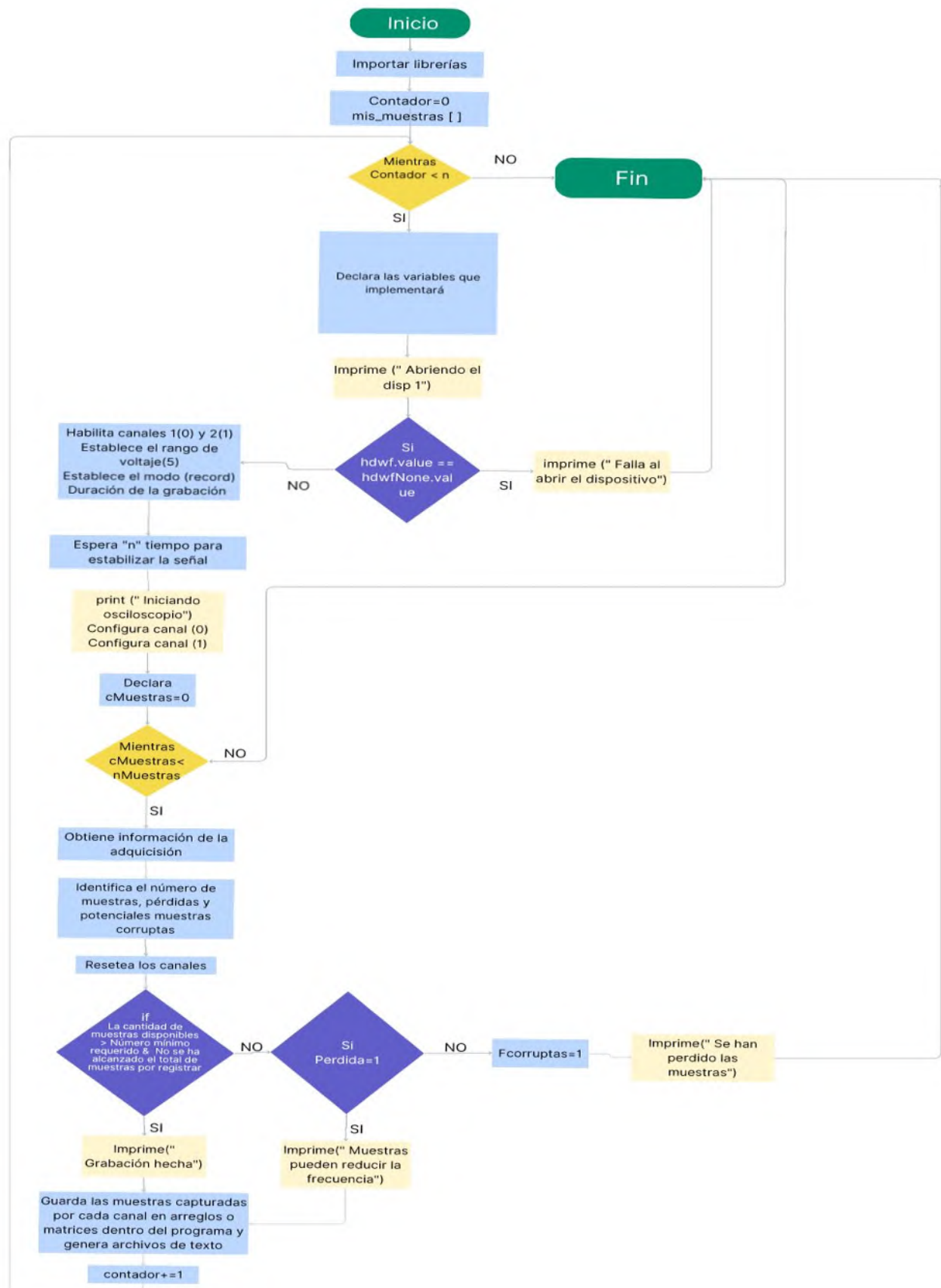


Figura 3.8: Diagrama de flujo sobre el programa desarrollado en Python para muestreo

3.2. Validación

En esta sección se presenta la validación del sistema de adquisición de datos implementado en este trabajo. Con este propósito, se implementaron dos experimentos que tiene como finalidad evaluar el desempeño del sistema de adquisición de datos para capturar señales eléctricas de distintas frecuencias. Los experimentos implementados son los siguientes:

- Experimento de validación: Este experimento consiste en muestrear una sola señal única con diferentes frecuencias usando el instrumento de adquisición de datos implementado en este trabajo y un osciloscopio comercial.

3.2.1. Experimento de validación

La Figura 3.9 describe la estructura del experimento de validación. Se generaron señales de 60Hz, 6kHz, y 120kHz con una amplitud de 2 volts pico usando el generador de señales BK PRECISION modelo 4070A. Los resultados obtenidos con el sistema de adquisición de datos basado en el Analog Discovery Pro se almacenan un vector de datos en un archivo de texto y se exportan a Matlab para procesarse con la Transformada Rápida de Fourier, obteniendo así el espectro armónico de la señal, amplitud y la frecuencia de la fundamental. Los resultados obtenidos con el sistema implementado en este trabajo se comparan con los resultados obtenidos con el osciloscopio Tektronik TDS 2014B el cual permite visualizar los valores de amplitud, componentes armónicos y frecuencia. Se obtuvieron resultados numéricos y gráficos, es decir, se obtuvieron formas de onda y valores de amplitud en volts, con la finalidad de hacer una comparativa. Los parámetros de muestreo usados en este experimento son los siguientes:

- Ventana de muestreo: 1 ciclo de 60 Hz
- Frecuencia de muestreo: 100,000,080 Hz
- Número de muestras: 1,666,668

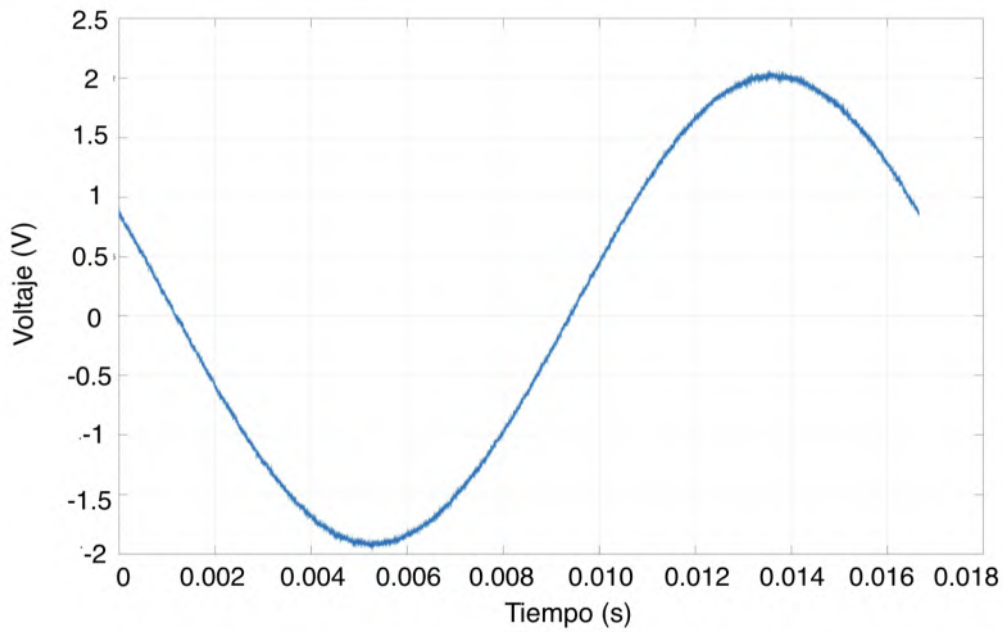


Figura 3.9: *Experimento de validación*

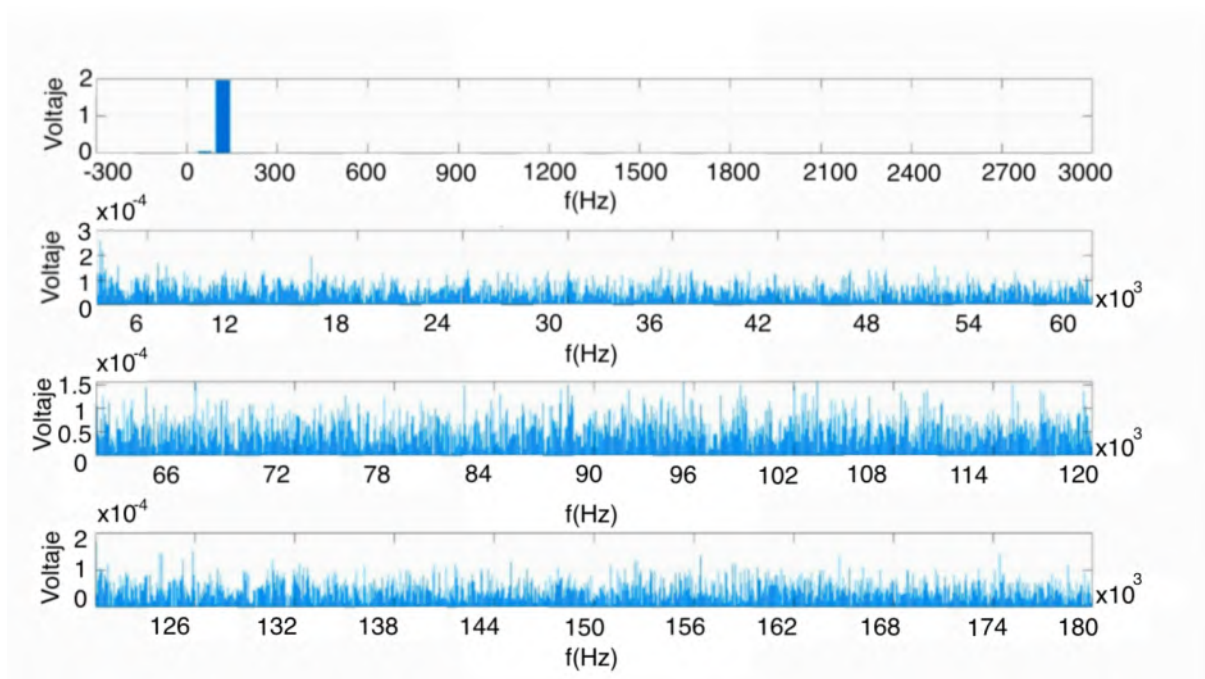
La Tabla 3.3 sintetiza los resultados obtenidos en términos de frecuencia, amplitud y porcentaje de error. Se puede observar que los errores observados en la amplitud usando el osciloscopio son de 1, 5 y 3 %, mientras que los errores de frecuencia son de 0.2833, 0.083 y 0.01666 % para las frecuencias de 60 Hz, 6 kHz, y 120 kHz, respectivamente. Además, se puede apreciar que los errores obtenidos con el dispositivo Analog Discovery Pro y Matlab en la amplitud son de 1.75, 1.645 y 1.80 % mientras que en la frecuencia los errores fueron de 0.0 y 0.1 % para las señales de 60 Hz, 6 kHz y 120 kHz, respectivamente.

Tabla 3.3: Resultados obtenidos para experimento de validación 1

	Señal generada	Señal en el osciloscopio	Analog Discovery Pro y Matlab	% de error con Osciloscopio	% de error con Analog Discovery Pro y Matlab
Amplitud	2V	2.02V	1.9650V	1	1.75
	2V	2.10V	1.9671V	5	1.645
	2V	2.06V	1.9640V	3	1.8
Frecuencia	60Hz	60.17Hz	60Hz	0.2833	0
	6kHz	5.995kHz	6kHz	0.083	0
	120kHz	120.02kHz	120.12kHz	0.01666	0.1



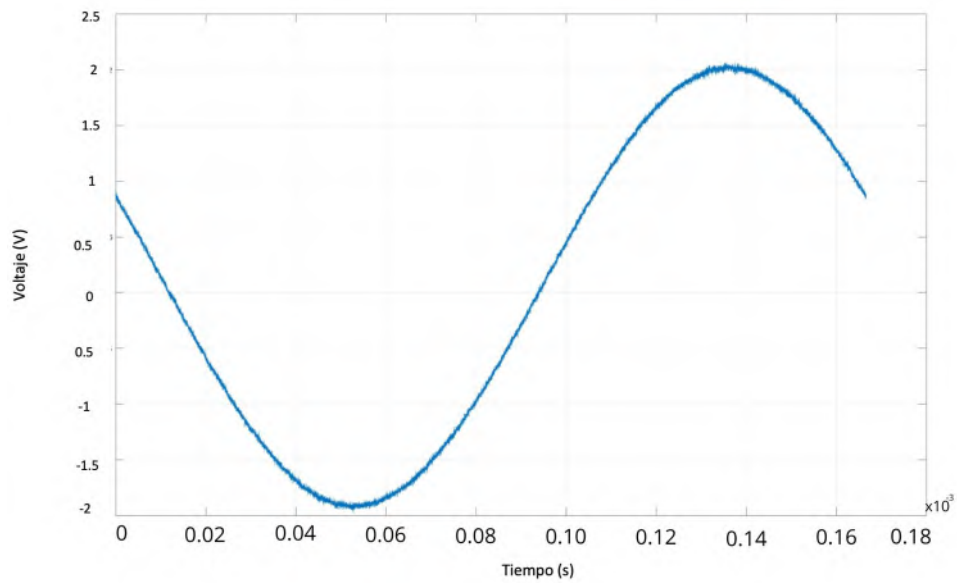
(a)



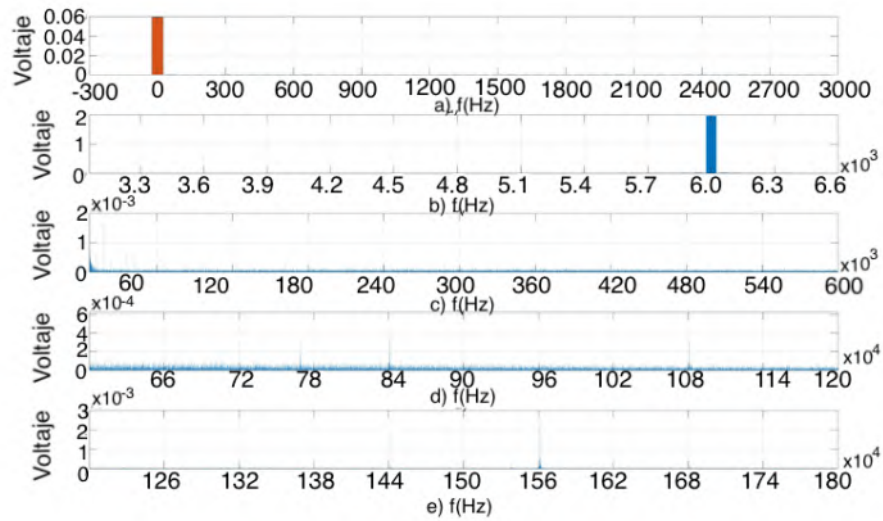
(b)

Figura 3.10: Señal de 60 Hz: a).- forma de onda en el tiempo y b).- espectro armónico

La Figura 3.10 muestra la forma de onda en el tiempo y el espectro de frecuencia correspondiente a la señal de 60 Hz obtenida mediante la plataforma basada en Analog Discovery Pro. Se puede apreciar que se detecta correctamente la componente de 60 Hz, sin embargo se observa que la señal es asimétrica y por lo tanto presenta un valor de voltaje promedio de 0.0515V de amplitud, esto debido a que el generador de señales no es perfecto e inyecta esa componente al momento de generar la señal. El resto de las componentes de frecuencia presentan amplitudes muy pequeñas y cuya presencia se atribuye al generador de señales.

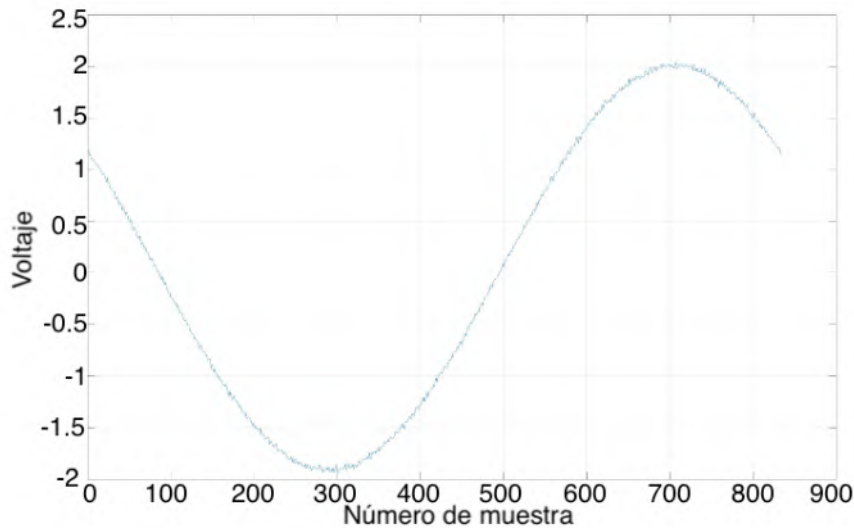


(a)

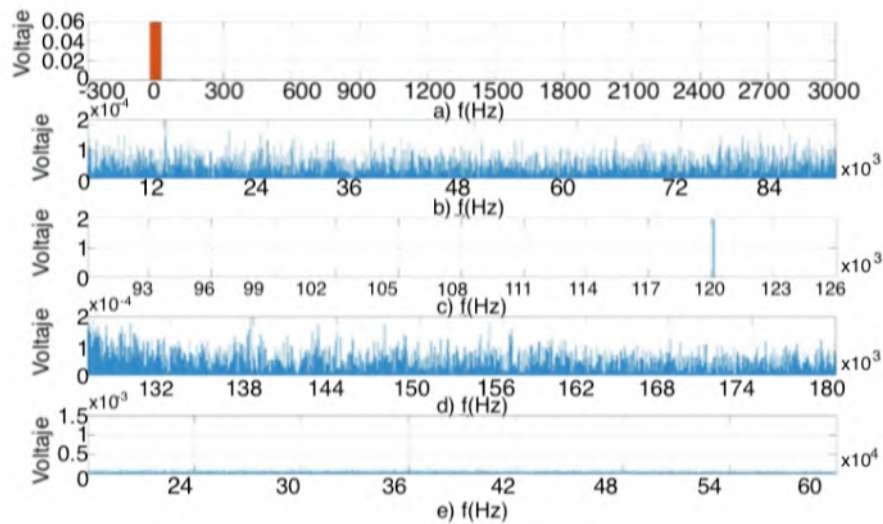


(b)

Figura 3.11: Señal de 6 kHz: a).- forma de onda en el tiempo y b).- espectro armónico.



(a)

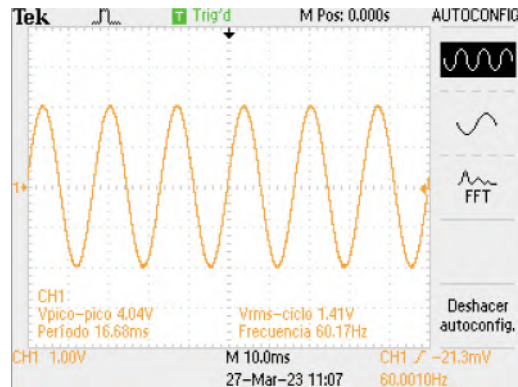


(b)

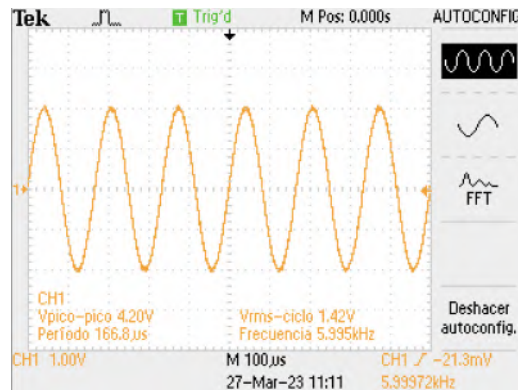
Figura 3.12: Señal de 120 kHz: a).- forma de onda en el tiempo y b).- espectro armónico.

En la Figura 3.12 muestra la forma de onda en el tiempo de la señal de 120kHz y se presenta el espectro de frecuencia de la señal de 120kHz. Se detecta correctamente la componente de 120kHz, sin embargo se observa que la señal es asimétrica y por lo tanto presenta un valor de voltaje promedio de 0.059V de amplitud. Se puede observar también el espectro armónico correspondiente a la frecuencia de 120.12kHz determinando un pequeño error respecto a la frecuencia exacta de la señal. El resto de las componentes de frecuencia presentan amplitudes muy pequeñas y cuya presencia se distribuye al generador de señales.

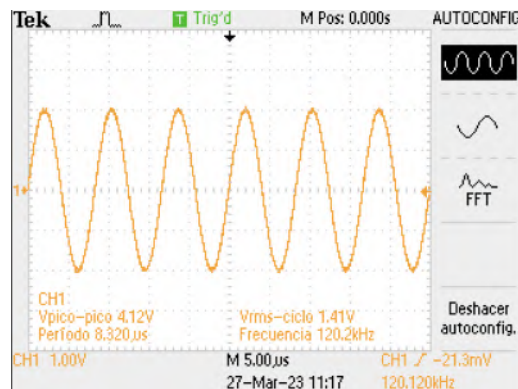
La Figura 3.13 a) presenta la captura de pantalla del osciloscopio capturando la señal generada de 60Hz, se puede observar que tiene una amplitud de 2.02V y una frecuencia de 60.17Hz. La Figura 3.13 b) presenta la captura de pantalla del osciloscopio capturando la señal generada de 60 Hz, se puede observar que tiene una amplitud de 2.10V y una frecuencia de 5.995kHz. Por su parte, la Figura 3.13 c) presenta la captura de pantalla del osciloscopio capturando la señal generada de 120Hz, se puede observar que tiene una amplitud de 2.06V y una frecuencia de 120.02 kHz.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.13: Resultados obtenidos con el osciloscopio para la señal de entrada de: a).- 60 Hz, b).- 6kHz y c).- 120 kHz

3.3. Conclusiones

El programa de muestreo funcionó de manera eficiente, logró muestrear las señales que se le indicaron sin importar que el contenido de frecuencia fuera alto o que se tratara de señales compuestas con distintos contenidos de frecuencia, la frecuencia de muestreo y el número de muestras que permiten el dispositivo Analog Discovery pro son muy altas por lo que se obtienen señales de muy buena resolución.

Comparado con un dispositivo comercial como lo es el osciloscopio, el programa de muestreo en Python y el procesamiento de la señal con Matlab presenta mejores resultados, errores casi nulos en la frecuencia y muy bajos en la amplitud. La gran limitante que se presentó al momento de realizar el sistema de validación fue el generador de señales tradicional, para este ejemplo el BK PRECISION modelo 4070^a ya que no permite generar señales compuestas con distintas frecuencias y amplitudes y la limitante para generar señales de 1 MHz de frecuencia de muestreo que permite el dispositivo Analog Discovery 2. Además, el osciloscopio

permite únicamente ver los datos de una señal a la vez, por lo que al tratar de observar la señal compuesta únicamente se observa la primer parte, el resto de la señal con distinta frecuencia y amplitud no se puede apreciar, lo cual no es problema para el programa de muestreo y el Analog Discovery Pro, lo cual lo convierte en una herramienta más útil. Por lo tanto, se puede concluir que el sistema de adquisición de datos es confiable y se recomienda su aplicación. Posibles desventajas de esta herramienta pueden ser que dependamos de un dispositivo para muestreo que es costoso, se necesita generar la infraestructura para poder realizar la plataforma de medición (sensores de corriente y conexión a un punto de medición). Es necesario contar con un dispositivo de computo y un software las mediciones, sin un equipo de los previamente mencionados se avería o se encuentra fuera de línea no podría realizar el proceso de muestreo.

Capítulo 4

Herramientas matemáticas para el procesamiento de señales

Las señales de corriente y voltaje que se capturan con ayuda de los sensores y el software de muestreo son vectores de datos cuyos valores se presentan en el dominio del tiempo. Para obtener las emisiones armónicas o supra-armónicas de las señales así como su nivel de distorsión es necesario emplear fórmulas matemáticas y técnicas de procesamiento según sea el caso. A continuación se presenta el contexto matemático y las técnicas de procesamiento que se emplearán en esta tesis.

4.1. Factor de distorsión

En esta tesis se estudia la presencia de frecuencias armónicas y supra-armónicas en redes eléctricas con una frecuencia fundamental de 60 Hz. El rango armónico comprende desde 0 Hz hasta 2.34 kHz, mientras que el rango supra-armónico abarca de 2.4 kHz hasta 180 kHz.

Como parte del presente trabajo, se propone una nueva definición del parámetro denominado “distorsión total”, la cual relaciona la distorsión armónica y la distorsión supra-armónica mediante la siguiente expresión:

$$TD^2 = THD^2 + TSHD^2 \quad (4.1)$$

en donde

- TD distorsión total
- THD distorsión armónica total
- $TSHD$ distorsión supra-armónica total
- THD_v distorsión armónica total de voltaje
- THD_i distorsión armónica total de corriente
- $TSHD_i$ distorsión supra-armónica total de corriente
- $TSHD_v$ distorsión supra-armónica total de voltaje

La ecuación propuesta se fundamenta en la idea de que tanto la distorsión armónica como la supra-armónica representan contribuciones independientes al contenido no fundamental de la señal de voltaje o corriente. Dado que ambas afectan de manera cuadrática la energía de la señal distorsionada, se plantea que la distorsión total (TD) puede expresarse como la suma cuadrática de la distorsión armónica total (THD) y la distorsión supra-armónica total (TSHD). Esto permite unificar en un solo parámetro el grado total de distorsión presente en la red, considerando el espectro completo desde 0 Hz hasta 180 kHz. Esta formulación facilita la evaluación global de la calidad de la energía eléctrica, especialmente en sistemas donde las componentes supra-armónicas son significativas.

Por lo tanto, se introduce un nuevo término llamado “factor de distorsión”, el cual se define como el cociente de la distorsión armónica total entre la distorsión total,

$$FD = \frac{THD}{TD} \quad (4.2)$$

El factor de distorsión FD se encontrará cercano a la unidad cuando la componente armónica sea mayor que la componente supra-armónica. De esta manera, este término permite determinar el grado de contribución del rango supra-armónico a la distorsión total.

La distorsión armónica total (THD) es una medida que se utiliza para medir la presencia de armónicos en una señal eléctrica. Para el caso de esta tesis, el calculo del %THD se restringue al rango 0-2.4 kHz, lo cual equivale a los primeros 40 armónicos,

$$\%THD_V = 100 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{m \neq 1}^{39} |V_m|^2}{|V_1|^2}} \quad (4.3)$$

$$\%THD_I = 100 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{n \neq 1}^{39} |I_n|^2}{|I_1|^2}} \quad (4.4)$$

Donde

V_m Amplitud del m-ésimo armónico e la señal de voltaje.

V_1 Amplitud de la componente fundamental de la señal de voltaje.

I_n Amplitud del n-ésimo armónico de la señal de corriente.

I_1 Amplitud de la componente fundamental de la señal de corriente.

El cálculo de la distorsión supra-armónica total se realiza involucrando las frecuencias en el rango 2.4kHz-180kHz, las cuales corresponden a las frecuencias alojadas en el rango armónico de 40 a 3000,

$$\%TSHD_V = 100 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{m=40}^{3000} |V_m|^2}{|V_1|^2}} \quad (4.5)$$

$$\%TSHD_I = 100 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{n=40}^{3000} |I_n|^2}{|I_1|^2}} \quad (4.6)$$

4.2. Transformada de Fourier

La transformada de Fourier para una señal continua en el tiempo $f(t)$ se define como [17]

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(w) e^{jw t} dw \quad (4.7)$$

y

$$F(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-jw t} dt \quad (4.8)$$

en donde,

ω frecuencia angular

t tiempo

En la mayoría de los casos prácticos, la versión discreta de la transformada de Fourier se implementa mediante la transformada rápida de Fourier. Para una señal discreta $f(n)$ de N puntos muestreados se define como,

$$F(n) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (4.9)$$

y

$$C_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (4.10)$$

en donde C_k es el coeficiente de Fourier y $k=0,1,\dots,N-1$.

Además, la resolución en la frecuencia se define como,

$$\Delta f = \frac{fs}{N_m} \quad (4.11)$$

y

$$N_m = \frac{fs}{f_1} N_p \quad (4.12)$$

en donde,

fs frecuencia de muestreo

f_1 frecuencia fundamental

N_m número de muestras

N_p número de periodos muestreados

4.3. Transformada Wavelet discreta

La implementación digital de la transformada Wavelet en una computadora requiere de la utilización de la versión discreta de la transformada Wavelet. La transformada Wavelet discreta se define como

$$W_{j,k} = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot \psi_{j,k}[n] \quad (4.13)$$

en donde,

$W_{j,k}$ Coeficiente wavelet en la escala j y la posición k

$x[n]$ Señal original

$\psi_{j,k}[n]$ Función wavelet discreta, escalada y desplazada

k Posición de la función wavelet

4.4. Análisis Wavelet Multi-resolución

El análisis Wavelet multi-resolución es una técnica de procesamiento de señales que utiliza funciones Wavelet para descomponer una señal en diferentes escalas de resolución. Mediante esta técnica, se puede analizar y representar una señal en múltiples niveles de detalle y frecuencia.[18]

El análisis Wavelet multi-resolución se lleva a cabo mediante el proceso de debilitamiento y reconstrucción de la señal. La señal original se descompone en diferentes componentes Wavelet en cada nivel de escala, y cada componente representa un nivel específico de detalle en la señal. Luego, la señal se reconstruye sumando los detalles en diferentes escalas junto con una aproximación general de la señal. El análisis multi-resolución construye Wavelets ortogonales a partir de funciones de escalamiento que son equivalentes a un filtro pasa-bajas y Wavelets madre que describen la presencia de un filtro pasa-altas. La Figura 4.1 presenta algunas de las funciones wavelet más utilizadas: a) Wavelet Morlet empleada en el análisis de señales y procesamiento de datos, b) Wavelet Sombrero mexicano empleada principalmente en procesamiento de imágenes, análisis de señales para detectar singularidades o discontinuidades y c) Wavelet Daubechies. Para esta investigación se está emplea la rutina de MRA (análisis wavelet multi-resolución) de MATLAB. En dicha rutina, matlab utiliza una wavelet tipo Daubechies, debido a que son compactas y ortogonales, adecuadas para análisis de señales generales. Tienen Mayor simetría y más momentos nulos etc.

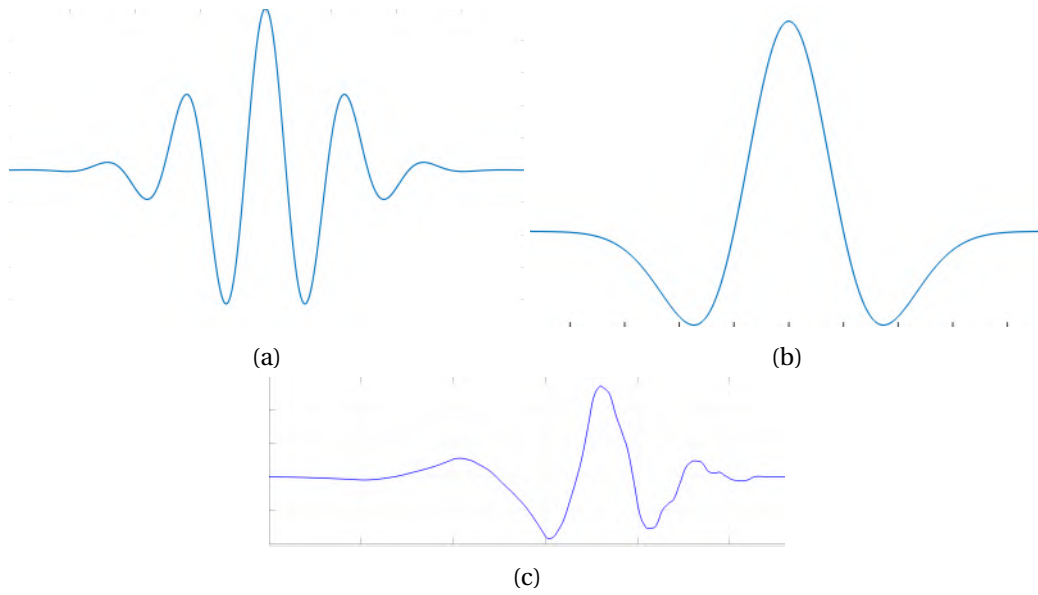


Figura 4.1: Tipos de wavelets más empleadas. a).- Morlet 1, b).- Sombrero mexicano, c) Daubechies

La Figura 4.2 muestra el diagrama esquemático del algoritmo de Mallat aplicado en el análisis multi-resolución mediante la transformada wavelet discreta. En dicho diagrama se representa el proceso jerárquico de descomposición de una señal original de longitud N , la cual se denota como $S_{0,n}$ en la escala inicial $m = 0$.

A partir de esta señal, se generan en cada iteración dos conjuntos de coeficientes: los coeficientes de aproximación ($S_{m,n}$) y los coeficientes de detalle ($T_{m,n}$). Los coeficientes de aproximación capturan las componentes de baja frecuencia de la señal, mientras que los coeficientes de detalle contienen la información de alta frecuencia correspondiente a los cambios rápidos o discontinuidades.

En cada nivel de descomposición, los coeficientes de aproximación se utilizan como entrada para la siguiente escala, permitiendo obtener una representación multi-nivel de la señal. Así, el proceso continúa hasta alcanzar la escala deseada m , donde la resolución temporal disminuye a medida que la resolución frecuencial aumenta.

Finalmente, la concatenación de todos los coeficientes obtenidos en los distintos niveles ($S_{m,n}$ y $T_{m,n}$) constituye el *vector de transformación wavelet en descomposición completa*, el cual describe la señal original en diferentes escalas o resoluciones.

Los coeficientes de aproximación en el índice de escala $m + 1$ se definen como [19],

$$S_{m+1,n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=0}^{N-1} C_{k-2n} S_{m,k} \quad (4.14)$$

En donde los coeficientes detallados se pueden determinar a partir de los coeficientes de aproximación b_k y de los coeficientes de aproximación $S_{m,k}$ de la siguiente forma :

$$T_{m+1,n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=0}^{N-1} b_{k-2n} S_{m,k} \quad (4.15)$$

en donde $1 \geq m_0 \geq M-1$ y el término M están relacionado con la longitud de la señal discreta N dada la expresión $N = 2^M$

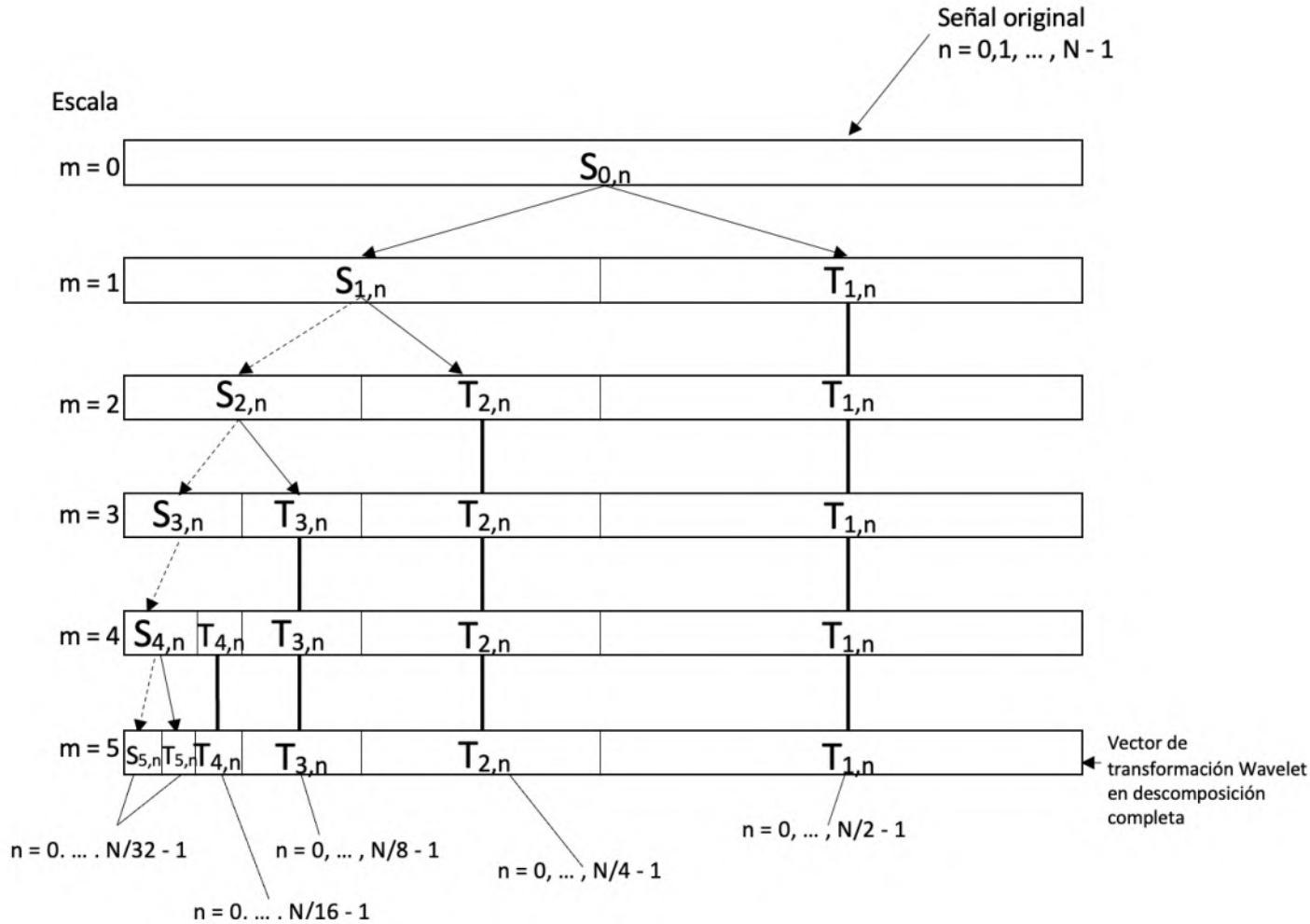


Figura 4.2: Diagrama del algoritmo de Mallat aplicado en Wavelet multi-resolución

Dada una señal continua $f(t)$ el análisis de multi-resolución Wavelet se realiza mediante una serie de transformaciones Wavelet a diferentes escalas y traslaciones (desplazamientos o cambios en la posición de la función wavelet a lo largo del dominio del tiempo) [20], [21].

Las bandas en las cuales se descompondrá la señal se determinan mediante la siguiente fórmula

$$\left[\frac{Fs}{2^{(k+1)}}, \frac{Fs}{2^k} \right] \quad (4.16)$$

en donde k es el número de banda que se está calculando y F_s es la frecuencia de muestreo. La banda de baja frecuencia se calcula como :

$$\left[0, \frac{Fs}{2^{(L+1)}} \right] \quad (4.17)$$

en donde f_s es la frecuencia de muestreo y L es el número de bandas totales que se propusieron para el análisis.

4.4.1. Energía y varianza

A continuación, se describe la forma como se determina la energía y varianza a partir de la transformada Wavelet discreta. Calcular la energía sirve identificar en qué niveles hay más información, detectar anomalías o eventos que ocurren en ciertas bandas de frecuencia. La varianza sirve para identificar los niveles con mayor variabilidad, lo que puede estar relacionado con eventos transitorios o ruido. La energía de una señal en el dominio Wavelet es la suma de los cuadrados de los coeficientes Wavelet. Representa la cantidad total de energía de la señal distribuida a través de las diferentes escalas j y posiciones k . Para una señal $x(t)$ con coeficientes Wavelet W_k , j la energía se calcula como :

$$E = \sum_j \sum_k |W_{j,k}|^2 \quad (4.18)$$

en donde W_j , k representan los coeficientes wavelet en la escala j y la posición k .

La varianza en el dominio Wavelet se calcula como la medida de la dispersión de los coeficientes Wavelet. Para cada escala j , la varianza se calcula como:

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{N_j} \sum_k (W_{j,k} - \bar{W}_j)^2 \quad (4.19)$$

en donde $\bar{W}_j$ representa el valor promedio de los coeficientes en la escala j y N_j es el número de coeficientes en esa escala. La varianza indica que tanto se desvían los coeficientes de su media en una escala particular.

4.5. Sumario

En este capítulo se abordó el proceso matemático fundamental que sustenta el procesamiento de señales eléctricas. Se presentaron los conceptos necesarios para comprender la distorsión armónica y supraarmónica, así como las herramientas de análisis en el dominio de la frecuencia, como la Transformada Discreta y Rápida de Fourier (DFT y FFT).

Posteriormente, se introdujo la Transformada Wavelet Discreta (DWT) y el Análisis Multiresolución (MRA), los cuales permiten estudiar las señales simultáneamente en los dominios del tiempo y la frecuencia. A través de formulaciones matemáticas y ejemplos gráficos, se mostraron los principios de descomposición y reconstrucción de señales utilizando wavelets.

Se destacó especialmente la importancia de los coeficientes de aproximación y de detalle, los cuales constituyen el núcleo del análisis multiresolución. Los coeficientes de aproximación representan las componentes de baja frecuencia y capturan la tendencia general o el comportamiento global de la señal, mientras que los coeficientes de detalle contienen las componentes de alta frecuencia, asociadas a cambios bruscos, transitorios o perturbaciones.

El estudio de estos coeficientes permite no solo identificar la energía distribuida por bandas de frecuencia, sino también localizar en el tiempo los eventos que originan la distorsión. En el contexto del análisis de señales eléctricas, esta característica es esencial para detectar y caracterizar armónicos y supra-armónicos de manera precisa.

En conclusión, este capítulo proporciona una base teórica sólida para la aplicación práctica del análisis wavelet en el procesamiento de señales, permitiendo una comprensión más profunda de los fenómenos de distorsión presentes en redes eléctricas modernas.

