

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA: INGENIERÍA ELÉCTRICA

Tesis previa a la obtención del título de: INGENIERO ELÉCTRICO

TEMA:
ANALISIS DE ARMONICOS DE FOCOS AHORRADORES UTILIZANDO
LA TRANSFORMADA WAVELET

AUTOR:
CHRISTIAN VLADIMIR PADILLA PAGUAY

DIRECTOR:
ESTUARDO JOSAFAT CORREA ZAPATA

Quito, FEBRERO 2015

DECLARATORIA DE AUTORÍA:

Yo, Christian Vladimir Padilla Paguay autorizo a la Universidad Politécnica Salesiana la publicación total o parcial de este trabajo de grado y su reproducción sin fines de lucro.

Además declaro que los conceptos y análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Quito, 27 de Febrero del 2015

.....
Christian Vladimir Padilla Paguay

CC: 171631387-7

AUTOR

CERTIFICA:

Haber dirigido y revisado prolijamente cada uno de los capítulos técnicos y financieros del informe de la monografía, así como el funcionamiento del “Análisis de Armónicos de focos ahorradores utilizando la Transformada Wavelet” realizada por el Sr. Christian Vladimir Padilla Paguay , previa a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico en la Carrera de Ingeniería Eléctrica.

Por cumplir los requisitos autoriza su presentación.

Quito, 30 de Octubre del 2014

.....

Ing. Estuardo Josafat Correa Zapata

DIRECTOR

AGRADECIMIENTO.

Christian Vladimir Padilla Paguay

Debo agradecer a la Universidad Politécnica Salesiana

Las facilidades que ha dado para llevar a cabo esta investigación.

A mi director Ing. Estuardo Correa, por su disponibilidad y apoyo durante el

proceso de elaboración de esta tesis.

Y concluyo: gracias a mi familia, por su paciencia y comprensión durante las

muchas horas que les he robado.

DEDICATORIA.

Christian Vladimir Padilla Paguay

Este proyecto es dedicado

Con mucho amor

A Dios, que sin su ayuda nada sería posible,

A mi madre, el mayor ejemplo de fe, fuerza y perseverancia.

CONTENIDO

DECLARATORIA DE AUTORÍA:	II
CERTIFICA:	III
CONTENIDO	VI
INDICE DE FIGURAS	IX
INDICE DE TABLAS	XI
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I	3
MARCO TEORICO	3
1.1 Introducción.....	3
1.2 Focos ahorradores, elementos y funciones.....	3
1.2.1 Partes de un foco ahorrador.....	4
1.2.2 Cómo funciona el foco ahorrador.	5
1.3 Armónicos, definición, causas y efectos.	7
1.3.1 Origen de los Armónicos.	9
1.3.2 Elementos generadores de Armónicos.	10
1.3.3 Efectos de los Armónicos.....	10
1.4 Métodos para analizar Armónicos.....	11
1.4.1 Método de penetración de Armónicos.	12
1.4.2 Análisis Armónico iterativo.	13
1.4.3 Método del flujo Armónico.....	13
1.4.4 Método Wavelet.....	14
CAPÍTULO II	15
ANÁLISIS DE ARMÓNICOS UTILIZANDO LA TRANSFORMADA WAVELET	15
2.1 Introducción.....	15
2.2 Aspectos Básicos de la Transformada Wavelet.....	16
2.3 La Transformada Wavelet.....	17

2.4	Tipos de Transformada Wavelet.	24
2.4.1	Transformada Wavelet Continua (CWT).....	24
2.4.2	Transformada Wavelet Discreta (DWT).....	26
2.4.3	Transformada Wavelet Semidiscreta (SWT).	26
CAPITULO III.....		28
EVALUACIÓN DE ARMÓNICOS EN FOCOS AHORRADORES.		28
3.1	Introducción.....	28
3.2	Índices de Distorsión Armónica	29
3.2.1	Índices de Distorsión Armónica Total (THD).	30
3.2.2	Factor de diversidad.	31
3.2.3	Factor de atenuación.	31
3.2.4	Niveles de Armónicos permitidos por las normas.	32
3.3	Métodos de medida de armónicos basados en la Transformada Wavelet... 35	
3.4	Estudio de armónicos de focos ahorradores mediante la Transformada Wavelet.	35
3.4.1	Secuencia 1.....	36
3.4.2	Secuencia 2.....	39
CAPÍTULO IV.....		45
ANÁLISIS DE RESULTADOS.		45
4.1	Introducción.....	45
4.2	Efectos de los Armónicos en los sistemas eléctricos.....	46
4.2.1	Resonancia.	46
4.2.2	Sobrecalentamiento de los conductores neutros.	46
4.2.3	Efecto sobre los transformadores	47
4.2.4	Sobrecarga de los condensadores de corrección de factor de potencia.	48
4.2.5	Problemas producidos por los armónicos de tensión.	48
4.2.6	Efectos de los armónicos en equipos de consumidor.....	48

4.3	Comparación con otros métodos de análisis de armónicos.	49
4.3.1	Análisis de Fourier.	49
4.3.2	Transformada Wavelet.	51
4.3.3	Transformada Wavelet vs Transformada de Fourier.	52
4.4	Análisis de los armónicos en escala y desplazamiento.	53
4.4.1	El escalamiento.	53
4.4.2	El desplazamiento.	54
4.4.3	Armónicos de focos ahorradores en escala y desplazamiento.	55
CONCLUSIONES.		58
RECOMENDACIONES.		59
BIBLIOGRAFIA		60
ANEXOS		62
ANEXO A.....		63
ANEXO B		65
ANEXO C		67
ANEXO D.....		70
ANEXO E		72

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Partes que constituyen a un foco ahorrador.....	5
Figura 1.2: Generación y propagación de armónicos en las redes de distribución.	7
Figura 1.3: Espectro armónico de un foco ahorrador.....	8
Figura 1.4: Circuito equivalente de una carga no lineal.....	9
Figura 2.5: Esquema de la Transformada Wavelet.	16
Figura 2.6: Wavelet Haar	20
Figura 2.7: Wavelet Morlet.....	20
Figura 2.8: Wavelet Sombrero Mexicano	21
Figura 2.9: Familia Daubechies	21
Figura 2.10: Familia Coiflet.....	22
Figura 2.11: Familia Symmlet	22
Figura 2.12: Visualización comparativa de la representación de una señal no estacionaria en diferentes dominios	25
Figura 3.13: Efecto en el voltaje por la conmutación de capacitores.....	29
Figura 3.14: Valores de THD secuencia 1	37
Figura 3.15: Descomposición de la señal utilizando Wavelet, secuencia 1.....	37
Figura 3.16: Descomposición de coeficientes de frecuencias bajas y altas, secuencia 1.....	38
Figura 3.17: Señal recuperada en base a los coeficientes secuencia 1.....	38
Figura 3.18: Valores de THD secuencia 2	40
Figura 3.19: Descomposición de la señal utilizando Wavelet, secuencia 2.....	40
Figura 3.20: Descomposición de coeficientes de frecuencias bajas y altas, secuencia 2.....	41
Figura 3.21: Señal recuperada en base a los coeficientes secuencia 2.....	41
Figura 3.10: Valores THD solo focos ahorradores, descomposición de la señal mediante wavelet.....	42
Figura 3.11: Descomposición de coeficientes de frecuencias bajas y altas, solo focos ahorradores.....	42
Figura 3.12: Señal recuperada en base a los coeficientes, solo focos ahorradores. ...	43
Figura 3.13: Señal en dos dimensiones aplicando CWT.....	43
Figura 3.14: Señal en tres dimensiones aplicando CWT.	44
Figura 4.22: Suma de las tres corrientes triple N en el neutro.	47

Figura 4.23: Esquema de Transformada de Fourier.....	49
Figura 4.24: Transformada de Fourier de ventana.	50
Figura 4.25: Transformada Wavelet	51
Figura 4.26: Fourier vs Wavelet.....	52
Figura 4.27: Escalamiento en Wavelet	54
Figura 4.28: Desplazamiento Wavelet	55
Figura 4.29: Escala y desplazamiento mediante wavelet, secuencia 1	56
Figura 4.30: Escala y desplazamiento mediante wavelet, secuencia 2	56
Figura 4. 31: Escala y desplazamiento mediante wavelet, secuencia 2, solo focos ahorradores.....	57

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Equivalencias entre lámparas incandescentes y focos ahorradores recomendadas por los fabricantes.	4
Tabla 2.2: Características y Propiedades de las Wavelet's más conocidas.....	23
Tabla 3.3: Límites de Distorsión Armónica en Voltaje, IEEE 519.....	33
Tabla 3.4: Límites de Distorsión Armónica en Corriente, IEEE 519	34
Tabla 5.3: Resultados obtenidos en la secuencia 1	36
Tabla 3.6: Resultados obtenidos en la secuencia 2.	39
Tabla A.1: 1era medición programada en el TDP de una vivienda	64
Tabla B.1: 2da medición programada en el TDP de una vivienda.....	66

Resumen

“Análisis de Armónicos de focos ahorradores utilizando la Transformada Wavelet”

Christian Vladimir Padilla Paguay

padi_cris2012@hotmail.com

Universidad Politécnica Salesiana

Resumen. — El presente proyecto de tesis desarrolla un estudio a las señales de origen armónico generadas en focos ahorradores a través de la herramienta matemática Transformada Wavelet. No sin antes analizar cómo se encuentran constituidos, sus elementos y funciones.

Se presenta información sobre armónicos, como se originan, cuales son los elementos que los generan, así como también que efectos producen al sistema eléctrico. Además se aborda algunos métodos para realizar el análisis de estos armónicos.

Para realizar este análisis, se describe inicialmente en que consiste la teoría Wavelet, cuáles son sus propiedades, tipos de transformada wavelet, descomposición de señales utilizando como función base la Wavelet Madre Haar y su relación con el análisis de Fourier.

También se realiza el análisis de señales armónicas de focos ahorradores en escala y desplazamiento basado en la función Gaussiana de las Wavelets.

Índice de Términos.— Armónicos, señal, Focos Ahorradores, Transformada Wavelet, Haar, Fourier, escala, desplazamiento, descomposición.

Abstract

"Harmonic Analysis of Compact Fluorescent Lamp (CFLs) using Wavelet Transform"

Christian Vladimir Padilla Paguay

padi_cris2012@hotmail.com

Salesian Polytechnic University

Abstract.- The present thesis project develops study harmonic signals generated in compact fluorescent lamps (CFLs) origin through wavelet transform mathematical tool. Not without analyzing how they are constituted, its elements and functions.

Harmonic data is presented, as they originate, what are the elements that generate, as well as what effects occur when electrical system. Also discusses some methods for the analysis of these harmonics.

To perform this analysis, it is initially described consisting Wavelet theory, what their properties, types of wavelet signal decomposition using wavelet basis function Mother Haar and its relation to Fourier analysis.

Analysis of harmonic signals CFLs in scale and offset based on the Gaussian function of Wavelets is also performed.

Index of Terms.- Harmonic signal, Spotlights Savers, Wavelet Transform, Haar, Fourier, scale, displacement, decomposition.

INTRODUCCIÓN

Debido al crecimiento de la población, junto al desarrollo económico y tecnológico ha dado un impulso para el desarrollo de la industria y el comercio a nivel global, esto ha generado un aumento significativo en la demanda de energía eléctrica.

El Gobierno Ecuatoriano en la búsqueda de soluciones responsables, dando prioridad a las soluciones inmediatas como son las medidas de eficiencia energética ha implementado el proyecto para la sustitución de lámparas incandescentes por lámparas fluorescentes compactas o focos ahorradores.

Estos focos ahorradores al tener componentes electrónicos generan una señal distorsionada conocida como armónicos con relación a la frecuencia de la señal ideal (sinusoidal) que circula en la red eléctrica. Al hacerse masiva su distribución, la presencia de los armónicos generados por estos focos ahorradores aumenta en la red de distribución.