Capítulo 5

Casos de estudio

Los casos de estudio que se presentan en este capítulo son los siguientes:

- Caso Base: En este caso de estudio se analiza el contenido de frecuencias de los voltajes trifásicos de la red eléctrica de distribución sin la presencia de vehículos eléctricos.
- Caso 1: Para este caso de estudio se analizan las emisiones del vehículo eléctrico BMW modelo i3 conectado a la red eléctrica de potencia mediante un cargador nivel 2 de 7kW.
- Caso 2: En este experimento se recargan simultáneamente dos vehículos eléctricos de la marca Jac modelo e-Sei 1 y Jac E10x. Ambos vehículos eléctricos se recargan de la red eléctrica de potencia empleando cargadores nivel 2 de 7kW.

5.1. Caso base

En este caso de estudio se muestrearon las formas de onda del voltaje de la red de distribución en bajo voltaje usando una frecuencia de muestreo de 10,000,080Hz. Se elegió ese valor para la frecuencia de muestreo ya que es el el valor mayor en el que el dispositivo Analog Discovery Pro permite realizar un muestreo sin tener problemas ni pérdidas de datos, tras varias pruebas prácticas resultó la mejor opción además, este valor se adapta bien al rango operativo del Analog Discovery Pro y de los sensores de voltaje y corriente, asegurando que las mediciones no estén limitadas por la respuesta en frecuencia del sistema de medición y una frecuencia de muestreo de 10 MHz garantiza cumplir de sobra con el Teorema de Nyquist, evitando aliasing y permitiendo observar con alta resolución las componentes espectrales de 2kHz - 180 kHz.

Se capturó una ventana de tiempo equivalente a 12 ciclos completos de una forma de onda con una frecuencia de 60Hz. Se seleccionó un ciclo completo de las señales previamente muestreadas para aplicarle la transformada rápida de Fourier y determinar el espectro armónico de las señales en la red eléctrica antes que se conectaran los vehículos eléctricos a la estación de recarga. En la Figura 5.1 se aprecian dos ciclos de las formas de onda de voltaje trifásico de la red eléctrica, en donde se puede apreciar a simple vista que existe distorsión de las formas de onda.

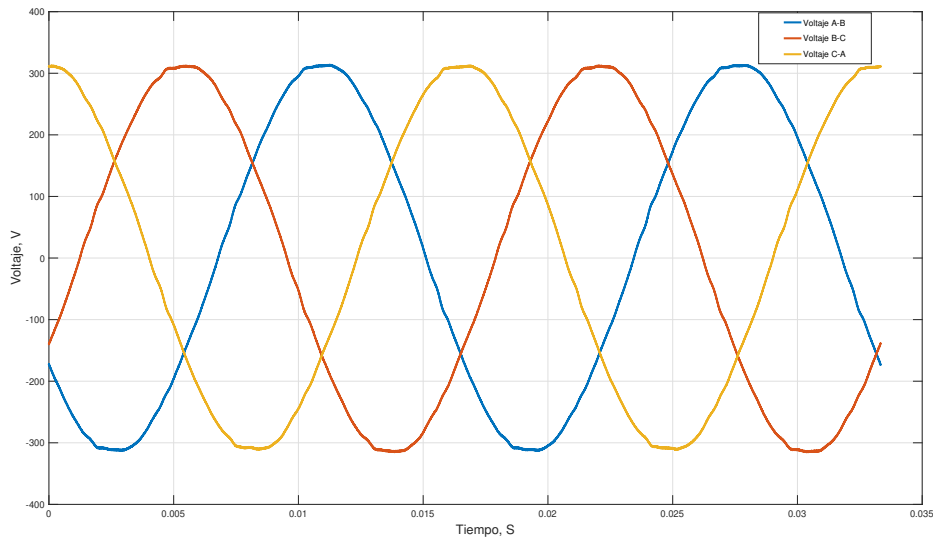


Figura 5.1: *Forma de onda en el tiempo de los voltajes entre fases de la red eléctrica.*

En la Tabla 5.1 se sintetizan los resultados de los voltajes de las fases A-B, B-C y C-A en términos de valores RMS, distorsión armónica total en el rango armónico, distorsión armónica total en el rango supra-armónico y el factor de distorsión propuesto en la Ecuación 4.2 Se puede observar que los valores RMS de los voltajes entre líneas son similares, con valores de 222.8683 V, 222.9399 V y 222.8805 V para los voltajes de A-B, B-C y C-A, respectivamente. En los tres voltajes el mayor contenido de componentes de frecuencia se concentra en el rango armónico y esto se puede visualizar también al analizar el factor de distorsión mostrando valores de 0.9898%, 0.9846% y 0.9897% para los voltajes de A-B, B-C y C-A respectivamente. El factor de distorsión cercano a la unidad indica que las componentes de frecuencia más importantes se alojan en el rango armónico.

Tabla 5.1: *Voltaje RMS y porcentaje de distorsión en las formas de Voltaje de A-B, B-C, y C-A*

Fases	VRMS	%TD	%THD	%TSHD	FD
A-B	222.87 V	0.91	0.90	0.13	0.99
B-C	222.94 V	0.86	0.84	0.15	0.98
C-A	222.88 V	1.00	0.99	0.14	0.99

5.1.1. Procesamiento con Transformada de Fourier

La Figura 5.2 muestra el espectro de frecuencias de los voltajes medidos entre las fases A-B. Se observa que la componente de frecuencia fundamental en cada figura se muestra incompleta en el eje de la amplitud, esto debido a que su amplitud es muy grande con respecto a la del resto de los componentes de frecuencia e impediría apreciar de forma clara al resto. Se puede apreciar que en el espectro armónico sobresalen las frecuencias 7(420Hz), 11(660Hz), 13(780Hz), 17(1020Hz), 19(1140Hz), 23(1380Hz), 25(1500Hz), 29(1740Hz), 31(1860Hz), 35(2010Hz) y 37(2220Hz). Resultados similares se observaron para los voltaje B-C y C-A.

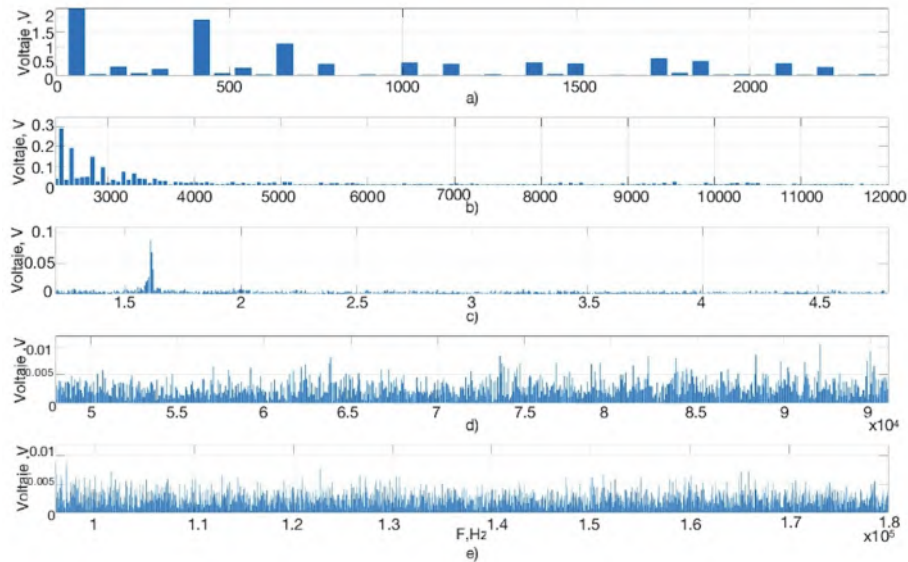


Figura 5.2: Espectro de frecuencia del voltaje A-B en el rango: a).- 0-2.4kHz, b).- 2.4kHz-12kHz, c).- 12kHz-48kHz, d).- 48kHz-96kHz y e).- 96kHz-180kHz.

Los armónicos de mayor magnitud que se detectaron en las señales de voltaje de la red eléctrica se pueden apreciar en la Tabla 5.2. Se observa que el voltaje medido entre las fases A-B tiene un componente fundamental correspondiente a 60Hz de 315.171 V pico, el armónico más grande encontrado está ubicado en la posición 7 correspondiendo a una frecuencia de 420Hz y una magnitud de 1.9308 V. Se detectaron dos componentes de frecuencia correspondientes a frecuencias de 16,080Hz y 16,140Hz los cuales se ubican en el rango supra-armónico. Por otro lado, el voltaje medido entre las fases B-C presentó una frecuencia fundamental de 60Hz con una magnitud de 315.263 V, el armónico de mayor magnitud es el número 7 correspondiente a una frecuencia de 420Hz y con una magnitud de 1.8838 V. Las frecuencias detectadas en el rango supra-armónico son a 16,080Hz y 16,140Hz, con magnitudes de 0.1175 V y 0.0903 V, respectivamente. Por su parte, el voltaje entre las fases C-A tiene una frecuencia fundamental de 60Hz con una magnitud de 314.137 V, como en las mediciones entre las otras fases el armónico de mayor magnitud fue el 7 con 2.0332 V y una frecuencia de 420Hz. En el rango supra-armónico se detectaron los componentes de frecuencia con magnitudes de 0.0680 V y 0.0452 V a las frecuencias de 16,080 y 16,140Hz.

Tabla 5.2: Componentes de frecuencia detectadas en los voltajes de línea-línea de la red eléctrica.

Voltaje de A-B		Voltaje de B-C		Voltaje de C-A	
Frecuencia Hz	Magnitud V	Frecuencia Hz	Magnitud V	Frecuencia Hz	Magnitud V
0	0.3288	0	1.1520	0	0.8363
60	315.171	60	315.263	60	314.137
300	0.2324	300	0.6750	300	0.6603
420	1.9308	420	1.8838	420	2.0214
660	1.1032	660	1.0620	660	1.3036
780	0.4074	780	0.7003	780	0.7517
1020	0.4481	1020	0.6285	1020	0.6422
1140	0.4418	1140	0.4000	1140	0.5660
2460	0.2928	2460	0.2276	2460	0.2054
2580	0.1926	2580	0.1638	2580	0.2002
16080	0.0883	16080	0.0994	16080	0.1175
16140	0.0685	16140	0.0846	16140	0.0452

5.1.2. Procesamiento con Análisis Wavelet Multi-resolución

En esta sección se aplica el análisis Wavelet multi-resolución (WMRA) a los voltajes de A-B, B-C y C-A usando los siguientes parámetros:

- Tipo de Wavelet: Daubechie db4
- No. de bandas: 11 bandas más una banda con el contenido de baja frecuencia
- Frecuencia de muestreo: 10,000,080Hz
- Ventana de muestreo: 12 ciclos de 60Hz

La Tabla 5.3 muestra el número de banda, el rango de frecuencias y el valor de la frecuencia en Hz que se definieron para este análisis. Se consideraron 11 bandas más la banda de baja frecuencia denotada como S11. Por lo tanto, el rango de frecuencias es de 0Hz - 5,000,040.0Hz.

Tabla 5.3: *Número de banda y valor de frecuencia para el análisis multi-resolución Wavelet*

Número de banda	Rango de frecuencia	Valor de frecuencia (Hz)
B1	$\frac{F_s}{2^{1+1}} - \frac{F_s}{2^1}$	2,500,020.0 – 5,000,040.0
B2	$\frac{F_s}{2^{2+1}} - \frac{F_s}{2^2}$	1,250,010.0 – 2,500,020.0
B3	$\frac{F_s}{2^{3+1}} - \frac{F_s}{2^3}$	625,005.0 – 1,250,010.0
B4	$\frac{F_s}{2^{4+1}} - \frac{F_s}{2^4}$	312,502.5 – 625,005.0
B5	$\frac{F_s}{2^{5+1}} - \frac{F_s}{2^5}$	156,251.3 – 312,502.5
B6	$\frac{F_s}{2^{6+1}} - \frac{F_s}{2^6}$	78,125.6 – 156,251.3
B7	$\frac{F_s}{2^{7+1}} - \frac{F_s}{2^7}$	39,062.8 – 78,125.6
B8	$\frac{F_s}{2^{8+1}} - \frac{F_s}{2^8}$	19,531.4 – 39,062.8
B9	$\frac{F_s}{2^{9+1}} - \frac{F_s}{2^9}$	9,765.7 – 19,531.4
B10	$\frac{F_s}{2^{10+1}} - \frac{F_s}{2^{10}}$	4,882.9 – 9,765.9
B11	$\frac{F_s}{2^{11+1}} - \frac{F_s}{2^{11}}$	2,441.4 – 4,882.9
S11	$0 - \frac{F_s}{2^{12}}$	0 – 2,441.4

La Figura 5.3 reporta la descomposición de la señal de voltaje de A-B original en 12 bandas usando el análisis Wavelet multiresolución. Se puede observar que las componentes de frecuencia de mayor magnitud se alojan en las bandas S11, B11 y B10, los cuales abarcan el rango de 0 - 9,765.9Hz. La banda S11 contiene al contenido de frecuencia en el rango armónico (0 - 2441.4Hz), mientras que las bandas B11 y B10 abarcan los rangos 2,441 Hz - 4,882.9 Hz y 4882.9 Hz - 9,756.9 Hz, respectivamente. Estas dos bandas ya abarcan el rango supra-armónico. La banda B10 es donde se aloja el mayor contenido de frecuencia en el rango supra-armónico de la señal de la red eléctrica, siendo además donde mejor se aprecian los cambios de frecuencia en el tiempo.

Por otro lado, se calculó la energía y la varianza por banda para la señal de voltaje de la red eléctrica. El cálculo de la energía permite entender cómo se distribuye la energía de la señal en diferentes escalas y frecuencias, siendo las bandas con mayor energía las que pueden representar las frecuencias dominantes. Por su parte, la varianza brinda información sobre cómo varían los valores de amplitud en diferentes escalas de frecuencia, siendo mayor donde se encuentra una mayor energía por banda. Las unidades de la varianza y la energía por banda se encuentran directamente relacionadas con las unidades de la señal original es decir, si se analizan señales de voltaje las unidades de la varianza y energía por banda es V^2 y si es corriente las unidades serán A^2 .

Los resultados de la energía y la varianza por banda para las señales de voltaje de A-B, B-C y C-A se muestran en la Tabla 5.4. Los resultados indican que para el voltaje A-B la banda S11 posee la mayor energía y varianza. La segunda banda donde la energía es mayor es la banda B11, teniendo un valor de energía de 47.74 y una varianza de 0.000022372, mientras que la banda B10 que fue donde se alojó la mayoría de los componentes de frecuencia en el rango supra-armónico tuvo una energía de 1.08 y una varianza de 0.000000543. Se puede observar que las bandas B5, B4, B3, B2 y B1 presentan valores grandes de energía y varianza pero una forma de onda que no presenta fluctuaciones en el tiempo. Esto es debido a que dichas

bandas se encuentran en un rango de frecuencia de 156,251.3Hz - 5,000,040Hz, lo cual está muy por encima del ancho de banda con el que operan los sensores el cual es de 200kHz, por lo tanto, los resultados reportados en las bandas de la B1 a B5 se consideran no confiables. Los voltajes de B-C y de C-A son de características similares al voltaje de A-B mencionado previamente. Las formas de onda del análisis multiresolución wavelet se muestran en las Figuras 5.3, 5.4 y 5.5. En esta parte se presentan los resultados obtenidos del Análisis Multiresolución Wavelet (AMW) aplicado a las señales de voltaje entre fases del sistema eléctrico. El análisis se realizó utilizando la función wavelet por defecto de MATLAB (correspondiente a la familia Daubechies 4, db4), considerando once bandas de frecuencia: diez bandas de detalle (B_1 a B_{10}) y una banda de baja frecuencia (B_{11}). El objetivo del estudio es identificar la presencia y distribución temporal de los suprarmonicos presentes en las señales de voltaje entre fases.

En la señal de voltaje entre las fases A-B se observa un comportamiento senoidal dominante con pequeñas oscilaciones de alta frecuencia superpuestas, indicativas de la presencia de componentes armónicas y suprarmonicas. En las bandas B_1 a B_3 se presentan fluctuaciones rápidas con alta densidad espectral, asociadas a frecuencias elevadas que corresponden principalmente a ruido eléctrico y perturbaciones transitorias. Las bandas intermedias B_4 a B_6 contienen la mayor parte del contenido suprarmonico, mostrando una energía constante en el tiempo, lo que sugiere una distorsión periódica estable en la red. Finalmente, las bandas superiores B_7 a B_{10} presentan oscilaciones de menor frecuencia, mientras que la banda de baja frecuencia B_{11} conserva la forma senoidal de la señal fundamental de 60 Hz. Este resultado evidencia que el par de fases A-B presenta un contenido suprarmonico moderado y estable, distribuido principalmente entre las bandas B_4 a B_6 .

En la señal de voltaje entre las fases B-C, la forma senoidal fundamental se mantiene; sin embargo, se observa una mayor amplitud de oscilaciones de alta frecuencia, lo que sugiere un nivel más alto de distorsión suprarmonica. Las bandas B_1 y B_2 muestran picos de alta frecuencia con energía ligeramente superior respecto al caso anterior, evidenciando una mayor actividad en el rango de frecuencias altas, posiblemente asociada a la conmutación de cargas electrónicas o inversores. En las bandas B_4 a B_6 , el contenido energético es más denso y sostenido, indicando la presencia de suprarmonicos persistentes. En las bandas superiores B_7 a B_{10} , la señal tiende a estabilizarse, y la banda de baja frecuencia B_{11} vuelve a representar la forma fundamental senoidal. El análisis sugiere que el par B-C es el más afectado por la distorsión suprarmonica del sistema, siendo las bandas intermedias (B_4 - B_6) las más representativas para el estudio del espectro no lineal.

La señal entre las fases A-C muestra un comportamiento más uniforme en el tiempo, con una menor amplitud de oscilaciones de alta frecuencia respecto a las dos anteriores. Las bandas B_1 a B_3 presentan energía de alta frecuencia, aunque con menor intensidad, lo cual sugiere que esta fase posee menor contaminación por ruido o transitorios rápidos. Las bandas B_4 a B_6 , donde típicamente se ubican los suprarmonicos, exhiben una amplitud más baja y menos dispersa que en los casos A-B y B-C, indicando una menor presencia de distorsión armónica extendida. Las bandas de menor frecuencia (B_7 a B_{10}) y la banda de baja frecuencia B_{11} reflejan claramente la señal fundamental, manteniendo una buena estabilidad temporal. Este resultado permite concluir que la señal entre A-C es la más limpia en términos de contenido suprarmonico, presentando una menor densidad energética en las bandas intermedias del AMW.

El análisis conjunto de las tres señales muestra que las bandas B_4 a B_6 son las más representativas para el estudio de los suprarmonicos. El par B-C presenta la mayor amplitud de distorsión, seguido por A-B, mientras que A-C muestra el comportamiento más estable y con menor contenido suprarmonico. El uso del Análisis Multiresolución Wavelet permitió distinguir con claridad las zonas temporales donde se concentran los armónicos superiores, demostrando su utilidad frente a métodos puramente espectrales como la FFT.

Con los datos de energía y varianza por banda así como el apoyo visual resultante de graficar las formas de onda del MRA puede identificarse cual o cuales son las bandas en las que se alojan las componentes de frecuencia dominantes y así seleccionar cual banda es de interés para estudiar.

Tabla 5.4: *Energía y varianza por banda para el voltaje de A-B , B-C y C-A*

Banda	Voltaje A-B (V^2)		Voltaje B-C (V^2)		Voltaje C-A (V^2)	
	Energía	Varianza	Energía	Varianza	Energía	Varianza
S11	39,733,711.60	19.86667354	39,768,685.18	19.88325069	39,393,098.60	19.69615040
B11	47.74	0.000022372	32.57	0.000016285	33.12	0.000016562
B10	1.08	0.000000543	1.02	0.000000511	0.79	0.000000396
B9	4.59	0.000002293	6.66	0.000003332	7.41	0.000003705
B8	1.15	0.000000573	1.48	0.000000740	1.45	0.000000727
B7	1.48	0.000000741	1.71	0.000000859	1.66	0.000000832
B6	3.12	0.000001560	3.75	0.000001873	3.62	0.000001810
B5	5.64	0.000002822	6.14	0.000002068	6.21	0.000003104
B4	9.50	0.000004751	9.36	0.000004679	9.38	0.000004692
B3	7.16	0.000003578	6.65	0.000003323	6.69	0.000003343
B2	5.31	0.000002655	5.10	0.000002600	5.23	0.000002615
B1	12.95	0.000006473	12.80	0.000006399	12.93	0.000006452

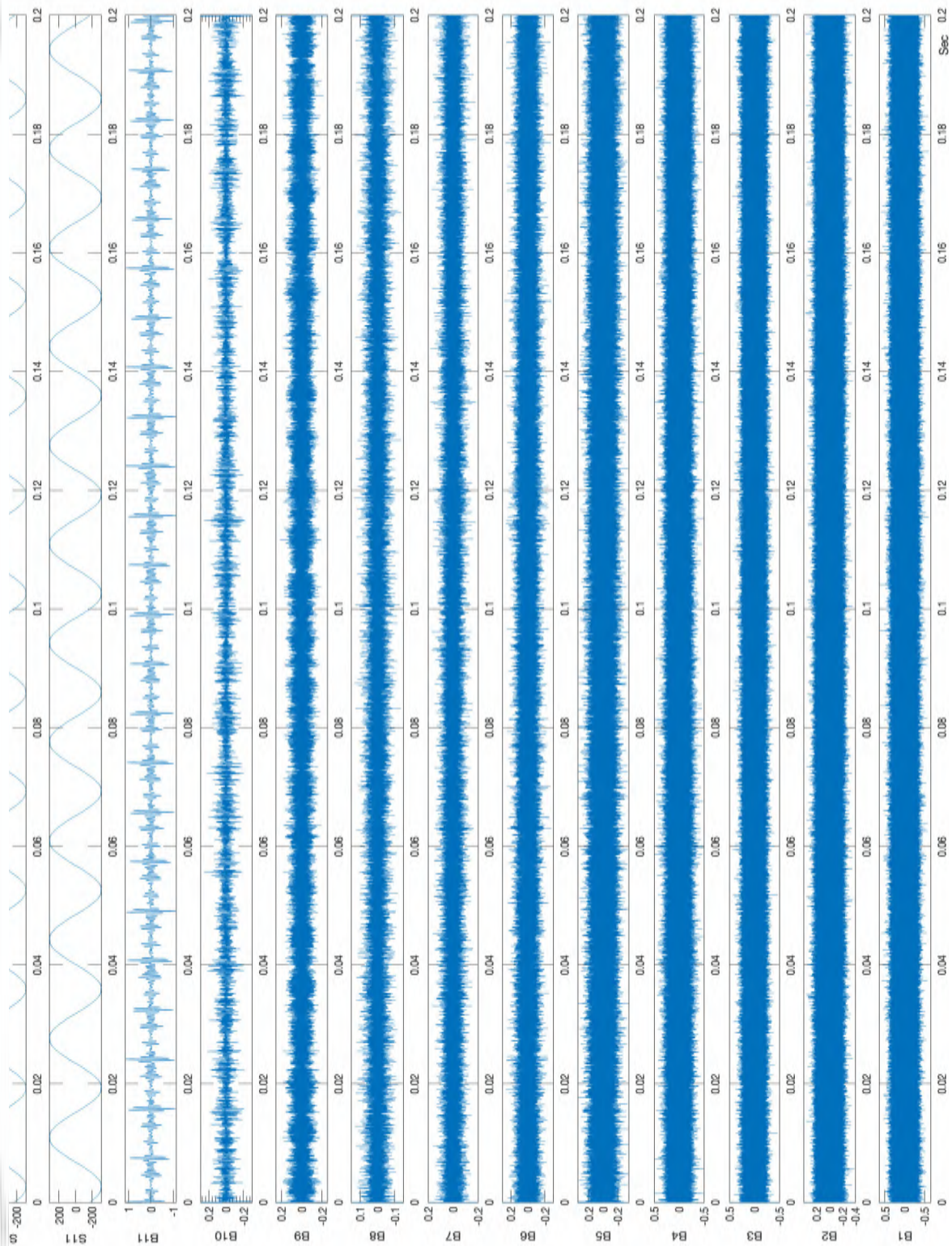


Figura 5.3: *Análisis Wavelet multi-resolución del voltaje A-B.*

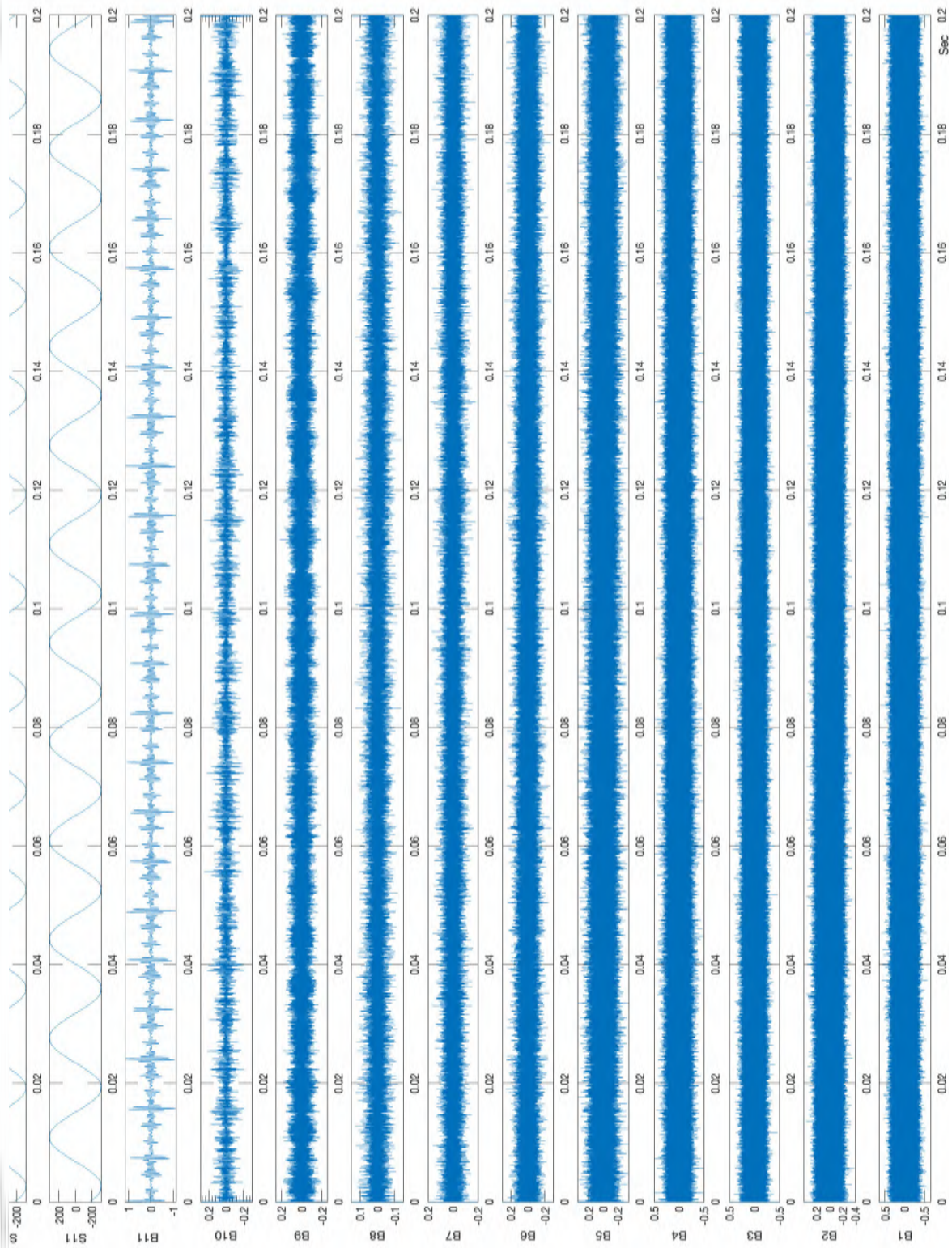


Figura 5.4: *Análisis Wavelet multi-resolución del voltaje B-C.*

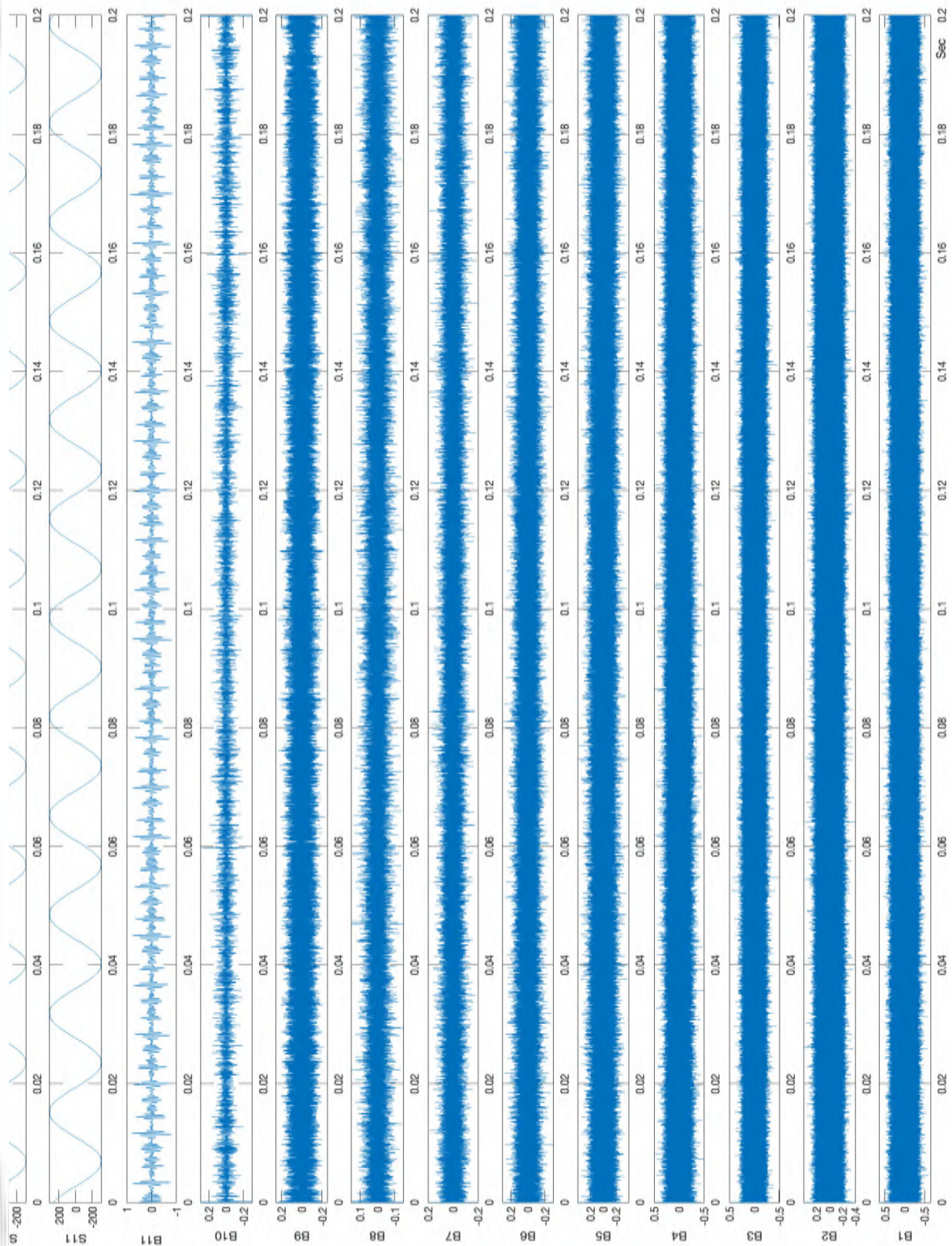


Figura 5.5: *Análisis Wavelet multi-resolución del voltaje C-A.*

5.2. Caso 1: Recarga de un vehículo eléctrico

En este caso de estudio se estudia la recarga de un vehículo eléctrico con un cargador nivel 2 abordo del vehículo y una estación de recarga externa alimentada por la red eléctrica de distribución. El proceso de muestreo de las variables eléctricas durante el proceso de recarga de vehículo eléctrico de baterías se realiza con las siguientes características:

- Frecuencia de muestreo: 10,000,080Hz.
- Muestras por ciclo: 166,668 muestras.
- Ventana de muestreo: 12 ciclos de 60Hz.

La Figura 5.6 presenta las formas de onda en el dominio del tiempo del voltaje entre fases que alimenta la estación de recarga y la corriente demandada por parte del cargador del vehículo eléctrico. Se puede apreciar que la corriente demandada por el cargador se encuentra en fase con el voltaje y presenta una forma de onda muy cercana a una senoide. Además, se puede observar una oscilación de alta frecuencia en la forma de onda de la corriente. Por su parte, la Figura 5.7 presenta el diagrama de fase del voltaje versus la corriente. Se puede apreciar en la Figura 5.7 que el voltaje y la corriente en el cargador 1 describen una relación en la forma de onda casi lineal con ligeras ondulaciones. Esto sugiere que el vehículo o el cargador están utilizando una estrategia de control para la regulación de corriente o protección de batería.

La Figura 5.8 describe las corrientes trifásicas de la red eléctrica que alimenta el cargador de vehículos eléctricos. Se puede apreciar que el cargador demanda una corriente en la fase C y una corriente en la fase A defasada 180° respecto de la fase C. La corriente en la fase B es cero debido a que el cargador se alimenta únicamente con dos fases. Las corrientes de la fase C y A se encuentran en contrafase ya que el cargador 1 se alimenta con el voltaje entre fases C y A. Como consecuencia el nivel de desbalance de las corrientes reportadas en la Figura 5.8 es del 98,03 %

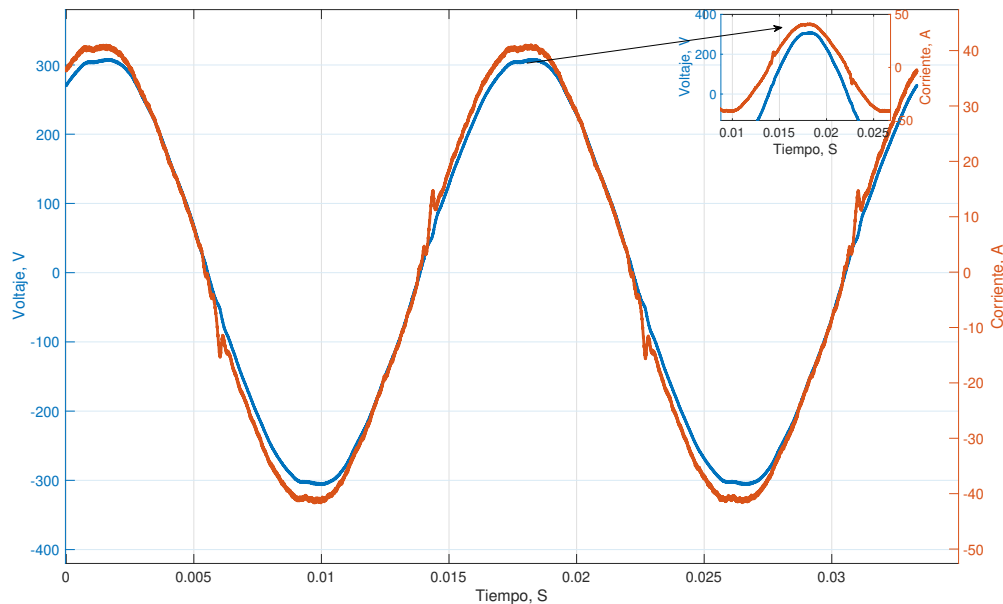


Figura 5.6: Formas de onda en el tiempo de las señales de corriente y voltaje correspondientes al cargador 1

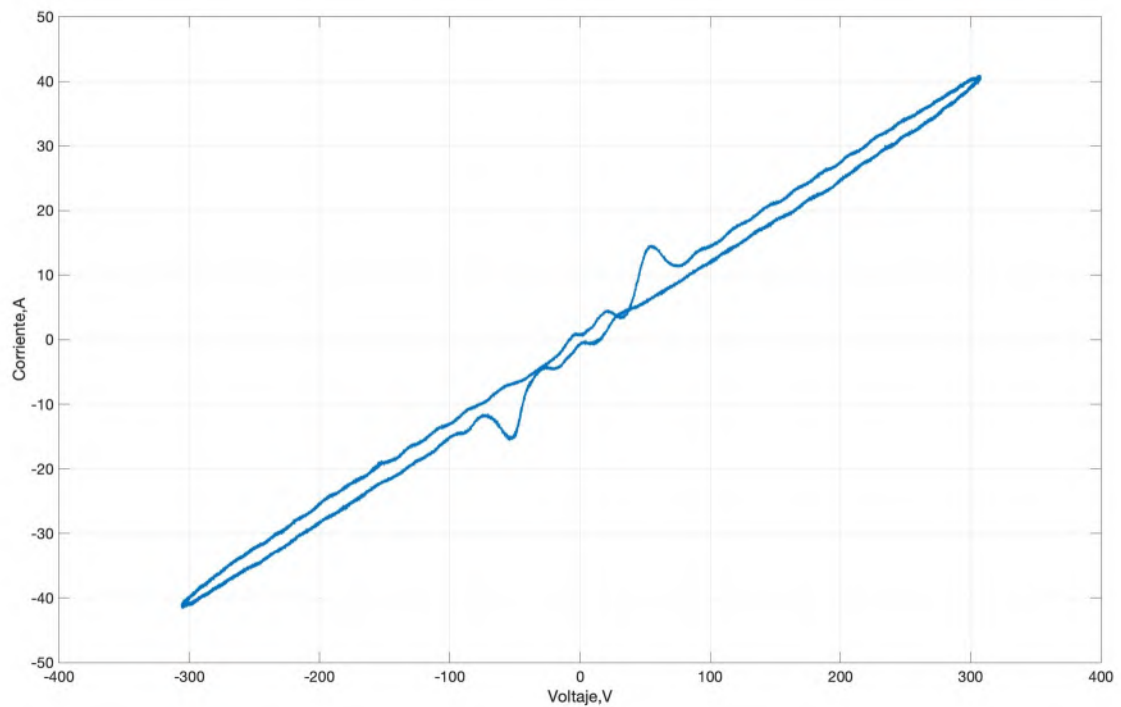


Figura 5.7: Diagrama de fase de voltaje-corriente para el cargador nivel 2.

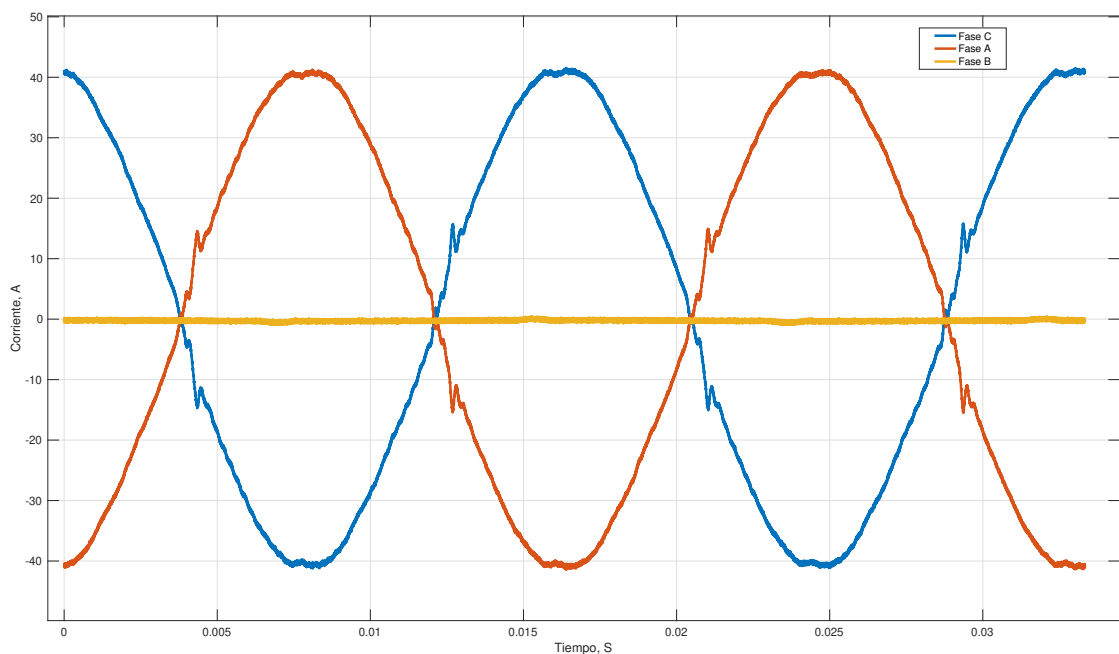


Figura 5.8: Formas de onda en el tiempo de las corrientes en las fases A, B y C.

5.2.1. Procesamiento con Transformada de Fourier

En esta sección se presenta el procesamiento de las formas de onda de voltaje y corriente usando la Transformada de Fourier. Se procesó un ciclo completo de las señales de corriente y voltaje correspondiente al cargador. Se utilizó una frecuencia de muestreo de 10,000,080Hz, lo cual corresponde a 166,668 muestras

para una forma de onda de 60Hz. Las Figuras 5.9 y 5.10 muestran el espectro armónico de las formas de onda de voltaje y corriente correspondientes al cargador 1.

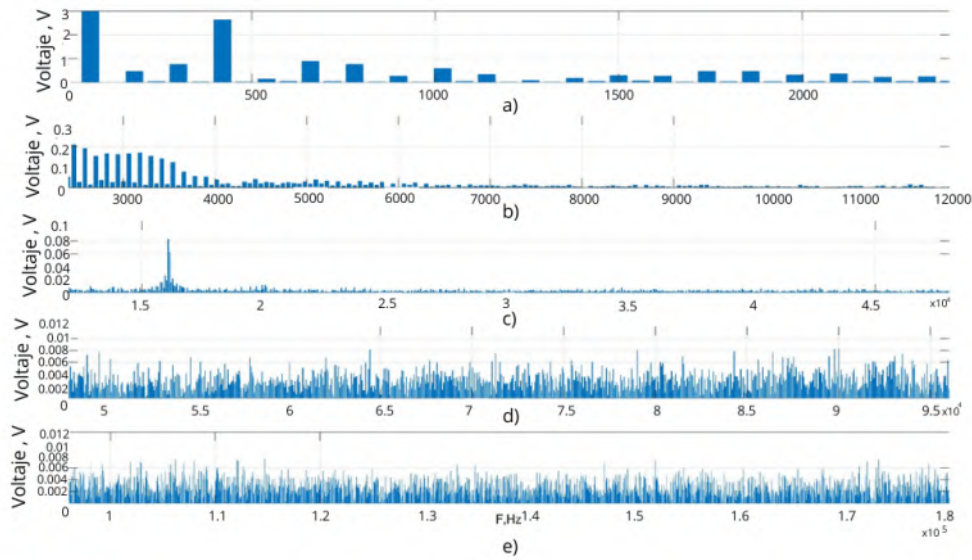


Figura 5.9: Espectro de frecuencia del voltaje en el rango: a). - 0-2.4kHz, b). - 2.4kHz-12kHz, c). - 12kHz-48kHz, d). - 48kHz-96kHz y e). - 96kHz-180kHz.

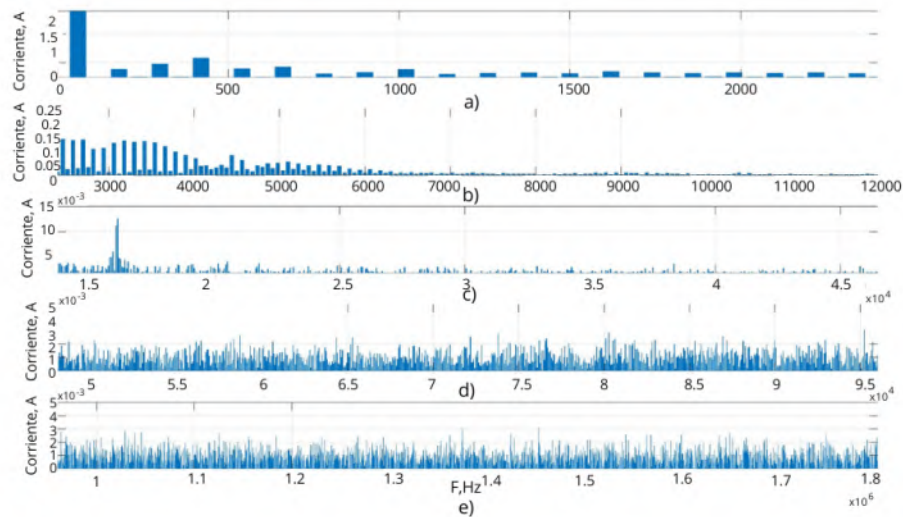


Figura 5.10: Espectro de frecuencia de la corriente en el rango: a).- 0-2.4kHz, b).- 2.4kHz-12kHz, c).- 12kHz-48kHz, d).- 48kHz-96kHz y e).- 96kHz-180kHz

En las Figuras 5.9 y 5.10 se observan los espectros de frecuencia del voltaje de C-A y la corriente en la fase C, respectivamente. Se observa que la componente de frecuencia cero muestra valores de amplitud de 0.568 V y 0.429 A para voltaje y corriente, respectivamente. Se puede apreciar que el armónico de mayor magnitud en el voltaje y la corriente es el séptimo, con amplitudes de 2.6450 V y 0.6734 A, respectivamente. Además, las Figuras 5.9 y 5.10 indican la presencia de frecuencias supra-armónicas en el rango de 2.4 kHz a 6.0 kHz, las cuales se ubican ya en el rango supra-armónico. Además, las Figuras 5.9 (c) y 5.10 (c) indican la presencia de una componente de frecuencia supra-armónica de 16,080 Hz con magnitudes de 0.0113 A y 0.0825 V para la corriente y el voltaje, respectivamente. No se aprecian componentes de frecuencia significativas en las Figuras 5.9 y 5.10 en los incisos (d) y (e). La Tabla 5.5 sintetiza las componentes de frecuencia más relevantes en términos de su magnitud.

Tabla 5.5: Componentes de frecuencia detectadas en los voltajes de línea-línea y la corriente del cargador.

Corriente en la fase C		Voltaje de C-A	
Frecuencia, Hz	Magnitud, A	Frecuencia, Hz	Magnitud, V
0	0.429	0	0.568
60	41.199	60	309.122
300	0.4635	300	0.7710
420	0.6734	420	2.6450
660	0.3520	660	0.8915
780	0.1161	780	0.7746
1020	0.2837	1020	0.5865
1140	0.1020	1140	0.3431
2460	0.1366	2460	0.2093
2580	0.1315	2580	0.1935
16080	0.0113	16080	0.0825
16140	0.0178	16140	0.0625

La Tabla 5.6 sintetiza los parámetros de calidad de la energía en el cargador. Se definen las potencias :

- Potencia aparente S (kVA)
- Potencia activa P (kW)
- Potencia reactiva Q (kVAR)
- Potencia de distorsión D (kVAD)
- Factor de potencia FP

Se puede apreciar que el valor RMS del voltaje y corriente es de 218.6648 V y 29.2482 A, respectivamente. La distorsión armónica total es $THD_v = 1,0608\%$ y $THD_i = 3,0581\%$. Se puede apreciar que el nivel de distorsión de voltaje se encuentra por debajo del 8% recomendado por el IEEE std, 519-2014 [1]. De forma similar, el porcentaje de distorsión armónica en la corriente es menor que el límite sugerido de 5% en el mismo estándar. Por su parte, las potencias aparente, activa, reactiva y de distorsión son de 6.3957 kVA, 6.3870 kW, 0.2597 kVAR y 0.20678 kVAD, respectivamente. El factor de potencia es de 0.9987, el cual es prácticamente unitario.

Tabla 5.6: *Parámetros de calidad de la energía del cargador 1.*

Voltaje		Corriente		Potencias				Factor de potencia
RMS	%THD	RMS	%THD	S, kVA	P, kW	Q, kVAR	D, kVAD	FP
218.6648	1.0608	29.2484	2.8301	6.3956	6.3870	0.2597	0.20678	0.9987

Con el propósito de cuantificar la contribución de las componentes de frecuencia en el rango armónico y supra-armónico a la distorsión armónica total, en la Tabla 5.7 se reportan los niveles de distorsión calculados de forma independiente. Para este estudio se definió el rango armónico de 0 a 2400Hz, lo cual corresponde a los primeros 40 armónicos. Por su parte, el rango supra-armónico se definió de 2.4kHz a 180kHz, es decir, del armónico 40 al armónico 3000. Los resultados reportados en la Tabla 5.7 indican que el porcentaje de distorsión armónica y supra-armónica para el voltaje es de 1.0608% y 0.1949%. De forma similar el valor de la corriente en el rango armónico y supra-armónico es de 2.8301% y 1.1587%, respectivamente. Como consecuencia, se puede observar que el factor de distorsión para el voltaje y la corriente es de 0.9836 y 0.9254, respectivamente. Se aprecia que el voltaje se encuentra más cercano a la unidad que la corriente, lo cual indica que el contenido de frecuencia en el voltaje se aloja primordialmente en rango armónico mientras que la corriente en el rango supra-armónico presenta un nivel de distorsión mayor que en el voltaje.

Tabla 5.7: *Porcentaje de distorsión armónica y supra-armónica total para voltaje y corriente en el cargador 1.*

Voltaje			Corriente		
% THD	% TSHD	FD	% THD	% TSHD	FD
1.0608	0.1949	0.9836	2.8301	1.1587	0.9254

5.2.2. Procesamiento Con Análisis Wavelet multi-resolución

Los resultados del análisis multi-resolución wavelet para el caso 1 se muestran en esta sección, considerando los mismos parámetros que en el caso base. La Tabla 5.3 muestra los rangos de frecuencia para las 11 bandas definidas en este análisis. En la Figura 5.11 se aprecia que las principales componentes de frecuencia en la señal de voltaje se alojan en las bandas B10, B11 y S11, las cuales abarcan el rango de frecuencias de 0-9,765.7Hz. La banda B11 aloja el mayor contenido supra-armónico de la señal, el cual corresponde a un rango de frecuencia de 2441.426Hz – 4882.885Hz, lo cual se ubica ya dentro del rango supra-armónico.

Los resultados obtenidos de la varianza y energía por banda para la señal de voltaje se reportan en la Tabla 5.8. Analizando los resultados, se puede determinar que la energía de la señal se concentra en la banda S11 y es también en donde la varianza presenta su mayor valor debido a que la banda S11 contiene la

mayor parte de la información de la señal original, es decir, en ella se aloja la señal con el menor contenido de frecuencia armónica. Las bandas 11 y 10 tienen un valor de energía importante, siendo de 77.3014 y 4.7997 además de contar con valores grandes de varianza en comparación con otras señales, siendo estas bandas donde se alojan los componentes de frecuencia más importantes en el rango supra-armónico en la señal de voltaje. Las bandas B5, B4, B3, B2 y B1 corresponden a un rango de frecuencia de 156,251.3Hz - 5,000,040.0Hz, presentan valores significativos de energía y varianza pero no se consideran adecuados dichos resultados debido a las limitaciones de ancho de banda de los sensores.

La Figura 5.12 presenta el análisis Wavelet multi-resolución para la corriente. Se puede apreciar que las componentes de frecuencia más relevantes se alojan en las bandas B9, B10, B11 y S11, las cuales abarcan el rango de frecuencia de 0-19,531.4Hz. La banda con mayor amplitud es también la B11, correspondiendo al rango supra-armónico 2.4kHz - 4.8kHz. Además, se nota que la forma de onda de B11 es variante en el tiempo. Se puede apreciar que el análisis wavelet multi-resolución permite apreciar instantes de tiempo en donde varía la amplitud de la señales alojadas en las diferentes bandas, lo cual permite comprobar que las componentes de frecuencia alojadas en el rango supra-armónico son variantes en el tiempo.

Los resultados reportados en la Tabla 5.9 en términos de energía y varianza indican que la mayor parte de la energía se encuentra en la banda S11, siendo también la banda con mayor varianza debido a que presenta la amplitud total de la señal. Las bandas B11, B10 y B9 son la bandas con mayor energía y con valores de varianza mayores a las de otras bandas. Además, dichas bandas muestran formas de onda en el tiempo en las que se observan oscilaciones en instantes de tiempo específicos. Las bandas B11, B10 y B9 presentan valores de energía de 326.1476, 47.3361 y 2.8570 y de varianza de 0.000163072601253, 0.000023667885623 y 0.000001428518441, respectivamente. De igual forma que en el caso anterior, las últimas cinco bandas corresponden a resultados no confiables dadas las limitaciones de ancho de banda de los sensores usados en esta tesis.

Tabla 5.8: *Valores de energía y varianza para la señal de voltaje de C-A.*

Voltaje C-A		
Banda	Energía	Varianza
S11	38,237,701.38	19.118434342637304
B11	77.3014	0.000038650439117
B10	4.7997	0.000002399871513
B9	4.2845	0.000002142269076
B8	1.200	0.000000600022595
B7	1.6075	0.000000803763295
B6	3.5863	0.000001792180609
B5	6.2600	0.000003130004645
B4	9.4692	0.000004734567949
B3	6.7063	0.000003353131453
B2	5.2594	0.000002629725855
B1	13.0190	0.000006509482470

Tabla 5.9: *Valores de energía y varianza para la señal de corriente en la fase C*

Corriente en la fase C		
Banda	Energía	Varianza
S11	4,269,797.71	2.134649096047858
B11	326.1476	0.000163072601253
B10	47.3361	0.000023667885623
B9	2.8570	0.000001428518441
B8	0.8554	0.000000427714819
B7	1.3075	0.000000653757673
B6	2.9046	0.000001452336132
B5	5.7584	0.000002884193615
B4	9.6455	0.000004823241481
B3	7.2059	0.000003602931727
B2	13.2315	0.000002679072036
B1	5.3581	0.000006615725727

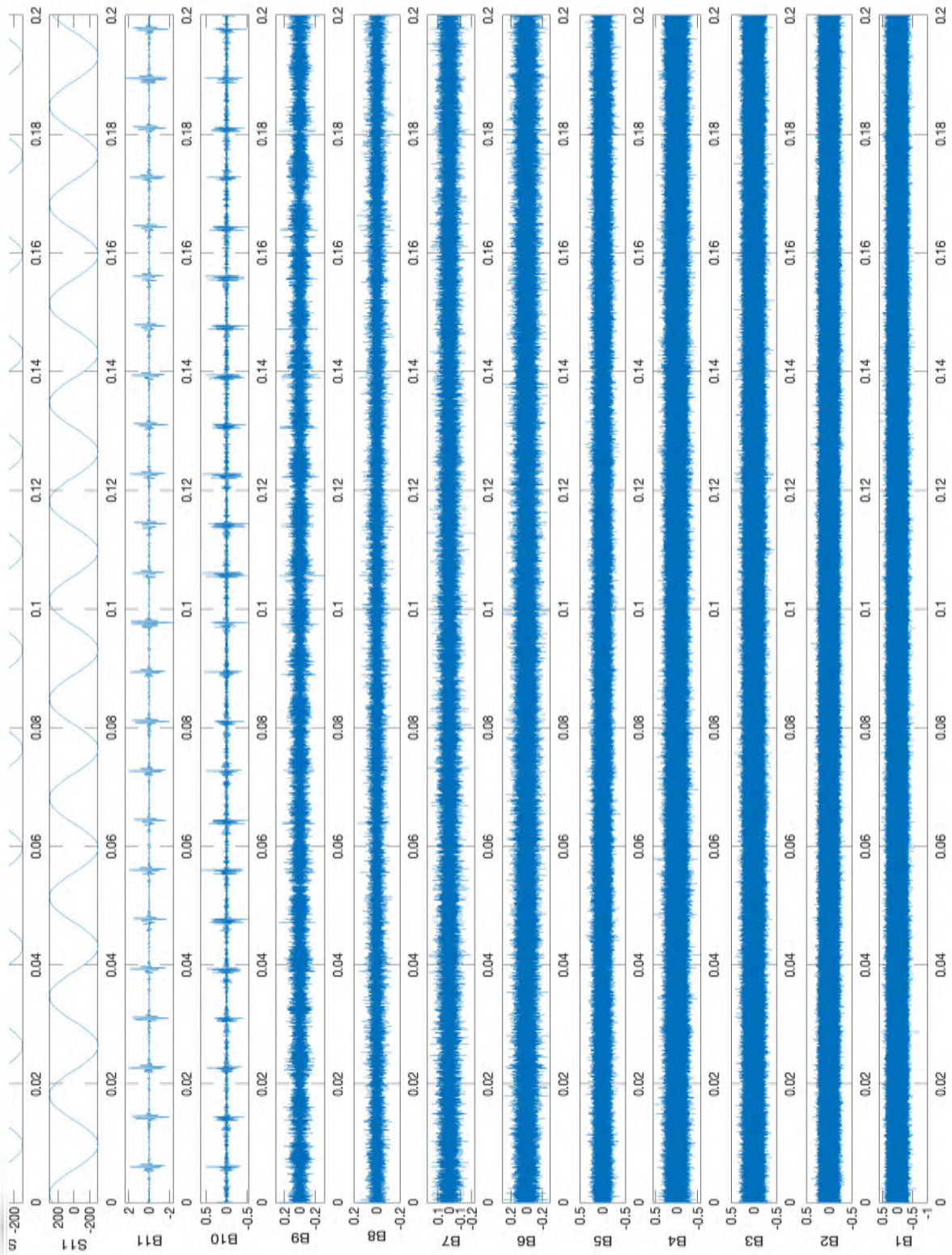


Figura 5.11: *Análisis Wavelet multi-resolución del voltaje C-A.*

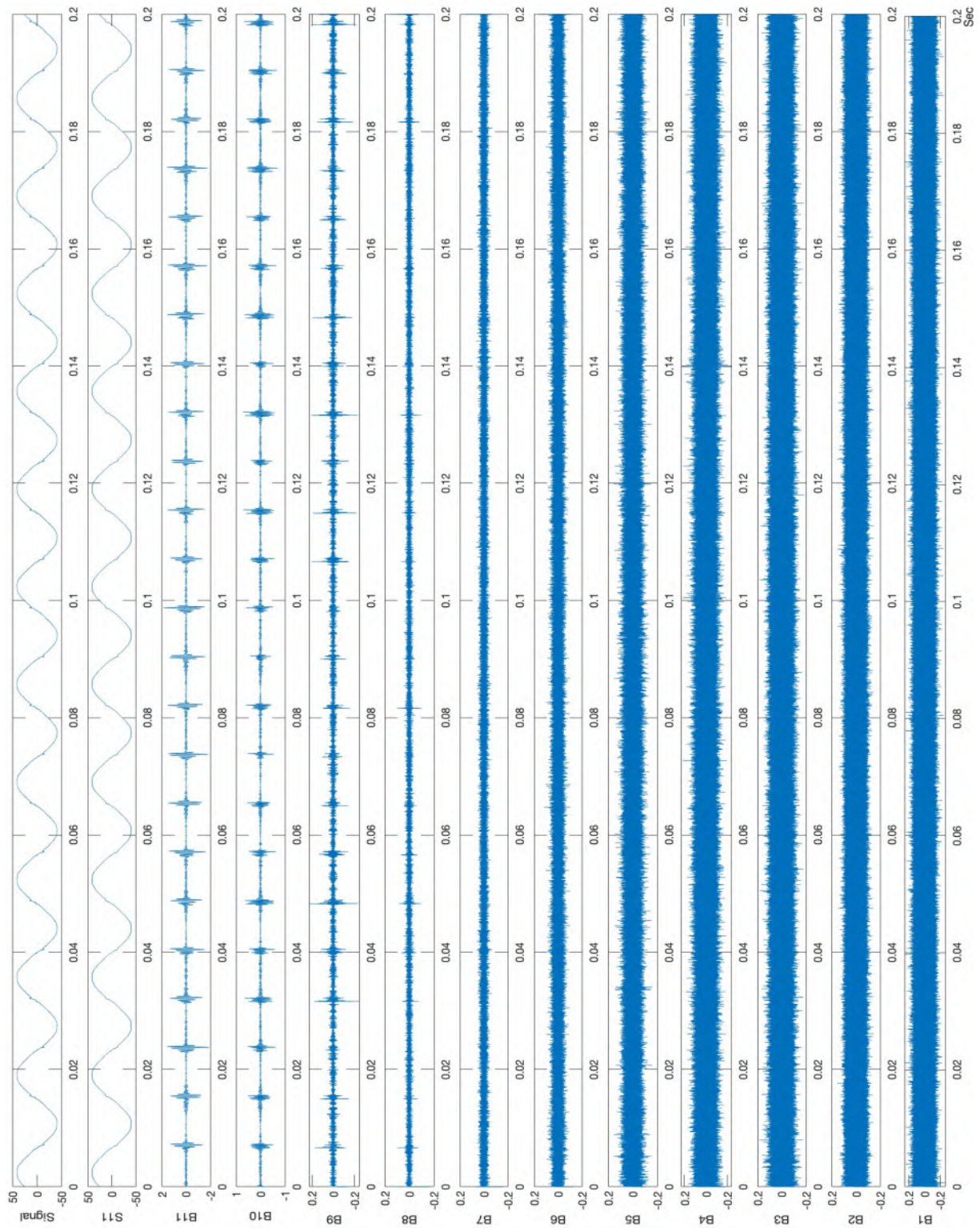


Figura 5.12: Análisis Wavelet multi-resolución de la corriente en la fase C.

A partir de los resultados reportados previamente, se puede identificar que la banda B11 en el voltaje de C-A, y corriente en la fase C es donde alojan el mayor contenido de frecuencia en el rango supra-armónico. Para profundizar en la información de la banda 11 se elaboró un escalograma para cada señal lo cual es una representación gráfica que muestra cómo varía la energía de una señal en diferentes escalas o frecuencias a lo largo del tiempo. El escalograma se obtiene aplicando una transformada wavelet continua (CWT) a cada señal. El escalograma permite identificar las componentes de frecuencia supra-armónica y en que momento del tiempo aparecen.

El escalograma para las señales de voltaje y corriente se muestran en las figuras 5.13 y 5.14 respectivamente. En la figura 5.13 se detectaron componentes de frecuencia de al rededor de 4800 Hz, los de mayor magnitud (denotados en una intensidad más amarilla) aparecieron alrededor de 25 ms, 55 ms 75 ms, 140 ms y 155 ms. Por otro lado, para la señal de corriente mostrada en la figura 5.14 los componentes de mayor intensidad situados en un rango de frecuencia de entre 4880 Hz y 4800 Hz aparecieron en al rededor de 40 ms, 50 ms, 110 ms, 120 ms, 175 ms y 185 ms.

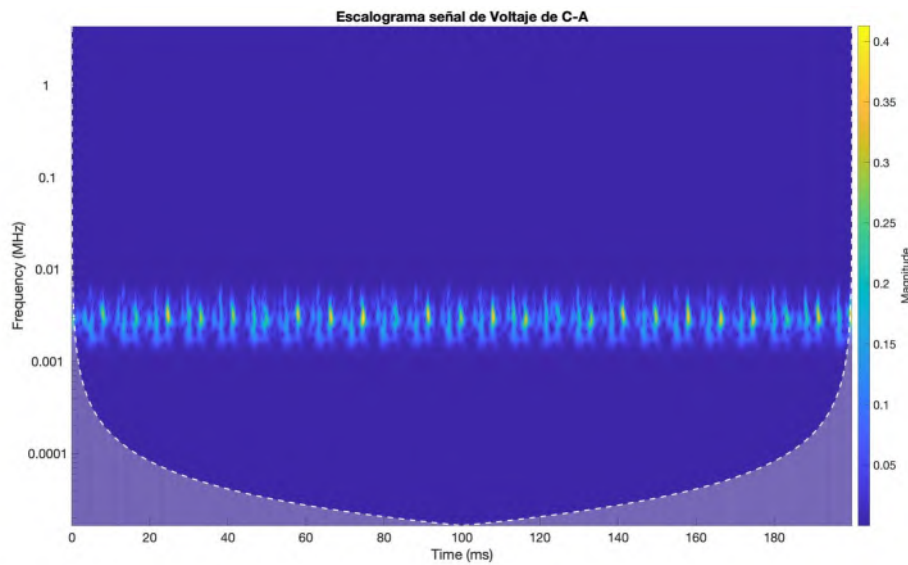


Figura 5.13: Escalograma de la banda B11 de la señal de voltaje de C-A

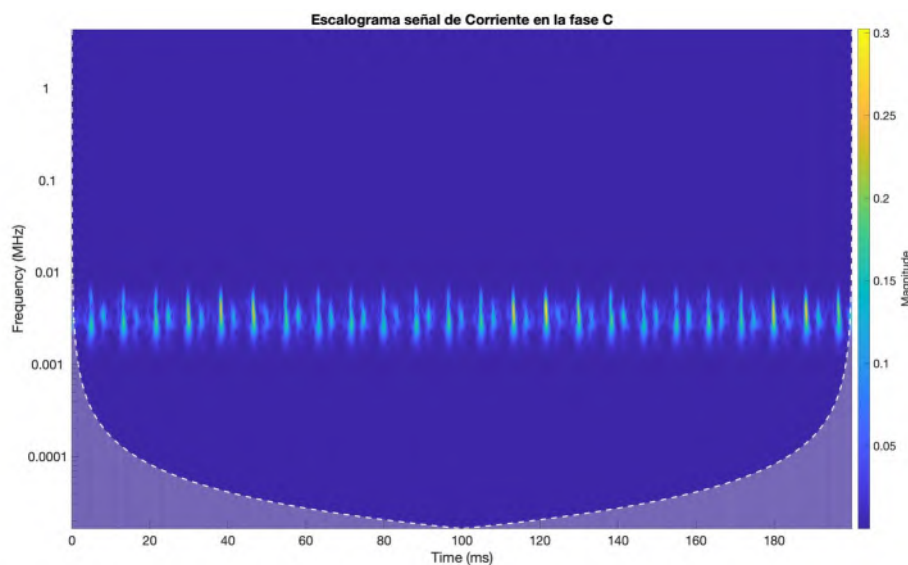


Figura 5.14: Escalograma de la banda B11 de la señal de corriente de la fase C

5.3. Caso 2: Dos vehículos eléctricos

En este caso de estudio se evalúa el impacto en la red eléctrica de distribución debido a la recarga simultánea de dos vehículos eléctricos. Se realizaron tres mediciones durante el proceso de recarga de los dos vehículos eléctricos con el propósito de identificar los cambios en el espectro de frecuencias y el momento cuando ocurren para voltajes y corrientes debido a los ajustes que realizan los controladores de los cargadores de los vehículos eléctricos. En este capítulo se analizarán los resultados correspondientes a la primera medición, los resultados de las otras dos mediciones se reportan en los apéndices C y D. El proceso del muestreo de las variables eléctricas se realiza con las siguientes características:

- Frecuencia de muestreo: 10,000,080Hz.
- Muestras por ciclo: 166,668 muestras.
- Ventana de muestreo: 12 ciclos de 60Hz.

La Figura 5.15 muestra la forma de onda de las corrientes trifásicas que alimentan la estación de recarga de vehículos eléctricos. Se puede apreciar que las corrientes trifásicas son altamente desbalanceadas tanto en amplitud como en defasamiento. Obsérvese que las corrientes de las fases B y C representan las corrientes demandadas por los cargadores 2 y 1, respectivamente. Por su parte, la corriente en la fase A es compartida por ambos cargadores. Mientras que las corrientes de las fases B y C presentan un valor pico alrededor de 40 A y un defasamiento entre sí de aproximadamente 60 grados, la corriente de la fase A presenta un valor pico de 71 A y tiene un ángulo de defasamiento de 150 grados adelantado respecto a la fase B. Por lo tanto, el nivel de desbalance de las corrientes trifásicas es del 22.67 %. Por otra parte, se puede apreciar la distorsión en las formas de onda en el tiempo de las corrientes trifásicas. La Figura 5.16 presenta los voltajes trifásicos de la red eléctrica de distribución. A simple vista se puede apreciar que la distorsión es baja y el desbalance es del 0.1528 %.

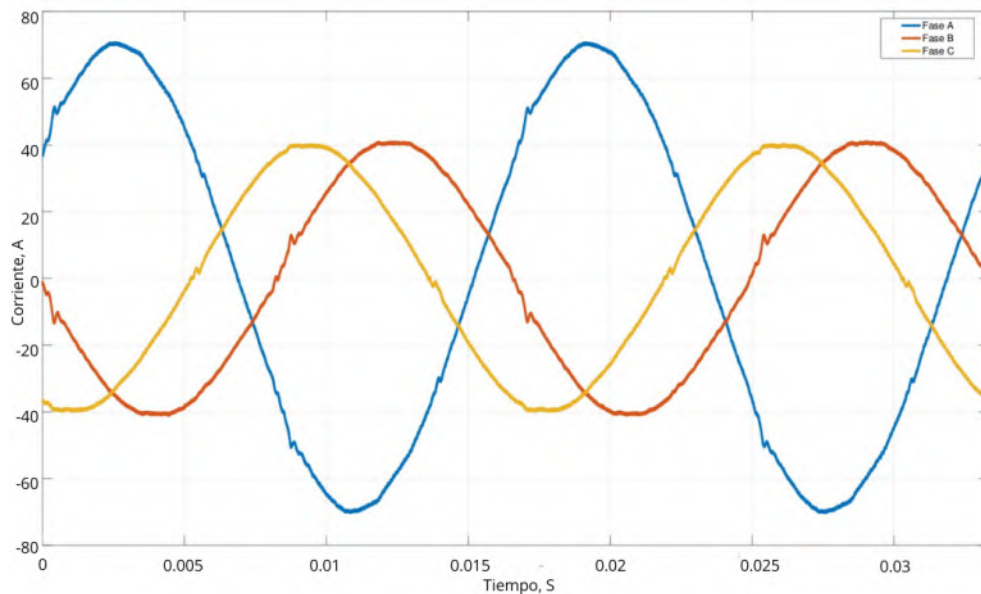


Figura 5.15: Formas de onda de las corrientes trifásicas demandadas por la estación de recarga con dos vehículos eléctricos.

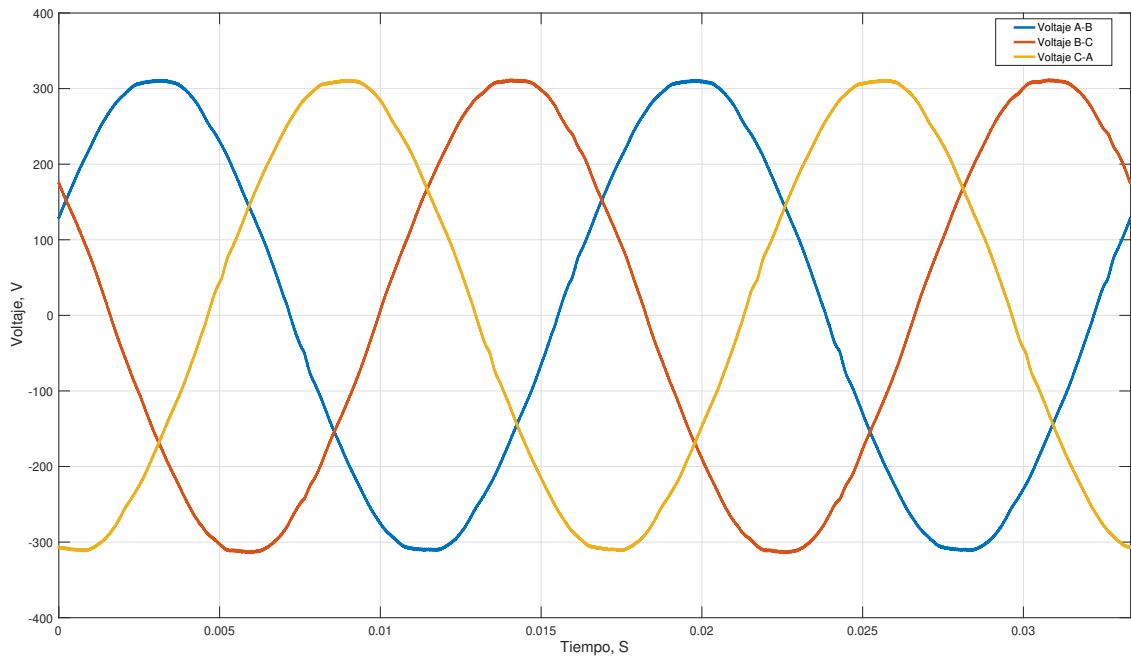
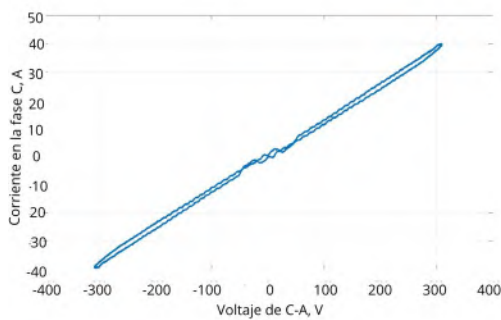
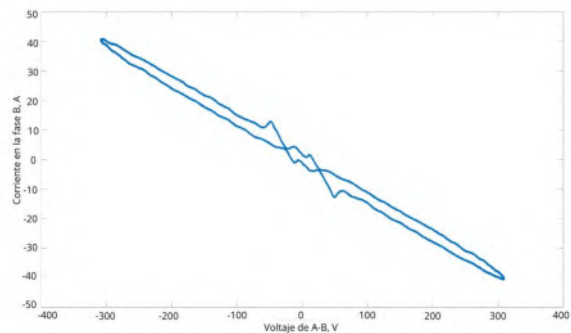


Figura 5.16: *Formas de onda de los voltajes de la red eléctrica de distribución.*

La Figura 5.17 muestra los diagramas de fase en los dos cargadores eléctricos nivel 2 de 7kW cuando están conectados dos vehículos eléctricos en la estación de recarga. Se observa que el cargador reportado en la Figura 5.17 (a) describe una trayectoria cerrada cuya forma es muy cercana a una línea recta debido a que el voltaje entre las fases C y A y la corriente en la fase C se encuentran en fase. Por su parte, la Figura 5.17 b) describe el diagrama de fase del cargador 2, en donde se puede observar que se describe también con una trayectoria cerrada pero con una estrategia de control distinta a la del inciso a), con una conmutación menos refinada o interferencias armónicas.

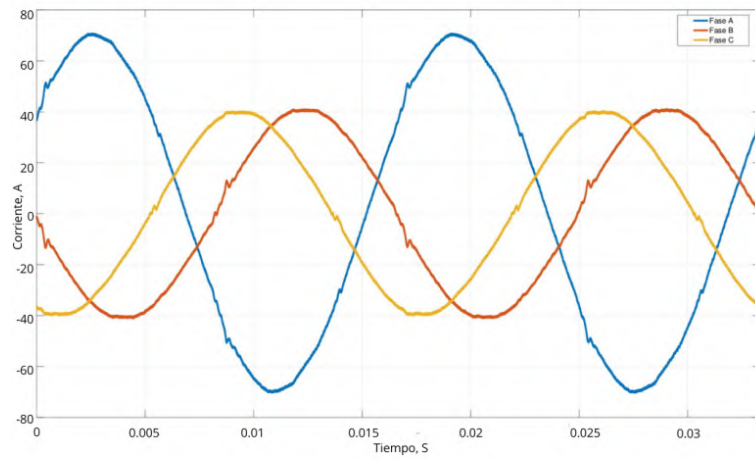


(a)

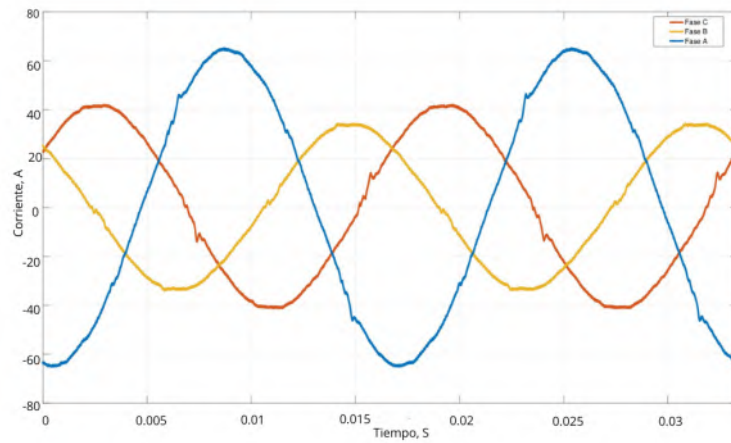


(b)

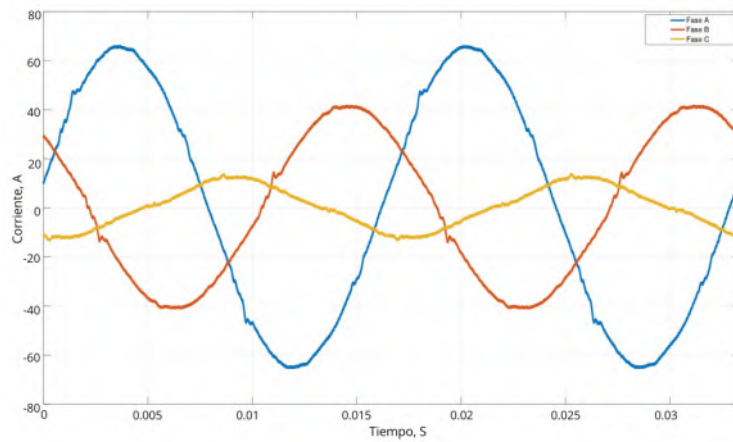
Figura 5.17: *Diagramas de fase V-I para: a).- cargador 1 y b).- cargador 2.*



(a)

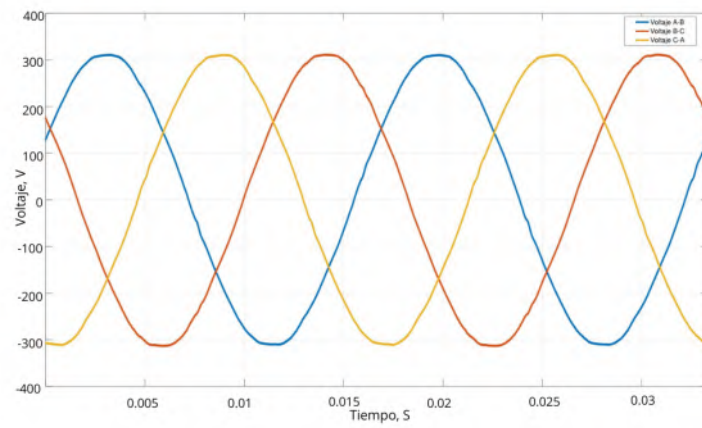


(b)

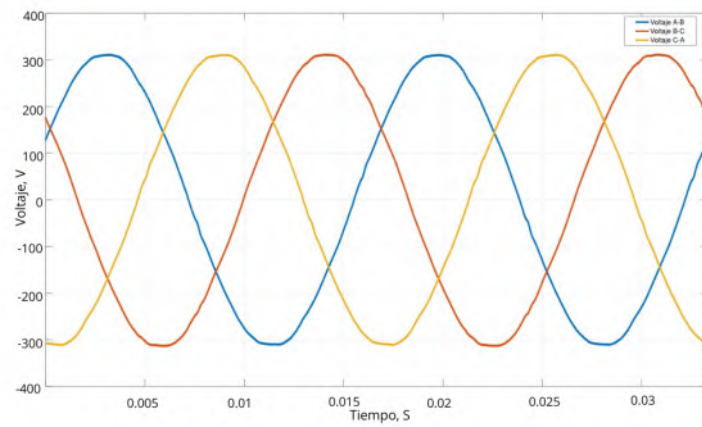


(c)

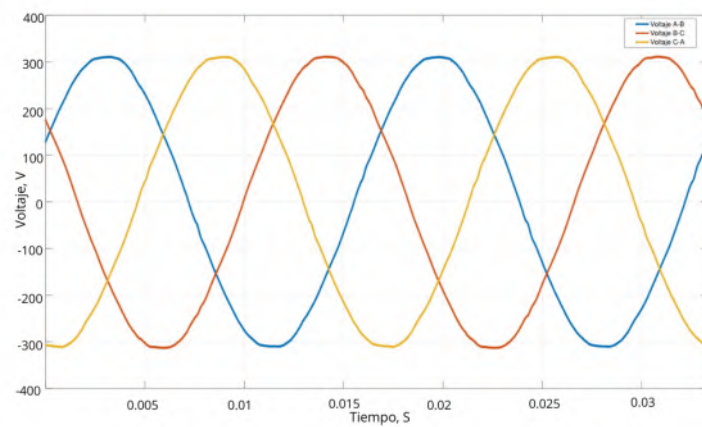
Figura 5.18: Evolución de las corrientes durante el proceso de recarga de dos vehículos eléctricos: a).- medición 1, b).- medición 2 y c).- Medición 3.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.19: Evolución de los voltajes durante el proceso de recarga de dos vehículos eléctricos: a).- medición 1, b).- medición 2 y c).- medición 3.

Las Figuras 5.18 y 5.19 describen la evolución de las formas de onda de las corrientes y voltajes durante el proceso de recarga de los vehículos eléctricos. Las Figuras 5.18 (a), (b) y (c) describe la evolución de las corrientes trifásicas durante el proceso de recarga de los dos vehículos eléctricos, el tiempo aproximado que duró el muestreo entre cada medición fue de 20 minutos. Se observa que la corriente en la fase C disminuye a medida que el vehículo conectado en el cargador 1 finaliza su proceso de carga. Por consiguiente, la corriente en la fase A, que contiene la contribución de los dos cargadores, también disminuye conforme avanza el proceso de recarga. El valor RMS de la corriente en la fase C en la primera captura fue de 27.91 A y en la última medición justo antes de finalizar el proceso de recarga del vehículo el valor RMS fue de 8.1422 A. Por su parte, la Figura 5.19 presenta la evolución de los voltajes en el tiempo durante el proceso de recarga de los vehículos eléctricos. Se puede apreciar que las formas de onda en el tiempo del voltaje trifásico no evidencian la presencia de distorsión armónica importante.

Las variaciones que presentan las formas de onda en el tiempo durante el proceso de recarga de los vehículos eléctricos se reflejan en cambios en sus características eléctricas y en la calidad de la energía. Las Figuras 5.20 y 5.21 muestran los cambios en los flujos de potencia en los dos cargadores durante el proceso de recarga de los vehículos eléctricos. Se puede apreciar en la Figura 5.20 que la potencia aparente en el cargador 1 disminuye de 6.171.6 kVA, a 1.8054 kVA. La potencia reactiva cambio de 0.14260 kVAR hasta 0.14875 kVAR. La potencia activa también disminuyó a medida que el proceso de recarga del vehículo vario de 6.1681 kW en la primera medición, 5.2001 kW en la segunda medición y 1.7058kW en la última medición. La potencia de distorsión aumentó a medida que el vehículo eléctrico finalizaba su proceso de carga, ya que pasó de 0.150 kVAD en la primera medición, 0.174 kVAD en la segunda medición y 0.219 kVAD en la última medición.

Por su parte, la Figura 5.21 muestra los cambios en los flujos de potencia en el cargador 2. En la primera medición la potencia aparente mostró un valor de 6.4088kVA, en la segunda medición 6.4131kVA y 6.4995kVA en la última medición. La potencia reactiva en la primera medición fue de 0.3683kVAR, 1.111kVAR en la segunda medición y 1.8058kVAR en la última medición. Para el caso de la potencia activa en la primera medición presentó un valor de 6.3963kW, 6.3135kW en la segunda medición y 6.2408kW en la última medición. Por último, la potencia de distorsión se incrementó a medida que continuaba el proceso de recarga del vehículo eléctrico el primer valor obtenido fue de 0.1559kVAD, en la segunda medición fue de 0.1820kVAD y en la última medición su valor fue de 0.1870kVAD.