En la actualidad es común la utilización de aparatos de consumo, llamados cargas entre los que tenemos televisores, radios, computadoras, focos, los mismos que al tener componentes electrónicos introducen distorsiones en la red. Estos aparatos al estar continuamente expuestos a variaciones de corriente y voltaje llegan a disminuir su vida útil.

En todos los hogares es común el uso de focos para la iluminación y en la actualidad por una propuesta gubernamental se han cambiado los focos incandescentes por focos ahorradores que tiene un bajo consumo de potencia en comparación con los ya mencionados incandescentes. Esto ha provocado que existan distorsiones en las frecuencias que se conocen como armónicos, además si se toma en cuenta que los focos ahorradores utilizan componentes electrónicos estos producirán más variaciones o distorsiones en la red.

Por lo anotado anteriormente se hace necesario el análisis de los armónicos que generan los focos ahorradores utilizando la transformada Wavelet.

Partiendo de un estudio a los focos ahorradores, para aclarar dudas y reforzar conocimientos sobre su parte constructiva y funcionamiento de este tipo cargas no lineales.

Cargas las cuales son las causantes de generar corrientes armónicas en la red eléctrica. Las mismas que serán estudiadas, para determinar definir las, determinar sus orígenes y efectos sobre ellas.

Y para realizar ese estudio, nos guiaremos por la herramienta matemática Transformada Wavelet, no sin antes conocer sus características, funciones, tipos y todo lo relacionado con esta herramienta matemática.

CAPITULO I

MARCO TEORICO

1.1 Introducción.

En este capítulo se expondrá definiciones y conceptos que ayudarán a entender las bases para la realización de este análisis. En un inicio se especifican las partes principales de las cuales están compuestos los focos ahorradores, actualmente popularizados por el Gobierno Nacional en su plan de cambio de matriz energética, luego se determinará el funcionamiento de cada una de estas partes.

También se abordará el tema de armónicos en sistemas eléctricos, se describe como se generan los armónicos, elementos que los generan y cómo afecta la presencia de armónicos a los sistemas eléctricos.

Para finalizar este capítulo se presenta algunos métodos para analizar armónicos.

1.2 Focos ahorradores, elementos y funciones.

Los conocidos focos ahorradores de energía o lámparas fluorescentes compactas (CFL por sus siglas en inglés) se caracterizan por estar compuestas internamente por varios elementos que le permitan funcionar como una lámpara fluorescente normal. En su mayoría diseñadas para reemplazar a los antiguos focos incandescentes en las mismas portalámparas de tal forma que su sustitución sea fácil y directa. La principal ventaja para la utilización de los focos ahorradores es que para producir la misma cantidad de luz de los focos incandescentes normales utilizan menos energía eléctrica.

En la siguiente tabla se expone equivalencias entre lámparas incandescentes y focos ahorradores recomendados por los fabricantes. Otra ventaja considerable es su tiempo de vida útil considerablemente mayor.

Tabla 1.1: Equivalencias entre lámparas incandescentes y focos ahorradores recomendadas por los fabricantes.

Lámpara incandescente			Lámpara Compacta Fluorescente			Diferencias	
Potencia (W)	Flujo Luminoso (Lm)	Eficacia (Lm/W)	Potencia (W)	Flujo Luminoso (Lm)	Eficacia (Lm/W)	En potencia (W)	En flujo Luminoso (Lm)
25	260	10.40	5	180	36	-20	-80
40	490	12.35	8	360	45	-32	-130
60	820	13.67	11	600	54.55	-49	-220
75	1070	14.27	14	810	57.86	-61	-260
80	1120	14	15	870	58	-65	-250
100	1560	15.60	18	1100	61.11	-82	-460
150	2200	14.67	20	1400	70	-130	-800
250	3400	13.60	28	1680	60	-222	-1720

Autor: E. Moposita, “Evaluación Técnica - Económica de las Lámparas Fluorescentes Compactas,” 2012.

Pero no todo es ventajas este tipo de lámparas se ven afectadas directamente cuando se encuentran en ambientes húmedos, su vida útil es trastornada por las variaciones en la tensión de alimentación y comparando el costo de una bombilla incandescente con un foco ahorrador su costo es muy superior.

Además por su alto contenido de mercurio, compuesto muy contaminante, se obliga a un manejo cuidadoso para su reciclaje, pues al romperse un tubo este contenido contaminante puede causar afecciones a la salud y contaminar el ambiente. [1]

1.2.1 Partes de un foco ahorrador.

Se detalla las partes principales de un foco ahorrador de energía.

- Tubo fluorescente: En el cual se almacena el gas inerte que es el que caracteriza la luz emitida. Estos gases son principalmente Neón (Ne), Criptón (Kr) o Argón (Ar), además encontramos junto a éstos gases vapor de Mercurio (Hg) que es el que da el efecto de fluorescencia. Las paredes internas de este tubo se encuentra recubierto de una fina capa de Fósforo (P).

- Filamentos: se encuentran dentro del tubo fluorescente, son de Wolframio (W) o Tungsteno y son necesarios para ionizar el gas inerte que se encuentra en el interior del tubo.
 - Balastro electrónico: Estas lámparas son de encendido rápido, así que emplean un balastro electrónico en miniatura que se compone de un rectificador de onda completa a base de diodos y un oscilador, que eleva la frecuencia entre 20 y 60 khz aproximadamente.
 - Base para balastro: es un compartimento tipo base donde se sujeta el balastro electrónico, ubicado entre el tubo y el casquillo o rosca de metal.
 - Casquillo o rosca de metal: este aditamento es para acoplar a la lámpara fluorescente compacta a la boquilla normal, conocida como rosca de Edison.
- [2]

En la figura se muestra las partes que constituyen un foco ahorrador o lámpara compacta fluorescente.

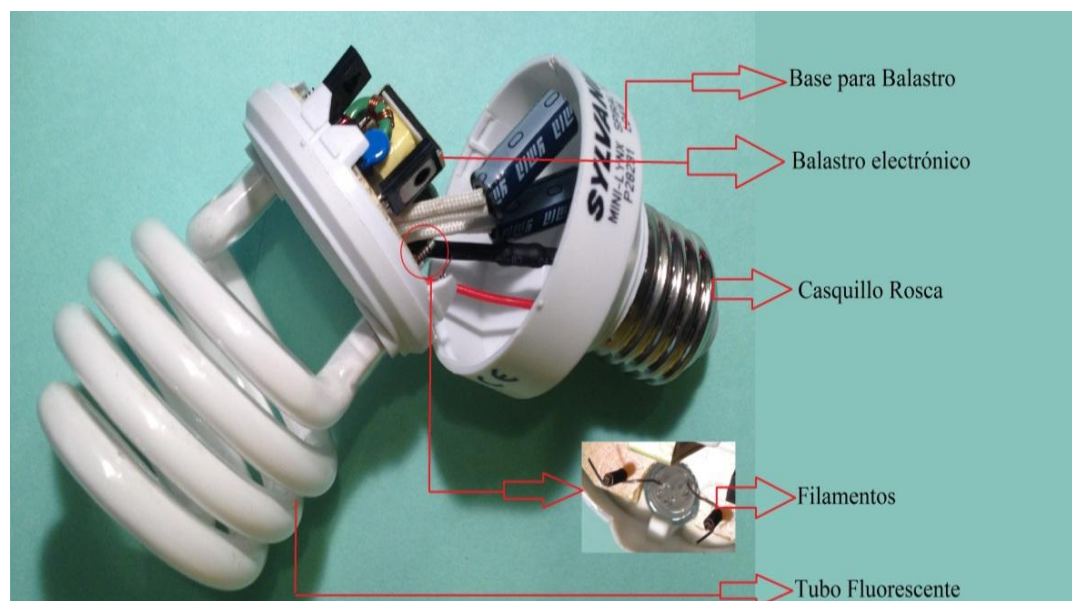


Figura 1.1: Partes que constituyen a un foco ahorrador.

Fuente: Autor

1.2.2 Cómo funciona el foco ahorrador.

El funcionamiento de un foco ahorrador de energía es el mismo que el de un tubo fluorescente común, con la diferencia que es mucho más pequeño y manejable, por

su forma cabe exactamente en el portalámparas donde se colocaba a los focos incandescentes. Al enroscar al foco ahorrador a un portalámparas y accionar el interruptor la corriente eléctrica alterna abastece al balastro electrónico, en el cual un rectificador puente de diodos de onda completa convierte la energía eléctrica alterna en energía eléctrica directa y mejora el factor de potencia de la lámpara. En seguida un circuito a base de transistores en función de amplificador de corriente, un transformador y un capacitor son los que se encargan de originar una corriente alterna que oscila entre los 20 y 60 KHz por segundo. [3][2]

El motivo de utilizar esta corriente tan elevada es disminuir el parpadeo que provoca el arco eléctrico que se crea dentro de las lámparas fluorescentes cuando estas se encuentran encendidas. Esa es la manera de eliminar el efecto estroboscópico que normalmente se crea en las antiguas lámparas fluorescentes que funcionaban con balastos electromagnéticos. En estas lámparas fluorescentes antiguas, de tubo recto, el arco que se origina está basado en la frecuencia que proporciona la red eléctrica, frecuencia de solo 50 o 60 Hz.

Una vez que los filamentos de la lámpara se encienden, el calor que producen ioniza el gas inerte que se encuentra en el interior del tubo, creando un puente de plasma entre los filamentos. En el puente se origina un flujo de electrones, condición necesaria para que el balastro electrónico genere la chispa que enciende el arco eléctrico entre los filamentos. Después de encendido el arco eléctrico los filamentos se apagan y se convierten en electrodos que mantienen el arco eléctrico durante el tiempo que permanezca encendida la lámpara.

Este arco eléctrico no es directamente el emisor de luz en las lámparas, el trabajo de este arco es mantener ionizado al gas inerte existente dentro del tubo de la lámpara. Los iones que desprenden los gases chocan contra los átomos de vapor de mercurio que también se encuentra dentro del tubo de la lámpara, este choque provoca que los electrones de mercurio se exciten y emitan fotones de luz ultravioleta. Los fotones de luz ultravioleta chocan con las paredes de cristal del tubo de la lámpara, que se encuentra recubierta con la capa fluorescente, este choque provoca que los átomos de flúor se exciten y emitan fotones de luz blanca que podemos apreciar, al encender una lámpara. [2][3][4]

1.3 Armónicos, definición, causas y efectos.

Los Armónicos son distorsiones de las sinusoidales ya sean en tensión o en corriente de los sistemas eléctricos, debido al uso de cargas con impedancia no lineal y equipos que necesiten realizar conmutaciones en su operación normal. En sistemas eléctricos la palabra Armónicos se utiliza para designar corrientes o tensiones de frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental de la alimentación.[5] [6]

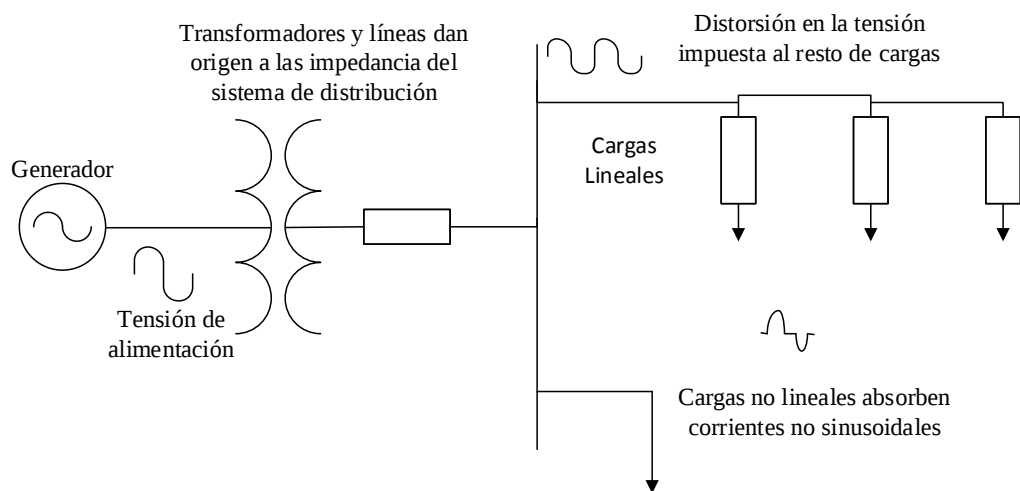


Figura 1.2: Generación y propagación de armónicos en las redes de distribución.