La Figura 5.22 muestra el comportamiento del factor de potencia en cada cargador a lo largo del proceso de recarga de los vehículos eléctricos. Se puede apreciar que en el cargador 1 el factor de potencia se mantuvo prácticamente unitario, su disminución fue mínima siendo 0.9994 en la primera medición, 0.9990 en la segunda medición y en la última medición fue de 0.9892. Por su parte, el cargador 2 también mostró factores de potencia cercanos al unitario. En la primera medición mostró un valor de 0.9980, 0.9845 en la segunda medición y 0.9601 en la última medición.

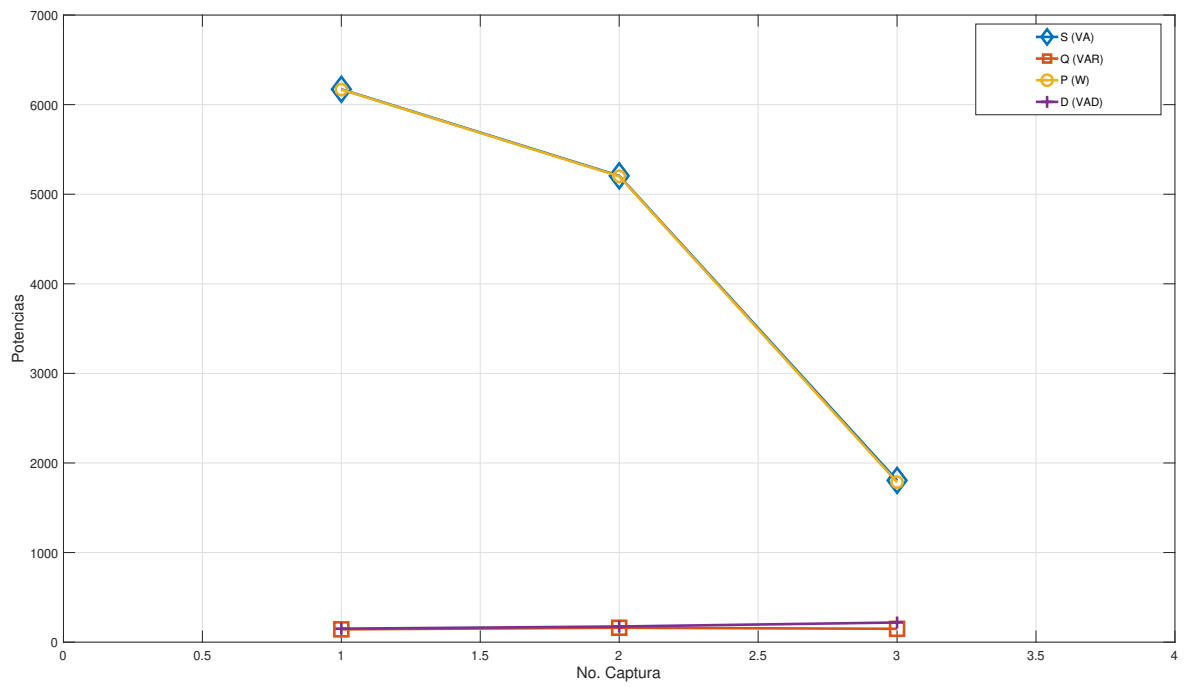


Figura 5.20: Variación en las potencias durante el proceso de recarga en el cargador 1.

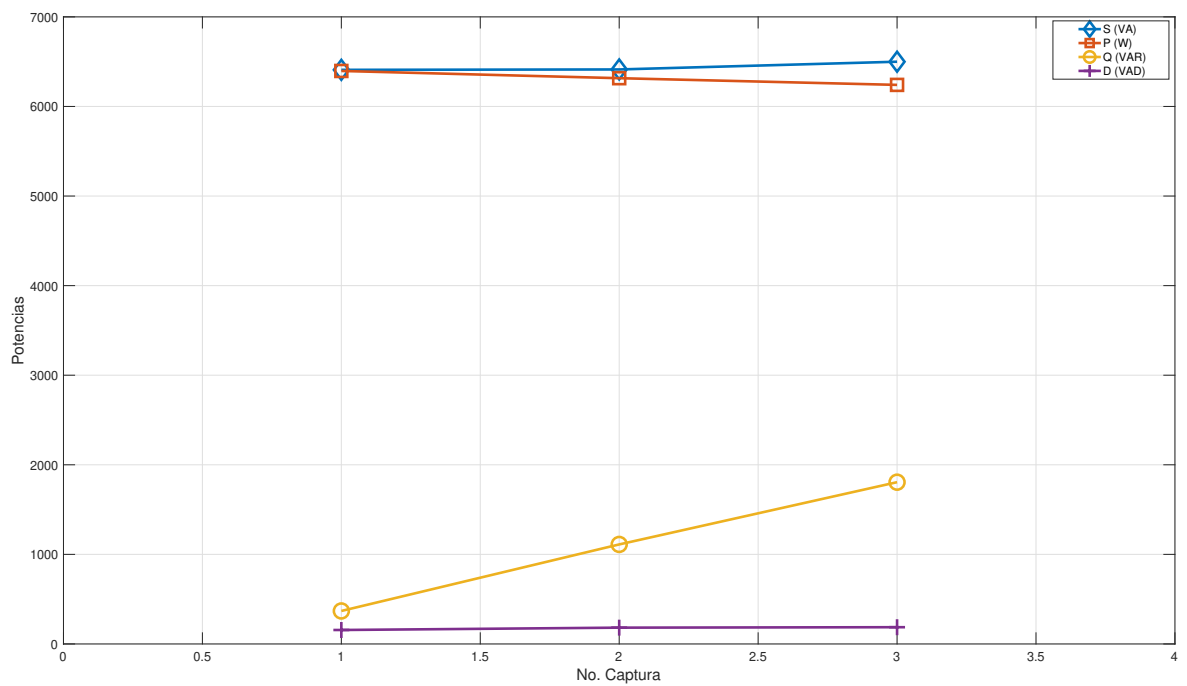


Figura 5.21: Variación en las potencias durante el proceso de recarga en el cargador 2.

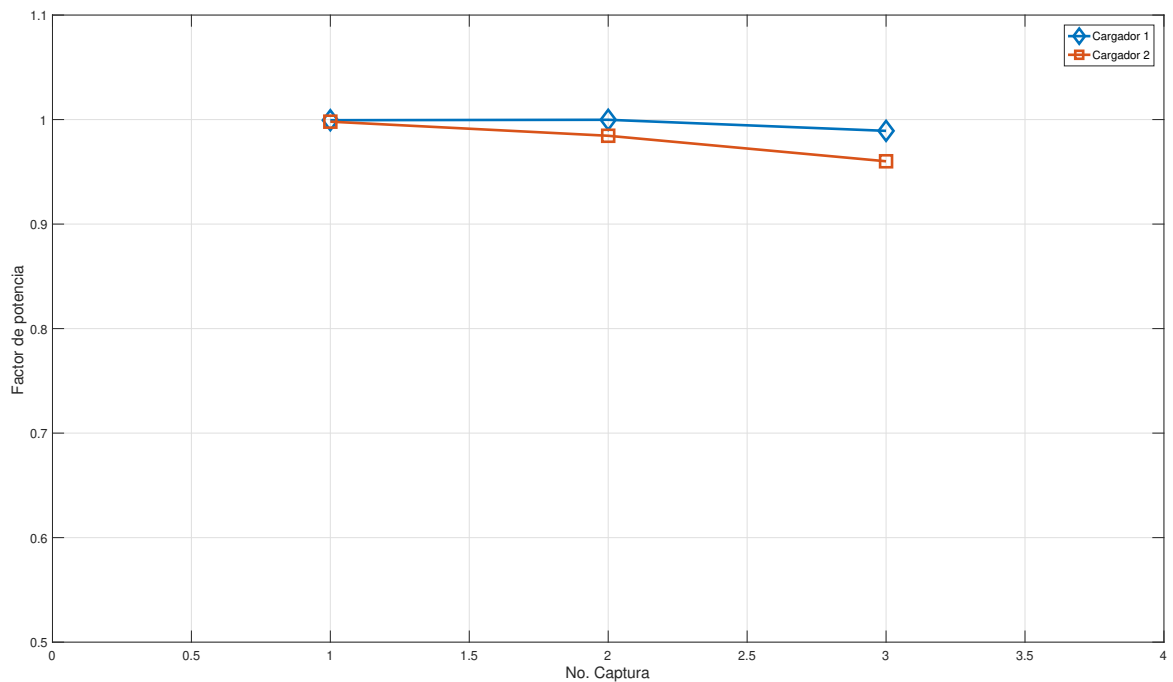


Figura 5.22: Variación del factor de potencia en los cargadores 1 y 2.

Tabla 5.10: Valores RMS y distorsión en el cargador 1 durante el proceso de recarga.

Medición	Voltaje de C-A				
	RMS	%TD	%THD	%TSHD	FD
1	221.06	1.14	1.13	0.15	0.9912
2	221.38	1.15	1.14	0.15	0.9913
3	221.68	1.15	1.14	0.15	0.9913
	Corriente en la fase C				
	RMS	%TD	%THD	%TSHD	FD
1	27.92	2.18	2.11	0.55	0.9679
2	23.16	2.88	2.79	0.70	0.9688
3	8.14	11.67	11.53	1.81	0.9880

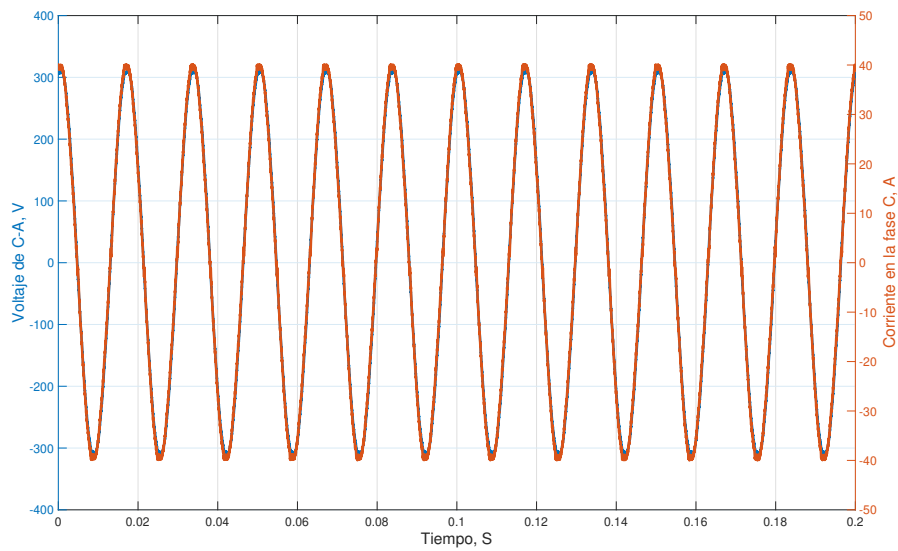
Tabla 5.11: Valores RMS y distorsión en el cargador 2 durante el proceso de recarga.

Medición	Voltaje de A-B				
	RMS	%TD	%THD	%TSHD	FD
1	221.07	0.92	0.90	0.18	0.9783
2	221.35	1.03	1.02	0.17	0.9903
3	221.66	0.93	0.91	0.19	0.9785
	Corriente en la fase B				
	RMS	%TD	%THD	%TSHD	FD
1	28.19	2.46	2.25	1.00	0.9109
2	28.97	2.62	2.43	0.98	0.9275
3	29.18	2.62	2.48	0.83	0.9466

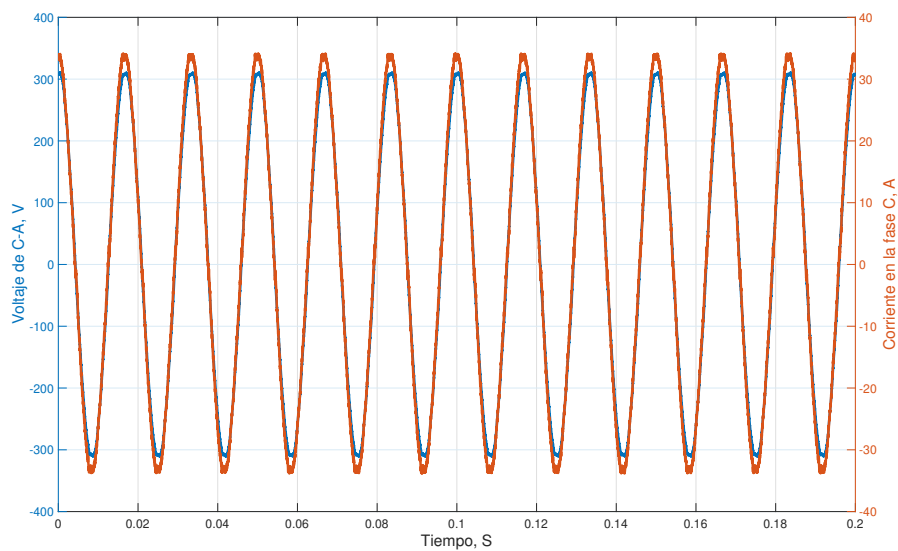
Por otro lado, en las Tablas 5.10 y 5.11 se muestran los voltajes y corrientes RMS, el %THD, EL%TSHD y el factor de distorsión a lo largo del proceso de recarga en los dos vehículos eléctricos. De la Tabla 5.10 se pueden apreciar para el cargador 1 que la corriente RMS en la primer medición es de 27.92 A y a medida que se completa el proceso de recarga la corriente fue disminuyendo hasta llegar a 8.14 A en la última medición. El voltaje se mantiene sin mostrar cambios relevantes en su magnitud RMS. Se puede observar también que la mayor distorsión de la corriente y el voltaje se centra en el rango armónico, teniendo valores en la primer medición de 2.11 % y 1.13 % hasta llegar a 11.53 % y 1.14 % para la corriente y el voltaje, respectivamente. El contenido supra-armónico del voltaje se mantiene constante en 0.15, mientras que el %TSHD de la corriente varía de 0.55 hasta 1.81. Analizando los resultados obtenidos en el factor de distorsión, se observa que el voltaje a lo largo de las tres mediciones se mantiene prácticamente constante en 0.9913, mientras que el FD de la corriente fluctúa de 0.9679 hasta 0.9880.

Por su parte, la Tabla 5.11 muestra los datos del cargador 2, se observa que la corriente RMS en la primer medición es de 28.19 A y hasta llegar en la última medición a 29.18 A. El %THD de la corriente varía de 2.25 % en la primer medición hasta 2.48 % en la última medición. El voltaje no muestra cambios importantes en su valor RMS. El %THD del voltaje es de 0.90 en la primer medición, 1.02 en la segunda medición y 0.91 en la tercer medición, mientras que el %TSHD se mantiene con muy poca variación alrededor de 0.18. La corriente en el cargador 2 presenta una contribución más importante en el rango supra-armónico y, por lo tanto, el FD varía de 0.9109 en la primer medición hasta 0.9466 en la última medición. Al comparar los resultados reportados en las Tablas 5.10 y 5.11 se observa que el contenido armónico y supra-armónico es diferente en cada cargador y se ajusta de forma distinta a lo largo del proceso de recarga.

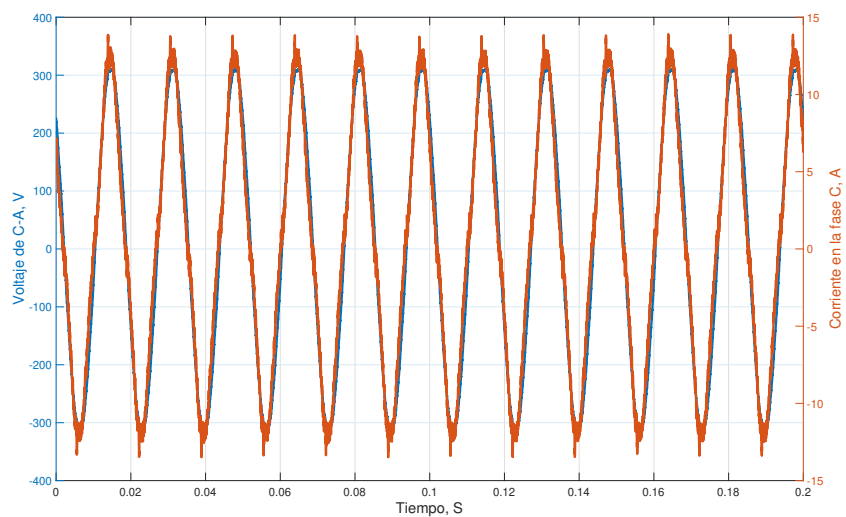
Las Figuras 5.23 y 5.24 muestran la evolución en el tiempo de los voltajes y las corrientes correspondientes al cargador 1 y 2, respectivamente. La Figura 5.23 muestra el voltaje entre C-A y la corriente en la fase C correspondientes al cargador 1, en donde se puede apreciar que el voltaje y la corriente se encuentran en fase. Las formas de onda están distorsionadas, siendo la forma de onda de corriente la que presenta una evidente mayor distorsión. Para el cargador 1, se observa que a medida que continúa el proceso de recarga la forma de onda de corriente disminuye en amplitud y se incrementa la distorsión. Por su parte, la Figura 5.24 muestra que para el cargador 2 el voltaje de alimentación A-B y la corriente en la fase B se mantienen en fase. Tanto el voltaje como la corriente presentan distorsión de su forma de onda, siendo más evidente para la corriente del cargador.



(a)

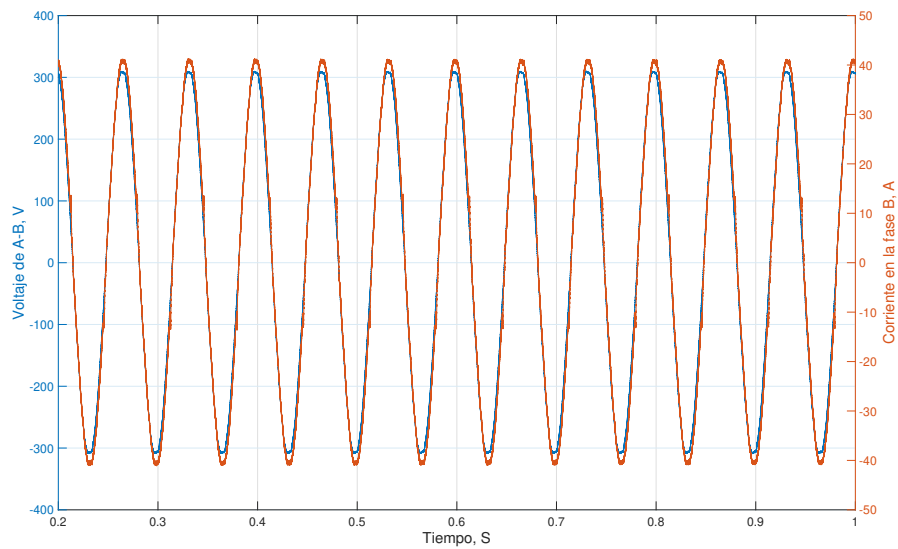


(b)

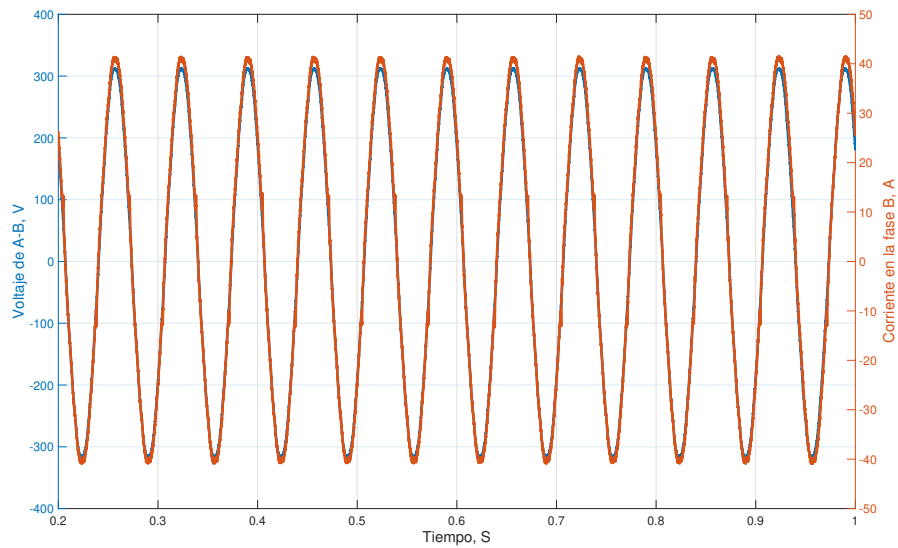


(c)

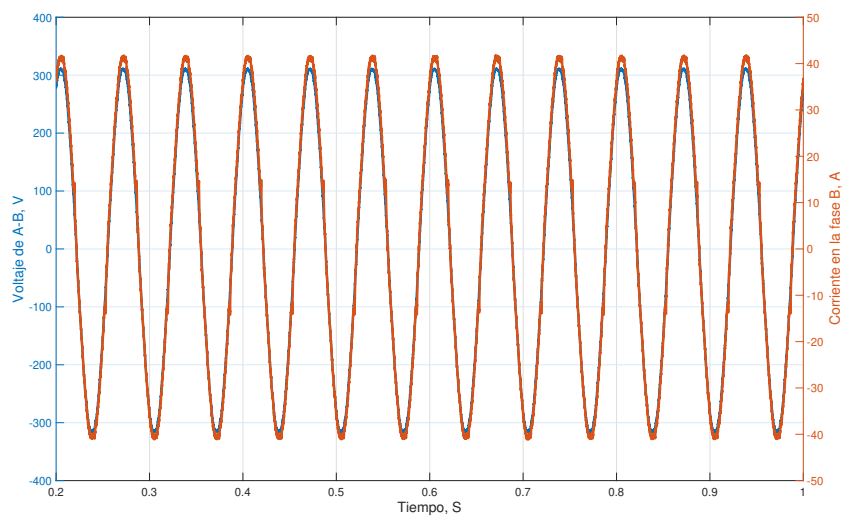
Figura 5.23: Evolución de las formas de onda de Voltaje C-A y corriente fase C para el cargador 1 durante el proceso de recarga: a).- medición 1, b).- medición 2 y c).- medición 3.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.24: Evolución de las formas de onda de Voltaje A-B y corriente fase B para el cargador 2 durante el proceso de recarga: a).- medición 1, b).- medición 2 y c).- medición 3.

5.3.1. Procesamiento con Transformada de Fourier

En esta sección se reportan los resultados de la aplicación de la Transformada de Fourier a las formas de onda de los voltajes de la red eléctrica y las corrientes demandadas por la estación de recarga de vehículos eléctricos. Se consideró una frecuencia de muestreo de 10,000,080 Hz, y 166,668 muestras para señales de 60Hz. Las Figuras 5.25, 5.26 y 5.27 muestran el espectro de frecuencias en el voltaje de A-B, B-C y C-A, respectivamente. Las componentes de frecuencia de mayor magnitud se enlistan en la Tabla 5.12. Se puede apreciar que para el voltaje de A-B se tiene una componente de frecuencia fundamental de 314.37 V, mientras que los armónicos de mayor magnitud son el 7 con 1.922 V y el armónico 11 con una magnitud de 0.719 V. Se observa también de forma destacable el grupo de componentes de frecuencia en el rango supra-armónico 2,460-2,580 Hz y en el rango 16,080-16,140 Hz. Para los voltajes B-C y C-A se tienen valores de 316.07 V y 312.62 V para la componente fundamental, respectivamente. Por su parte, los armónicos más destacados fueron también el 7o y 11o, mientras que en el rango supra-armónico resaltaron las frecuencias en el rango 2,460-2,580 Hz y rango 16,080-16,140 Hz.

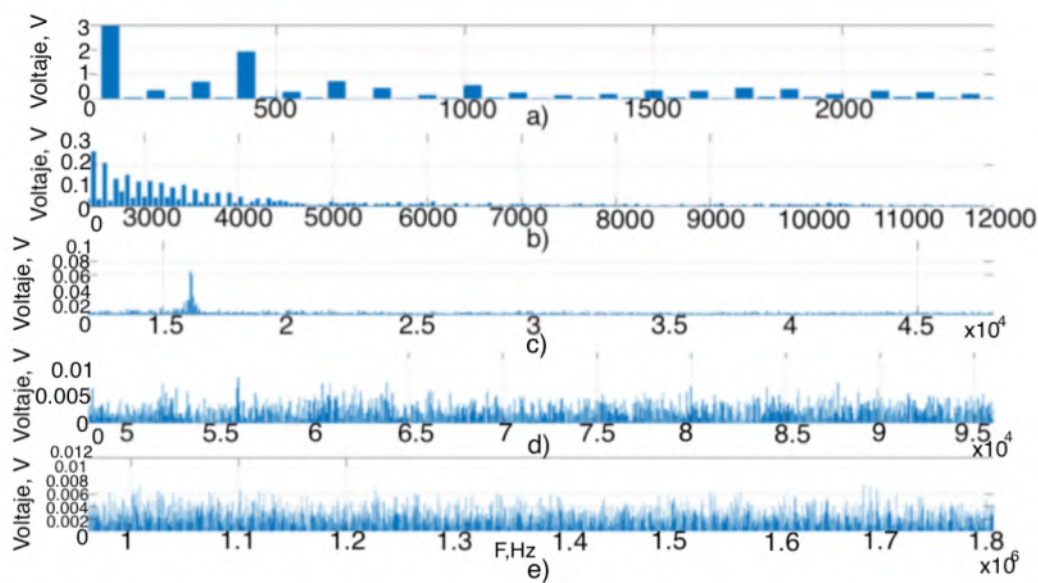


Figura 5.25: Espectro de frecuencias del voltaje A-B en el rango: a).- 0-2.4kHz, b).- 2.4kHz-12kHz, c).- 12kHz-48kHz, d).- 48kHz-96kHz y e).- 96kHz-180kHz.

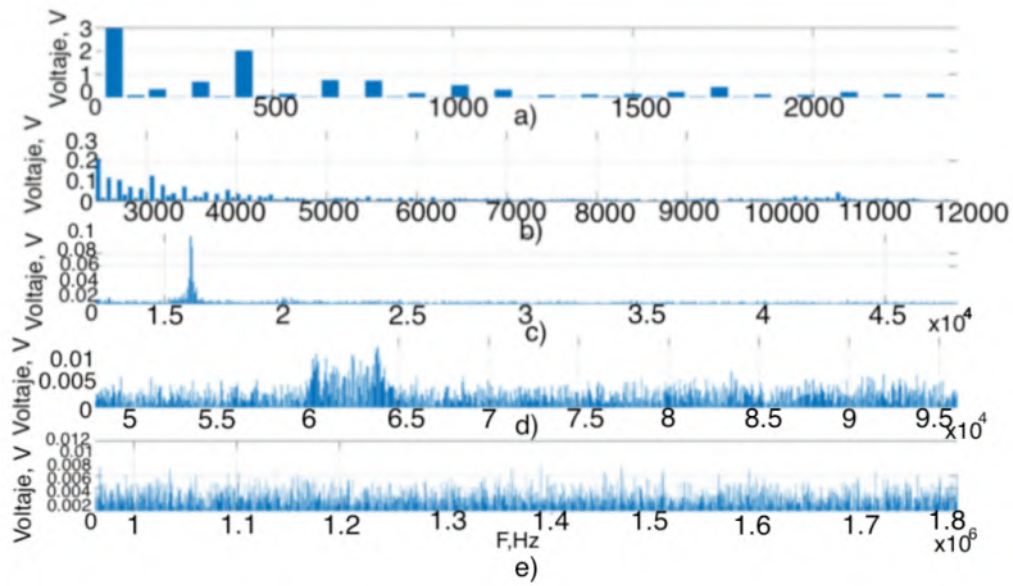


Figura 5.26: Espectro de frecuencias del voltaje B-C en el rango: a).- 0-2.4kHz, b).- 2.4kHz-12kHz, c).- 12kHz-48kHz, d).- 48kHz-96kHz y e).- 96kHz-180kHz.

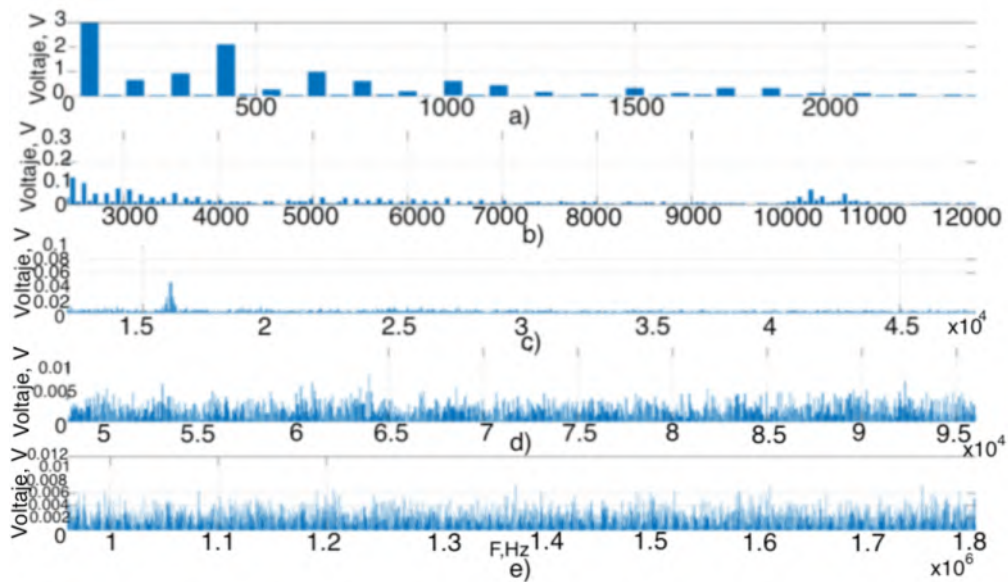


Figura 5.27: Espectro de frecuencias del voltaje C-A en el rango: a).- 0-2.4kHz, b).- 2.4kHz-12kHz, c).- 12kHz-48kHz, d).- 48kHz-96kHz y e).- 96kHz-180kHz.

Tabla 5.12: Frecuencias de mayor magnitud detectados en los voltaje de A-B, B-C y C-A

Voltaje A-B		Voltaje B-C		Voltaje C-A	
Frecuencia, Hz	Magnitud, V	Frecuencia, Hz	Magnitud, V	Frecuencia, Hz	Magnitud, V
0	0.5806	0	1.5388	0	0.4707
60	312.62	60	314.070	60	312.6233
300	0.6959	300	0.6970	300	0.9263
420	1.9222	420	2.0341	420	2.1143
660	0.7119	660	0.7744	660	0.9845
780	0.4370	780	0.7421	780	0.6163
1020	0.5559	1020	0.5476	1020	0.5442
1140	0.2547	1140	0.3354	1140	0.3296
:	:	:	:	:	:
2460	0.2645	2460	0.2124	2460	0.1291
2580	0.2088	2580	0.1169	2580	0.1015
:	:	:	:	:	:
16080	0.0658	16080	0.1070	16080	0.0458
16140	0.0595	16140	0.0907	16140	0.0452

Las Figuras 5.28, 5.29 y 5.30 muestran el espectro de frecuencias de las corrientes en las fases C, B y A, las cuales representan las corrientes en el cargador 1, cargador 2 y la suma de ambos cargadores, respectivamente. Por su parte, los valores numéricos de las componentes de frecuencia más relevantes se sintetizan en la Tabla 5.13. Se puede apreciar que para la corriente del cargador 1 se tiene una componente promedio es de 0.1073 A y la fundamental tiene una magnitud de 39.48 A. Los armónicos de mayor magnitud son el número 3 con una magnitud de 0.7053 A y una frecuencia de 180Hz y el 13 con una magnitud de 0.1840 A correspondiéndole una frecuencia de 780Hz. Además, en el rango supra-armónico se detectó un grupo de frecuencias en el rango 2,460-2,700 Hz, en el rango 10,260-10,620 Hz y en el rango 16,080-16,140 Hz. Por su parte, la Tabla 5.13 indica que para la corriente en la fase B asociada al cargador 2 se tiene una componente de frecuencia cero 0.4707 A y la componente de frecuencia fundamental es de 39.48 A. El armónico de mayor magnitud fue el número 3 con una magnitud de 0.7053 A, seguido del número 13 con una magnitud de 0.1840 A. Por su parte, las frecuencias supra-armónicas se agruparon únicamente en el rango 2,460-2,580 Hz y alrededor de la frecuencia 16,080 Hz. Respecto a la corriente en la fase A que representa la suma de las corrientes del cargador 1 y 2, la componente de frecuencia cero tiene un valor de 0.1849 V, mientras que la componente de frecuencia fundamental tiene un valor de 71.38 A. El armónico 3 tiene una magnitud de 0.6694 A, seguido del número 7 con una magnitud de 0.5069 A. En el rango supra-armónico, se detectó un grupo de frecuencias en el rango 2,460-2,580 Hz con magnitudes entre 0.1157-0.1153, 10,260-10,620 Hz con magnitudes entre 0.0613-0.0481 y 16,080-16,140 Hz con magnitudes 0.0113-0.0106.

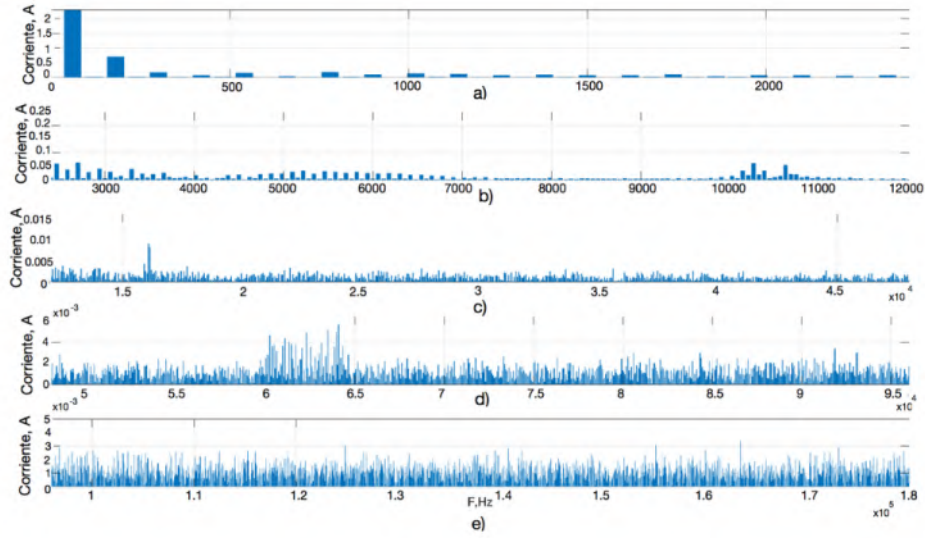


Figura 5.28: Espectro de frecuencias de la corriente fase C, cargador 1 en el rango: a).- 0-2.4kHz, b).- 2.4kHz-12kHz, c).- 12kHz-48kHz, d).- 48kHz-96kHz y e).- 96kHz-180kHz.

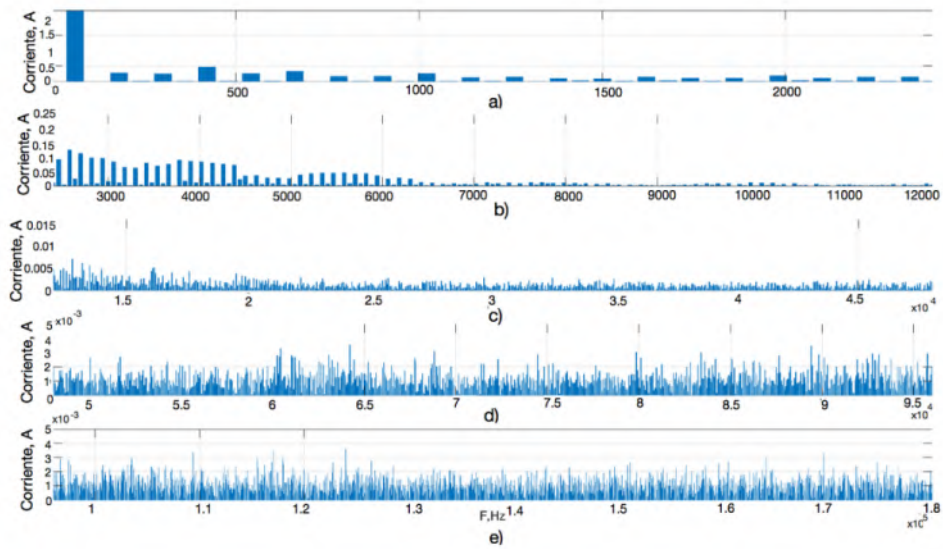


Figura 5.29: Espectro de frecuencias de la corriente fase B, cargador 2 en el rango: a).- 0-2.4kHz, b).- 2.4kHz-12kHz, c).- 12kHz-48kHz, d).- 48kHz-96kHz y e).- 96kHz-180kHz.

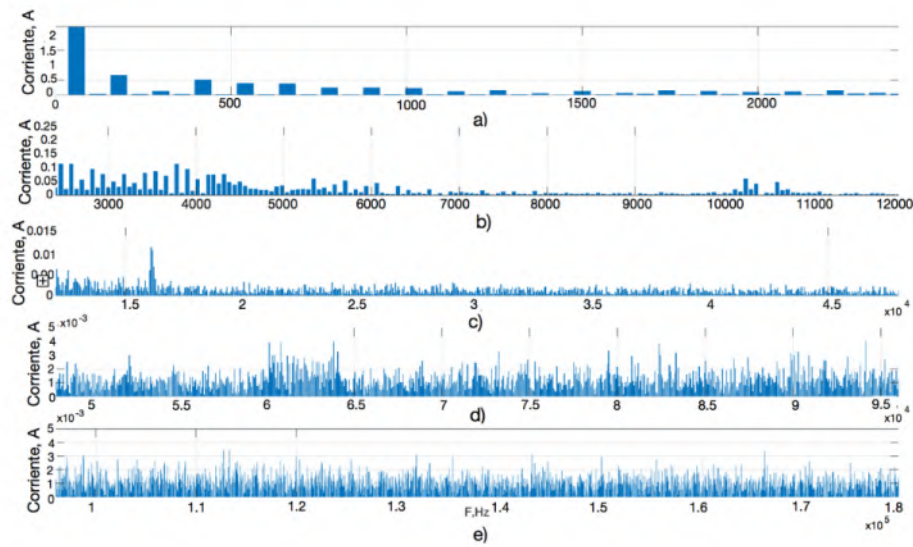


Figura 5.30: Espectro de frecuencias de la corriente fase A, suma del cargador 1 y 2 en el rango: a).- 0-2.4kHz, b).- 2.4kHz-12kHz, c).- 12kHz-48kHz, d).- 48kHz-96kHz y e).- 96kHz-180kHz.

Tabla 5.13: Frecuencias de mayor magnitud detectados en las corrientes de las fases C, B y A

Corriente fase C (cargador 1)		Corriente fase B (cargador 2)		Corriente fase A (cargador 1 + 2)	
Frecuencia, Hz	Magnitud, A	Frecuencia, Hz	Magnitud, A	Frecuencia, Hz	Magnitud, A
0	0.1073	0	0.1273	0	0.1849
60	39.48	60	40.007	60	71.3802
180	0.7053	180	0.1832	180	0.6694
300	0.1769	300	0.2527	300	0.1235
540	0.1526	420	0.4704	420	0.5069
780	0.1840	660	0.3255	660	0.3877
900	0.1750	780	0.1650	780	0.2370
:	:	1020	0.2557	1020	0.2188
:	:	1140	0.1246	1140	0.1150
:	:	:	:	:	:
2460	0.0602	2460	0.0940	2460	0.1157
2580	0.0596	2580	0.1275	2580	0.1153
2700	0.0635	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:
10260	0.0613	:	:	10260	0.0613
10620	0.0559	:	:	10620	0.0481
:	:	:	:	:	:
16080	0.0089	16080	0.0035	16080	0.0113
16140	0.0061	:	:	16140	0.0106

5.3.2. Procesamiento con Análisis Wavelet multi-resolución

Los resultados del análisis wavelet multi-resolución para el caso 2 se reportan en esta sección, en el cual se consideran los mismos parámetros que en el caso base y el caso 1. La Tabla 5.3 muestra los rangos de frecuencia para las 11 bandas definidas en este análisis.

La Figura 5.31 corresponde al voltaje de A-B. Se puede apreciar que la mayor distorsión de la señal se aloja en el rango armónico en la banda S11 en el rango de frecuencia de 0 - 2441.4Hz. El mayor contenido supra-armónico se encuentra en las bandas B11 y B10 que corresponden a un rango desde 2,441.4Hz-9,765.703Hz. Cabe destacar, que la forma de onda en la banda 11 varía con el tiempo y, por lo tanto, el análisis Wavelet multi-resolución permite capturar los cambios en las componentes de frecuencia en el tiempo provocados por los controladores de electrónica de potencia del cargador del vehículo eléctrico. La Figuras 5.32 corresponde a la señal de voltaje de B-C. Se puede apreciar que en la señal de voltaje el contenido de frecuencia se aloja en las bandas B10,B11 y S11, correspondiendo a un rango de frecuencias de 0Hz -9,765.703Hz. Se pueden observar en las bandas B10 y B11 que hay variaciones en el tiempo que se lograron capturar, las cuales están asociadas al sistema de control del cargador del vehículo eléctrico. Por su parte, la Figura 5.33 corresponde al voltaje C-A. Se puede observar que el contenido en el rango armónico se encuentra en la banda de baja frecuencia S11 correspondiendo al rango de 0 - 2441.4Hz y el contenido supra-armónico se encuentra en las bandas B11 y B10 ubicado en el rango de 2441.4Hz - 9,765.703Hz. Además, se aprecian variaciones en el tiempo en las bandas B9 y B8, las cuales no eran tan evidentes en los voltajes A-B y B-C.