Fuente: Propia del Autor.

En sistemas eléctricos los armónicos que se producen en las ondas de corriente son los más preocupantes, ya que estos se originan como corrientes y son la causa de la mayoría de efectos negativos detallados más adelante. [7]

Cuando los armónicos de corriente se propagan por el sistema de distribución también lo hacen en forma de tensión. Por lo tanto es muy importante medir los valores de tensión y corriente y así poder identificarlos claramente.

Las corrientes armónicas no son problemas actuales, han existido en los sistemas de suministro de electricidad desde hace muchos años, en el principio se presentaban en los rectificadores de arco de mercurio, utilizados para transformar corriente alterna en continua, utilizada para las líneas férreas y para la regulación de motores de corriente continua de velocidad variable utilizados en las industrias. En la actualidad existen una gran variedad de equipos que generan armónicos, lo cual ha producido

un aumento acelerado, obligando a los responsables del desarrollo de las especificaciones técnicas a que ajusten las instalaciones de energía tomando muy en cuenta la existencia de los armónicos.

En el sector doméstico el Gobierno Nacional implementó un programa para el reemplazo de focos incandescentes por focos ahorradores. Un balastro electrónico alojado en la carcasa del foco ahorrador controla un tubo fluorescente de 8mm de diámetro. Se ha difundido la utilización de los focos ahorradores en sustitución de los incandescentes en el ámbito doméstico y en el sector comercial, dando origen a serios problemas de armónicos. En la figura se presenta un espectro de corrientes armónicas.

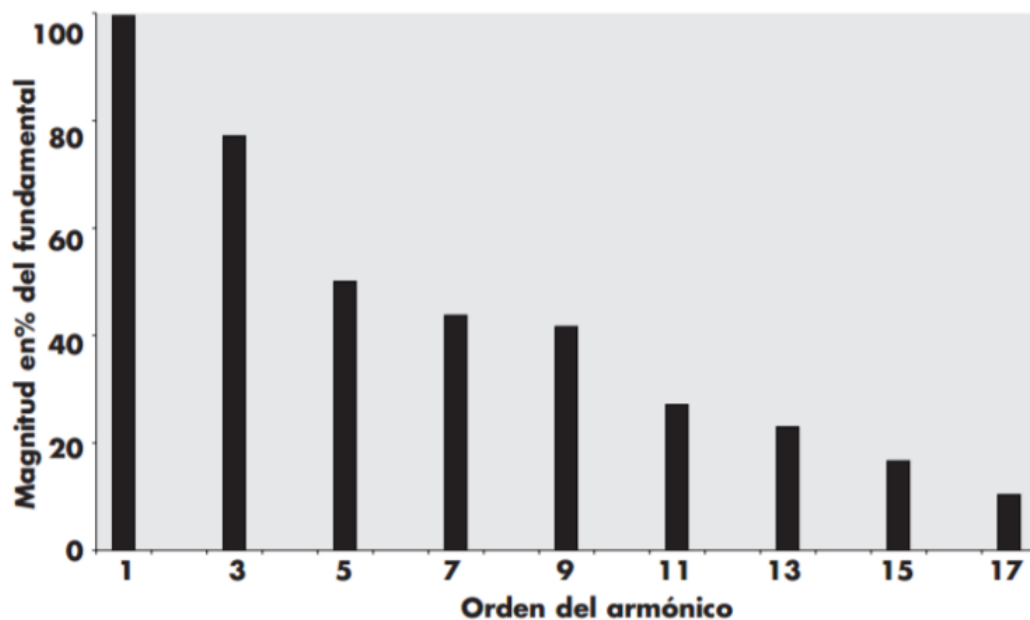


Figura 1.3: Espectro armónico de un foco ahorrador

Fuente: D. Chapman, “Armónicos Causas y efectos,” 2001.

Por lo general el estudio de los Armónicos lo realizan las compañías suministradoras, con esto analizan la influencia de los grandes consumidores no lineales sobre las redes de transporte y distribución.

1.3.1 Origen de los Armónicos.

En general, los armónicos son producidos por cargas no lineales, lo cual significa que su impedancia no es constante.

Se han clasificado en dos categorías a los elementos generadores de armónicos. La primera son las cargas no lineales en las que la corriente que fluye por ellas no es proporcional a la tensión, como por ejemplo transformadores, reguladores, bancos de transformadores multifase conectados en estrella-estrella con problemas en su puesta a tierra. En la siguiente figura se presenta el circuito equivalente para una carga no lineal, este circuito se puede representar como una carga lineal que se encuentra en paralelo con varias fuentes de corriente, una por cada fuente de frecuencia armónica.[7]

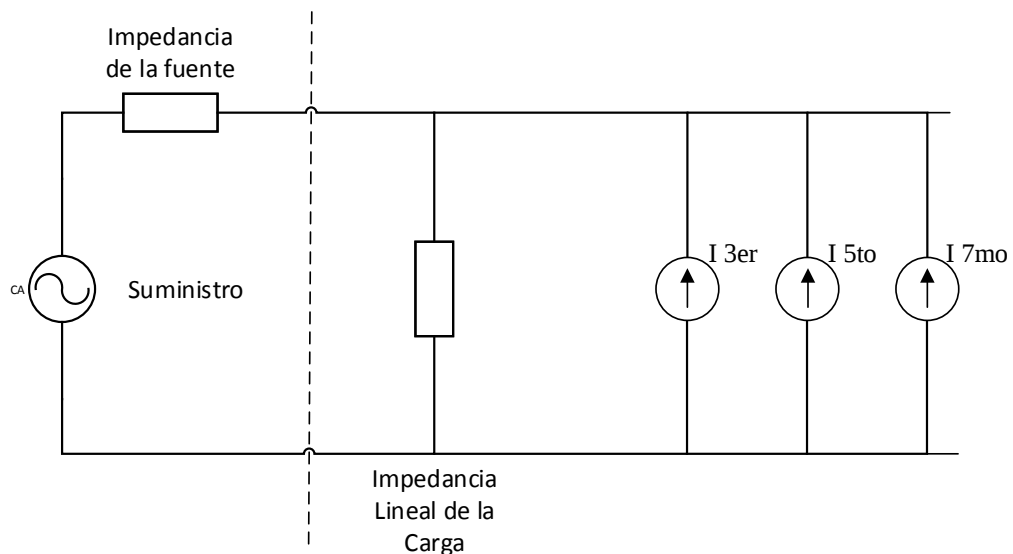


Figura 1.4: Circuito equivalente de una carga no lineal.

Fuente: Propia del Autor

La segunda categoría de elementos que generan armónicos son aquellos que tienen una impedancia dependiente de la frecuencia, aquellos que a una determinada frecuencia pueden tener una impedancia constante, pero varían su impedancia en función de la frecuencia como lo hacen rectificadores, convertidores, filtros eléctricos y electrónicos, servomecanismos de motores, variadores de velocidad de motores. [8]

Los sistemas de iluminación con focos ahorradores son cargas no lineales que en su interior poseen un balastro electrónico, los mismos que funcionan entre 20 KHz y 60 KHz, esto provoca que su impedancia no sea constante ya que no se encuentra en función de la tensión, están en función de la frecuencia lo que origina una variada distorsión armónica en la onda de corriente que está oscilando entre un 5% y 30% según su diseño.

1.3.2 Elementos generadores de Armónicos.

Existe un gran número de dispositivos que distorsionan el estado ideal de las redes eléctricas. Algunos de ellos nacen de la formación de los sistemas de potencia, otros son el producto de la aplicación de dispositivos de electrónica de potencia utilizados para el control moderno de las redes eléctricas.

Entre los elementos que generan corrientes armónicas se encuentran:

- Transformadores sobre excitados
- Reguladores
- Inversores
- Computadores
- Equipos electrónicos
- Hornos de arco
- Hornos de Inducción
- Equipos para soldadura
- Equipo de telecomunicaciones [8]

1.3.3 Efectos de los Armónicos.

Las corrientes armónicas generadas por la carga a partir de la corriente fundamental, circulan por el circuito a través de la impedancia de la fuente. Como consecuencia, aparecen tensiones armónicas a través de la impedancia de alimentación y se encuentran presentes en toda la instalación. La magnitud de la tensión es proporcional, con margen limitado, a la impedancia de la fuente, lo que indica que el generador se comporta como una fuente de corriente.[7]

Los armónicos de corriente y voltaje sobrepuestos a la onda fundamental tienen efectos combinados sobre los equipos y dispositivos conectados a las redes de distribución. Los efectos y las soluciones a estos problemas son muy distintos en cada caso y deben abordarse por separado; es posible que medidas adecuadas para controlar los efectos de los armónicos dentro de la instalación no reduzcan necesariamente la distorsión producida en el suministro y viceversa.

Algunos efectos ocasionados por el flujo de las corrientes armónicas son:

- Sobre carga en conductores.
- Vibraciones y sobrecargas en las máquinas.
- Mal funcionamiento de los relés de protección.
- Mediciones erróneas en equipos de medida.
- Perturbaciones en equipos de control.
- Aumento en las pérdidas por efecto Joule.
- Sobrecalentamiento en conductores del neutro
- Sobre calentamiento en generadores y transformadores, reduciendo su vida útil.
- Vibración en motores y generadores.
- Falla en bancos de capacitores.
- Falla de transformadores.
- Mal funcionamiento y fallo destructivo en equipos de potencia y control.
- Problemas en funcionamiento en equipos electrónicos sensibles.
- Interferencia en sistemas de telecomunicaciones.
- Afectaciones en las condiciones de conmutación de los tiristores, por el desplazamiento del cruce por cero de la onda de tensión.[8][6]

1.4 Métodos para analizar Armónicos

En la actualidad existen varios métodos analíticos para estudiar armónicos, todos emplean aproximaciones, las cuales presentan ventajas y desventajas, por lo que se puede mencionar que ningún método se puede aplicar a todas las situaciones, es decir la aplicación del método depende de la situación.

En términos generales de métodos de análisis de presencia de armónicos pueden clasificarse de acuerdo al conocimiento o no de las impedancias de las cargas, desde este punto de vista existen tres tipos:

- Impedancias conocidas de antemano, la cual utiliza el método de penetración armónica.
- En la entrada las impedancias de carga son desconocidas, pero al momento de resolver un flujo de cargas se las puede determinar, considerando solo potencias correspondientes a la frecuencia fundamental, por ejemplo método de análisis armónico iterativo.
- Se utiliza el flujo armónico de cargas cuando durante todo el proceso de cálculo las impedancias son desconocidas.[9]

Los métodos mencionados serán con interacción armónica cuando se tome en cuenta la distorsión de tensión sobre la forma de onda de la corriente en las cargas no lineales.

1.4.1 Método de penetración de Armónicos.

Esta metodología consiste en considerar constantes de las intensidades armónicas $[J_h]$ inyectadas por las cargas no lineales además de conocer la modelización armónica de los elementos lineales de la red, determinar las tensiones en todos los nudos de la misma mediante la resolución del sistema.[9]

$$[I_h]_{bus} = [Y_h]_{bus} * [V_h]_{bus} \quad (1)$$

Donde $[I_h]_{bus}$ es constante para cada armónico h (incluido el fundamental).