La Tabla 5.14 muestra los resultado de la energía por banda y la varianza por banda para la señales de voltaje de A-B, B-C, y C-A. Se puede observar que la energía total de la señal de voltaje de A-B se encuentra en la banda S11 y, además, es la que presenta un mayor amplitud obtenido un valor de varianza de 19.7611. Las bandas con mayor energía son la banda B11 con 63.2885 y una varianza 0.000031642588745 seguida de la banda B10 con una energía de 3.2695 y una varianza de 0.000001634723592. Por otra parte, para el voltaje B-C se observa que la energía se concentra en la banda S11 y presenta un amplitud mayor con un valor de varianza de 19.9705. Las bandas con forma de onda en el tiempo definida y una mayor energía detectadas son la banda B11 con 33.4425 y una varianza 0.000016721163608 seguida de la banda B10 con una energía de 2.4472 y una varianza de 0.000001223635565. Finalmente, la energía del voltaje C-A se concentra en la banda S11 y presentando además una amplitud mayor en comparación con otras bandas con un valor de varianza de 19.5360. Las banda con mayor energía detectadas son la banda 11 con 16.5016 y con valor de varianza de 0.000008250750391 seguida de la banda 10 con una energía de 3.5690 y una varianza de 0.000001784491368 .

Tabla 5.14: Energía y varianza por banda para los voltajes A-B, B-C y C-A.

Banda	Voltaje de A-B (V^2)		Voltaje de B-C (V^2)		Voltaje de C-A (V^2)	
	Energía	Varianza	Energía	Varianza	Energía	Varianza
S11	39,522,940.46	19.76119434	39,943,241.43	19.97053684	39,072,658.32	19.53608380
B11	63.29	0.000031642	33.44	0.000016721	16.50	0.000008251
B10	3.27	0.000001635	2.45	0.000001224	3.57	0.000001784
B9	3.51	0.000001757	7.97	0.000003985	4.07	0.000002037
B8	0.95	0.000000477	1.38	0.000000689	0.97	0.000000483
B7	1.47	0.000000735	1.98	0.000000989	1.40	0.000000699
B6	3.01	0.000001503	1.78	0.000001389	2.74	0.000001372
B5	5.54	0.000002769	5.60	0.000002801	5.63	0.000002816
B4	9.37	0.000004685	9.44	0.000004719	9.52	0.000004762
B3	7.18	0.000003588	7.22	0.000003611	7.21	0.000003604
B2	5.18	0.000002588	5.22	0.000002609	5.26	0.000002630
B1	12.60	0.000006299	12.73	0.000006365	12.85	0.000006425

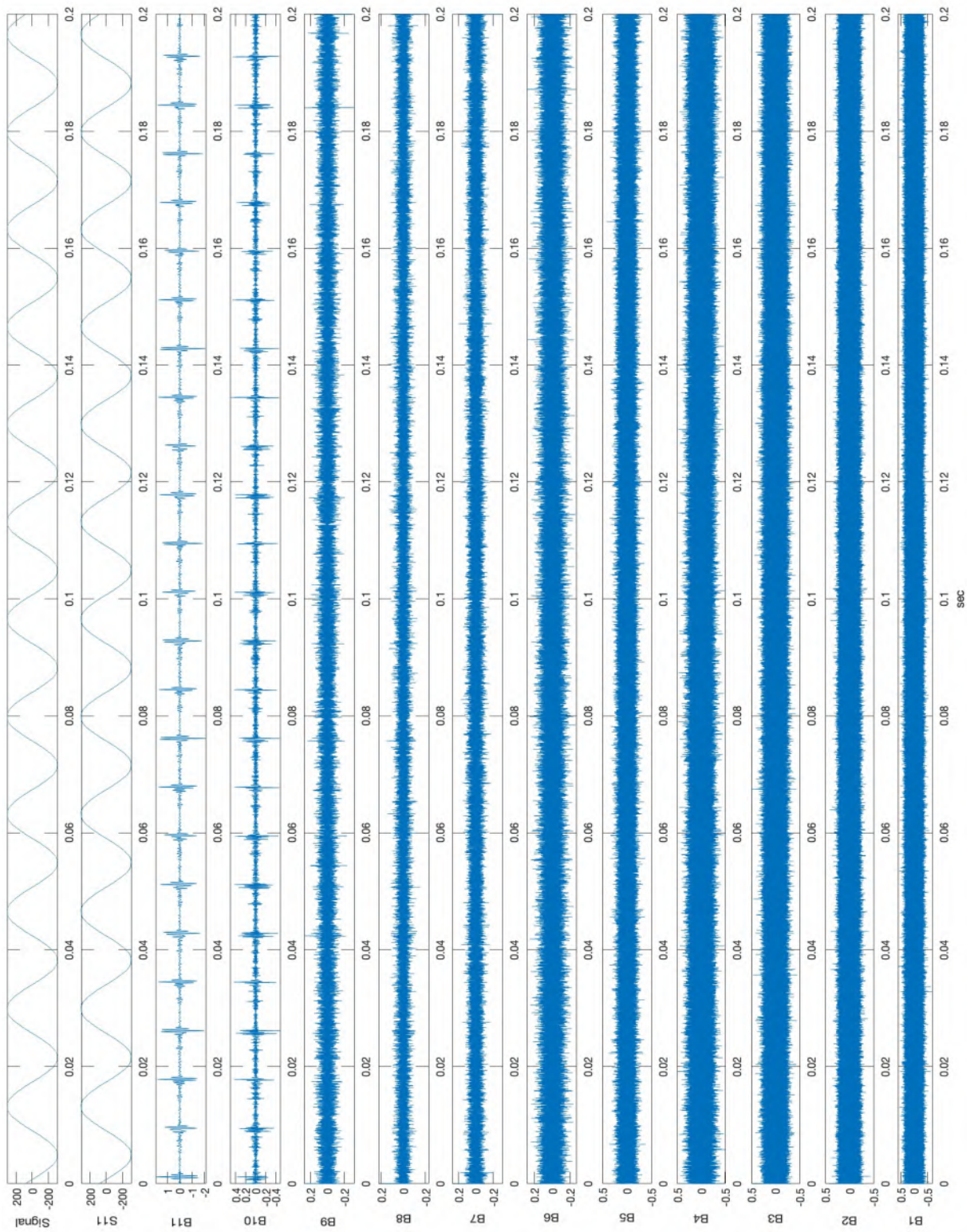


Figura 5.31: Análisis Wavelet multi-resolución del voltaje A-B.

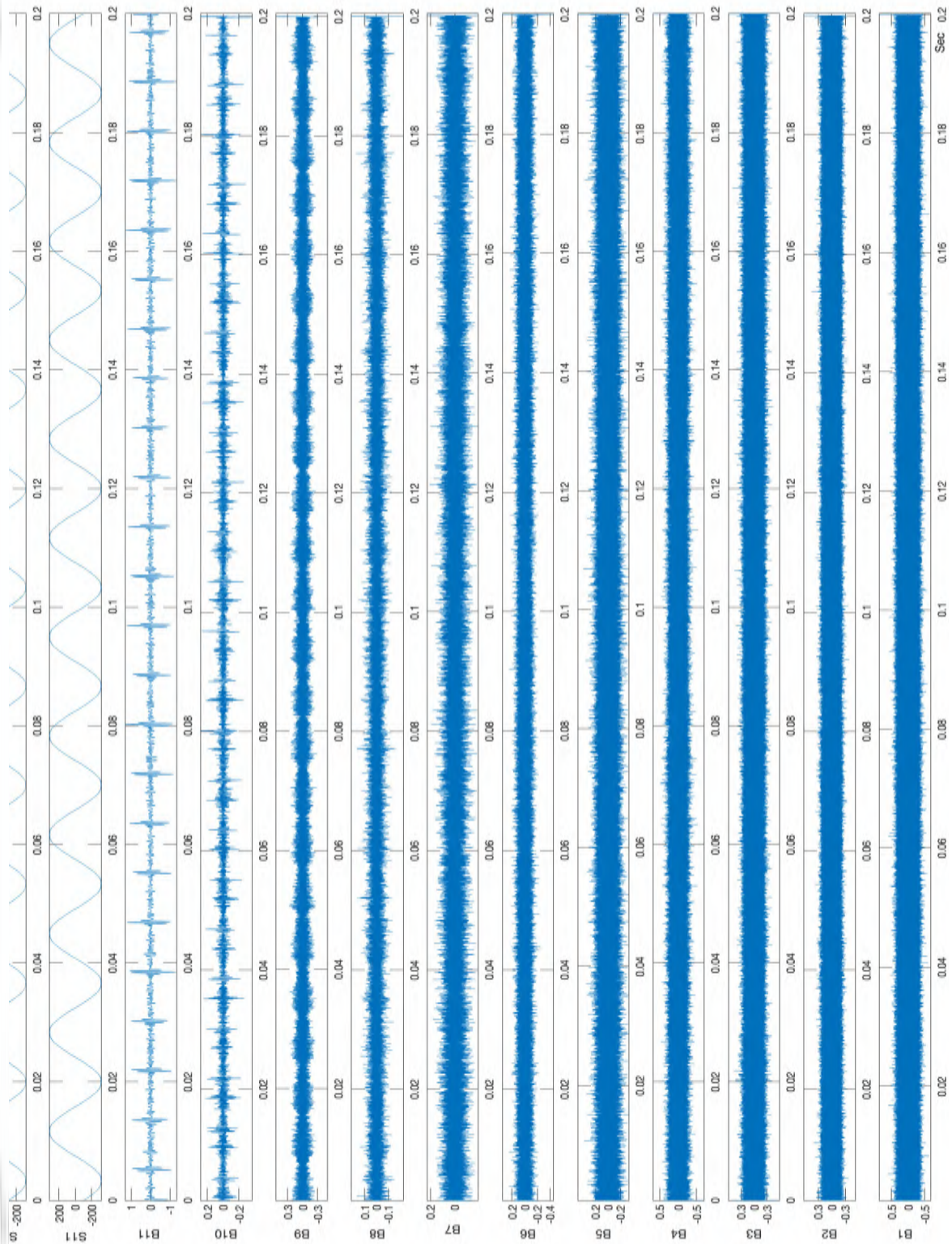


Figura 5.32: Análisis Wavelet multi-resolución del voltaje B-C.

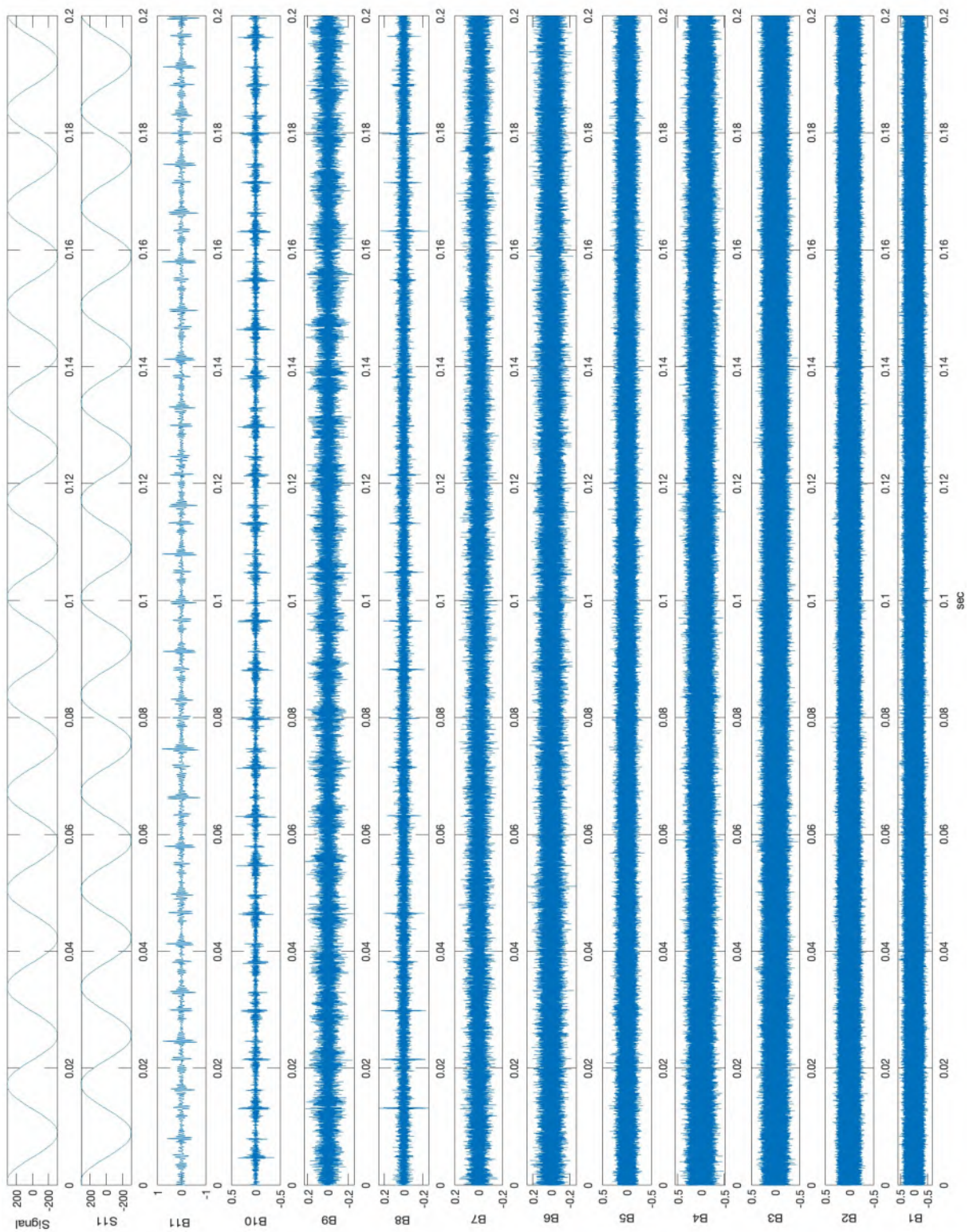


Figura 5.33: Análisis Wavelet multi-resolución del voltaje C-A.

Las Figuras 5.34, 5.35 y 5.36 corresponde a los resultados del análisis Wavelet multi-resolución para las corrientes en las fases A, B y C, respectivamente. Se observa que el mayor contenido de frecuencia se encuentra en el rango armónico en la banda de baja frecuencia S11 ubicada en el rango de 0 - 2441.4Hz. Las componentes de frecuencia en el rango supra-armónico se alojan principalmente en las bandas B11, B10, B9 y B8. En particular, se aprecian patrones de variación en el tiempo en las bandas B11, B10, B9 y B8 en la corriente de la fase C asociada al cargado 1. Además, al comparar las Figuras 5.35 y 5.36 vinculadas a las corrientes demandadas por los cargadores 2 y 1, es evidente que los controladores de dichos cargadores generan patrones de frecuencias supra-armónicas variantes en el tiempo muy diferentes.

La Tabla 5.15 sintetiza los resultados de la energía y la varianza para las corrientes en las fases A, B y C. Se observa que para la señal de corriente en la fase A la energía se concentra en la banda S11 así como el mayor valor de amplitud. Las bandas con mayor energía son la 11, 10 y 9 con valores de 214.53, 44.47 y 13.14 y valores de varianza de 0.000107281, 0.000022235 y 0.0000006569, respectivamente. Para la corriente en la fase B se aprecia que la energía de la señal se ubica en la banda S11 así como la que tiene la mayor magnitud. Las bandas con mayor energía son la B11, B10 y B9 con valores de 260.99, 24.88 y 1.97 y con valores de varianza de 0.000130493, 0.000012439 y 0.000000985, respectivamente. Por su parte, la corriente en la fase C se observa que la energía de la señal se concentra en la banda S11 así como el mayor valor de amplitud tiendo un valor de varianza de 2.106632365. Las bandas con mayor energía son la B11, B10 y B9 con valores de 38.9412, 20.0597 y 12.2170 y con valores de varianza de 0.000019470, 0.000010029 y 0.000006108, respectivamente.

Tabla 5.15: *Energía y varianza por banda para las corrientes en la fases A, B y C.*

Banda	Corriente fase A (A^2)		Corriente fase B (A^2)		Corriente fase C (A^2)	
	Energía	Varianza	Energía	Varianza	Energía	Varianza
S11	12,838,845.87	6.419318253	4,213,372.64	2.106632365	389,957.98	1.949749659
B11	214.53	0.000107281	260.99	0.000130493	38.94	0.000019470
B10	44.47	0.000022235	24.88	0.000012439	20.06	0.000010029
B9	13.14	0.000006569	1.97	0.000000985	12.22	0.000006108
B8	1.13	0.000000565	0.86	0.000000432	1.02	0.000005085
B7	1.84	0.000000919	1.60	0.000000799	2.07	0.000001033
B6	3.67	0.000001835	3.28	0.000001640	3.26	0.000001628
B5	6.00	0.000003002	6.06	0.000003029	6.09	0.000003046
B4	9.22	0.000004612	9.20	0.000004600	9.33	0.000004662
B3	6.64	0.000003319	6.59	0.000003290	6.63	0.000003316
B2	5.05	0.000002524	5.07	0.000002536	5.11	0.000002554
B1	12.40	0.000006199	12.48	0.000006239	12.64	0.000006318

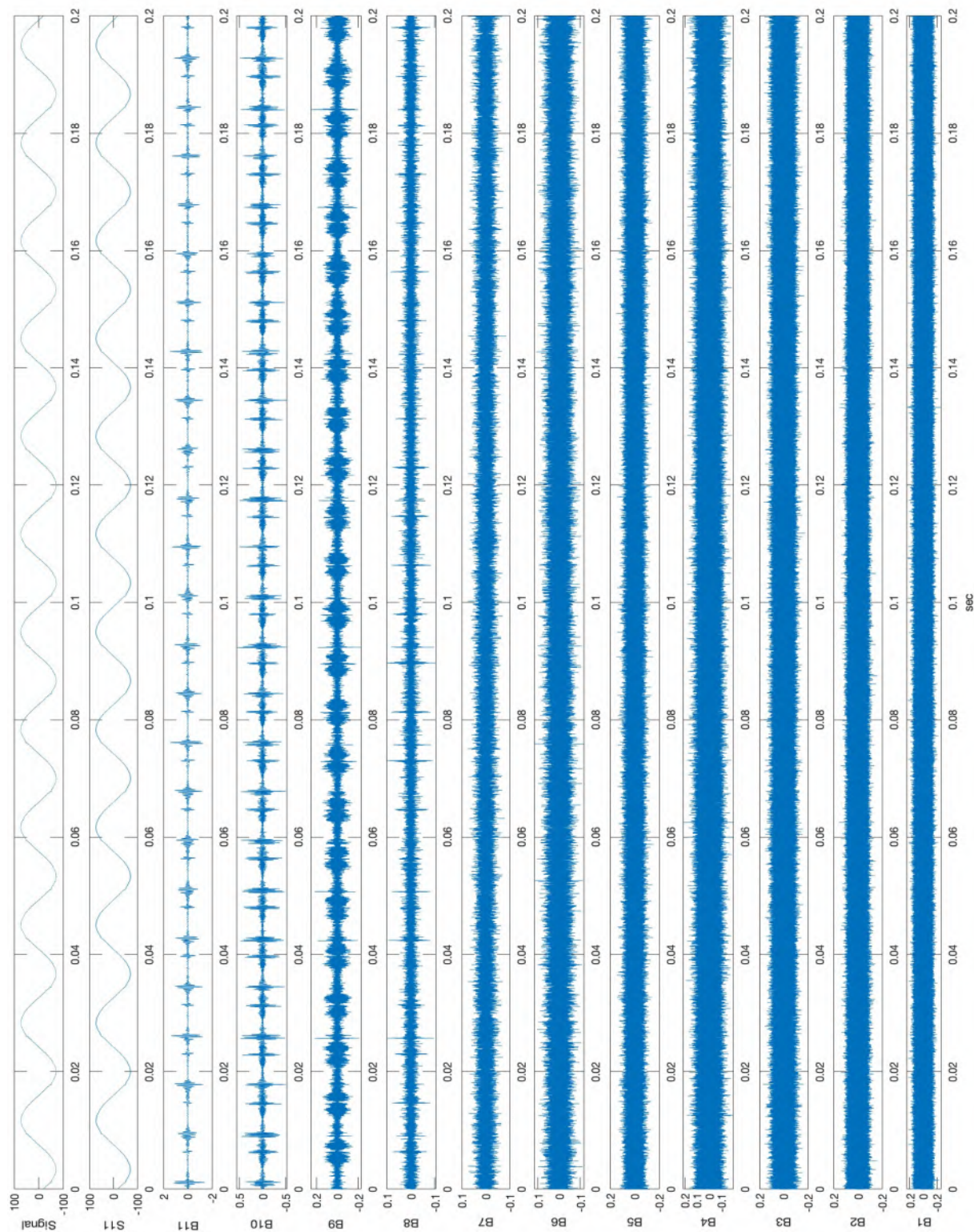


Figura 5.34: Análisis Wavelet multi-resolución de la corriente en la fase A.

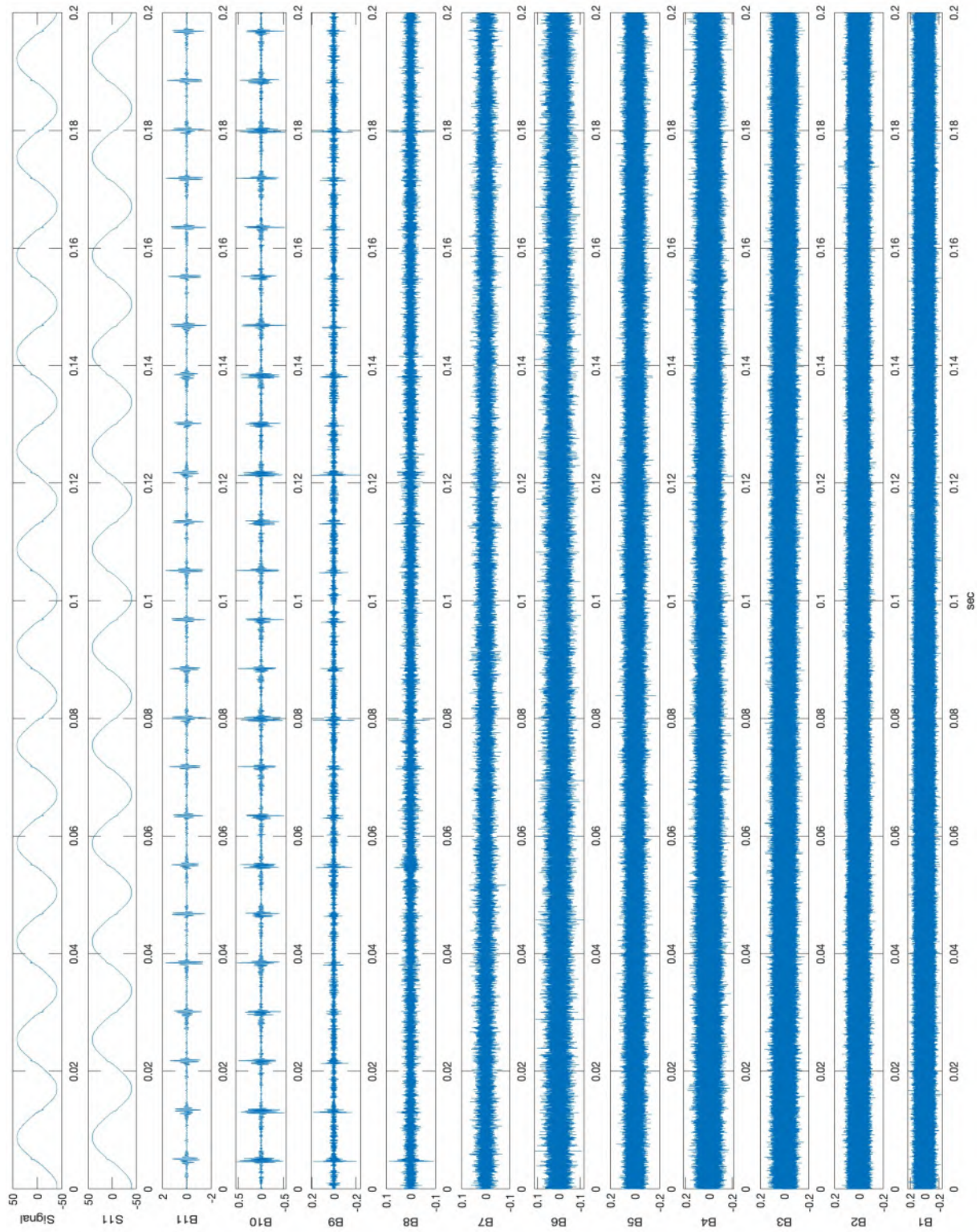


Figura 5.35: Análisis Wavelet multi-resolución de la corriente en la fase B.

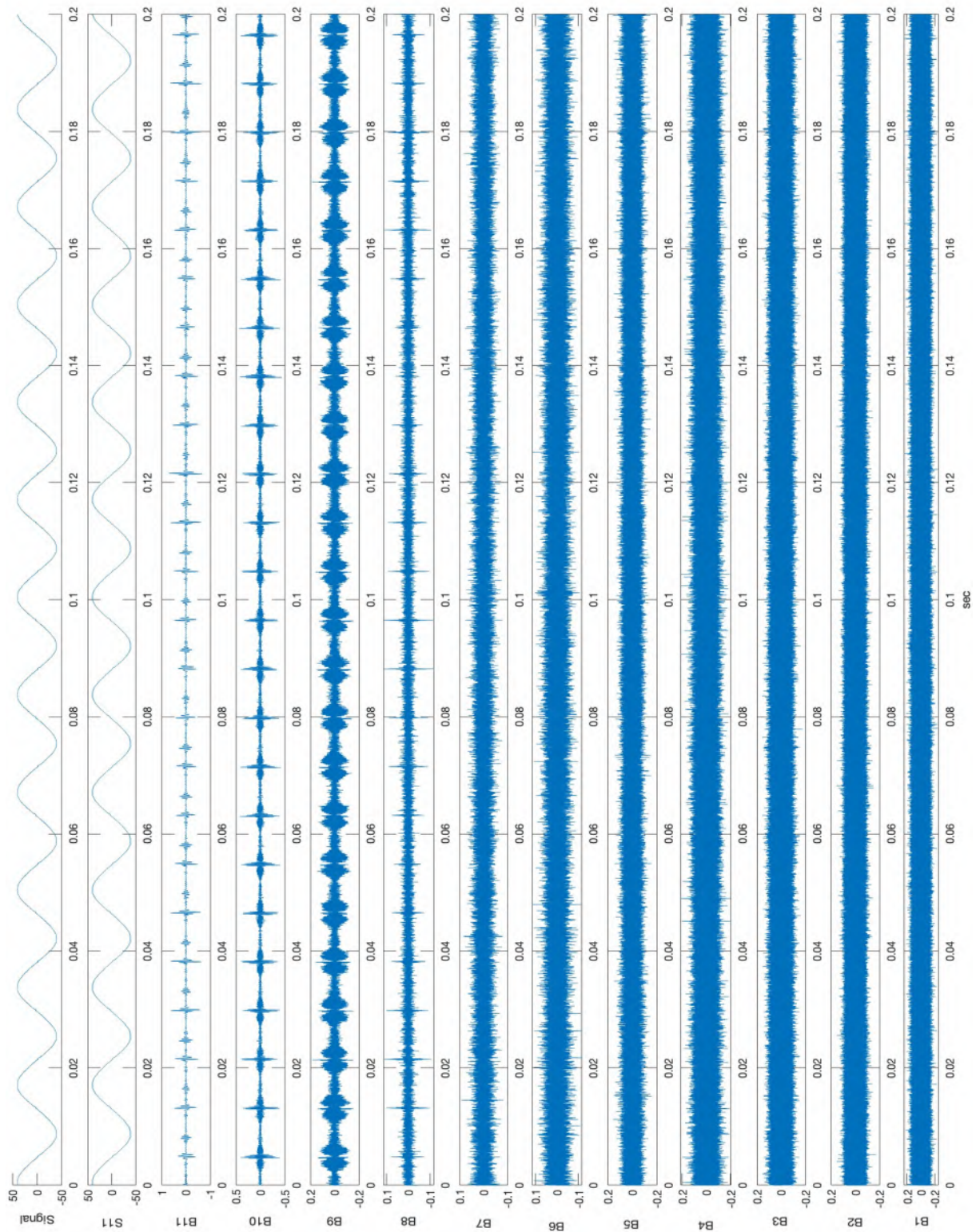


Figura 5.36: Análisis Wavelet multi-resolución de la corriente en la fase C.

Las figuras 5.37 y 5.38 muestran los resultados tras aplicar el escalograma a la banda B11 del análisis MRA para las formas de onda de voltaje de A-B y corriente en la fase A respectivamente. Observando las figuras se determina que para la señal de corriente se detectaron los componentes de frecuencia de mayor magnitud aproximadamente a los 25 ms, 50 ms, 75 ms, 110 ms, 145 ms, 155 ms y 180 ms. En la señal de corriente en la fase A, los componentes de frecuencia supra-armónica de mayor magnitud aparecieron aproximadamente a los 15 ms, 45 ms, 75 ms, 90 ms, 115 ms, 130 ms, 165 ms y 185 ms.

Las figuras 5.39 y 5.40 representan el escalograma de la banda B11 para la señal de voltaje de B-C y la corriente en la fase B. En ellos, los componentes de frecuencia supra-armónica de mayor magnitud aparecieron aproximadamente en los instantes 15 ms, 40 ms, 55 ms, 65 ms, 90 ms, 125 ms, 140 ms y 180 ms para la señal de voltaje y 15 ms, 25 ms, 45 ms, 55 ms, 60 ms, 85 ms, 105 ms, 120 ms, 135 ms, 145 ms, 185 ms y 195 ms para la señal de corriente.

En las figuras 5.41 y 5.42 se encuentran los escalogramas aplicados a la banda B11 del MRA para las señales de voltaje de C-A y la corriente en la fase C. Se puede apreciar que en ambas figuras se detecta un patrón de componentes de frecuencia supra-armónicas mayor. Esto se debe a que el voltaje de C-A y la corriente en la fase C corresponden al cargador 2, el cuál mostraba un compartamiento de conmutación menos refinado, con más interferencias armónicas probablemente debido a la estrategia de control que emplea para ajustarse al proceso de recarga. Para la señal de voltaje los componentes de frecuencia supra-armónica de mayor magnitud aparecieron aproximadamente en los instantes 15 ms, 25 ms, 40 ms, 55 ms, 80 ms, 85 ms, 95 ms, 105 ms, 110 ms, 130 ms, 135 ms, 145 ms, 150 ms, 180 ms y 195 ms. Para la señal de corriente aparecieron en los instantes 10 ms, 25 ms, 35 ms, 55 ms, 70 ms, 80 ms, 95 ms, 110 ms, 145 ms, 165 ms, 175 ms y 195 ms.

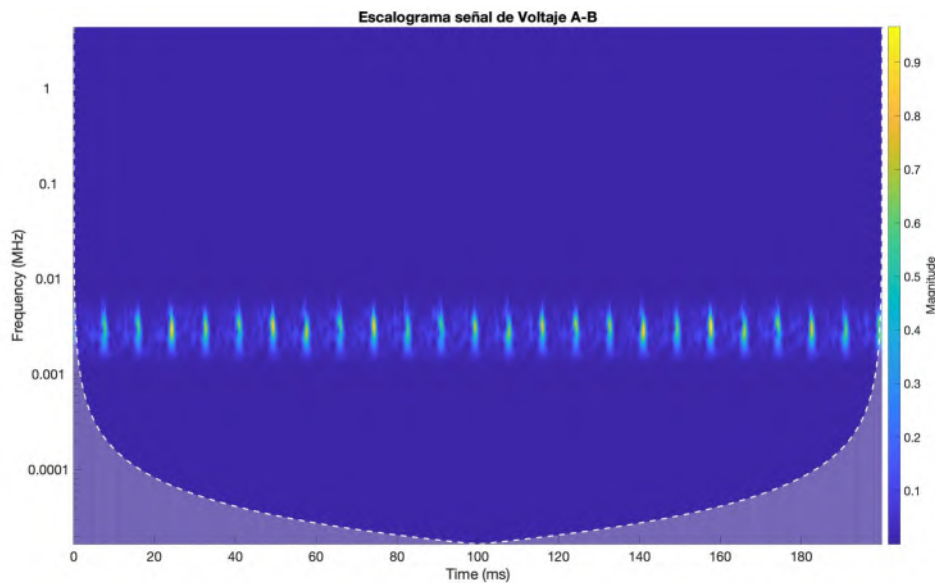


Figura 5.37: Escalograma de la señal de voltaje de A-B

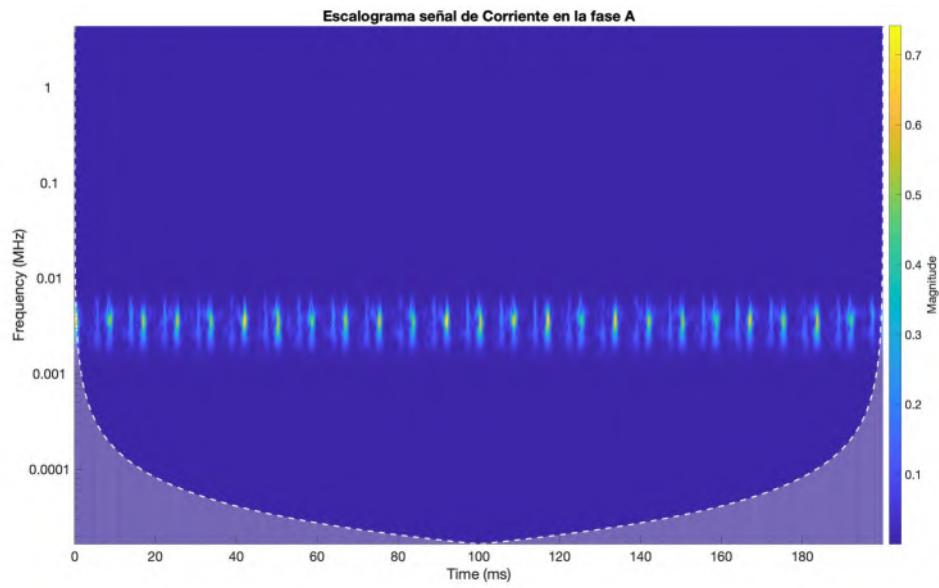


Figura 5.38: Escalograma de la señal de Corriente en la fase A

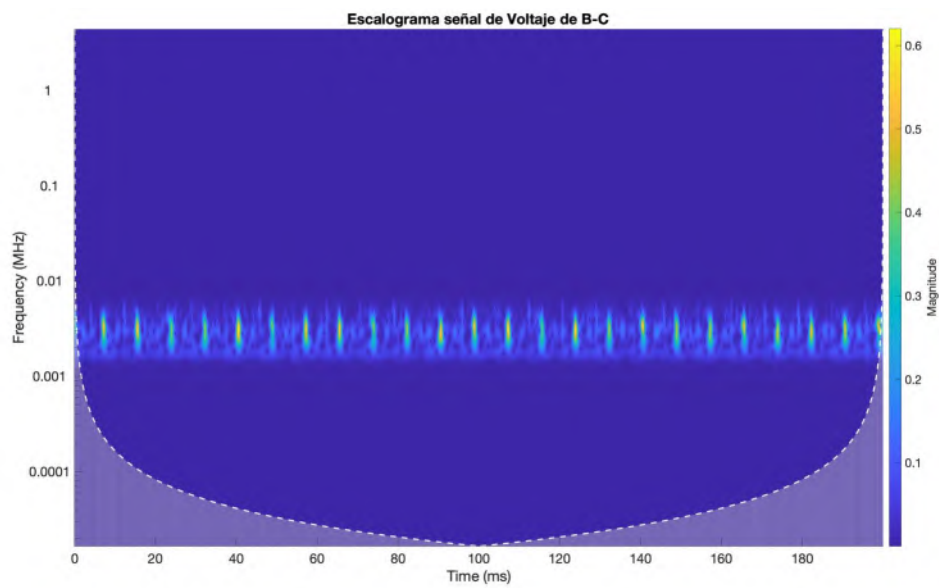


Figura 5.39: Escalograma de la señal de voltaje de B-C

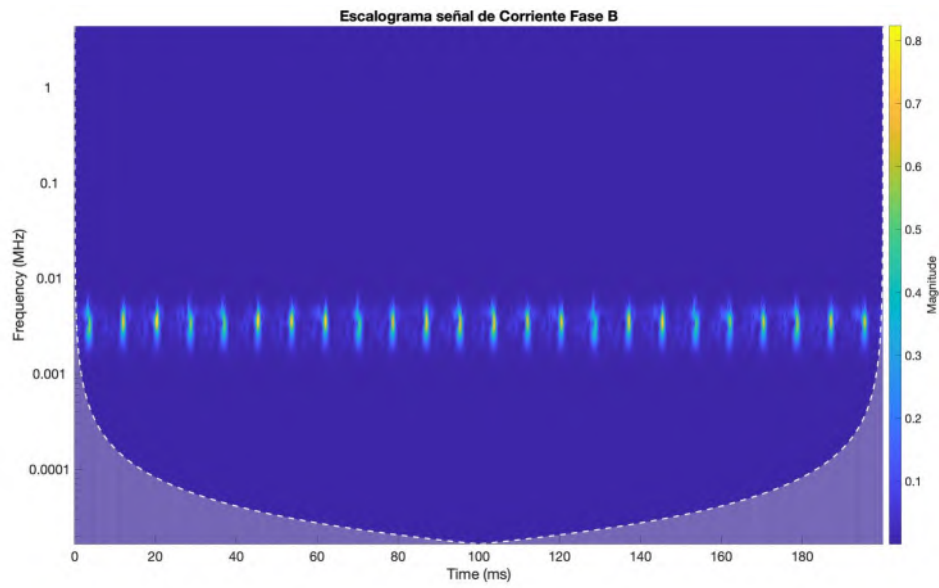


Figura 5.40: Escalograma de la señal de Corriente en la fase B

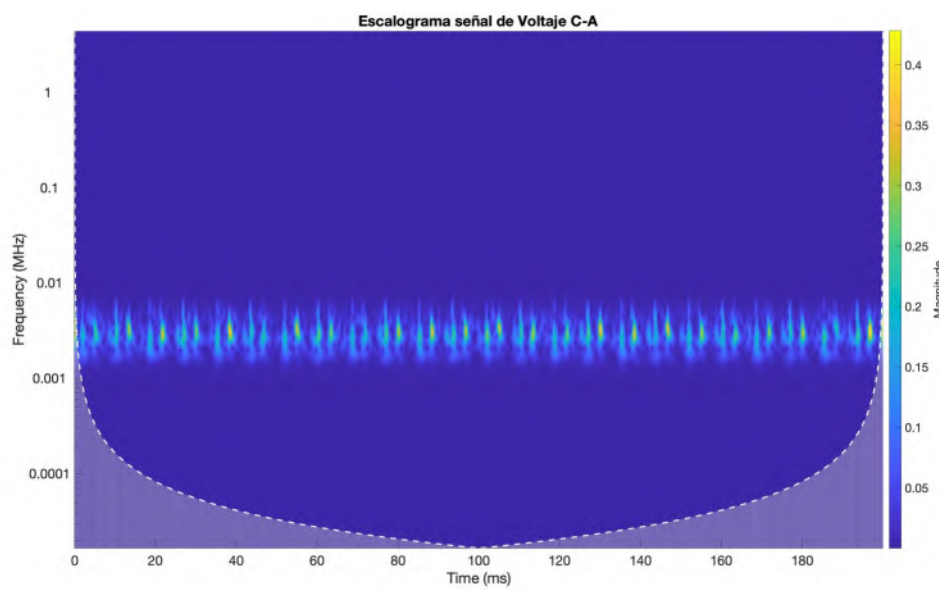


Figura 5.41: Escalograma de la señal de voltaje de C-A

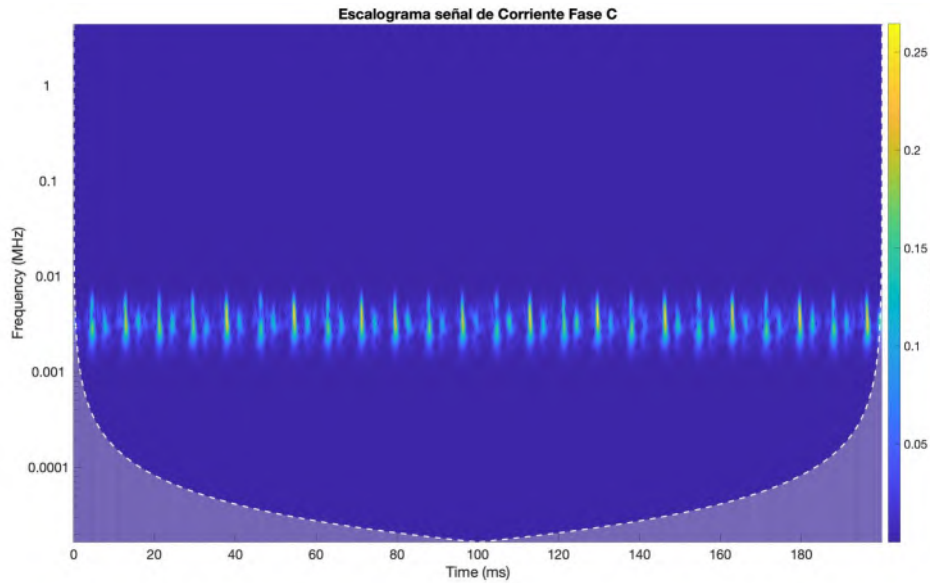


Figura 5.42: Escalograma de la señal de Corriente en la fase C

5.4. Discusión

En esta sección se discuten los resultados del análisis realizado al caso base, caso 1 y caso 2. De esta forma se corroborará el impacto que ocasiona en la red eléctrica de potencia de la recarga de un vehículo eléctrico y dos vehículos eléctricos simultáneamente. En el caso base únicamente se tienen resultados de mediciones de voltajes entre fases por lo que en ese apartado únicamente se considerará el impacto en los voltajes de la red eléctrica.