Este método resultaría ser inexacto pues no tiene en cuenta la interacción armónica.[9]

1.4.2 Análisis Armónico iterativo.

Para el análisis armónico iterativo se comienza conociendo las impedancias armónicas y suponiendo unos valores V_j iniciales para obtener las intensidades armónicas J_h inyectadas por las cargas no lineales.

$$I_h = fV_j \quad (2)$$

Donde $J = 1..h_{max}$, lo que nos permite resolver (1) para obtener las tensiones en los nudos de la red, para luego determinar los valores de las intensidades armónicas de J_h inyectadas por las cargas no lineales. Con los valores hallados se recalculan las tensiones de los nudos, este paso se lo realiza sucesivamente para acotar las soluciones dentro del margen de error deseado.[9]

1.4.3 Método del flujo Armónico.

Este método aparece como una ampliación del flujo de cargas convencionales que además de las ecuaciones de balance de potencias en la red, aparecen las ecuaciones de balance de corriente y las expresiones de las cargas no lineales utilizadas para determinar las incógnitas internas de las mismas. Este planteo se lo puede escribir para un nodo i en un sistema de n_{max} nodos, de la siguiente forma.

$$S_i - g(V_{jh}) \quad j = 1 \dots n_{max} \quad h = 1 \dots h_{max} \quad \text{Balance de potencias} \quad (3)$$

$$J_{hi} = f(V_{ki}) = Y_{hi} V_{hi} \quad j = 1 \dots h_{max} \quad \text{Balance de corrientes} \quad (4)$$

$$f'(t_q) = 0 \quad \text{Ecuaciones de las cargas} \quad (5)$$

Mediante las ecuaciones de balance de potencias (3) se relacionan las tensiones y potencias (activa y reactiva) en los nodos. Con la expresión de balance de corrientes (4) se relaciona las intensidades de las cargas con las tensiones del nodo al que se encuentran conectadas. [9]

Con estas ecuaciones se determinará algunas incógnitas como son el módulo y la fase en de las tensiones en todos los nodos, la admitancia de las cargas lineales y los parámetros de funcionamiento de las cargas no lineales.[9]

1.4.4 Método Wavelet.

Utiliza técnicas analíticas basadas en la teoría de la wavelet como análisis tanto en el dominio de la frecuencia y del tiempo.

Un wavelet es una forma de onda de duración limitada que tiene un valor promedio de ceros. Mientras las sinusoidales son aisladas y predecibles, las wavelets tienden a ser irregulares y asimétricas. Además que el tamaño de ventana en Fourier es fijo, en Wavelet varía. Existen varios campos en los que se puede aplicar la wavelet, a continuación algunas aplicaciones.

- Aplicaciones de compresión en imágenes médicas.
- Reducción del ruido en señales electrocardiográficas. Compresión en imágenes de mamografía.
- Compresión de voz y vídeo.
- Eliminar ruido en señales digitales.
- Técnicas para la reducción de triángulos basada en wavelets para mapas cartográficos digitales (Mallado triangular).
- Compresión de la compensación de problemas auditivos.

En este caso utilizaremos la Transformada Wavelet en el análisis de Armónicos generados por focos ahorradores.

CAPÍTULO II

ANÁLISIS DE ARMÓNICOS UTILIZANDO LA TRANSFORMADA WAVELET.

2.1 Introducción.

La Transformada Wavelet es una herramienta matemática que tiene aplicaciones en procesamiento de señales.

En el análisis de señales existe un gran número de herramientas que han sido desarrolladas con el paso de los años, la que más se ha destacado y se ha vuelto muy conocida es la Transformada de Fourier por su capacidad de entregar una representación del contenido de frecuencias de una señal determinada.

Sin embargo desde hace varios años se han venido desarrollando nuevas herramientas que permitan analizar señales desde otras perspectivas, las cuales surgen ante la necesidad de poder analizar señales no estacionarias o que presentan cambios bruscos en espacios muy cortos de tiempo.

Entre estas herramientas desarrolladas encontramos a la Transformada Wavelet que tiene aplicaciones en procesamiento de señales, esta transformada es eficiente en el análisis local de señales no estacionarias y de rápida transitoriedad, este análisis también lo realiza la Transformada de Fourier con ventana que mapea la señal en una representación de tiempo-escala, la diferencia es que la Transformada Wavelet provee un análisis multiresolución (MRA) con ventanas dilatadas. Además la Transformada Wavelet es local en tiempo y espacio.[10]

Las funciones de la Transformada Wavelet, son generadas a partir de una función Wavelet básica mediante traslaciones y dilataciones. Estas funciones permiten reconstruir la señal original a través de la Transformada Wavelet inversa. [11]

2.2 Aspectos Básicos de la Transformada Wavelet.

Esta técnica fue desarrollada como alternativa para superar los problemas de resolución de la Transformada de Fourier en tiempo reducido (STFT), haciendo una buena representación de una señal tanto en tiempo y frecuencia de forma simultánea por lo que el análisis Wavelet representa el siguiente paso a la STFT que es una técnica mediante ventanas con regiones de tamaño variable.[12]

Una manera más sencilla para comprender como opera la Transformada Wavelet es pensar que la señal en base de tiempo es pasada por filtros altos y bajos, los mismos que permiten separar las porciones de la señal de alta frecuencia de las porciones de señal de baja frecuencia.

Se puede decir que el análisis Wavelet permite el uso de intervalos grandes de tiempo para aquellos segmentos en los que se necesita mucha precisión en baja frecuencia, así como el uso de intervalos más pequeños para información de alta frecuencia.

En la figura se muestra en forma esquemática la idea mencionada.



Figura 2.5: Esquema de la Transformada Wavelet.

Fuente: S. Kouro, R. Rodrigo, and a A. De Fourier, “Tutorial introductorio a la Teoría de Wavelet,” pp. 1–8, 2002.

Se vuelve necesario señalar que una Wavelet es una señal o forma de onda de duración limitada cuyo valor medio es cero. Al comparar una Wavelet con las funciones sinusoidales hay que resaltar la principal diferencia, esta señala que la señal sinusoidal no tiene duración, pues se extiende desde $-\infty$ a $+\infty$. Así como también decir que las señales sinusoidales son predecibles, caso contrario ocurre con las Wavelets que tienden a ser irregulares y asimétricas.

Se debe mencionar que la Transformada Wavelet descompone la señal en versiones trasladadas (en tiempo) y escaladas de la Wavelet original o Wavelet Madre más conocida.

Así como decir que la principal ventaja que provee la Transformada Wavelet es su facultad para el análisis de áreas localizadas de señales grandes.[10]

Básicamente lo que hace la Transformada Wavelet es filtrar una señal en el dominio del tiempo mediante filtros pasa bajos y pasa altos que eliminan ciertas componentes de alta y baja frecuencia de la señal.

Para entender de mejor manera como opera la Transformada Wavelet, observemos este ejemplo; supóngase que se tiene una señal de hasta 1000Hz, para el primer paso se divide la señal en dos partes, se hace pasar por un filtro pasa bajo y uno pasa alto, de esta manera se obtiene dos versiones diferentes de la señal original, una parte corresponde al rango 0-500Hz y la otra parte corresponde al rango 500-1000Hz. Se repite el procedimiento mencionado, se debe escoger una de las dos partes de la señal, para este ejemplo se tomará el rango de baja frecuencia de la señal, se obtiene como resultado los rangos de 0-250Hz, 250-500Hz y 500-1000Hz. Se repite el proceso para la señal de baja frecuencia y se obtiene como resultado los siguientes rangos 0-125Hz, 125-250Hz, 250-500Hz y 500-1000Hz.

Este procedimiento se puede seguir repitiendo hasta descomponer a la señal en un determinado número de niveles. Lo que se obtiene es un grupo de señales que representan a una sola señal pero en diferentes bandas de frecuencia.

Como se conoce el rango de frecuencia de cada señal, se puede agrupar para realizar un gráfico de tres dimensiones, teniendo como ejes tiempo, frecuencia y amplitud respectivamente.[10][12]

2.3 La Transformada Wavelet.

La Transformada Wavelet es una herramienta matemática desarrollada desde los años 80s, eficiente para el análisis local de señales no estacionarias y de rápida

transitoriedad, muy similar a la Transformada de Fourier con ventana que mapea a la señal en una representación de tiempo-escala.

Lo que diferencia a estas transformadas, es que la Transformada Wavelet provee de análisis multiresolución (MRA) con ventanas dilatadas.

Para el análisis de frecuencias de mayor rango se usan ventanas angostas y para el análisis de frecuencias de menor rango se usan ventanas anchas. [11]

Las funciones de la Transformada Wavelet son generadas a partir de una función Wavelet básica, mediante traslaciones y dilataciones. Estas funciones son esenciales para la reconstrucción de la función original mediante la Transformada Wavelet Inversa.[11]

De una manera muy general, la Transformada Wavelet de una función $f(t)$ es la descomposición de $f(t)$ en un conjunto de funciones $\psi_{s,\tau}(t)$, que forman una base y son llamadas las “wavelets”. La Transformada Wavelet se define como:

$$W_{f(s,\tau)} = \int f(t) \psi_{s,\tau}^*(t) dt \quad (6)$$

Las Wavelets son generadas a partir de la traslación y cambio de escala de una misma función Wavelet $\psi(t)$, llamada “Wavelet Madre”, este nombre deriva de dos importantes propiedades del análisis wavelet y se define como:

$$\psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (7)$$

Donde s es el factor de escala y τ es el factor de traslación.

El termino Madre da a entender que las funciones con diferentes regiones de actuación que se unen en el proceso de transformación provienen de una función principal o wavelet madre. Es decir la Wavelet Madre es un prototipo para generar las otras funciones ventanas.[12]

Adelante se muestra las transformaciones básicas utilizadas en el análisis Wavelet para traslación, cambio de escala y para cambio de escala y traslación.

$$\text{Traslación: } \psi(t - b) \quad (8)$$

$$\text{Cambio de escala: } \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t}{a}\right) \quad (9)$$

$$\text{Traslación y cambio de escala: } \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (10)$$

Existen muchas wavelets madres agrupadas en familias, Ingrid Daubechies es el mayor constructor de wavelets, él ha propuesto tres familias. La primera familia nombrada Daubechies, un conjunto de wavelets ortonormales apropiadas para analizar señales discretas. La segunda familia llamada Coiflets, llamada así por ser construidas para R. Coifman y la tercera familia Symmlet tiende a ser asimétricas al ser similares a las Daubechies.[12]

Existe también la familia Biortonormales, muy útil para la reconstrucción de imágenes por presentar una propiedad de fase lineal, se debe usar una wavelet madre para la descomposición y otra para la reconstrucción.

Haar expresa que existen Wavelets definidas por una función explícita como:

$$S_t = \begin{cases} 1, & 0 < t < 0,5 \\ -1, & 0,5 < t < 1 \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (11)$$

Que se representa en la siguiente grafica

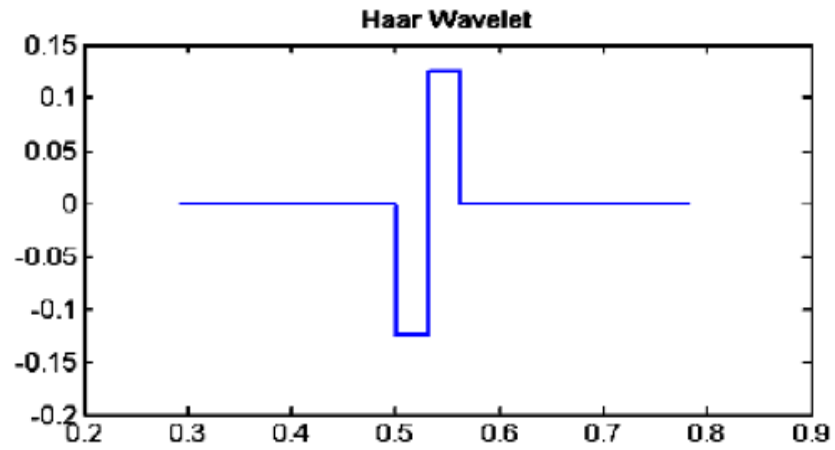


Figura 2.6: Wavelet Haar

Fuente: Propia del Autor

También existe la ecuación dada por Morlet:

$$S_t = \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) \cos(5t) \quad (12)$$

La siguiente grafica muestra la Wavelet Morlet

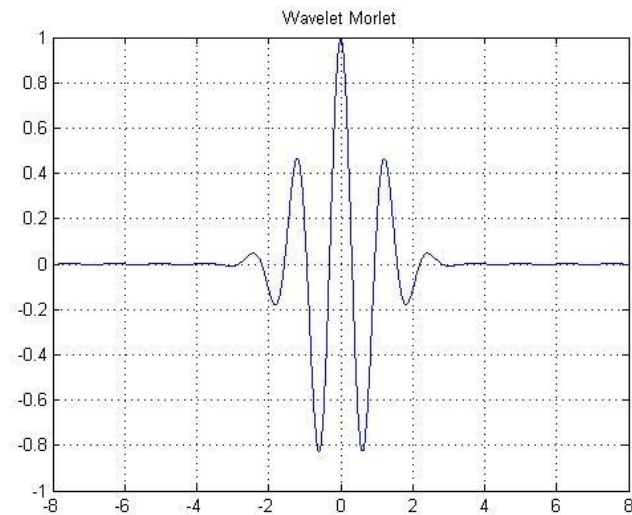


Figura 2.7: Wavelet Morlet

Fuente: Propia del Autor

También la Wavelet Sombrero Mexicano, que es la segunda derivada de la función de distribución Gaussiana.

$$S_t = \frac{2}{\sqrt{3} * \pi^{1/4}} \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) (1 - t^2) \quad (13)$$

Representada en la siguiente figura.

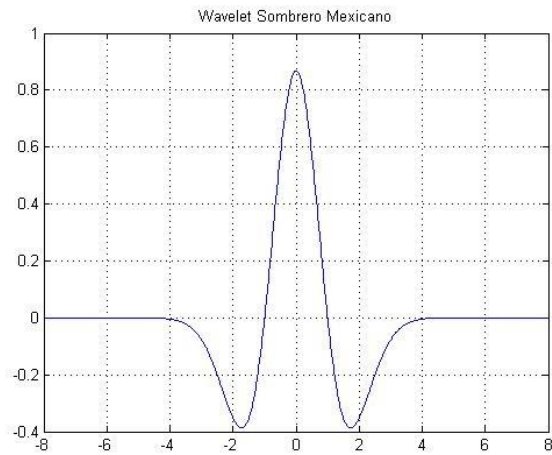


Figura 2.8: Wavelet Sombrero Mexicano

Fuente: Propia del Autor

En las siguientes graficas se presentan las principales familias de Daubechies, Coiflet y Symmlet.

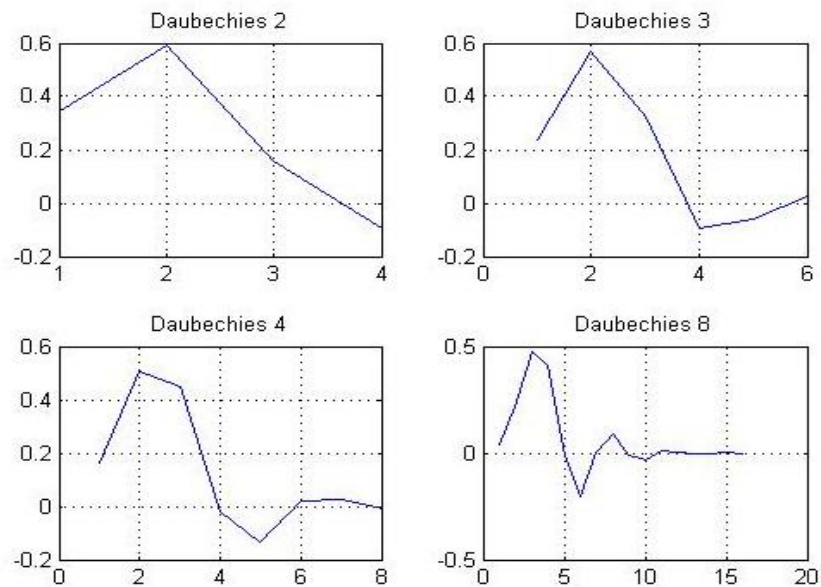


Figura 2.9: Familia Daubechies

Fuente: Propia del Autor

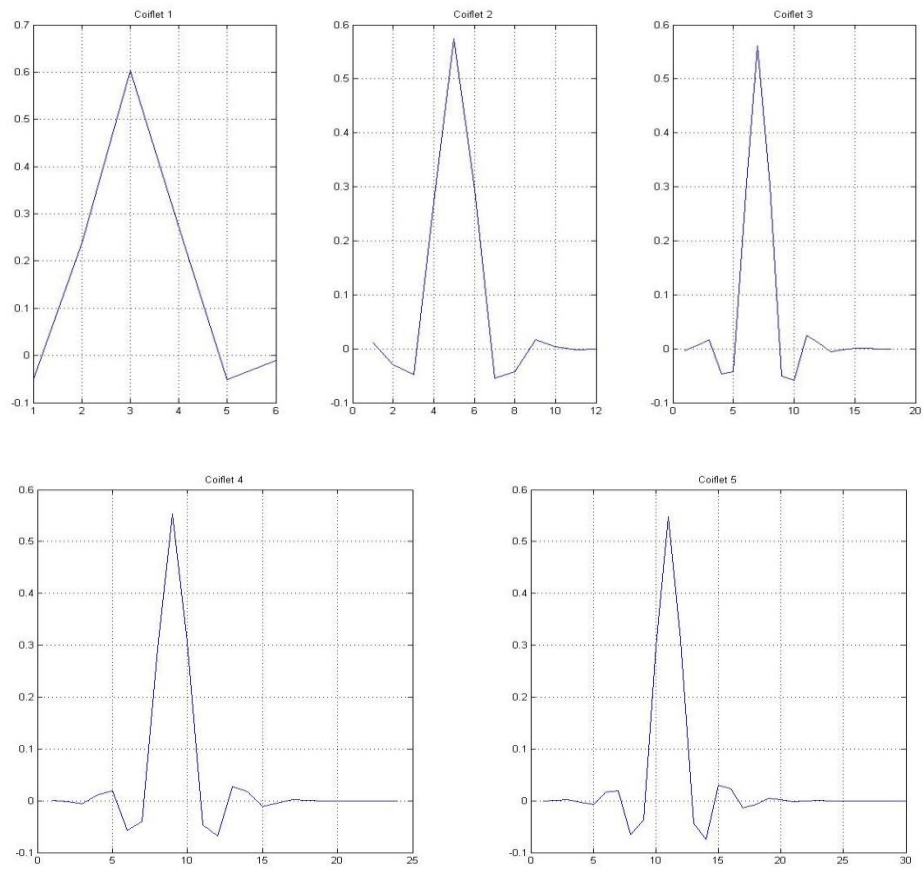


Figura 2.10: Familia Coiflet

Fuente: Propia del Autor

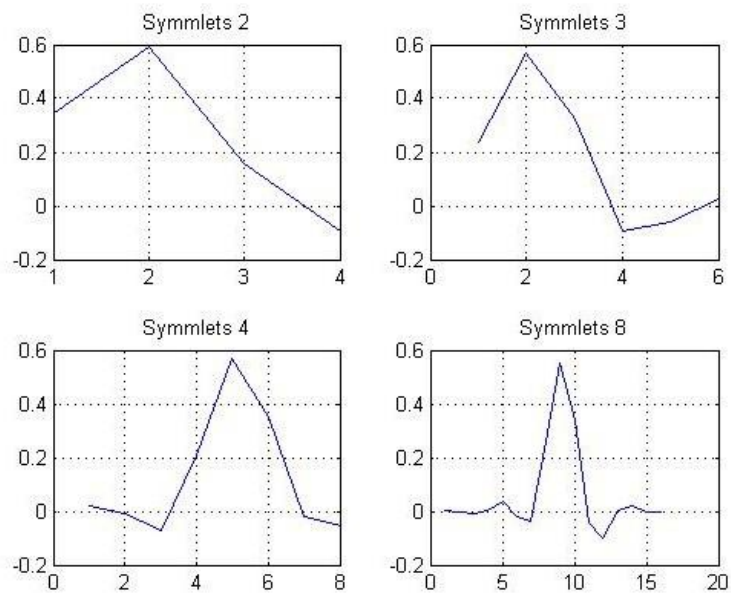


Figura 2.11: Familia Symmlet

Fuente: Propia del Autor

En la siguiente tabla se presentan las características de las wavelets más conocidas y algunas de sus propiedades. A continuación se presenta una descripción de las propiedades más importantes.

Tabla 2.2: Características y Propiedades de las Wavelet's más conocidas

	Haar	Sombrero Mexicano	Morlet	Daubechies	Symmlet	Coiflets	Gaussian
Propiedades	(haar)	(mexh)	(morl)	(dbN)	(symN)	(coifN)	(gausN)
Orden	---	---	---	$1,2,\dots, 45^2$	$1,2,\dots, 41^2$	$1,2,\dots, 5^2$	$1,2,\dots, 44^2$
Regularidad	No	Si	Si	Relativa ³	Relativa ³	Relativa ³	Si
Tamaño del Soporte	1	[-5,5]	[-4,4]	2N-1	2N-1	6N-1	[-5,5]
Longitud del filtro	2	---	---	2N	2N	6N	---
Simetría	Si	Si	Si	No	Aproximada	Aproximada	Si
Momentos de desvanecimiento	1	---	---	N	N	2N	---
Función de escala	Si	No	No	Si	Si	Si	No
CWT	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible
DWT	Posible	No permite	No permite	Posible	Posible	Posible	No permite
Expresión Explicita	Si	Si	Si	No	No	No	Si

Fuente: Propia del Autor

2.4 Tipos de Transformada Wavelet.

Se encuentran definidos tres tipos de transformadas Wavelets, la transformada Wavelet Discreta (DWT), la transformada Wavelet Continua (CWT) y la transformada Wavelet Semidiscreta (SWT).

2.4.1 Transformada Wavelet Continua (CWT).

La Transformada Wavelet Continua (CWT) para una señal $S_{(x)}$ está definida por la siguiente ecuación:

$$CWT_{(a,b)} = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int w\left(\frac{x-b}{a}\right) S_{(x)} dx; \quad a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0 \quad (14)$$

Donde a es la escala y b es la traslación ambos son números reales y $S_{(x)}$ es la función a analizar. De la ecuación puede apreciarse que si el coeficiente de escalamiento se hace cero, la wavelet no existiría y el análisis se indeterminaría

En la ecuación anterior se representa la señal $S_{(x)}$ en el plano tiempo-escala. La variable a de escala puede ser vista como $a = \frac{f_0}{f}$, donde f_0 es la frecuencia central de la wavelet, si remplazamos en la ecuación anterior tenemos:

$$CWT_{(a,b)} = \sqrt{\left|\frac{f}{f_0}\right|} \int w\left(\frac{f}{f_0}(x-b)\right) S_{(x)} dx; \quad a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0 \quad (15)$$

En la variable de escala se encuentra la información de la dilatación y la contracción de la señal, pero esto podría interpretarse como si lo que varía fuese la frecuencia, es decir, la señal al contraerse aumenta la frecuencia, y al dilatarse la señal disminuye la frecuencia.

Para el dominio del tiempo el análisis resulta menos complicado, puesto que la variable de traslación contiene la información en el tiempo e indica en qué posición se encuentra la wavelet.

Así es como por cada integral se obtiene un punto del plano traslación-escala y al ordenar los resultados en forma matricial se obtiene la información en el plano tiempo-frecuencia

En la siguiente figura se puede observar diferentes representaciones en tiempo-frecuencia para una señal $S(x)$, mostrando la resolución para cada transformada y el efecto de cada una sobre la señal.