Los resultados arrojan que el voltaje de la red eléctrica ya se encontraba contaminado previo a conectar los vehículos eléctricos en la estación de recarga. El análisis de Fourier para el voltaje de A-B indicó que los componentes de frecuencia que aparecen con mayor magnitud se encuentran en frecuencias que son múltiplos impares de la fundamental alojados en el rango armónico. La distorsión armónica total fue de 0.8967%, mientras que la distorsión supra-armónica total fue de 0.1292%. El análisis Wavelet multi-resolución indicó que el contenido supra-armónico más destacable en el voltaje se encuentra en las bandas B10 y B11 que corresponden a un rango de frecuencia de 2,441.4Hz - 9,765.9Hz. En la banda B10 la energía alcanzó un valor de 1.08. En el voltaje B-C, las componentes de frecuencia más destacables se encuentran también ubicadas en múltiplos impares de la frecuencia fundamental. La distorsión armónica total es de 0.8425% y la distorsión supra-armónica total fue de 0.1499%. Analizando los resultados del análisis Wavelet multi-resolución el contenido supra-armónico se concentro en las bandas B10 y B11, las cuales abarcan el rango de 2,441.4Hz - 9,765.9Hz. La banda con mayor energía es la B10 con un valor de 1.02. Para el voltaje de C-A, La distorsión armónica total es de 0.9850% y la distorsión supra-armónica total es de 0.1439%. Los resultados del análisis Wavelet multi-resolución presentan que la banda donde se perciben más claramente variaciones en el tiempo de la componentes de frecuencia es la banda B10, la cual presenta un valor de energía de 0.79.

Para el caso 1 con un solo vehículo eléctrico conectado a la red se analizaron los resultados del voltaje A-C ya que el cargador correspondiente denominado cargador 1 se alimenta con dicho voltaje. El vehículo que se conecto a dicho cargador y con el cual se realizaron las mediciones para este caso fue un BMW modelo i3 2020. Tras aplicar la transformada rápida de Fourier se pudo determinar que para el rango supra-armónico los componentes de frecuencia que sobresalen son los mismos que en el caso base pero con magnitudes distintas. Los niveles de distorsión aumentaron, hubo un crecimiento de la distorsión en el rango armónico del 7.6954% y en el rango supra-armónico del 35.44%.

Analizando los resultados de aplicar el análisis Wavelet multi-resolución se determina que los componentes de frecuencia más relevantes en el rango supra-armónico se encuentran alojadas en las bandas B10 y B11, correspondientes al rango de frecuencia de 2,441.4Hz - 9,765.9Hz. La banda en la cual se aloja el

mayor contenido de frecuencia es la banda B10, mostrando un valor de energía de 4.799, el cual es mayor que el nivel de energía determinado para el voltaje C-A de la red eléctrica para el caso base. Por lo tanto, la energía en esa banda de frecuencia incrementa casi 6 veces cuando el vehículo eléctrico se conectó a la red eléctrica.

Respecto al caso 2 que consistió en conectar dos vehículos eléctricos simultáneamente (Jac modelo e-Sei 1 y Jac E10x) a la estación de recarga, se puede observar para el cargador 1 alimentado por el voltaje entre fases C-A, los resultados del análisis de Fourier indican que en el rango armónico sobresalen las componentes de frecuencia impares no-múltiplos de tres. La distorsión en el rango armónico fue de 1.1309%, mientras que en el rango supra-armónico fue de 0.1528%. Por lo que hubo un incremento en el rango armónico del 14.81% y en el rango supra-armónico un incremento del 6.1848% respecto al caso base. En comparación con el caso 1, también hubo un incremento en la distorsión en el rango armónico del 6.6082% y un incremento en la distorsión en el rango supra-armónico del 6.1848%. Analizando los resultados del análisis Wavelet multi-resolución se determinó que el contenido de frecuencia en el rango supra-armónico se encontró en las bandas B10 y B11, alojándose en el rango de 2,441.4Hz - 9,765.7Hz. La banda con mayor energía en donde se detectaron cambios en el tiempo más evidentes en las componentes de frecuencia fue la banda B10 con una concentración de energía de 3.57, siendo aproximadamente 4.5 veces la energía que se detectó en la misma banda para el caso base pero menor que la energía concentrada en la misma banda en el caso 1 con una diferencia de 1.229. La diferencia de niveles de energía entre el caso 1 y el caso 2 se atribuyen a las diferencias en los sistemas de control y electrónica de potencia de los vehículos eléctricos involucrados en ambos caso de estudio.

Siguiendo con la discusión de los resultados correspondientes al caso 2, para el voltaje A-B correspondiente al cargador 2, los resultados del análisis de Fourier indicaron que en el rango armónico los componentes de frecuencia que destacaron fueron los impares no-múltiplos de 3. La distorsión en el rango armónico fue de 0.9015% y en el rango supra-armónico fue de 0.1768%, lo que representa un incremento de 0.5353% en el rango armónico respecto al caso base y del 36.8421% en el rango supra-armónico respecto al caso base. Observando los resultados del análisis Wavelet multi-resolución se determinó que el contenido de frecuencias en el rango supra-armónico se alojó en las bandas B10 y B11, lo cual se encuentra dentro de un rango de 2,441.4Hz - 9,765.7Hz. La banda con mayor energía donde se detectaron cambios en la frecuencia variantes con el tiempo fue la banda B10 con una concentración de energía de 3.27 mostrando un incremento de 2.19 respecto a la energía del voltaje de la red para el caso base sin vehículo eléctrico.

El análisis de las corrientes para los casos 1 y 2 arroja las siguientes resultados. Para el caso 1, los componentes de frecuencia sobresalientes en la fase C asociada al cargados 1 para el rango armónico fueron frecuencias impares no múltiplos de tres de la frecuencia fundamental. El nivel de distorsión en el rango armónico fue de 2.8301% y en el rango supra-armónico fue de 1.1587%. Al aplicar el análisis Wavelet multi-resolución se encontró que los componentes de frecuencia en el rango supra-armónico se alojaron en las bandas B9, B10 y B11, la cuales se ubican en un rango de 2,441.4Hz - 19,531.4Hz. La banda B10 presentó los mayores niveles de energía con 47.3361, por lo cual en dicha banda B10 se presentó la mayor concentración de frecuencias supra-armónicas. En el caso 2, se puede observar que para la corriente en la fase C correspondiente al cargador 1, las componentes de frecuencia importantes son enteros impares no-múltiplos de 3 de la frecuencia fundamental. La distorsión armónica fue de 2.1086% y en el rango supra-armónico fue de 0.5539%, por lo que respecto al caso 1 se puede determinar que la electrónica de potencia y el control es distinto en cada cargador interno del vehículo conectado y que el nivel de carga era distinto al momento de realizar la medición. Los resultados del análisis Wavelet multi-resolución muestran que los componentes de frecuencia supra-armónicos se encuentran presentes en las bandas B9, B10 y B11, siendo la banda B10 en donde hay una mayor concentración de componentes de frecuencia variantes en el tiempo en el rango supra-armónico. El valor de energía de la banda B10 es de 20.06, el cual es menor a la energía que se detectó en esa misma banda para el caso 1.

En la corriente en la fase B correspondiente al cargador 2, destacaron componentes de frecuencia en el rango armónico enteros impares no-múltiplos de 3. La distorsión en el rango armónico fue de 2.2515% y en el rango supra-armónico fue de 1.0005%. Tras aplicar el análisis Wavelet multi-resolución se determinó que las componentes de frecuencia en el rango supra-armónico se alojaron en las bandas B9, B10 y B11, siendo la banda B10 donde hubo la mayor concentración supra-armónica y tuvo una concentración de energía de 24.88.

En la corriente en la fase A vinculada a la suma de las corrientes de los dos cargadores, en el rango armónico los componentes de frecuencia que destacaron fueron enteros impares no-múltiplos de 3. Se puede observar que en este espectro de frecuencias se encuentran una combinación de los componentes de frecuencia detectados en las corrientes en la fase C y en la fase B. Tras aplicar el análisis Wavelet multi-resolución se encontró que al igual que en las otras dos fases los componentes de frecuencia en el rango supra-armónico se encuentran en las bandas B9, B10 y B11 siendo la banda B10 donde se encuentra la mayor concentración supra-armónica y la mayor cantidad de energía con un valor de 44.47 siendo este la suma de las energías detectadas en la misma banda B10 para las corrientes en la fase C y B. Se puede apreciar de forma clara, que en la banda B9 de la fase A, la forma de onda del espectro de frecuencias es una combinación de la forma de onda del espectro de frecuencias de la corriente en la banda B9 de la fase B y de la fase fase C.

5.5. Conclusiones

En este capítulo se realizó la identificación de emisiones en el rango armónico y supra-armónico ocasionados por vehículos eléctricos conectados en estaciones de recarga. Se analizaron tres casos, el primero donde únicamente se analizó la red eléctrica, el segundo donde se encontraba un vehículo eléctrico conectado y el tercero donde dos vehículos eléctricos se encontraban conectados a la vez en la estación de recarga.

La contaminación armónica y supra-armónica se observa principalmente en las señales de corriente, aunque las señales de voltaje también se contaminan de frecuencias amónicas y supra-armónicas con la recarga de vehículos eléctricos. Además, tiene que considerarse que el voltaje de la red eléctrica ya se encuentra contaminado previo a la conexión de vehículos eléctricos en las estaciones de recarga.

Cabe mencionar que el análisis de Fourier FFT resultó una buena herramienta que permite encontrar el espectro armónico y supra armónico de las señales de corriente y voltaje que se le alimenten, permite darse una buena idea de que componentes de frecuencia aparecen en la señal pero tiene la gran limitante que no provee información del momento donde aparecen y que puede analizar únicamente un ciclo de la señal y se debe asumir que el comportamiento del resto es estacionario. En el caso 1, donde únicamente se encontraba un vehículo eléctrico cargándose se encontraron principalmente contenidos de frecuencia en el rango armónico, el voltaje y la corriente se encontraban en fase y el factor de potencia se mantenía cercano a la unidad, en 0.9987% y el mayor contenido de frecuencia en el rango supra-armónico se encontró en la banda B11 en un rango de 2,441.426Hz-4,882.885Hz. Mientras que en el caso 2, cuando hay dos vehículos eléctricos cargándose el análisis se vuelve un poco más complejo, tienen que considerarse que ahora las características eléctricas de la señal cambian al contar con dos cargadores trabajando simultáneamente. Como se mencionó previamente, los cargadores son bifásicos, y la conexión a la red eléctrica es trifásica por lo que hay una fase compartida entre ambos cargadores. El cargador denominado como 2 se alimenta con los voltajes de A-B y por el circula una corriente en la fase B. El cargador 1 se alimenta con los voltajes de C-A y por el circula una corriente en la fase C, por lo que se aprecia que ambos cargadores comparten la fase A. El cargador 1 presentó mayores incrementos de distorsión, esto debido a que en él se encontraba conectado el vehículo que concluyó su proceso de recarga y a medida que la carga se acercaba a su límite se incrementaba la distorsión de las señales.

Analizando la corriente en la fase A correspondiente a la suma del cargador 1 y el cargador 2 se puede observar que en las bandas donde se encuentran alojados los componentes de frecuencia se percibe la aportación de los componentes de frecuencia del cargador 1 y del cargador 2. De forma más clara se puede observar la banda número 10 de las Figuras 5.35 y 5.36. En ellas se puede apreciar el espectro de frecuencia correspondiente al cargador 2 y el cargador 1 respectivamente, cada espectro es variante en el tiempo y es diferente entre si. Por otra parte, en la banda 10 de la Figura 5.34 la cual corresponde a la fase A se aprecia la contribución de ambos cargadores, en el espectro de frecuencia se puede observar una especie de combinación entre el espectro de frecuencias del cargador 1 y del cargador 2 por lo que se puede determinar que en esa fase la contribución supra-armónica que se inyecta a la red es mayor.

Con lo antes mencionado, se determinó que, entre las herramientas empleadas para el procesamiento de las señales, el análisis multirresolución por wavelets (WMRA) resultó ser el método más efectivo para identificar los cambios de frecuencia en el tiempo. A diferencia de técnicas como la FFT, que presentan

limitaciones de resolución temporal, el WMRA permite descomponer la señal en bandas específicas de frecuencia conservando la información temporal.

Esta característica facilitó observar de forma más clara las variaciones en las componentes armónicas y su aparición en el tiempo.

Además, al calcular la energía y la varianza de los coeficientes por banda, se logró cuantificar la magnitud del contenido espectral y la dispersión de los mismos, lo cual permitió identificar la banda en la que se concentra el contenido armónico predominante. Finalmente, mediante el análisis del escalograma correspondiente a dicha banda, se corroboró visualmente la presencia y el instante temporal de los armónicos detectados, validando así la efectividad del método WMRA para el estudio de señales eléctricas no estacionarias.

Capítulo 6

Conclusiones

6.1. Conclusiones generales

Los vehículos eléctricos son una gran fuente de emisiones en el rango supra-armónico que se inyectan a la red eléctrica. El control con la electrónica de potencia asociada a los cargadores de dichos dispositivos es la principal causante de la generación de los contenidos de frecuencia supra-armónica. En los siguientes apartados se describen las conclusiones del presente trabajo de investigación.

Se realizó el diseño y creación de tarjetas con los sensores de voltaje LV25-P y el sensor de corriente LA100-P y sus respectivas resistencias de medición así como una fuente de corriente directa de $\pm 15V_{cd}$ para el funcionamiento de los sensores y se colocaron en una caja de acrílico en el gabinete correspondiente a la estación de recarga de vehículos eléctricos, se le agregaron terminales bnc para poder realizar la captura de datos de las tres fases de corriente y voltaje.

Se diseñó un software en Python para poder realizar el muestreo de las señales con ayuda del dispositivo Analog Discovery pro, permitiendo muestrear señales de forma eficiente con una frecuencia de muestreo de 10MHz y los datos se almacenaron para su posterior procesamiento.

Para corroborar que el sistema de adquisición de datos funcionara correctamente se realizó una validación, la cual consistió en generar 4 señales de 60Hz, 6kHz, 60kHz y 120kHz de 2V de amplitud con el generador de señales y se conectó al dispositivo Analog Discovery pro para realizar el muestreo, después la señal muestreada se exportó como un vector de datos en un archivo de texto y se ingresó en Matlab para ser procesada mediante la FFT y así obtener el espectro armónico de la señal. Posteriormente se repitió el proceso de generar las señales con el generador BK PRECISION pero ahora se conectó en el osciloscopio Tektronix TDS 2014B para observar la magnitud y la frecuencia de señal y compararla con la muestreada. Comparado con un dispositivo comercial como lo es el osciloscopio, el programa de muestreo en Python y el procesamiento de la señal con Matlab presenta mejores resultados, errores casi nulos en la frecuencia y muy bajos en la amplitud.

Analizando el vehículo eléctrico conectado a la estación de recarga se pudo determinar que el mayor contenido de frecuencia que presenta se encuentra en el rango armónico, si embargo también se detectaron contenidos de frecuencia en el rango supra-armónico. Al procesar las señales con las técnicas de procesamiento FFT, STFT y WMRA se determinó que la más adecuada fue el WMRA ya que permite identificar los cambios en las frecuencias e identificar las frecuencias en bandas a las cuales se les asigna un intervalo previamente calculado. Mientras que la FFT muestra información del espectro armónico de la señal procesada pero no el instante en que aparecen estos cambios, asumiendo que la señal es periódica lo cual no concuerda con el contenido supra-armónico el cual varía con el tiempo y la STFT que es una herramienta que si intenta proveer información del tiempo en que aparecen los cambios en las frecuencias pero se limita a la ventana de procesamiento con la que trabaja y además que no funciona muy bien con señales de alta frecuencia.

Con el análisis WMRA análisis se logró identificar que no hay tanta distorsión armónica, apenas el 1,0785% para voltaje y el 3,0581% para corriente, el factor de potencia se mantiene en 0.9987. Además se determinó que el contenido de frecuencia supra-armónico se alojó en la banda 11 en un rango de 2,441.426Hz a 4,882.885Hz para las señales de corriente y voltaje.

Al analizar los resultados de la estación de recarga cuando se encontraban dos vehículos eléctricos co-

nectados y cargándose simultáneamente se volvió más complejo el análisis y la interpretación de los resultados. Se muestrearon los tres módulos de medición en repetidas ocasiones hasta obtener el proceso de recarga de uno de los vehículos eléctricos, los datos se almacenaron y se procesaron con ayuda de las herramientas de procesamiento descritas anteriormente. Al obtener tantos datos se procedió a separar las mediciones en capturas, la captura inicial de los tres módulos de medición, la captura que quedaba justo a la mitad entre la primer y la última y la última captura que se logró obtener antes que el vehículo eléctrico completara su carga y fue la información que se presentó. Se identificaron los puntos de medición que correspondían a cada cargador, el módulo de medición 1 correspondía al cargador 2 y el punto de medición 3 correspondía al cargador 1.

Una vez que se analizó la información se observó que el cargador 2 contenía además una contribución del cargador 1, ya que hay una fase de la red eléctrica compartida entre ellos, y esto afecta en las potencias eléctricas, el factor de potencia y la distorsión de la señal. Se identificó que el contenido de frecuencias se aloja en las bandas de la 9 a la 11, siendo la 11 además la que aloja el contenido de frecuencia supra-armónico. Se determinó también, que en el cargador 2 donde se encuentra la contribución de ambos cargadores presenta el contenido armónico de cada cargador, es decir que en el módulo de medición 1 correspondiente al cargador 2 y donde se comparte fase con el módulo de medición 3 correspondiente al cargador 1 se aprecian dos contenidos de frecuencia supra-armónica correspondientes a la contribución de los otros módulos de medición, cosa que no se observa en los módulos de medición 2 y 3 y que afectan en la calidad señal en ese punto. Por lo tanto, se concluye que el WMRA es una muy buena herramienta para identificar los contenidos de frecuencia supra-armónica y las variaciones en el tiempo que presentan además que en el caso de analizar vehículos eléctricos permite identificar de forma clara los resultados del contenido de frecuencias en el rango supra-armónico.

6.2. Trabajos futuros

Como resultado de la realización de esta tesis, a continuación se enlistan los posibles trabajos futuros

- Diseñar una plataforma para la adquisición de datos que permita muestrear formas de onda en el tiempo con frecuencias superiores a 10MHz.
- Comparar los resultados obtenidos con las distintas técnicas del análisis multi-resolución tales como Empirical Mode Decomposition, Empirical Wavelet Transform y Variational Mode Decomposition.
- Crear una base de datos con las características obtenidas con el análisis multi-resolución para identificación y clasificación de vehículos eléctricos según su huella en el dominio de la frecuencia
- Proponer estándares que permitan mitigar o reducir de forma significativa la presencia de contenido supra-armónico.
- Modelar las fuentes de contaminación supra-armónicas mediante los resultados obtenidos con el análisis Wavelet multi-resolución.
- Implementar filtros o rediseñar los controladores de electrónica de potencia de los cargadores de vehículos eléctricos para reducir la inyección de componentes de frecuencia supra-armónicos en la red eléctrica.

Apéndice A

Cálculo de resistencia R_1 y R_M para el sensor de voltaje

La corriente RMS demandada en el devanado primario se determina como :

$$I_{pn} = 10 \times 10^{-3} A$$

El voltaje RMS con el que operan los sensores se establece como :

$$V_{pn} = 220V$$

Por lo tanto la resistencia R_1 se definirá como:

$$R_1 = \frac{V_{pn}}{I_{pn}} = \frac{220V}{10 \times 10^{-3}} = 22,000\Omega$$

Como no se encontró con ese valor de resistencia comercial se optó por implementar una resistencia R_1 de $25k\Omega$

La potencia que se disipará por R_1 se calcula :

$$P = (I_{pn})^2 (R_1) = (10 \times 10^{-3})^2 (25k\Omega) = 2,5W$$

Para evitar que la potencia se muy justa y evitar calentamientos se triplica la potencia.

$$P_n = 3(2,5W) = 7,5W$$

Para determinar la resistencia de medición $R - M$ primero se define la relación de transformación del sensor, la cual está dado por :

$$N = \frac{N_p}{N_s} = \frac{2,5}{1000} = 2,5$$

Considerando que la resistencia R_1 se cambio de valor, la corriente que circulará por el primario sera de $8,8 \times 10^{-3} A$, por lo tanto la corriente del secundario se definirá como:

$$I_s = N * I_{pn} = (2,5)(8,8 \times 10^{-3} A) = 0,022 A$$

Considerando obtener un voltaje de medición $V_M = 5V$

$$R_M = \frac{V_M}{I_s} = \frac{5V}{0,022A} = 227,2727\Omega$$

El valor comercial encontrado más cercano para esa resistencia es de 200Ω por lo que el voltaje que se espera a la salida es de $4.4V$

Apéndice B

Cálculo de resistencia R_1 y R_M para el sensor de corriente

Considerando la relación de transformación como :

$$N = \frac{N_p}{N_s} = \frac{1}{2000} = 0,5 \times 10^{-3}$$

La corriente nominal que de hoja de datos puede circular por el devanado primario es de $100mA$

La corriente que circulará por el secundario se determina como:

$$I_s = N * I_{pn} = (0,5 \times 10^{-3})(100 \times 10^{-3} A) = 50 \times 10^{-3} A$$

Esperando obtener 5V a la salida se determina la resistencia de medición R_M como

$$R_M = \frac{V_M}{I_s} = \frac{5V}{50 \times 10^{-3}} = 100\Omega$$

La potencia disipada por R_M es

$$P = (I_s)^2 (R_M) = (50 \times 10^{-3})^2 (100) = 0,25W$$

Para evitar que la potencia se muy justa y evitar calentamientos se triplica la potencia.

$$P = 3 * P = (3)(0,25W) = 0,75W$$

Apéndice C

Datos de la medición dos del Caso 2

C.1. Procesamiento Con Transformada rápida de Fourier

Los espectros armónicos de las señales de voltaje de A-B , B-C y C-A se muestran en las figuras C.1 C.2 C.3 mientras que la tabla C.1 muestra los armónicos de mayor magnitud que destacaron en los espectros de voltaje.

Tabla C.1: *Armónicos de mayor magnitud detectados en las tres señales de voltaje entre fases en la medición 2*

Voltaje de A-B		Voltaje de B-C		Voltaje de C-A	
Frecuencia Hz	Magnitud V	Frecuencia Hz	Magnitud V	Frecuencia Hz	Magnitud V
0	0.1330	0	0.1432	0	0.0998
60	313.0621	60	316.2758	60	313.0621
180	0.6899	180	0.2689	180	0.6894
300	0.3387	300	0.4879	300	0.3387
420	2.6860	420	2.4483	540	2.6870
660	1.5683	660	1.4684	780	1.5668
780	0.9119	780	1.1481	900	0.9119
1020	0.6753	1020	0.4809	1140	0.6753
2460	0.1132	1740	0.5128	2460	0.1132
2700	0.0793	2460	0.1829	2700	0.0793
10320	0.0632	2580	0.1211	10320	0.0632
10680	0.0676	10260	0.0458	10680	0.06760
16080	0.0652	10620	0.0406	16080	0.0652
16140	0.0547	16020	0.0241	16140	0.0547
		16080	0.0338		

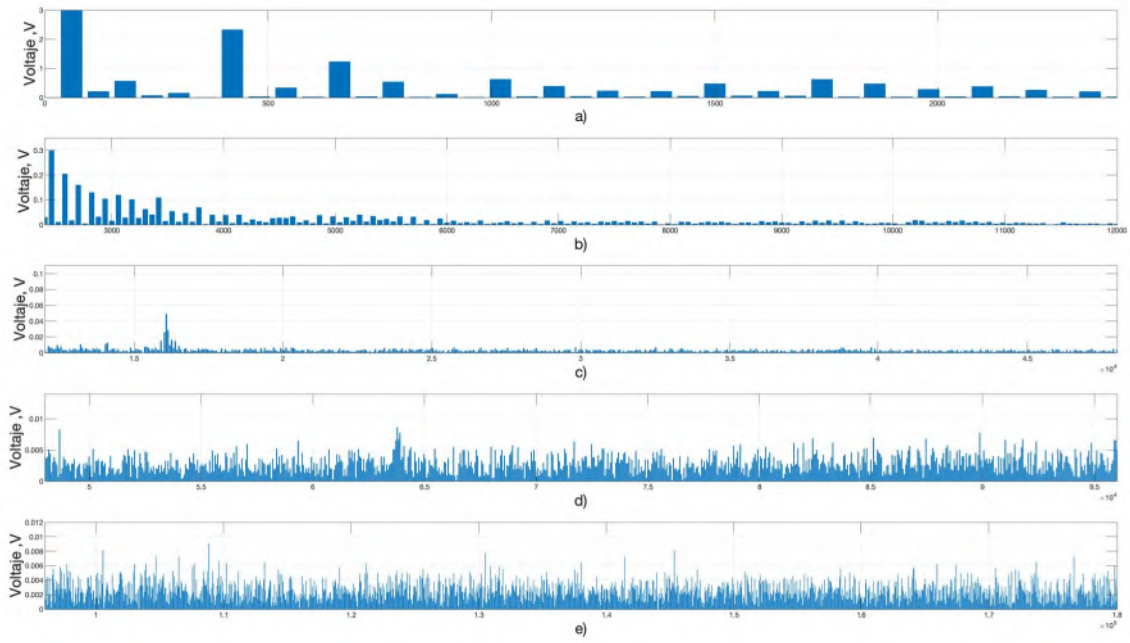


Figura C.1: *Espectro armónico de la forma de onda de voltaje de A-B. Rango en Hz de a).- 0-2400, b).- 2400-12000, c).- 12000-48000, d).- 48000-96000 y e).- 96000-180000*

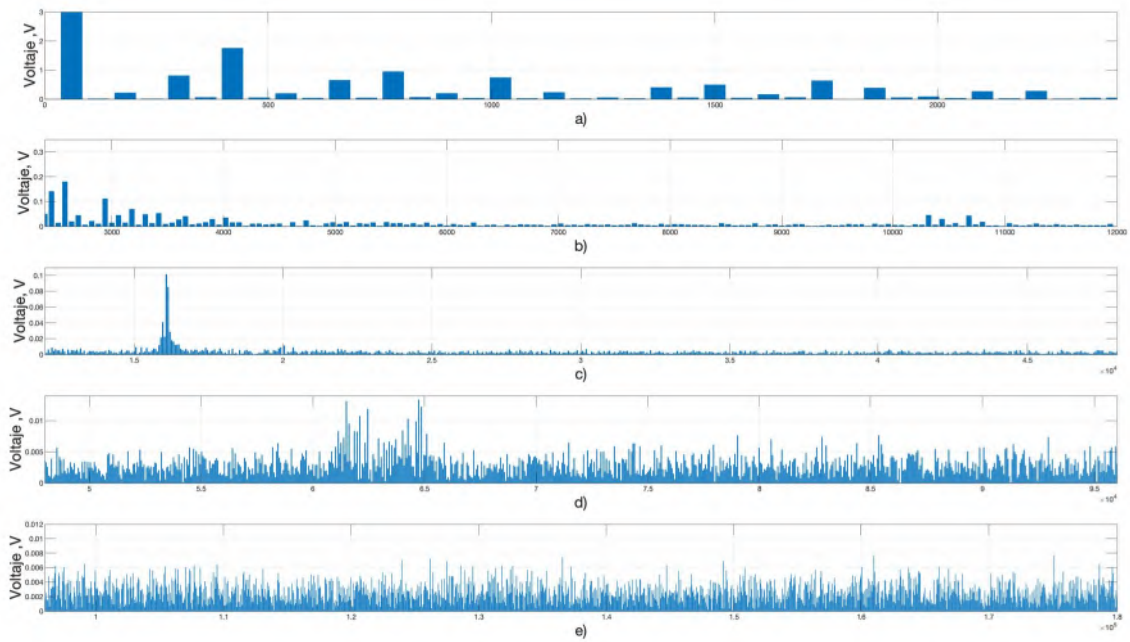


Figura C.2: *Espectro armónico de la forma de onda de voltaje de B-C. Rango en Hz de a).- 0-2400, b).- 2400-12000, c).- 12000-48000, d).- 48000-96000 y e).- 96000-180000*

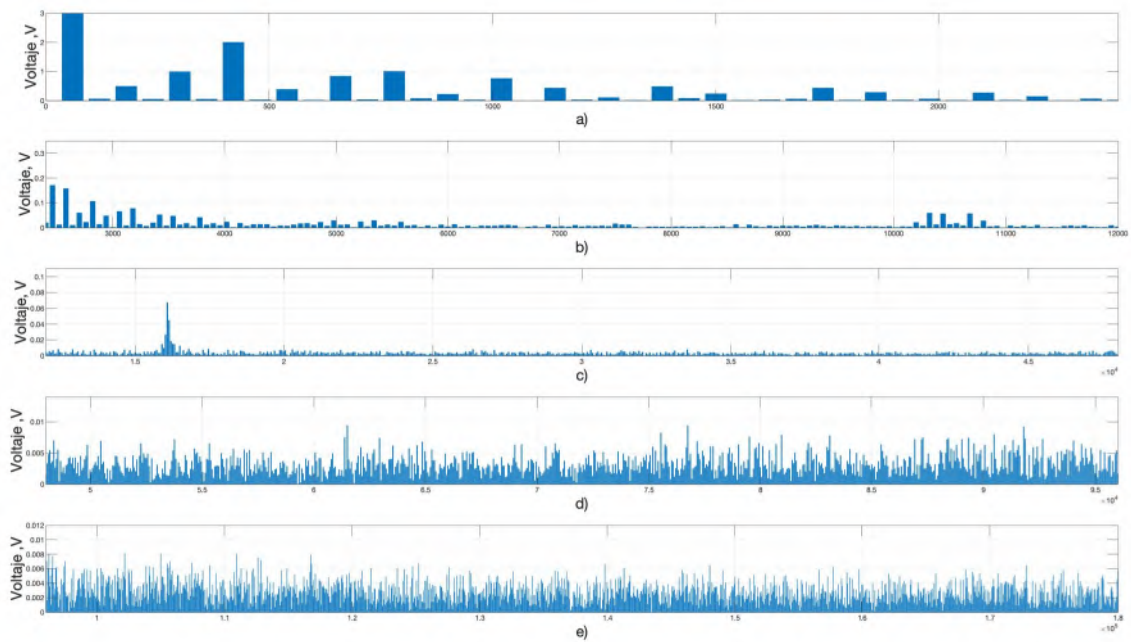


Figura C.3: *Espectro armónico de la forma de onda de voltaje de C-A. Rango en Hz de a).- 0-2400, b).- 2400-12000, c).- 12000-48000, d).- 48000-96000 y e).- 96000-180000*

Por su parte, las figuras C.4 C.5 C.6 muestran los espectros armónicos de las señales de corriente de las fases A, B y C. La Tabla C.2 muestra los armónicos de mayor magnitud que destacaron en los espectros de frecuencia para las señales de corriente.

Tabla C.2: *Armónicos de mayor magnitud detectados en las señales de corriente en la medición 2*

Corriente en la fase A		Corriente en la fase B		Corriente en la fase C	
Frecuencia Hz	Magnitud A	Frecuencia Hz	Magnitud A	Frecuencia Hz	Magnitud A
0	0.0223	0	0.0021	0	0.0198
60	64.2687	60	40.9512	60	33.2377
180	0.7947	180	0.2950	180	0.0794
300	0.2376	300	0.3755	300	0.2376
540	0.2270	420	0.5305	540	0.2270
780	0.1908	540	0.2808	780	0.1908
900	0.1502	660	0.3617	900	0.1502
1140	0.1526	900	0.2128	1020	0.1079
2940	0.0459	1020	0.2624	1140	0.526
3300	0.0611	2460	0.1016	3300	0.0611
3540	0.0526	2580	0.1051	3540	0.0526
10320	0.0625	2760	0.1035	172	0.0625
10680	0.0606	3660	0.0988	178	0.0606
16080	0.0119	3780	0.0978	268	0.0119
16140	0.0081	4380	0.0707	269	0.0082

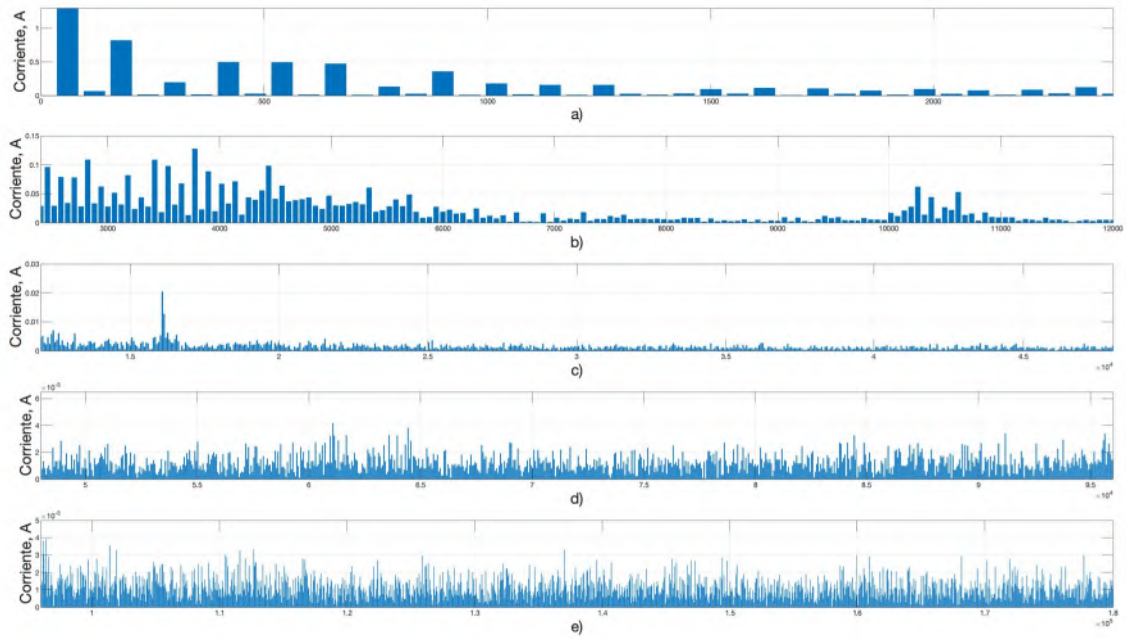


Figura C.4: *Espectro armónico de la forma de onda de corriente en la fase A. Rango en Hz de a).- 0-2400, b).- 2400-12000, c).- 12000-48000, d).- 48000-96000 y e).- 96000-180000*

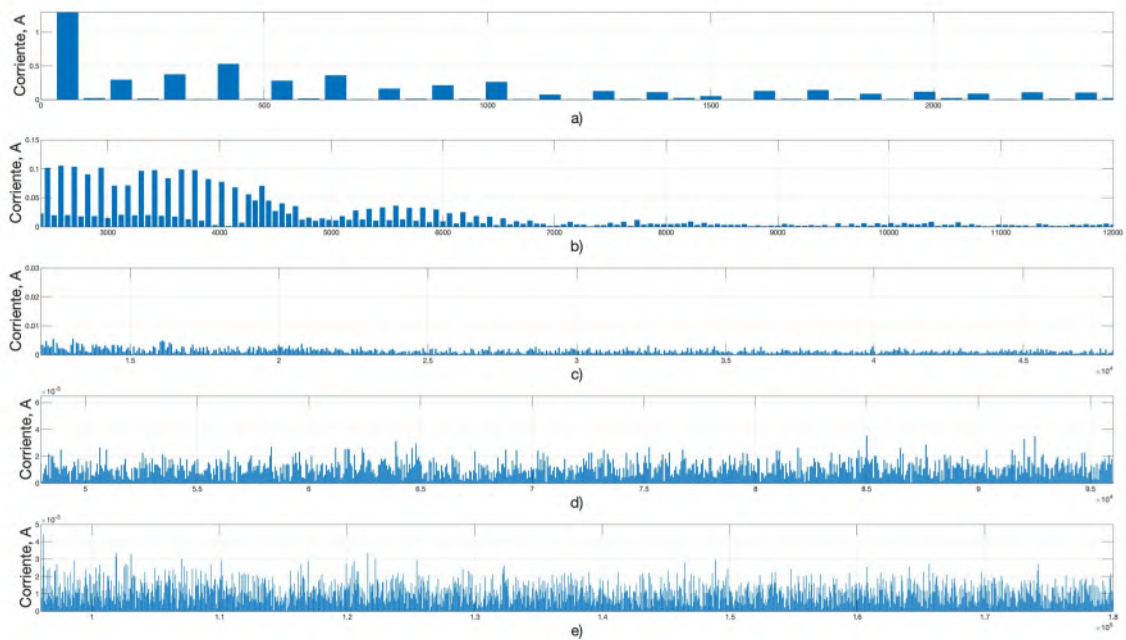


Figura C.5: *Espectro armónico de la forma de onda de corriente en la fase B. Rango en Hz de a).- 0-2400, b).- 2400-12000, c).- 12000-48000, d).- 48000-96000 y e).- 96000-180000*

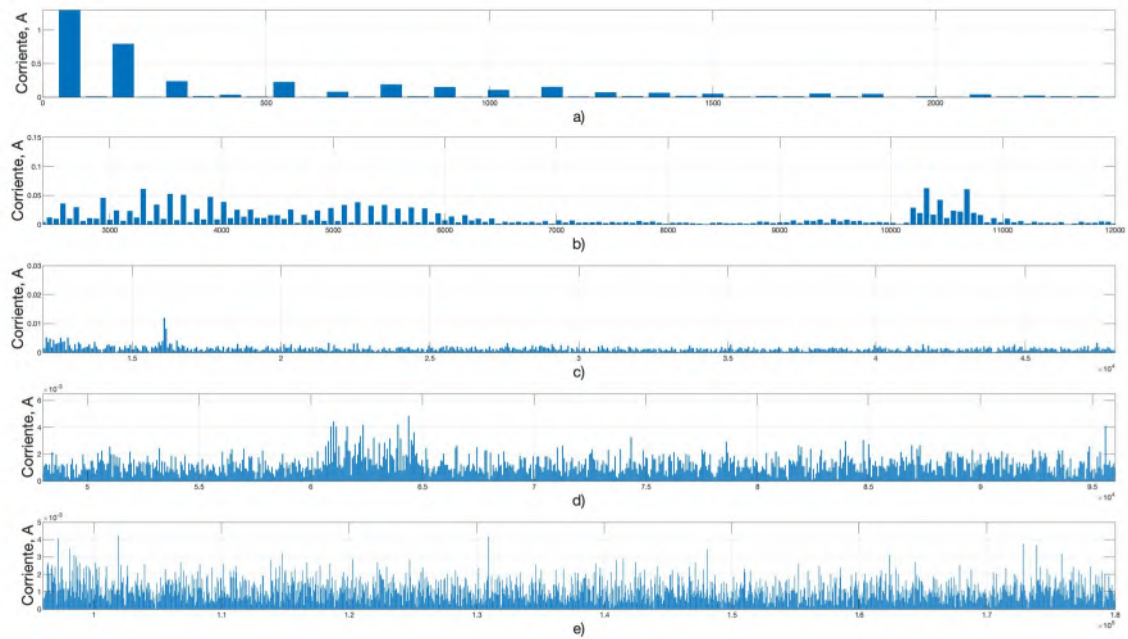


Figura C.6: Espectro armónico de la forma de onda de corriente en la fase C. Rango en Hz de a).- 0-2400, b).- 2400-12000, c).- 12000-48000, d).- 48000-96000 y e).- 96000-180000

C.2. Procesamiento Con Análisis Wavelet multi-resolución

Las figuras C.7 , C.8 y C.9 muestran el espectro del análisis tiempo-frecuencia de las señales de voltaje tras aplicar el análisis Wavelet multi-resolución. La Tabla C.3 presenta la correlación por banda entre las señales de voltaje entre las fases A-B , B-C y C-A. y la Tabla C.4 muestra la energía por banda y la varianza por banda en cada señal de voltaje.

Tabla C.3: Correlación entre las señales de voltaje en la segunda medición del caso 2

No. Banda	Correlación de voltaje A-B y B-C	Correlación de voltaje A-B y C-A	Correlación de voltaje B-C y C-A
S11	-0.820479888443797	-0.962034659253272	0.634331985626827
B11	0.065854263759873	-0.035515161729100	0.178389302834619
B10	0.173687125118698	-0.017454295307006	0.042732758540571
B9	0.292693216151903	-0.076913328302110	-0.124081674450765
B8	0.156222167608773	-0.034416174404056	-0.039536194244628
B7	0.034315581587512	-0.005614323102262	0.006087493010391
B6	0.011829513695559	-0.003987527880855	-0.006893646068072
B5	0.004847884799234	0.008391367933831	-0.003391718592199
B4	0.001285254313991	0.003784708241601	0.000187103777227
B3	0.003408402707742	-0.002092486024880	-0.004479520065870
B2	0.000351198112138	-0.000127429515629	0.000659488028410
B1	0.001062931814246	-0.000808918876688	0.000782614233056

Tabla C.4: *Energía y varianza por banda en las señales de voltaje entre fases A-B, B-C y C-A en la segunda medición del caso 2*

No. Banda	Voltaje de A-B		Voltaje de B-C		Voltaje de C-A	
	Energía por banda	Varianza por banda	Energía por banda	Varianza por banda	Energía por banda	Varianza por banda
S11	40,024,923.3300	20.010326672501048	39,340,639.8278	19.670141530101219	39,001,239.0586	19.600467086201533
11	36.8031	0.000018401442942	54.5209	0.000027260251371	12.4032	0.000006201573994
10	3.6343	0.000001817155292	3.3046	0.000001652307688	3.2127	0.000001606372091
9	3.2307	0.000001615339905	2.1567	0.000001078366509	5.1852	0.000002592601673
8	1.2325	0.000000616274112	0.8893	0.000000444692666	1.0414	0.000000520732376
7	2.0612	0.000001030623678	1.4380	0.000000719016572	1.4655	0.000000732753454
6	3.1295	0.000001564763358	3.0345	0.000001517271988	3.0485	0.000001524259981
5	5.7749	0.000002887469510	5.7740	0.000002886981989	5.8154	0.000002907693244
4	9.6349	0.000004817451891	9.5804	0.000004790212055	9.6003	0.000004800123655
3	7.2719	0.000003635926571	7.2122	0.000003606108735	7.1769	0.000003588441571
2	5.3721	0.000002686055293	5.3407	0.000002670370082	5.3725	0.000002686253387
1	13.1847	0.000006592309991	13.1185	0.000006559230160	13.1751	0.000006587545681

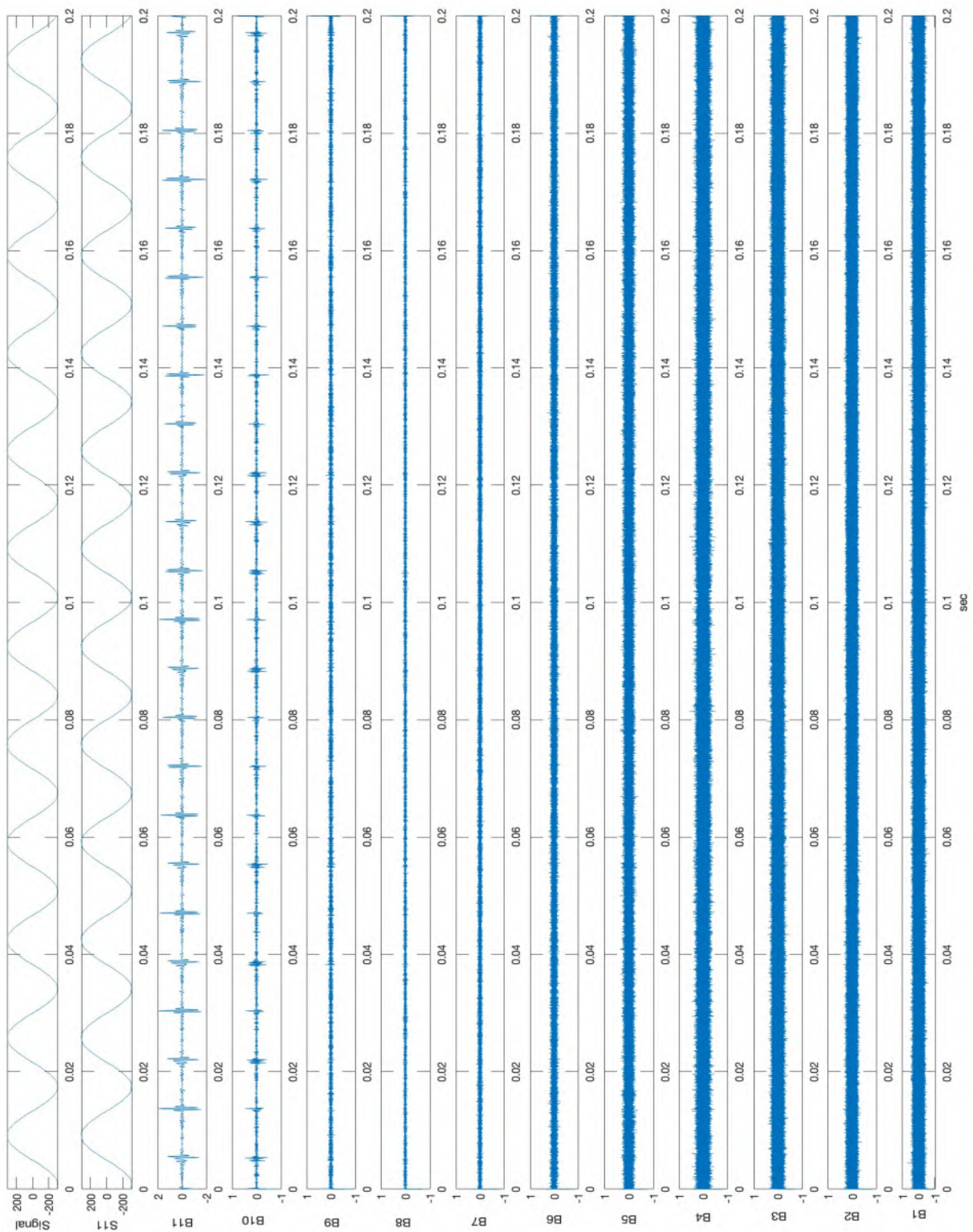


Figura C.7: Primer captura. Descomposición en tiempo-frecuencia de la señal de voltaje de A-B utilizando el análisis multi-resolución Wavelet

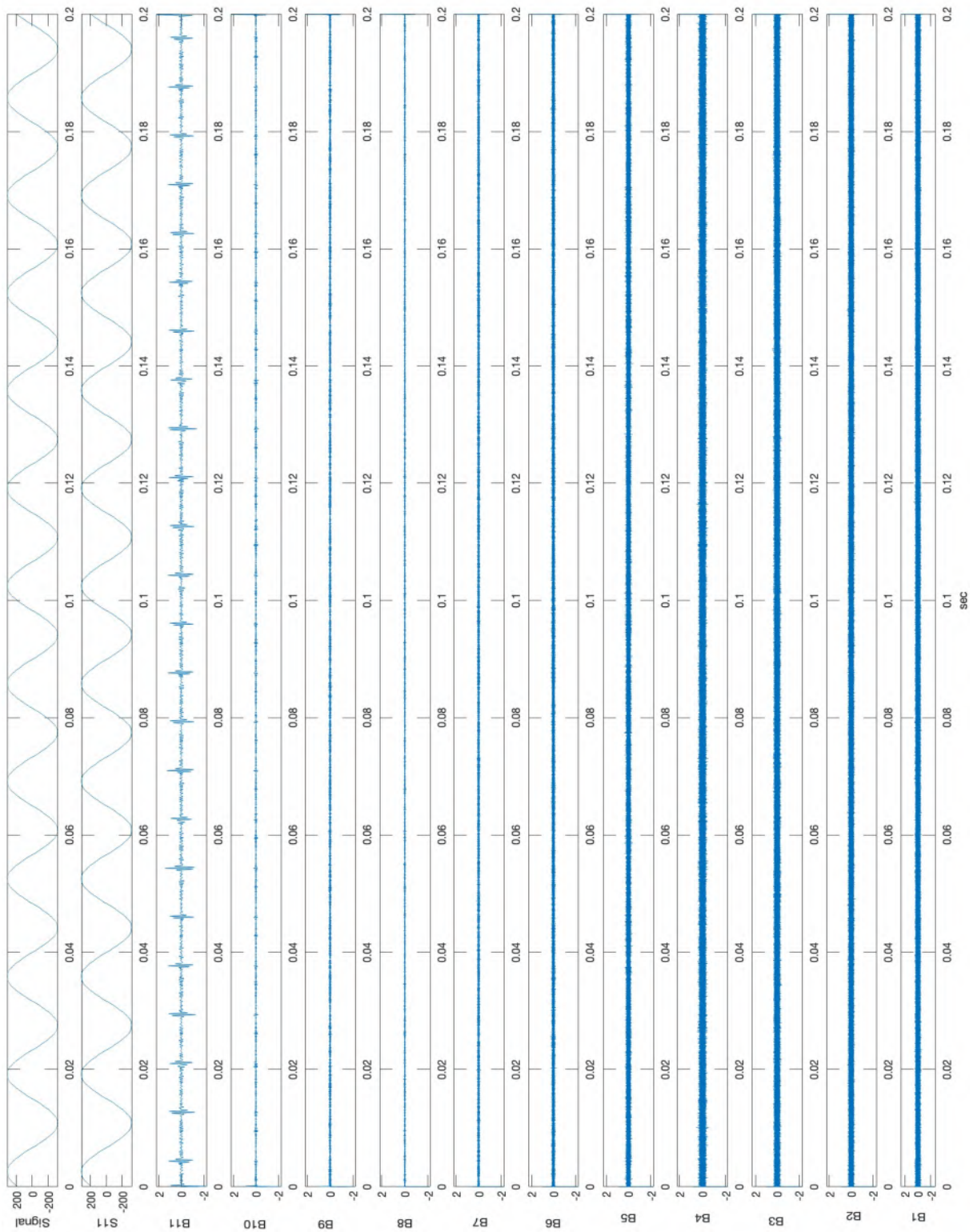


Figura C.8: *Primer captura. Descomposición en tiempo-frecuencia de la señal de voltaje de B-C utilizando el análisis multi-resolución Wavelet*

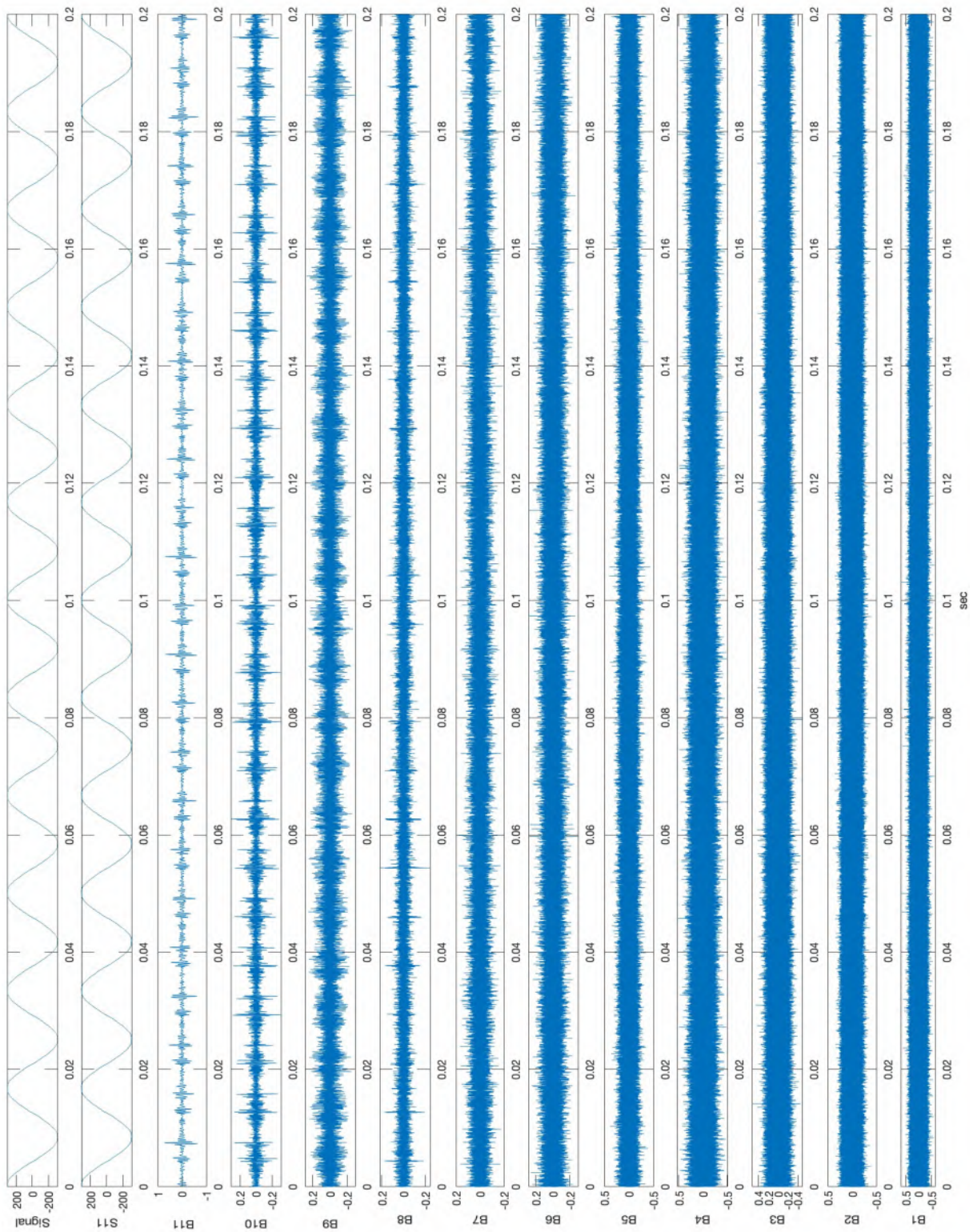


Figura C.9: *Primer captura. Descomposición en tiempo-frecuencia de la señal de voltaje de C-A utilizando el análisis multi-resolución Wavelet*

Por su parte, Las figuras C.10 , C.11 y C.12 muestran el espectro del análisis tiempo-frecuencia de las señales de voltaje tras aplicar el análisis Wavelet multi-resolución. La Tabla C.5 presenta la correlación por banda entre las señales de corriente y la Tabla C.6 muestra la energía por banda y la varianza por banda en cada señal de corriente en las fases A, B y C.

Tabla C.5: *Correlación entre las señales de corriente en las fases A, B y C en la segunda medición del caso 2*

No. Banda	Correlación de corriente A y B	Correlación de corriente A y C	Correlación de corriente B y C
S11	-0.998651183485313	-0.980303957186454	0.985950722934541
B11	-0.035487743056573	-0.083180182786999	0.246685096376655
B10	0.005670971287196	-0.044591705388158	0.066890843612292
B9	0.022315421374227	0.004759613359490	-0.009601236104014
B8	0.012363283297141	0.035802572869720	0.000894236683548
B7	0.003023945326190	0.008612921055053	0.003940099128146
B6	0.000379476231004	0.000938358002666	-0.000121985592693
B5	0.004523848485777	-0.007563854088721	-0.001687548544694
B4	-0.000052315930153	0.003834567729049	0.003900512458224
B3	0.006302874493666	0.001955115745240	0.004089803147477
B2	0.002070801825465	0.000757817201327	-0.000413336559644
B1	-0.001320453748456	-0.000337206701821	0.001262453504976

Tabla C.6: *Energía y varianza por banda en las señales de corriente en las fases A, B y C en la segunda medición del caso 2*

No. Banda	Corriente en la fase A		Corriente en la fase B		Corriente en la fase C	
	Energía por banda	Varianza por banda	Energía por banda	Varianza por banda	Energía por banda	Varianza por banda
S11	10,306,259.4409	5.152734120352266	4,200,722.0992	2.100109739401651	1,382,988.9610	1.382988961043146
11	208.0507	0.000104024605900	224. 2188	0.000112108561388	20.4748	0.000020474840857
10	43.0902	0.000021544985279	28. 0645	0.000014032171835	9.4702	0.000009470175251
9	14.4706	0.000007235261981	2.0552	0.000001007604938	6.9152	0.000006915232474
8	1.1992	0.000000599642072	0.9179	0.000000458983586	5.3519	0.000000535198594
7	1.7569	0.000000878478227	1.6431	0.000000821566430	10.0719	0.000001007193933
6	3.6592	0.000001829631943	3.6452	0.000001822614864	10.3478	0.000001834789515
5	6.1955	0.000003097743596	6.2878	0.000003143876935	35.0885	0.000003108853851
4	9.4053	0.000004702627290	9.3983	0.000004699116041	47.2707	0.000004727075230
3	6.6556	0.000003327804955	6.6861	0.000003343058755	33.2231	0.000003322316945
2	5.2119	0.000002605954647	5.2143	0.000002607162709	26.0341	0.000002603419335
1	12.9007	0.000006450326152	12.9735	0.000006486704142	64.5350	0.000006453502661

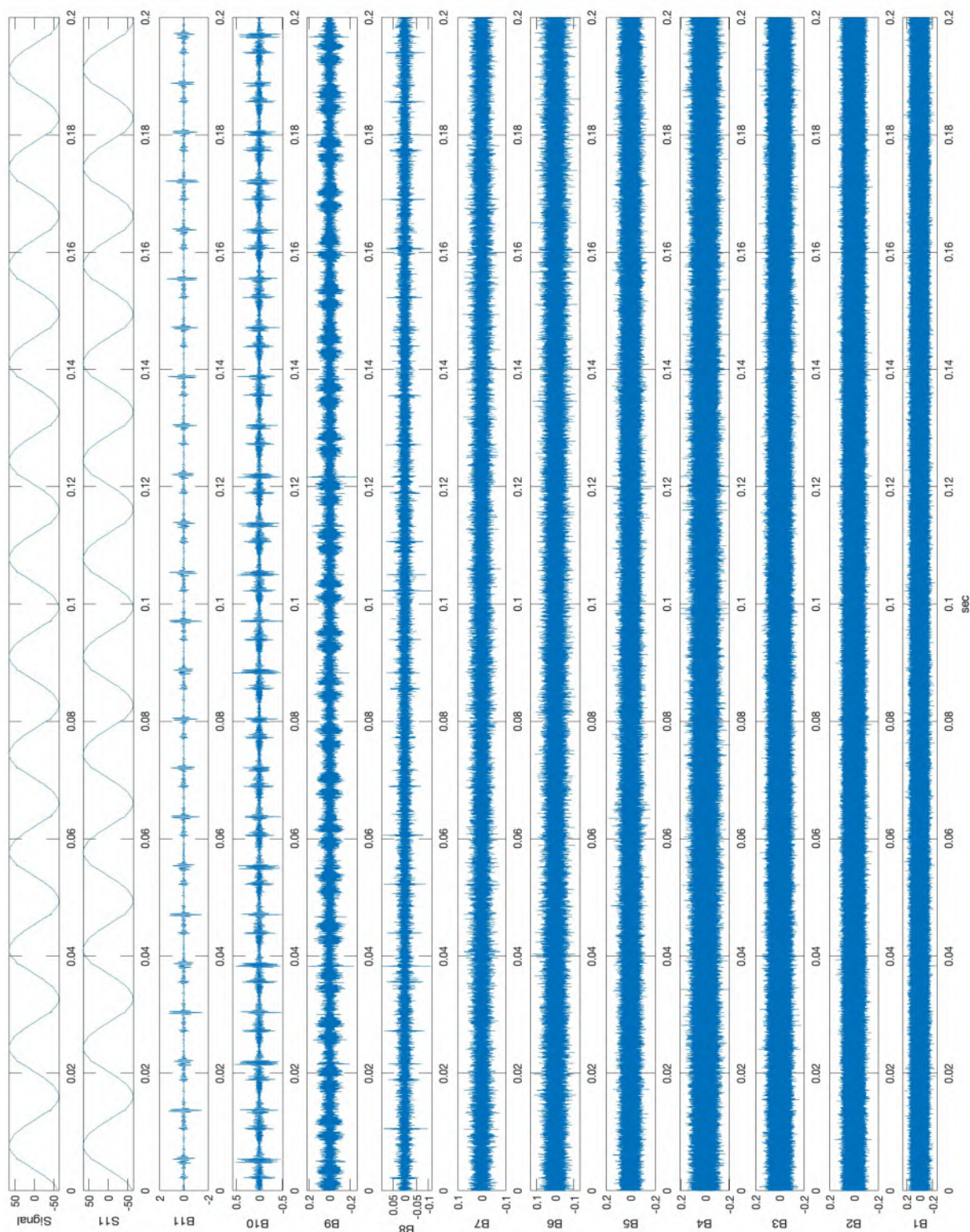


Figura C.10: Primer captura. Descomposición en tiempo-frecuencia de la señal de corriente en la fase A utilizando el análisis multi-resolución Wavelet

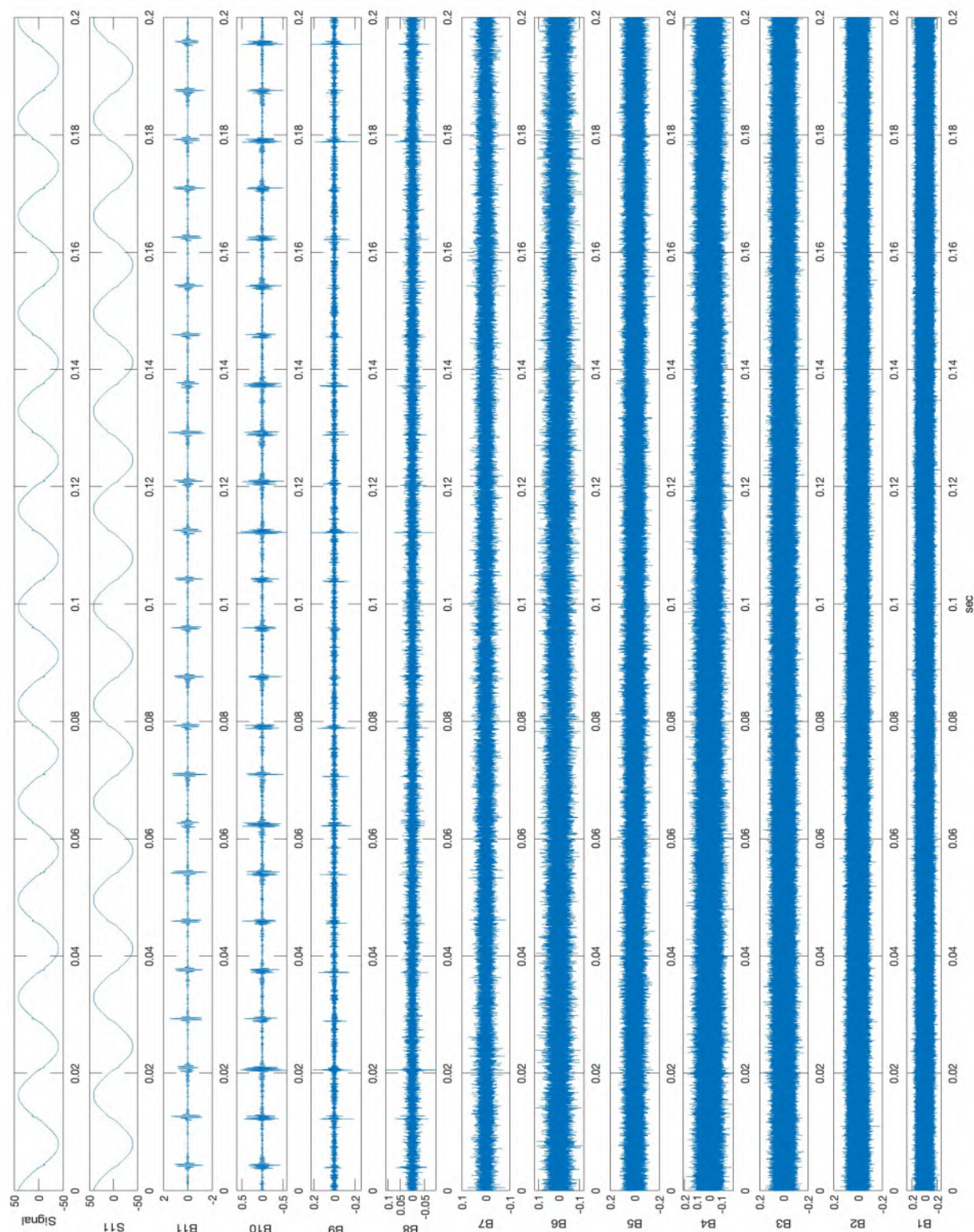


Figura C.11: Primer captura. Descomposición en tiempo-frecuencia de la señal de corriente en la fase B utilizando el análisis multi-resolución Wavelet

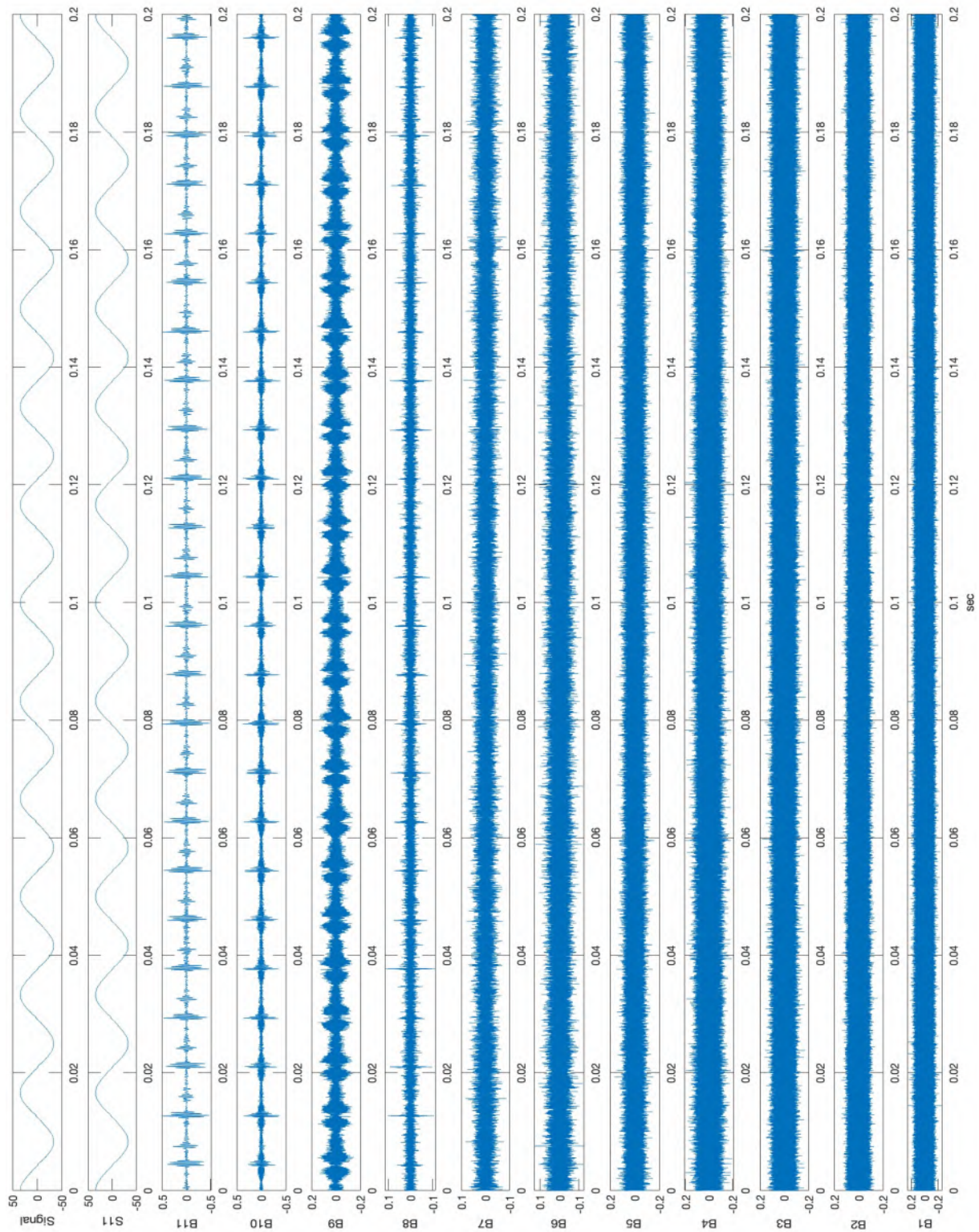


Figura C.12: Primer captura. Descomposición en tiempo-frecuencia de la señal de corriente en la fase C utilizando el análisis multi-resolución Wavelet

Apéndice D

Datos de la medición tres del Caso 2

D.1. Procesamiento Transformada rápida de Fourier

Los espectros armónicos de las señales de voltaje de A-B , B-C y C-A se muestran en las figuras D.1 D.1 D.1 mientras que la tabla D.1 muestra los armónicos de mayor magnitud que destacaron en los espectros.

Tabla D.1: *Armónicos de mayor magnitud detectados en las señales de voltaje en la tercera medición del caso 2*

Voltaje de A-B		Voltaje de B-C		Voltaje de C-A	
Frecuencia	Magnitud	Frecuencia	Magnitud	Frecuencia	Magnitud
0	0.1443	0	0.0332	0	0.02876
60	314.4416	60	315.4887	60	313.4345
180	0.2819	180	0.2678	180	0.7112
420	1.9358	300	0.6177	300	0.5105
660	0.8965	420	1.9336	420	2.1842
780	0.6828	660	0.9519	540	0.4794
1020	0.4315	780	0.6736	660	1.3581
1140	0.5450	1020	0.5652	780	0.7369
1500	0.7666	1380	0.5424	1020	0.7094
2460	0.3407	1740	0.8475	1140	0.5580
2580	0.1924	2460	0.2368	2460	0.2150
3420	0.1562	10260	0.0474	10860	0.0347
16080	0.0259	16080	0.0486	16080	0.0770
16140	0.0243	16220	0.0237	16140	0.0736

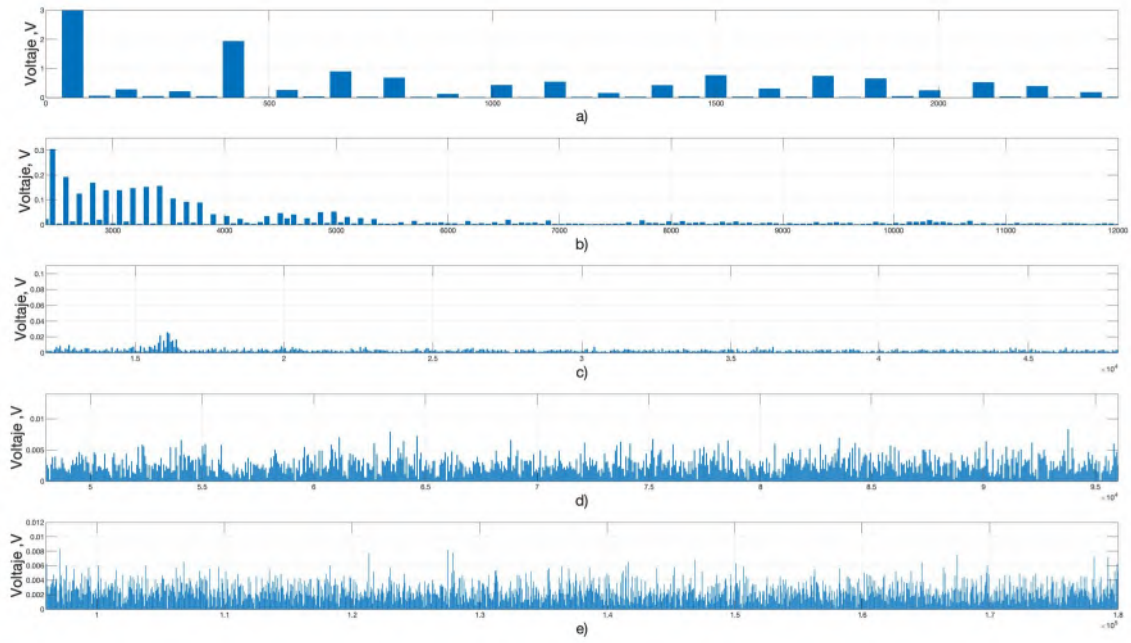


Figura D.1: *Espectro armónico de la forma de onda de voltaje de A-B. Rango en Hz de a).- 0-2400, b).- 2400-12000, c).- 12000-48000, d).- 48000-96000 y e).- 96000-180000*

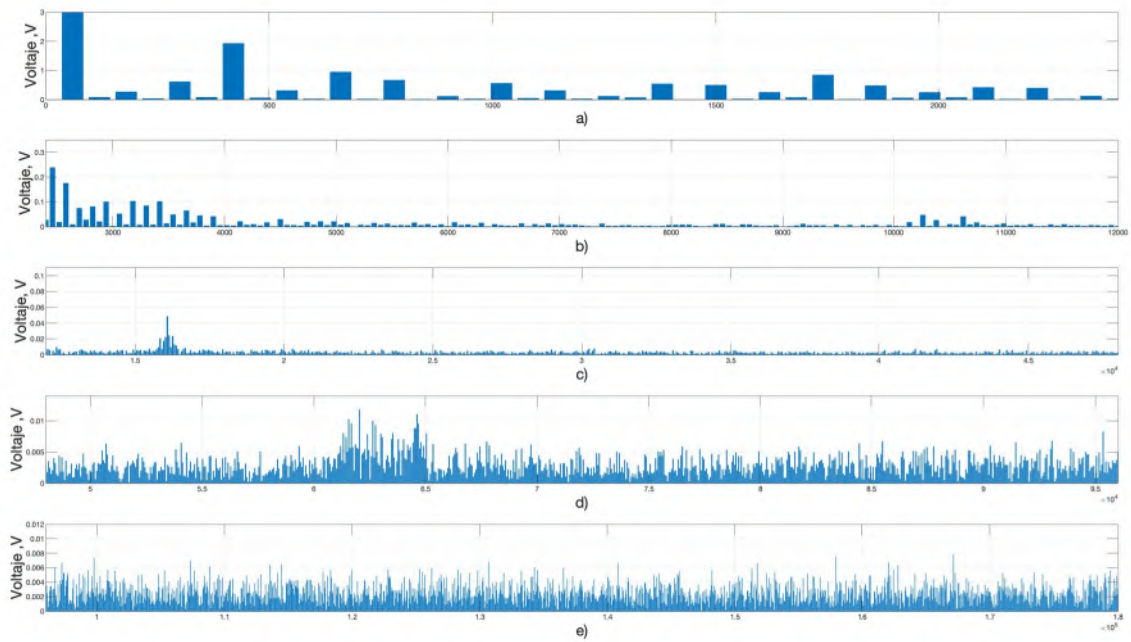


Figura D.2: *Espectro armónico de la forma de onda de de voltaje de B-C. Rango en Hz de a).- 0-2400, b).- 2400-12000, c).- 12000-48000, d).- 48000-96000 y e).- 96000-180000*

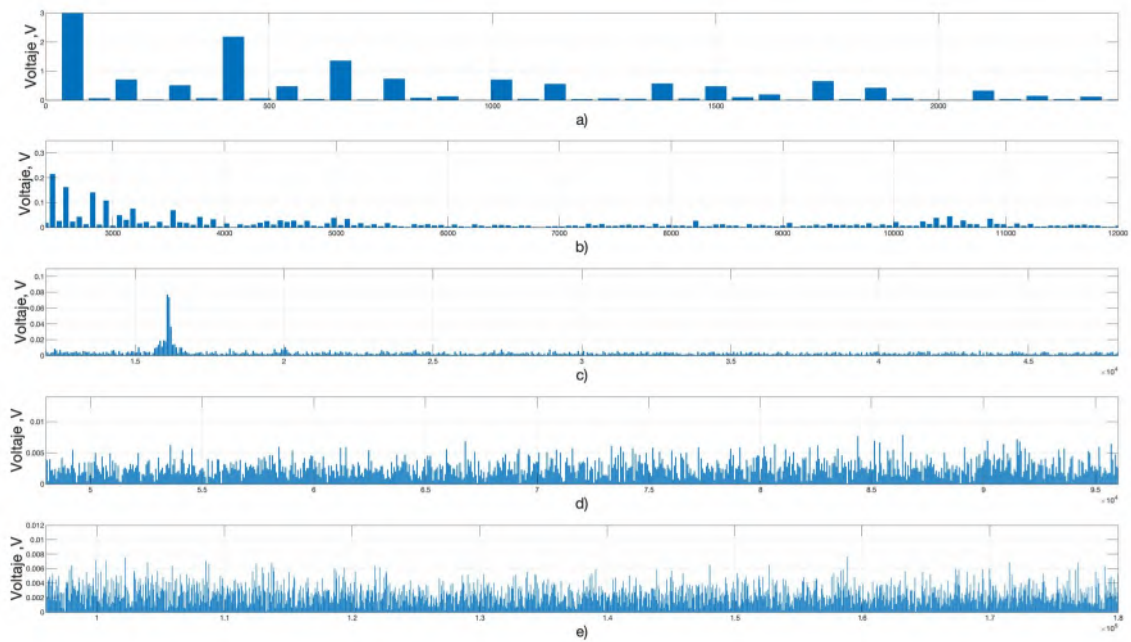


Figura D.3: *Espectro armónico de la forma de onda de de voltaje de C-A. Rango en Hz de a).- 0-2400, b).- 2400-12000, c).- 12000-48000, d).- 48000-96000 y e).- 96000-180000*

Por su parte, las figuras D.4 D.6 ?? muestran los espectros armónicos de las señales de corriente de las fases A, B y C. La Tabla D.2 muestra los armónicos de mayor magnitud que destacaron en los espectros de frecuencia para las señales de corriente.

Tabla D.2: *Armónicos de mayor magnitud detectados en las señales de corriente en la tercera medición del caso 2*

Corriente en la fase A		Corriente en la fase B		Corriente en la fase C	
Frecuencia	Magnitud	Frecuencia	Magnitud	Frecuencia	Magnitud
0	0.0098	0	0.0110	0	0.0554
60	55.2259	60	41.2565	60	11.43
180	0.6410	180	0.2799	180	1.2516
420	0.4814	300	0.3404	300	0.2819
540	0.4823	420	0.5093	540	0.1381
660	0.3723	540	0.2947	660	0.0974
900	0.3373	660	0.3547	780	0.0874
1140	0.2938	900	0.2165	2460	0.0794
1500	0.2957	1020	0.2446	2580	0.0658
2580	0.1213	2580	0.0953	3060	0.0622
10320	0.0618	2700	0.0829	10380	0.0330
10680	0.550	3540	0.0969	10620	0.0240
16080	0.0200	3660	0.0938	16080	0.0131
16140	0.0144	4860	0.0577	16140	0.0115

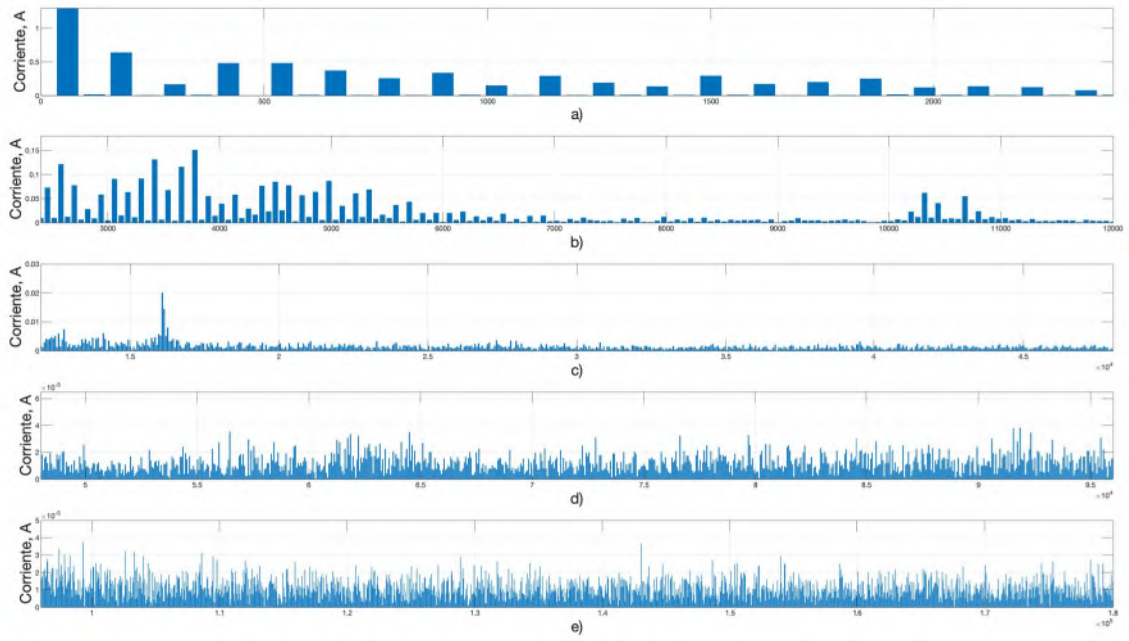


Figura D.4: *Espectro armónico de la forma de onda de corriente en la fase A. Rango en Hz de a).- 0-2400, b).- 2400-12000, c).- 12000-48000, d).- 48000-96000 y e).- 96000-180000*

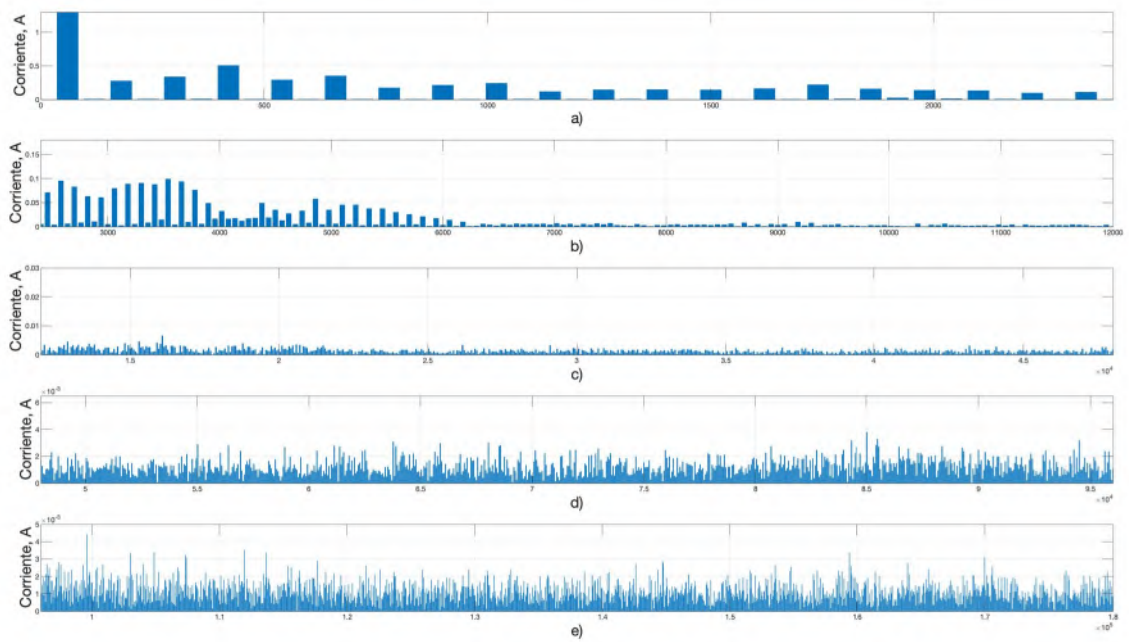


Figura D.5: *Espectro armónico de la forma de onda de corriente en la fase B. Rango en Hz de a).- 0-2400, b).- 2400-12000, c).- 12000-48000, d).- 48000-96000 y e).- 96000-180000*

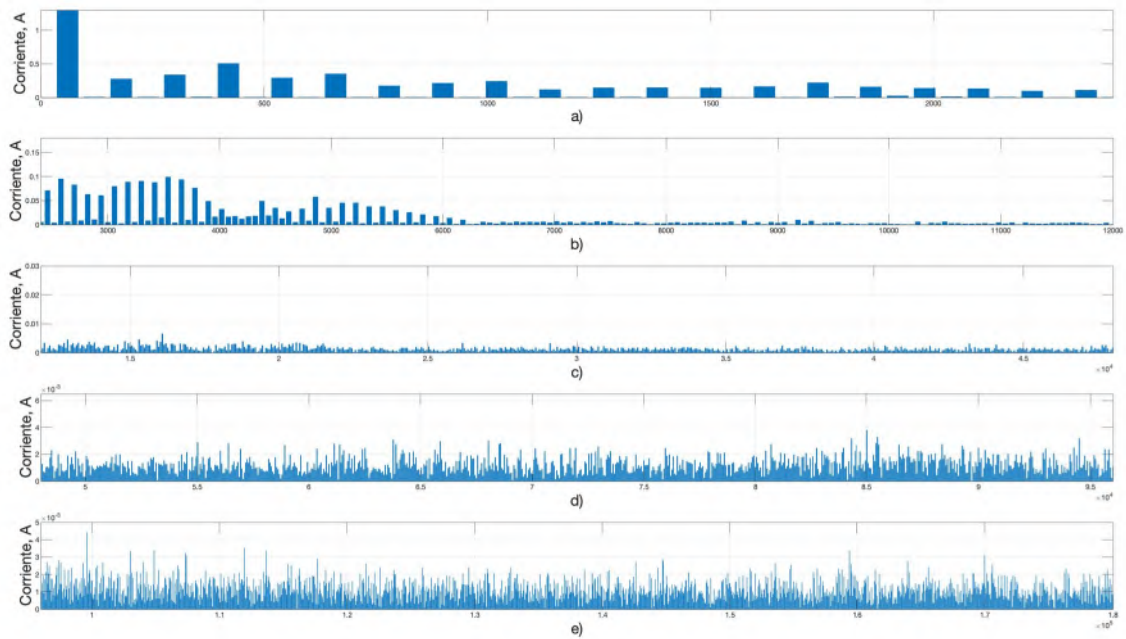


Figura D.6: *Espectro armónico de la forma de onda de corriente en la fase C. Rango en Hz de a).- 0-2400, b).- 2400-12000, c).- 12000-48000, d).- 48000-96000 y e).- 96000-180000*

D.2. Procesamiento Análisis Wavelet multi-resolución

Las figuras D.7 , D.8 y D.9 muestran el espectro del análisis tiempo-frecuencia de las señales de voltaje tras aplicar el análisis Wavelet multi-resolución. La Tabla D.3 presenta la correlación por banda entre las señales de voltaje y la Tabla D.4 muestra la energía por banda la varianza por banda en cada señal de voltaje entre las fases A-B , B-C y C-A.