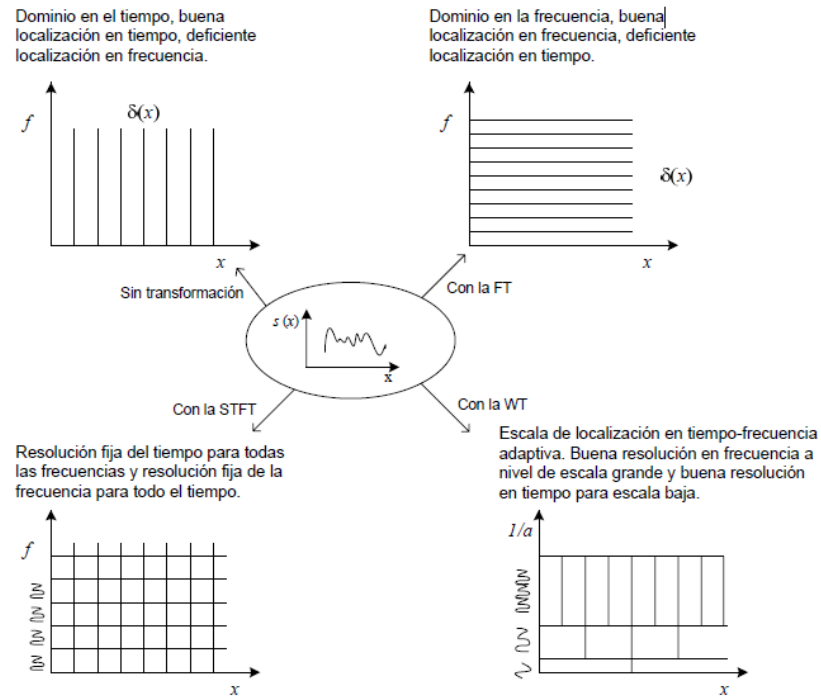


Figura 2.12: Visualización comparativa de la representación de una señal no estacionaria en diferentes dominios

Fuente: PEKE, "Teoria de Wavelets," 2006.

Además se debe mencionar otro aspecto importante de la CWT que es reversible, por medio de la Transformada Wavelet Continua Inversa (ICWT) y está representada por la siguiente ecuación.

$$C_{\psi} = \sqrt{2\pi \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|W(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega} < \infty \quad (16)$$

Donde $W(\omega)$ es la FT de $w(x)$ que es la función madre de la wavelet empleada. El valor de C_ψ debe ser finito para poder realizar la ICWT. A este proceso de reconstrucción de la señal se la denomina como síntesis y se la realiza después del proceso de descomposición. [13]

2.4.2 Transformada Wavelet Discreta (DWT).

Sea la señal a analizar $f_{[n]}$ una función discreta. Para este caso de esta señal la transformada Wavelet esta dada por:

$$C_{[j,k]} = \sum_{n \in \mathbb{Z}} f_{[n]} \psi_{j,k}[n] \quad (17)$$

Don de $\psi_{j,k}$ es una nueva Wavelet discreta definida como;

$$\psi_{j,k}[n] = 2^{-\frac{j}{2}} * \psi[2^{-j} n - k] \quad (18)$$

Los parámetros τ , s están definidos según la escala diádica, de manera que $\tau = 2^j$ $s = 2^j k$, con la diferencia respecto a la SWT que la señal bajo estudio es discreta. La transformada inversa se define de forma similar como:[12]

$$f_{[n]} = \sum_{j \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} C[j,k] * \psi_{j,k}[n] \quad (19)$$

2.4.3 Transformada Wavelet Semidiscreta (SWT).

En la práctica es más conveniente considerar la WT en algunos valores discretos de a y b . Por ejemplo, la escala diádica corresponde a la definición de los parámetros $a = 2^j$, $b = 2^j k$ con $(j, k) \in \mathbb{Z}^2$ denominándose transformada Wavelet semidiscreta (SWT).

Para que esta transformada sea reversible debe cumplir:

$$A\|f\|^2 \leq \sum_{a,b} |\langle f, \psi(\tau, s) \rangle|^2 \leq B\|f\|^2 \quad (20)$$

Donde A y B son dos constantes positivas y $f(t)$ sigue siendo una función continua.

La herramienta Wavelet es importante para el análisis de señales, mediante la cual se obtiene características importantes del comportamiento de las mismas.

En el presente análisis se utilizará la Transformada de Wavelet utilizando la familia Haar y la Gaussiana de orden 2, utilizando el toolbox de Wavelet de Matlab, herramienta matemática de programación de gran importancia en el tratamiento de señales. [12]

CAPITULO III

EVALUACIÓN DE ARMÓNICOS EN FOCOS AHORRADORES.

3.1 Introducción.

En este capítulo se presentan parámetros para la evaluación de armónicos, partiendo del hecho que existen normas que establecen los límites permisibles de distorsión, dependiendo de la tensión de operación y de su influencia en el sistema.

Parámetros como los índices de distorsión armónica, utilizado tanto en corriente como en voltaje, el factor de diversidad y el factor de atenuación mediante los cuales es posible cuantificar el error que se comete al analizar los índices de distorsión.

Además es necesario establecer límites sobre los niveles de distorsión permisibles para asegurar la integridad del sistema, estos límites deben ser tanto para usuarios como para suministradores de energía. Sin olvidar que los límites a los niveles de distorsión deben ser tanto en voltaje como en corriente.

También se va a establecer algunos métodos para medir armónicos, basados en la Transformada Wavelet.

Así como también se detalla el proceso del análisis de armónicos de focos ahorradores mediante la transformada wavelet, objetivo de este trabajo.

3.2 Índices de Distorsión Armónica

Cuando el voltaje o la corriente de un sistema tienen deformaciones con respecto a la forma de onda senoidal, se dice que esta señal está distorsionada.

Esta distorsión puede ser ocasionada por fenómenos transitorios como arranque de motores, conmutación de capacitores, efectos de tormentas o fallas por cortocircuito entre otras.

Además también existen condiciones permanentes que están relacionadas con armónicas de estado estable. En sistemas eléctricos es frecuente encontrar señales con cierta distorsión que al ser baja no ocasionan problemas en la operación de equipos. Existen normas que establecen los límites permisibles de distorsión, dependiendo de la tensión de operación y de su influencia en el sistema.[14]

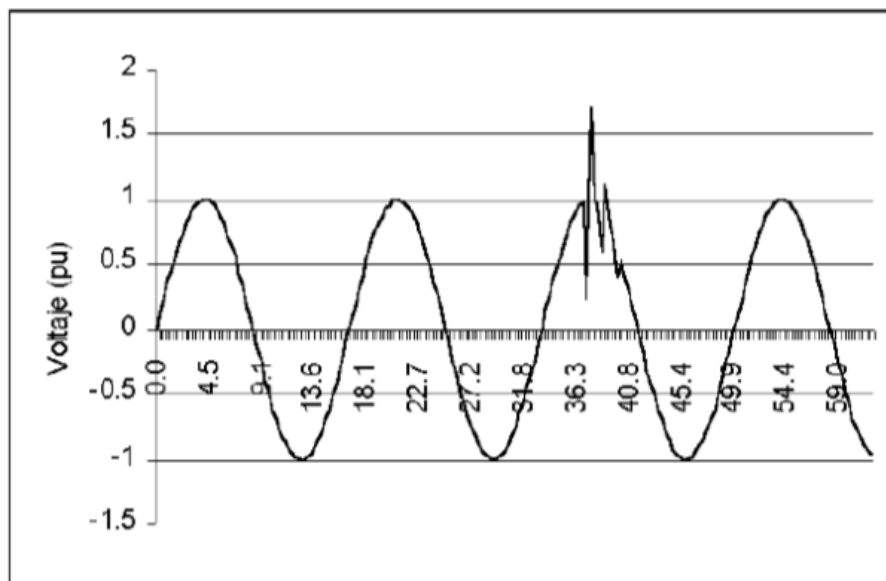


Figura 3.13: Efecto en el voltaje por la conmutación de capacitores.

Autor: E. Téllez Ramírez, “Distorsión Armónica,” *Autom. Product. Y Calid. S.a. C.V.*, no. 222, pp. 1–31, 2008.

Al medir la onda de corriente o tensión en un sistema eléctrico en cualquier punto este se encuentre distorsionado, tomando como referencia a la sinusoidal ideal que deberíamos encontrar, se dice que es una onda contaminada con componentes armónicas.

Existen algunas especificaciones para poder considerar como distorsiones armónicas en una señal, las cuales están expuestas a continuación:

- Que la señal contenga valores definidos dentro del intervalo, esto implica que la energía contenida es finita.
- Esta señal debe ser periódica, manteniendo la misma forma de onda en cada ciclo ya sea de corriente o tensión.
- También debe ser permanente presentándose en cualquier instante de tiempo.

A continuación se detallan los índices utilizados para cuantificar los niveles de distorsión armónicas.

3.2.1 Índices de Distorsión Armónica Total (THD).

La Distorsión Armónica Total (THD sus siglas en ingles), es uno de los índices más utilizados tanto para tensión como para corriente. Se lo define como el valor eficaz del total de las componentes armónicas y el valor eficaz que corresponde al componente de la fundamental, este valor se lo expresa como un porcentaje de la onda fundamental.

Para el cálculo de este factor en la señal de corriente se utiliza la siguiente expresión:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1} 100\% \quad (21)$$

Dónde:

K: Es el número de armónica.

I_1 : Es el valor eficaz de la onda fundamental de corriente.

I_k : Es el valor eficaz de la corriente del armónico k.

El THD_I puede variar desde valores porcentuales menores hasta superar el 100%, como ocurre en las fuentes de potencia conmutadas.

Aunque los armónicos de corriente de frecuencia más elevada pueden tener valores pequeños, al ser reactancias de la línea y de los transformadores proporcionales a la frecuencia, los armónicos de tensión pueden tomar valores significativos.

Por lo que para el cálculo de este factor se utiliza la siguiente expresión:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}}{V_1} 100\% \quad (22)$$

Dónde:

K: Es el número de armónica.

V_1 : Es el valor eficaz de la onda fundamental de voltaje.

V_k : Es el valor eficaz del voltaje del armónico k.[15]

3.2.2 Factor de diversidad.

La dispersión en el ángulo de fase de los armónicos de cargas individuales provoca una disminución de las corrientes armónicas en la red. A este efecto se lo conoce como diversidad, principalmente se debe a diferencias en los parámetros del sistema de distribución y a los de la propia carga.

El factor de diversidad de corriente (FD_K) se define para cualquier armónico k y un conjunto de n cargas conectadas en paralelo, como la magnitud del fasor de la corriente de red, dividido por la suma de magnitudes de las corrientes individuales, para el mismo orden de armónico.

$$FD_k = \frac{\left| \sum_{i=1}^n I_{K(i)} \right|}{\sum_{i=1}^n |I_{K(i)}|} \quad (23)$$

Este factor varía entre 0 y 1. Un bajo valor de este índice implicará una cancelación importante para el armónico bajo análisis.[15]

3.2.3 Factor de atenuación.

La impedancia propia del sistema de potencia y la distorsión de tensión que tiende a reducir las corrientes armónicas en la red producidas por cargas no lineales provocan atenuación.

El factor de atenuación FA_k para el armónico k está definido como la magnitud de la corriente total del armónico k cuando n cargas idénticas están conectadas en paralelo, dividida por n veces la magnitud de la corriente de una única carga.

$$FA_k = \frac{I_{k(n)}}{nI_{k(1)}} \quad (24)$$

Dónde:

$I_{k(n)}$: Corriente para el armónico k con n cargas conectadas en paralelo.

$I_{k(1)}$: Corriente para el armónico k con una sola carga conectada.

Con los factores de atenuación y diversidad es posible cuantificar el error que se comete al analizar los índices de distorsión.[15]

3.2.4 Niveles de Armónicos permitidos por las normas.

Es preciso establecer límites sobre los niveles de distorsión permisibles, que se apliquen a usuarios como a los suministradores de energía, con esto se asegura la integridad del sistema de potencia.

En los Estados Unidos de América la norma IEEE 519, define entre sus puntos los valores máximos permisibles de distorsión.

3.2.4.1 Límites de distorsión en Voltaje.

La empresa suministradora es responsable de mantener la calidad del voltaje en el sistema de energía, especificando los límites para diferentes niveles de tensión.

Además es importante notar que la definición de la THD que se utiliza es diferente a la convencional ya que se expresa la distorsión en función del voltaje nominal, que es un valor constante para cada usuario, estableciendo así una base fija de evaluación a lo largo del tiempo.