Tabla D.3: *Correlación entre las señales de voltaje en la tercera medición del caso 2*

No. Banda	Correlación de voltaje A-B y B-C	Correlación de voltaje A-B y C-A	Correlación de voltaje B-C y C-A
S11	0.263434808893961	-0.009152536619199	0.962088372635630
B11	-0.064504361872204	0.050360918944968	0.049681848717567
B10	0.014314148683165	0.035463499026887	0.001141970651178
B9	0.294369810630389	-0.084195773915868	-0.331177474089467
B8	0.061029901052279	-0.004205068368756	-0.130169591912009
B7	-0.003446204995908	0.002735472428046	-0.003259593920686
B6	-0.000009102148883	0.000533710335404	0.001919865566181
B5	-0.005116810606501	0.001173021812313	-0.000073408418296
B4	-0.000603857444597	0.002134996981815	0.004037838726218
B3	-0.002534953385193	-0.001318286215479	-0.000962734649013
B2	-0.001721853860531	-0.000253291089656	-0.001723552372472
B1	-0.000083688476474	0.000981854080669	0.000725522661240

Tabla D.4: *Energía y varianza por banda en las señales de voltaje entre fases A-B, B-C y C-A en la tercera medición del caso 2*

No. Banda	Voltaje de A-B		Voltaje de B-C		Voltaje de C-A	
	Energía por banda	Varianza por banda	Energía por banda	Varianza por banda	Energía por banda	Varianza por banda
S11	39,558,612.7171	19.779149946043358	39,800,947.9314	19.897779229881348	39,300,906.6951	19.650273014561208
11	84.8535	0.000042426477998	52.2725	0.000026136085934	32.1480	0.000016073893277
10	2.9774	0.000001488705962	1.8066	0.000000903296405	2.3950	0.000001197509333
9	1.6971	0.000000848551285	2.7510	0.000001375532850	5.5650	0.000002782480248
8	0.8206	0.000000410309313	0.9171	0.000000458560990	1.1030	0.000000551529022
7	1.4717	0.000000735849996	1.8288	0.000000914426828	1.3767	0.000000688378679
6	2.9957	0.000001497876239	3.0171	0.000001508565185	3.0296	0.000001514838087
5	5.8152	0.000002907609187	5.8305	0.000002915237978	5.7990	0.000002899487459
4	9.5660	0.000004783012019	9.7375	0.000004868762647	9.6788	0.000004839373762
3	7.1554	0.000003577674327	7.2428	0.000003621381970	7.2304	0.000003615220236
2	5.3781	0.000002689031068	5.3922	0.000002696128614	5.3926	0.000002696291306
1	13.1988	0.000006599375982	13.2845	0.000006642202229	13.2447	0.000006622304386

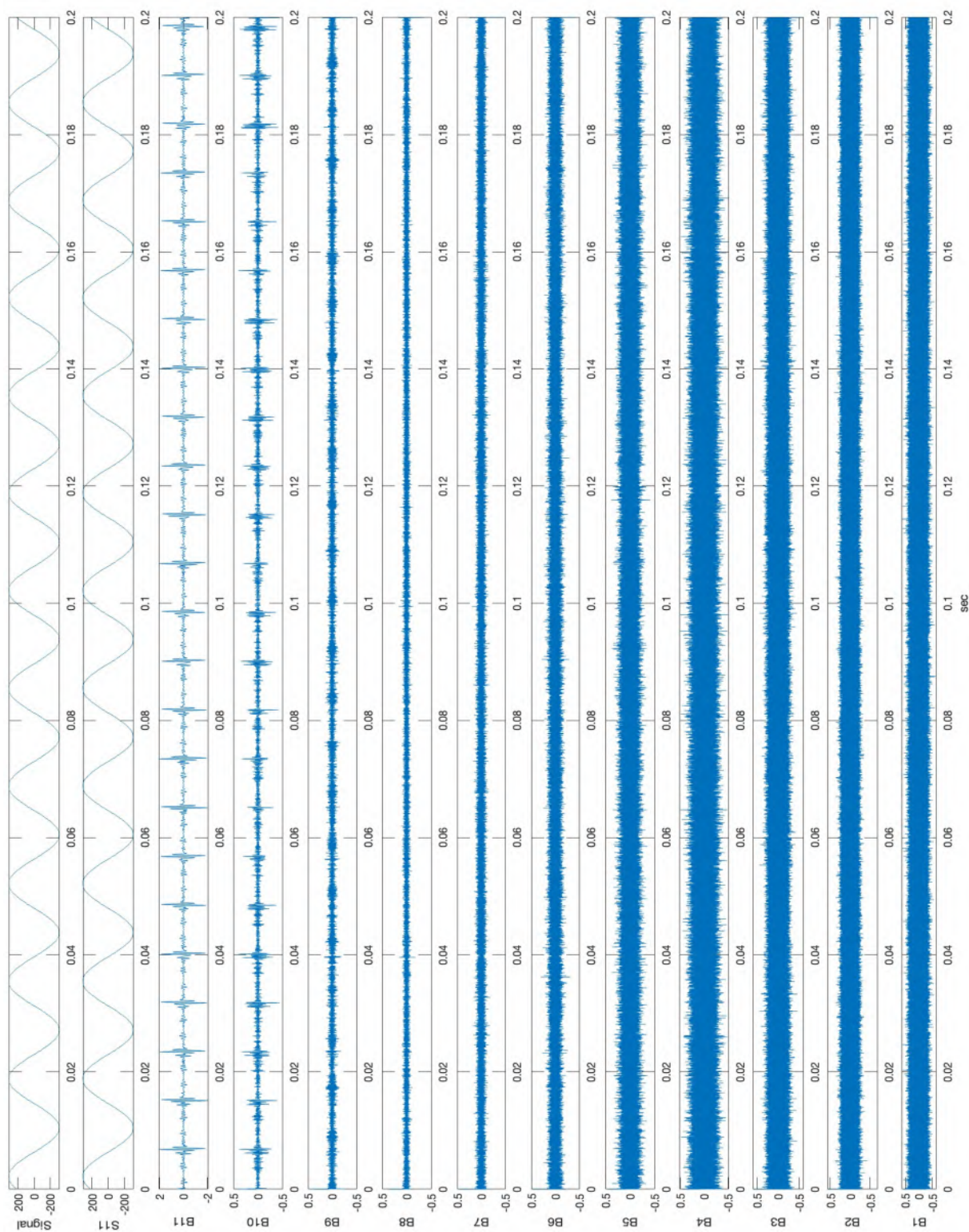


Figura D.7: Primer captura. Descomposición en tiempo-frecuencia de la señal de voltaje de A-B utilizando el análisis multi-resolución Wavelet

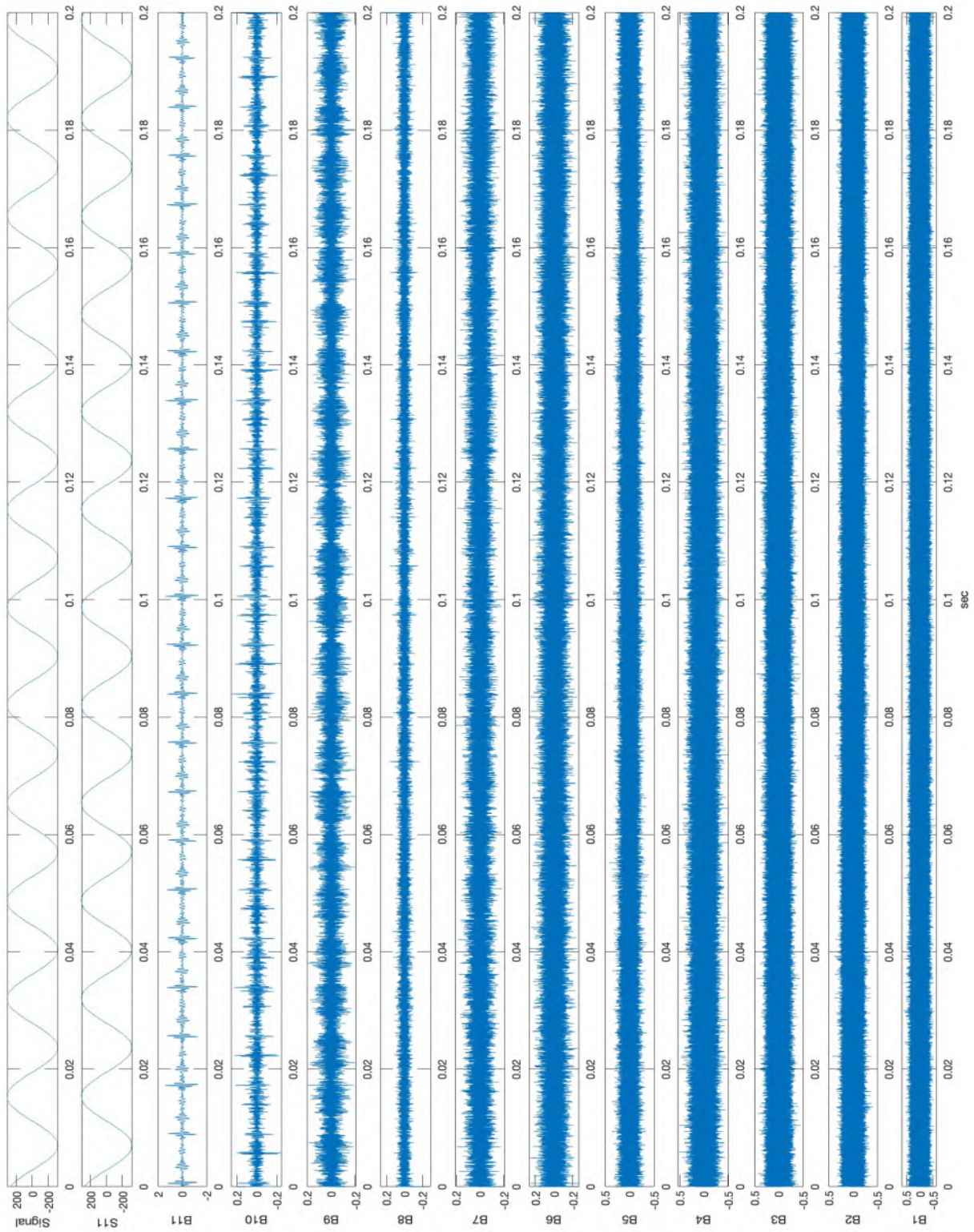


Figura D.8: *Primer captura. Descomposición en tiempo-frecuencia de la señal de voltaje de B-C utilizando el análisis multi-resolución Wavelet*

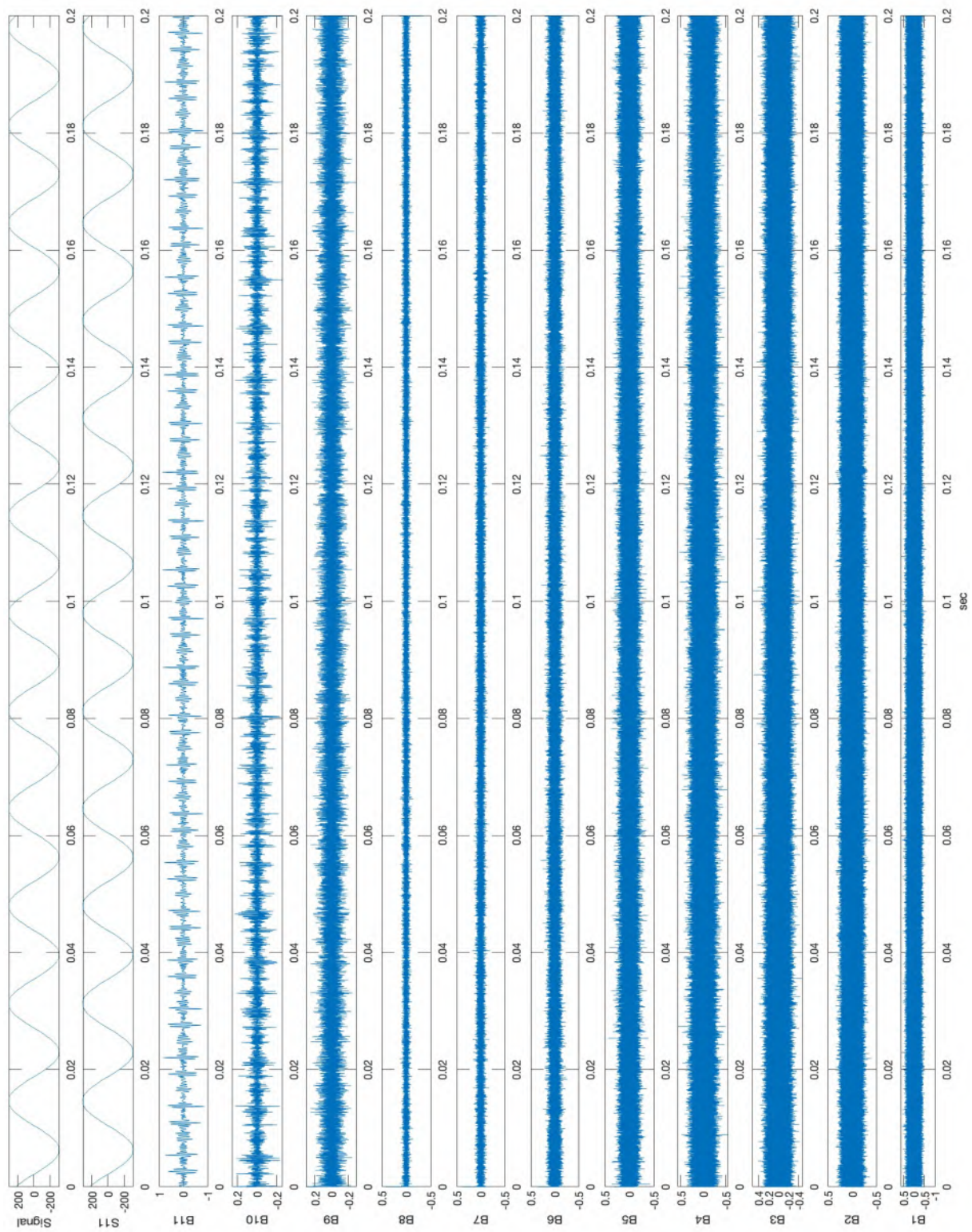


Figura D.9: *Primer captura. Descomposición en tiempo-frecuencia de la señal de voltaje de C-A utilizando el análisis multi-resolución Wavelet*

Por su parte, Las figuras D.10 , D.11 y D.12 muestran el espectro del análisis tiempo-frecuencia de las señales de voltaje tras aplicar el análisis Wavelet multi-resolución. La Tabla D.5 presenta la correlación por banda entre las señales de corriente y La Tabla D.6 muestra la energía por banda y la varianza por banda en cada señal de corriente en las fases A, B y C.

Tabla D.5: *Correlación entre las señales de corriente en la tercera medición del caso 2*

No. Banda	Correlación de corriente A y B	Correlación de corriente A y C	Correlación de corriente B y C
S11	-0.298905902575465	0.399758489645324	0.747863654796016
B11	-0.002355546830006	-0.142469507217804	-0.079152979122155
B10	0.041211964264204	-0.037048077181284	0.042893540800895
B9	-0.044931738089888	-0.063786650296677	0.007308078650860
B8	-0.030904228265906	-0.066235057550143	-0.009917505620400
B7	-0.008413974885039	0.008293328258535	-0.015736699229543
B6	-0.002034778714088	-0.000017139890903	0.000846680836500
B5	-0.004788920882850	-0.000102920407028	0.004351331202518
B4	0.001384797822247	0.004608157108662	-0.002397890815562
B3	-0.004767211550958	-0.003769364405141	-0.004099505661304
B2	-0.002431109277117	0.000242564997905	-0.001479546971156
B1	0.000291913518304	-0.000062292322317	0.000766620487240

Tabla D.6: *Energía y varianza por banda en las señales de corriente en las fases A, B y C en la tercera medición del caso 2*

No. Banda	Corriente en la fase A		Corriente en la fase B		Corriente en la fase C	
	Energía por banda	Varianza por banda	Energía por banda	Varianza por banda	Energía por banda	Varianza por banda
S11	10,644,019.4863	5.321660654120472	4,256,142.0607	2.127804322877117	331,142.7796	0.165447483724302
11	178.8199	0.000089409294586	221.4406	0.000110719508050	37.1330	0.000018566369943
10	46.8014	0.000023400556135	24.5139	0.000012256903660	10.3996	0.000005199809586
9	13.8162	0.000006908074634	1.7493	0.000000874682819	7.7136	0.000003856782230
8	1.2236	0.000000611828448	0.8693	0.000000434693519	0.9263	0.000000463192345
7	1.7544	0.000000877223059	1.6777	0.000000838882554	1.6378	0.000000818926422
6	3.6411	0.000001820550565	3.6638	0.000001831891171	3.6967	0.000001848384071
5	6.2309	0.000003115450428	6.3175	0.000003158774474	6.1985	0.000003099274565
4	9.5144	0.000004757201226	9.4716	0.000004735785787	9.4671	0.000004733529265
3	6.6744	0.000003337224320	6.7305	0.000003365231425	6.6395	0.000003319772409
2	5.2527	0.000002626369235	5.2910	0.000002645480904	5.2477	0.000002623874759
1	13.0182	0.000006509054460	13.0953	0.000006547601323	13.0052	0.000006502596108

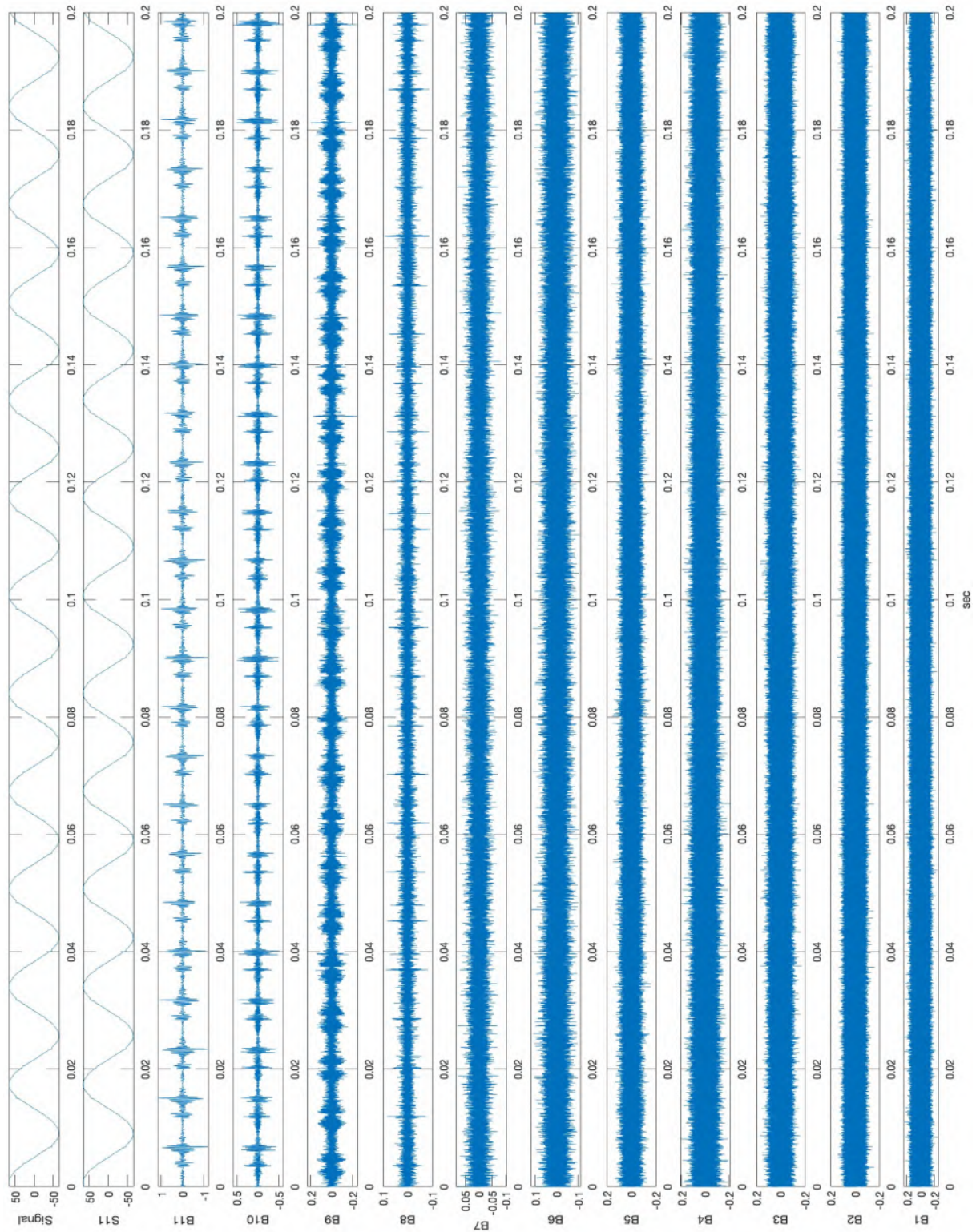


Figura D.10: Primer captura. Descomposición en tiempo-frecuencia de la señal de corriente en la fase A utilizando el análisis multi-resolución Wavelet

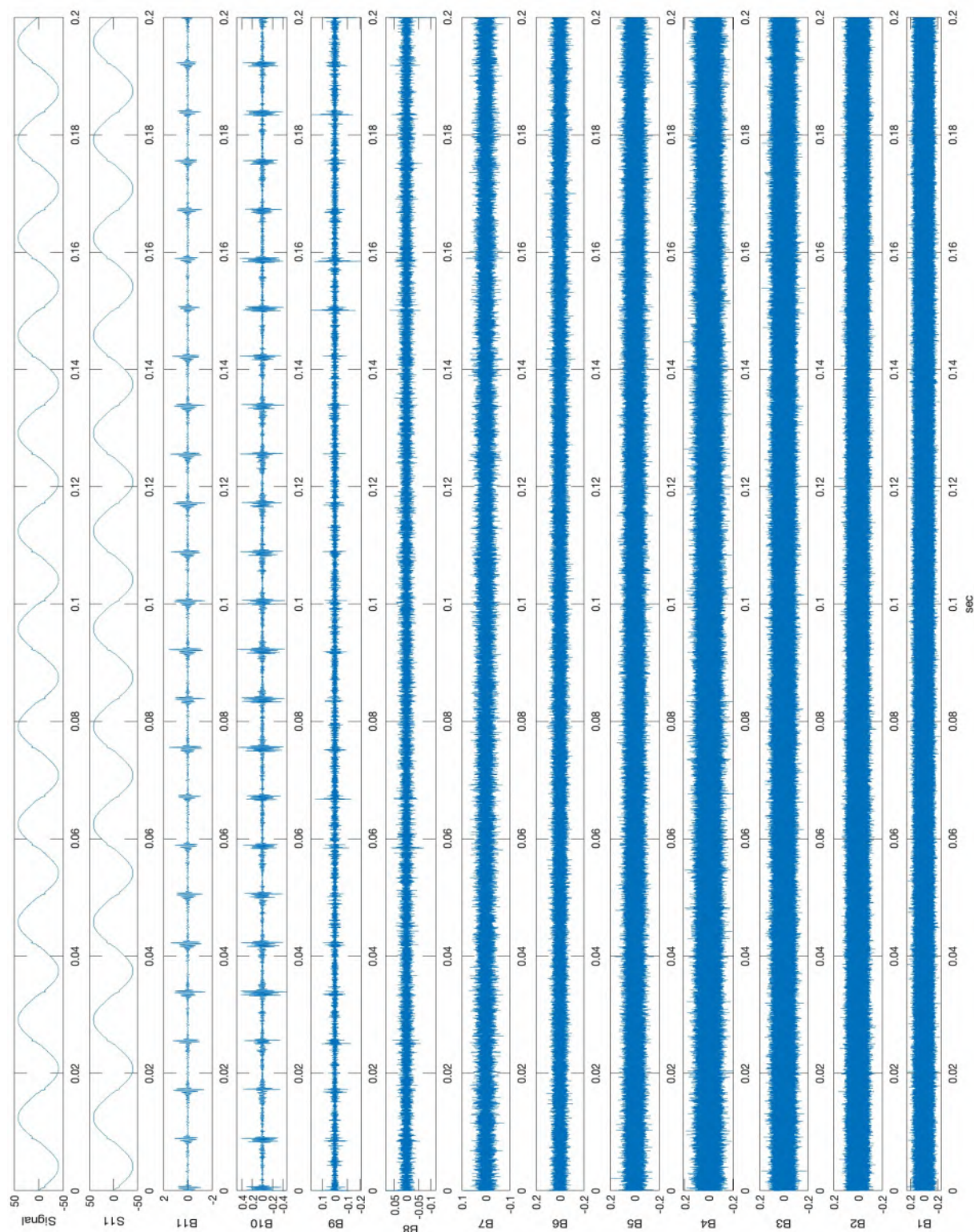


Figura D.11: Primer captura. Descomposición en tiempo-frecuencia de la señal de corriente en la fase B utilizando el análisis multi-resolución Wavelet

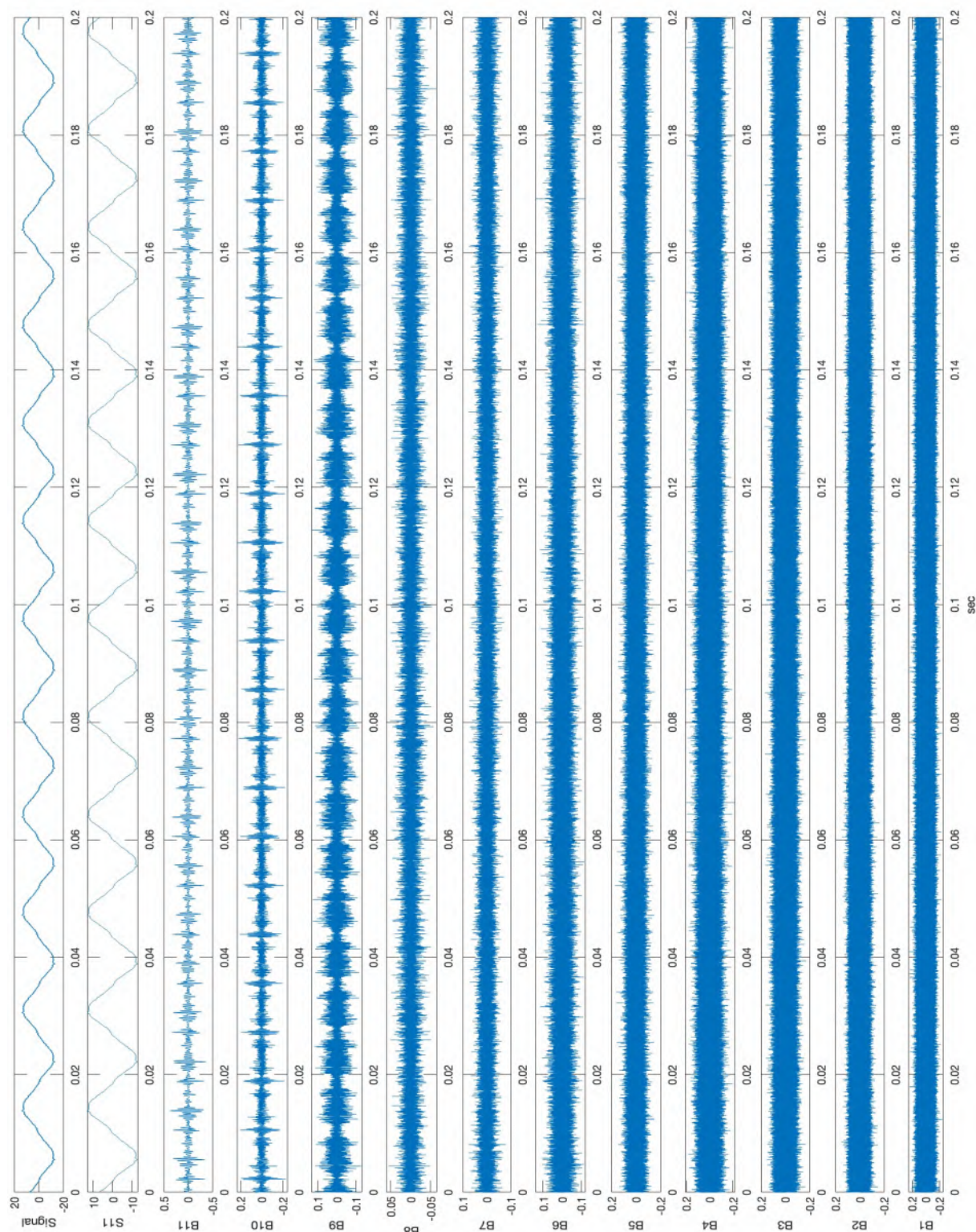


Figura D.12: Primer captura. Descomposición en tiempo-frecuencia de la señal de corriente en la fase C utilizando el análisis multi-resolución Wavelet

Bibliografía

- [1] IEEE std 519-2014, Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, págs. 5-12, June 2014
- [2] A. Larsson, High Frequency Distortion in Power Grids due to Electronic Equipment, Licentate Thesis, Luleå University of Technology, 2006.
- [3] S. Rönnberg, Emission and Interaction from Domestic Installations in the Low Voltage Electricity Network, up to 150 kHz, Doctoral thesis, Luleå University of Technology, 2013.
- [4] A. Moreno-Munoz, A. Gil-de-Castro, E. Romero-Cavada, S. Rönnberg and M. Bollen, "Supraharmonics (2 to 150 kHz) and multi-level converters," 2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), Riga, Latvia, May 2015, págs. 38-40.
- [5] G.Figo, "Measurement of conducted supraharmonics emissions: quasi-peak detection and filter bandwidth", Metrology, vol 2, págs 161-179, 2022.
- [6] J. Meyer, S. Haehle y P. Schegner, Impact of higher frequency emission above 2kHz on electronic mass-market equipment, "22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013), Stockholm, June 2013, págs. 3-4.
- [7] L. Paulsson, B. Ekehov, S. Halen, T. Larsson, L. Palmqvist, A.-A. Edris, D. Kidd, A.J.F. Keri y B. Mehra-ban., "High-frequency impacts in a converter-based back-to-back tie; the Eagle Pass installation", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 4, págs. 1411-1414, October 2003.
- [8] A. Espín-Delgado, S.S. Letha, S. K. Rönnberg y M.H. Bollen, "Failure of MV Cable Terminations Due to Supraharmonic Voltages: A Risk Indicator", IEEE Open Journal of Industry Applications, vol. 1, págs. 42-51, May 2020.
- [9] T. Slangen, T. Van Mijk, V. Cuk y S. Cobben, "The Propagation and Interaction of Supraharmonics from Electric Vehicle Chargers in a Low-Voltage Grid", Energies, vol. 13, no. 15, págs. 2-16, July 2020.
- [10] J. Meyer, S. Mueller, S. Ungethum, X.Xiao, A. Collin y S. Djokic, "Harmonic and supraharmonic emission of on-board electric vehicle chargers", IEEE PES Transmission Distribution Conference and Exposition-Latin America, Morelia México, September 2016, págs. 1-7.
- [11] T. M. H. Slangen, T. van Wijk, V. Čuk y J. F. G. Cobben, "The Harmonic and Supraharmonic Emission of Battery Electric Vehicles in The Netherlands" 2020 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), Istanbul, Turkey, September 2020, págs. 3-6.
- [12] T. Slangen, V. Cuk y S. Cobben, "Summation of supraharmonic currents (2-150 kHz) from EV fast charging stations", Electric Power Systems Research, vol. 220, págs. , jule 2023.
- [13] Sutaria y S. K. Rönnberg, "Propagation of Supraharmonics in a Data Center With Different Operating Modes of UPS", IEEE Access, vol. 11, págs. 36825-36832. April 2023.
- [14] S. Rajkumar, R. Balasubramanian y P. Kathirvelu, "A Comprehensive Review on Supraharmonics – The Next Big Power Quality concern", Smart Grids and Sustainable Energy, vol. 9, no. 15, págs. 4-7, February 2024

- [15] J. Behkesh Noshahr, "Emission phenomenon of supra-harmonics caused by switching of full-power frequency converter of wind turbines generator (PMSG) in smart grid", 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Florence, Italy, June 2016, págs. 2-5.
- [16] C. E. M. Rodrigues y M. E. de Lima Tostes, "Characterization of supraharmónics using the wavelet packet transform", 2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Ljubljana, Slovenia, May 2018, págs.1-6.
- [17] J.G Proakis y D.G. Manolakis, Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications, New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- [18] S. Lodetti, J. Bruna, J. J. Melero, V. Khokhlov y J. Meyer, "A Robust Wavelet-Based Hybrid Method for the Simultaneous Measurement of Harmonic and Supraharmonic Distortion", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 69, no. 9, págs. 2-8, September 2020.
- [19] P. S. Addison, The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance, Boca Raton, FL: CRC Pres, 2020.
- [20] T. Yalcin, M. Ozdemir, P. Kostyla y Z. Leonowicz, "Discrete Wavelet Analysis of Supra-Harmonic Emissions in Smart Grid (PV Inverter Implementation)", 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / ICPS Europe), Palermo Italy, June 2018, págs.1-6.
- [21] A. Juárez and D. G. Colomé, "Estimación en línea de modos interárea utilizando la Transformada Wavelet Discreta y el Análisis Prony [Not available in English]", 2018 IEEE 38th Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXVIII), San Salvador El Salvador, november 2018, págs. 3-8.
- [22] Baha M. A. Alawi, PhD., O MacDonnell, R. García, C. Façanha, PhD. "Trayectorias tecnológicas y comerciales para la adopción de vehículos medianos y pesados de cero emisiones en México", CALSTART, Enero del 2023.
- [23] T. Yalcin, M. Ozdemir, P. Kostyla y Z. Leonowicz. "Investigation of Supra-Harmonics through Signal Processing Methods in Smart Grids", Transactions on Environment and Electrical Engineering, vol. 2, no. 2, págs. , october 2017.
- [24] L. Sandrolini y A. Mariscotti, "Signal Transformations for Analysis of supraharmónic EMI Caused by Switched-Mode Power Supplies", Electronics 2020, vol. 9, no.12, págs. 2-19, December 2020.
- [25] L.F. Yañes Olmos, "Análisis en tiempo-frecuencia de supra-armónicos en redes de baja tensión basado en transformada Wavelet", Tesis: UMSNH, 2022
- [26] International Energy Agency, Global EV, 27 de septiembre de 2024. www.iea.org/search?q=global
- [27] Secretaria de Medio ambiente y Recursos Naturales. Avances y proyectos de Electromovilidad en México, México, 2022.
- [28] S.T.Y. Alfalahi, A.A. Alkahtani, A.Q. Al-Shetwi, A.S. Al-Ogaili, A.A. Abbood y M.B. Mansor, "Supraharmónics in Power Grid: Identification, Standards, and Measurement Techniques", IEEE Access, vol. 9, págs.103678-103687, July 2021
- [29] A. Bosak, A. Bosak, L. Kulakovskiy, T. Oboronov, "Impact of EV Chargers on Total Harmonic Distortion in the Distribution System Network", 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv Ukraine, April 2019, págs. 329-333.
- [30] R. Misra, "Impact of Plug in electrical Vehicles and Wind Generators on Harmonics Distortion of Electric Distribution System", Master's Thesis, Michigan Technological University, 2014.
- [31] T. Streubel, C. Kattmann, A. Eisenmann y Krzysztof Rudion, "Characterization of Supraharmonic Emission from Three Different Electric Vehicle Charging Infrastructures in Time and Frequency Domain", Energies, vol. 15, no.2, págs.4-16, January 2022.

- [32] Y. -J. Liu, T. -P. Chang, H. -W. Chen, T. -K. Chang and P. -H. Lan, "Power quality measurements of low-voltage distribution system with smart electric vehicle charging infrastructures", 2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Bucharest Romania, May 2014, págs. 631-635.
- [33] M. Syai'in, N. H. Rohiem, R. K. Tobing, M. A. Atmoko, M. F. Adiatmoko, A. Soeprijanto, A. M. Hatta y Sekartedjo, "Harmonics Monitoring of Car's Inverter using Discrete Fourier Transformation", 2017 4th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE), Semarang Indonesia, October 2017, págs.103-106.
- [34] A. Mariscotti and L. Sandrolini, "Techniques for the Analysis of Time-Domain Conducted Emissions of SMPS in Smart Grids", 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Genova Italy, June 2019, págs.2-5.
- [35] 35. D. Agudelo-Martínez, F. Ríos and A. Pavas, "Interaction of some low power LED lamps within 2–150 kHz (supraharmonics)", 2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Ljubljana Slovenia, May 2018, págs 1-6.
- [36] 36. Energiforsk. Propagation of Supraharmonics in the Low Voltage Grid. Stockholm, 2017.
- [37] Energuía, página principal, Republica Dominicana, 27 de septiembre de 2024. <https://energuia.com.do/>.
- [38] M. Syai'in et al., "Harmonics monitoring of car's inverter using discrete fourier transformation," 2017 4th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE), Semarang, Indonesia, January 2017, págs. 103-106.
- [39] waveSDKDiligent, "WaveForms SDK reference manual", Diligent, Nov 2022.
- [40] T. Fujun, X. Ruiheng, C. Dong, R. Lijia, Y. Quanning and Z. Yan, Research on the harmonic characteristics of electric vehicle fast charging stations, "2017 2nd International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), Chengdu, China, June 2017, págs. 805-808.
- [41] K. Yuan et al., "Harmonic characteristics of distributed generation and electric vehicle integrating to the grid," 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Beijing, China, November 2017, págs. 1-3.
- [42] J. B. Noshahr, M. Kermani and M. Bagheri, "The Behavior of Capacitance Component of Loads in Frequency Range 2-150 kHz (Supra-Harmonic)," 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Genova, Italy, June 2019, págs. 2-5.
- [43] IEC 61000-4-7:2002, IEC 61000-4-7: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto. IEC 2002.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica	
Título del trabajo	ANÁLISIS WAVELET MULTI-RESOLUCIÓN DEL FENÓMENO SUPRA-ARMÓNICO EN UNA ESTACIÓN DE RECARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Daniel Alejandro Ornelas González	2146664c@umich.mx
Director	Norberto García Barriga	norberto.garcia@umich.mx
Codirector		
Coordinador del programa	Norberto García Barriga	norberto.garcia@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	NO	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	NO	
Traducción a otra lengua	NO	
Revisión y corrección de estilo	NO	
Análisis de datos	NO	
Búsqueda y organización de información	NO	
Formateo de las referencias bibliográficas	NO	
Generación de contenido multimedia	NO	
Otro	NO	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Daniel Alejandro Ornelas González
Lugar y fecha	Morelia Michoacán 03/11/2025

Daniel Alejandro Ornelas González

Análisis en Tiempo-Frecuencia de Supra-armónicos Ocasionados por Estaciones de Recarga para Vehículos Eléctri...

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:522303326

Fecha de entrega

3 nov 2025, 11:03 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

3 nov 2025, 11:06 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

Análisis en Tiempo-Frecuencia de Supra-armónicos Ocasionados por Estaciones de Recarga parapdf

Tamaño del archivo

41.2 MB

132 páginas

34.524 palabras

172.771 caracteres

16% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Fuentes principales

- 15%  Fuentes de Internet
- 9%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión



Caracteres reemplazados

308 caracteres sospechosos en N.º de páginas

Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.