Tabla 3.3: Límites de Distorsión Armónica en Voltaje, IEEE 519

Límites de Distorsión Armónica en Voltaje en % del voltaje nominal.		
Nivel de tensión de la acometida (V_n)	Distorsión Armónica individual	Distorsión Armónica Total THD V_n
$V_n \leq 69KV$	3.0%	5.0%
$69KV < V_n \leq 161KV$	1.5%	2.5%
$V_n > 161 KV$	1.0%	1.5%

Fuente: NORMA IEEE 519, “Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia,” 1992.

3.2.4.2 Límites de distorsión en corriente.

Las corrientes armónicas para cada usuario son evaluadas en la acometida y los límites se establecen en base a la relación entre la corriente de cortocircuito y la demanda máxima de corriente de la carga del usuario.

Tabla 3.4: Límites de Distorsión Armónica en Corriente, IEEE 519

Límites de Distorsión Armónica en corriente de la acometida.						
Isc/IL	TDD	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$
$V_n \leq 69KV$						
< 20	5.0%	4.0%	2.0%	1.5%	0.6%	0.3%
20-50	8.0%	7.0%	3.5%	2.5%	1.0%	0.5%
50-100	12.0%	10.0%	4.5%	4.0%	1.5%	0.7%
100-1000	15.0%	12.0%	5.5%	5.0%	2.0%	1.0%
> 1000	20.0%	15.0%	7.0%	6.0%	2.5%	1.4%
$69KV < V_n \leq 161KV$						
< 20*	2.5%	2.0%	1.0%	0.75%	0.3%	0.15%
20-50	4.0%	3.5%	1.75%	1.25%	0.5%	0.25%
50-100	6.0%	5.0%	2.25%	2.0%	0.75%	0.35%
100-1000	7.5%	6.0%	2.75%	2.5%	1.0%	0.5%
> 1000	10.0%	7.5%	3.5%	3.0%	1.25%	0.7%
$V_n > 161KV$						
< 50	2.5%	2.0%	1.0%	0.75%	0.3%	0.15%
≥ 50	4.0%	3.5%	1.75%	1.25%	0.5%	0.25%
Los armónicos pares se limitan al 25% de los límites de los armónicos impares mostrados anteriormente						
• Todo equipo de generación se limita a estos valores independientemente del valor Isc/IL que presenten.						
Donde Isc = corriente Máxima de cortocircuito en el punto de acoplamiento común. IL = Máxima demanda de la corriente de carga (a frecuencia fundamental) en el punto de acoplamiento común. TDD = Distorsión total de la demanda (RSS) en % de la demanda máxima.						

Fuente: NORMA IEEE 519, “Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia,” 1992.

3.3 Métodos de medida de armónicos basados en la Transformada Wavelet.

Se han venido desarrollando varios estudios para la detección y localización de perturbaciones empleando la transformada wavelet como herramienta para el análisis de interferencias, impulsos, interrupciones, armónicos, parpadeo (conocido como flicker) de señales no estacionarias causantes del deterioro del servicio.

Para el análisis de estudio se han realizado de acuerdo a dos líneas de estudio, la primera es el análisis multiresolución (MRA) que parte de un banco de filtros en su primera etapa para luego utilizar la transformada wavelet continua a las sub-bandas y la segunda emplea un análisis de una transformada wavelet compleja.

Basado en la primera línea de análisis, se presenta un estudio para evaluar armónicos desarrollando un algoritmo para la identificación de todos ellos, en los cuales se incluyen a los armónicos enteros, no enteros y subarmónicos. Como primer paso del análisis al espectro de frecuencias de la señal se descompone en sub-bandas empleando la técnica de filtrado de la transformada wavelet discreta con funciones Daubechies de alto grado, para posteriormente aplicar la transformada continua a las sub-bandas no nulas, así se alcanza resultados satisfactorios partir de un sistema de prueba real.

Para la segunda línea de investigación se realiza un análisis armónico con una función wavelet trapezoidal compleja y la transformada trapezoidal asociada.[16]

3.4 Estudio de armónicos de focos ahorradores mediante la Transformada Wavelet.

Para realizar el análisis de los armónicos generado por los focos ahorradores partiremos de la adquisición de datos. Para este caso existen varios estudios previos en la cual se han realizado las mediciones pertinentes en las cuales se ha determinado los valores de THD tanto de corriente como de voltaje.

Por lo tanto se detalla a continuación los datos obtenidos en dichos estudios, que para obtener un resultado adecuado, han realizado dos secuencias de pruebas, los cuales

permitirán el análisis mediante la transformada de wavelet, motivo del presente trabajo.

3.4.1 Secuencia 1.

El proceso para esta secuencia comienza con la realización de 18 pruebas (P1-P18), siendo P1 el inicio con todos los equipos electrónicos y lámparas encendidas.

Para los siguientes pasos, desde P2 hasta P18, se apagará uno a uno los focos ahorradores y a continuación los equipos electrónicos.[17]

Como resultado de este procedimiento se obtuvieron los siguientes datos.

Tabla 5.3: Resultados obtenidos en la secuencia 1

	%THD Corriente	I [A]	K	P [W]	PF	DPF
P1	33.1	2.17	2	2670	0.94	1
P2	42	6.6	3.2	810	0.89	0.98
P3	36.3	7.05	3	760	0.89	0.98
P4	39.7	6.3	3.1	790	0.9	0.98
P5	37.4	6.8	3.3	770	0.9	0.99
P6	38.5	6.6	3.2	720	0.9	0.99
P7	35.4	6.4	3.1	770	0.91	0.99
P8	34.9	5.9	3.7	730	0.91	0.99
P9	38.9	5.4	3.5	660	0.9	0.99
P10	34.5	5.9	3	650	0.91	0.99
P11	35	5.8	3.2	640	0.91	0.99
P12	35.6	5.7	3.1	640	0.91	0.99
P13	63.7	2.9	9.4	290	0.76	1
P14	63.9	2.1	10.4	210	0.76	0.99
P15	65.7	2.01	11.5	197	0.74	0.99
P16	64.1	1.68	9.4	150	0.73	0.99
P17	51.7	0.403	13.3	32	0.78	0.96
P18	50.3	0.313	16.4	21	0.76	0.92
P19	48.2	0.27	15.6	24	0.8	0.96

Fuente: F. Vasco, “Capítulo IV: Análisis experimental del funcionamiento de los focos ahorradores frente a distintos tipos de cargas.”

De los datos obtenidos al realizar la secuencia 1, se toma como referencia los valores de THD, valores representados en la siguiente gráfica.

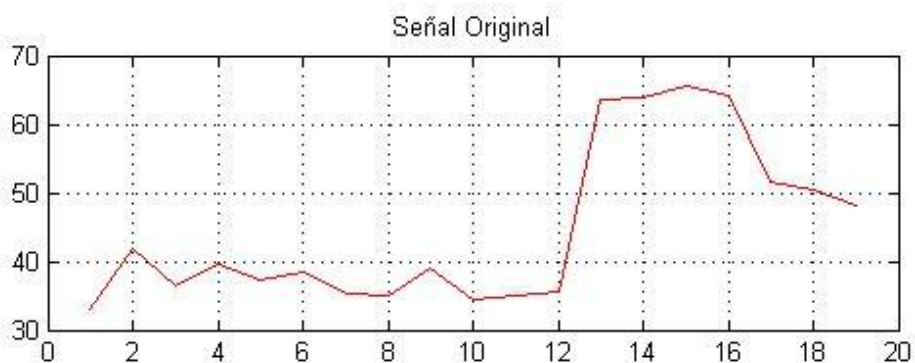


Figura 3.14: Valores de THD secuencia 1

Fuente: Propia del Autor

En la siguiente grafica se presenta la descomposición de la señal utilizando Wavelet, mediante la herramienta matemática Matlab.

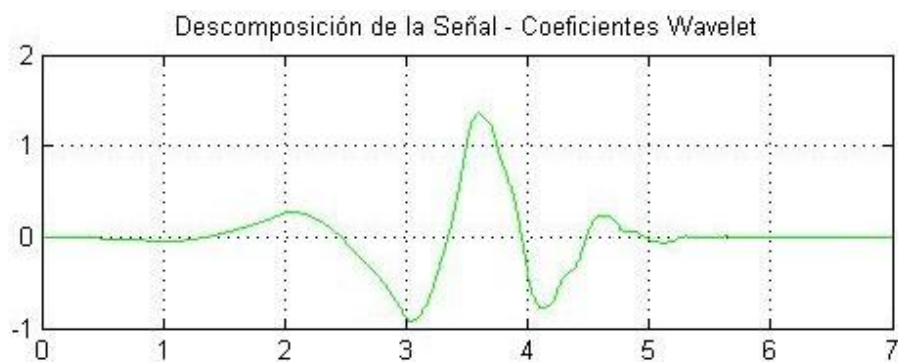


Figura 3.15: Descomposición de la señal utilizando Wavelet, secuencia 1

Fuente: Propia del Autor

En la siguiente ilustración se presenta la descomposición de las frecuencias altas y bajas mediante Wavelet.

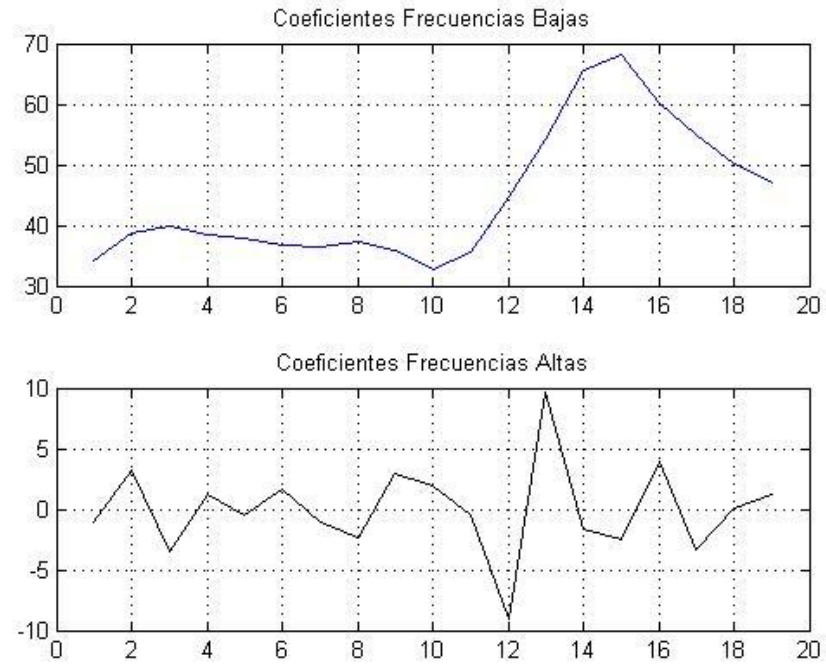


Figura 3.16: Descomposición de coeficientes de frecuencias bajas y altas, secuencia 1

Fuente: Propia del Autor

Como último paso se procede a recuperar la señal original, en base a los coeficientes.

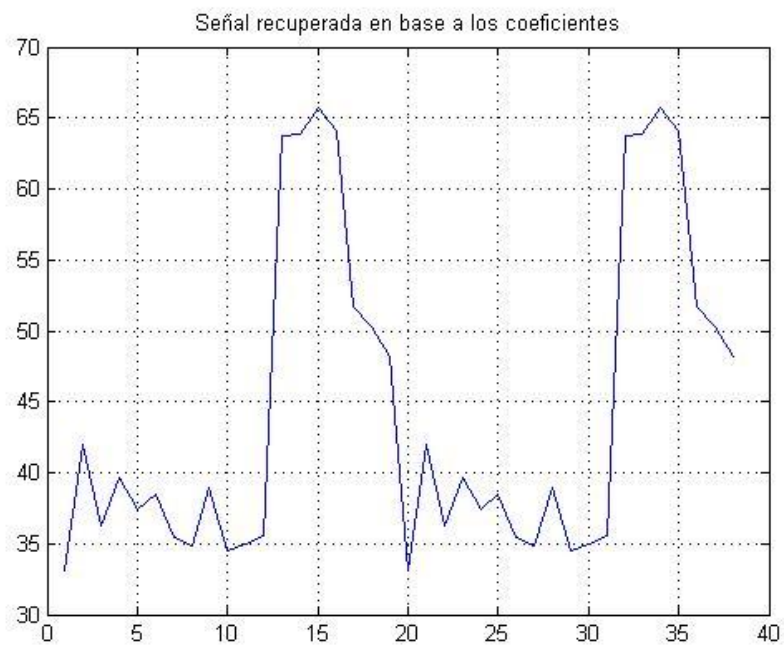


Figura 3.17: Señal recuperada en base a los coeficientes secuencia 1.

Fuente: Propia del Autor

3.4.2 Secuencia 2.

El proceso para esta secuencia comienza con la realización de 17 pruebas (P1-P17), siendo P1 el inicio con todos los equipos electrónicos y lámparas encendidas.

Para los siguientes pasos, desde P2 hasta P8, se apagara uno a uno los equipos electrónicos. Además en los pasos P8 a P17 se apagan los focos ahorradores uno a uno, lo que nos indica el comportamiento de los focos ahorradores frente a los distintos tipos de cargas.[17]

Como resultado de este procedimiento se obtuvieron los siguientes datos.

Tabla 3.6: Resultados obtenidos en la secuencia 2.

	%THD Corriente	I [A]	K	P [W]	PF	DPF
P1	39.9	7.8	3.2	840	0.89	0.98
P2	40.1	6.6	4.2	800	0.91	0.98
P3	41.3	5.8	4.1	650	0.89	0.98
P4	40	5.54	4.4	600	0.88	0.98
P5	37.3	5.8	4.4	510	0.88	0.98
P6	39.2	5.3	5.4	500	0.89	0.97
P7	66.1	2.6	16.4	220	0.69	0.92
P8	67.3	2.5	18.1	210	0.68	0.93
P9	67	2.2	16.3	200	0.68	0.92
P10	66.2	2	17.4	167	0.69	0.92
P11	65.8	1.5	19	129	0.69	0.91
P12	66.5	1.3	23.8	110	0.68	0.92
P13	66.6	1.14	28.4	92	0.67	0.91
P14	63.8	0.91	27	76	0.7	0.92
P15	60	0.7	26	60	0.72	0.93
P16	54.2	0.49	30	43	0.77	0.94
P17	47.7	0.21	17.3	26	0.79	0.95

Autor: F. Vasco, “Capítulo IV: Análisis experimental del funcionamiento de los focos ahorradores frente a distintos tipos de cargas.”

Como en la secuencia anterior, se vuelve a tomar de referencia los valores de THD, de los cuales se obtiene la siguiente gráfica.

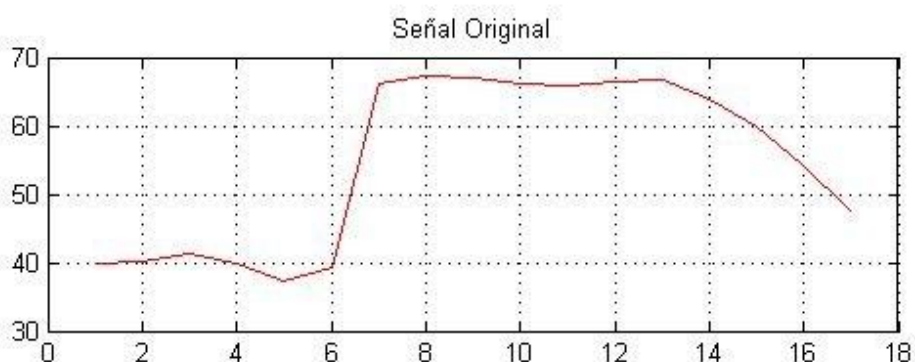


Figura 3.18: Valores de THD secuencia 2

Fuente: Propia Autor

De la misma manera se presenta la descomposición de la señal, mediante wavelet, lo que se presenta en la siguiente gráfica.



Figura 3.19: Descomposición de la señal utilizando Wavelet, secuencia 2

Fuente: Propia del Autor

Como para la secuencia anterior se procede a la descomposición de la de frecuencias bajas y altas, lo que se representa en la siguiente imagen.

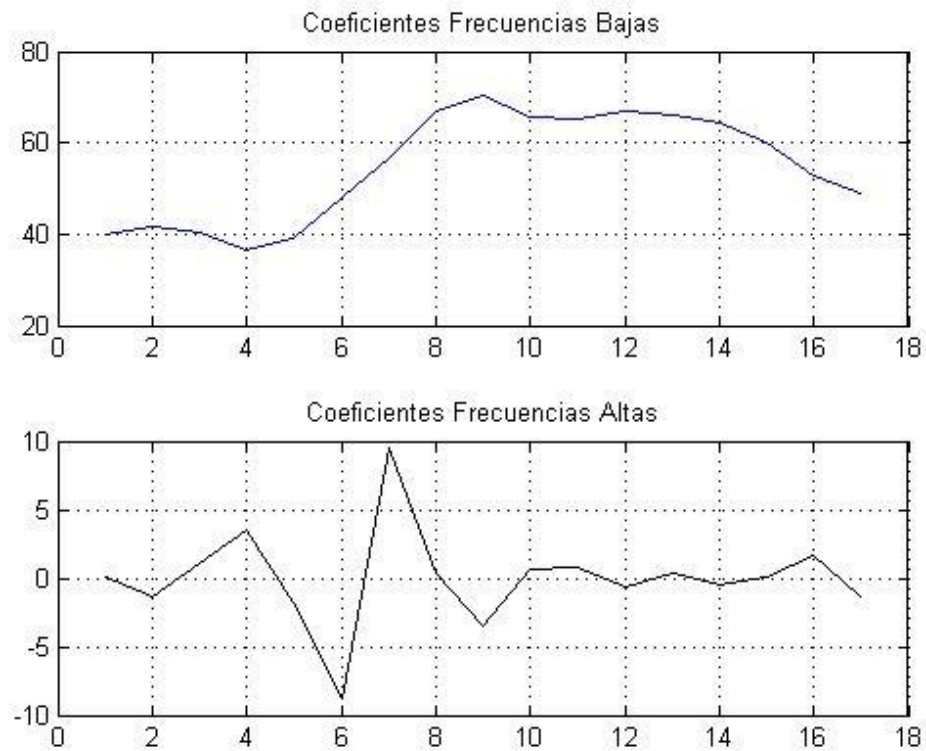


Figura 3.20: Descomposición de coeficientes de frecuencias bajas y altas, secuencia 2

Fuente: Propia del Autor

Para terminar el procedimiento se procede a recuperar la señal en base a los coeficientes.

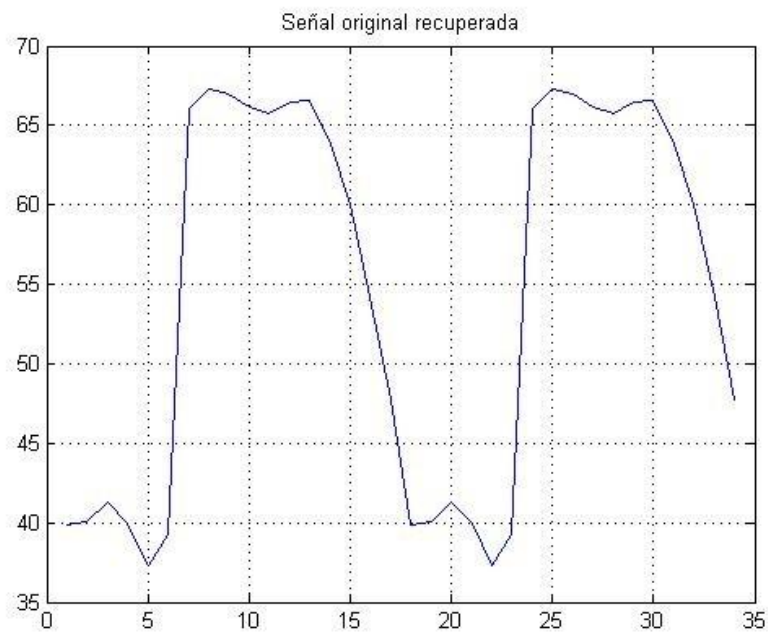


Figura 3.21: Señal recuperada en base a los coeficientes secuencia 2.

Fuente: Propia del Autor

Para el siguiente paso se procedió a tomar los valores THD únicamente de los focos ahorradores, se graficó la señal y como en los procedimientos anteriores se procedió a la descomposición de la señal mediante Wavelet, la que se presenta en la siguiente gráfica.

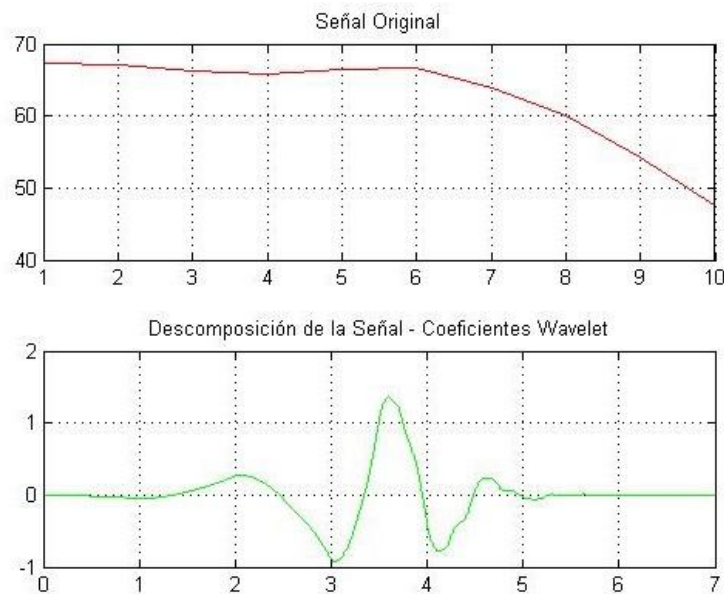


Figura 3.10: Valores THD solo focos ahorradores, descomposición de la señal mediante wavelet.

Fuente: Propia del Autor

Como en los procedimientos anteriores se descompone la señal en frecuencias altas y bajas y como resultados se obtuvo las siguientes gráficas.

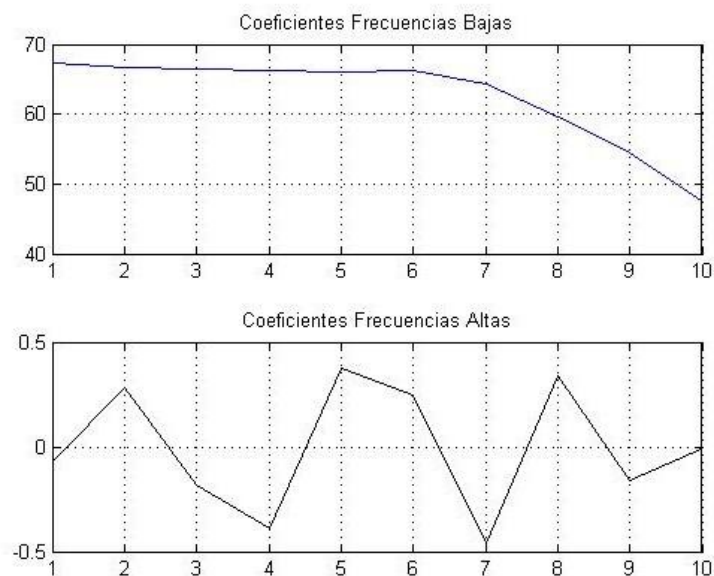


Figura 3.11: Descomposición de coeficientes de frecuencias bajas y altas, solo focos ahorradores

Fuente: Propia del Autor

Para terminar se reconstruye la señal en base a los coeficientes, lo que está representado en la siguiente gráfica.



Figura 3.12: Señal recuperada en base a los coeficientes, solo focos ahorradores.

Fuente: Propia del Autor

Para los valores de THD solo de focos ahorradores procedemos a representar de forma tridimensional los coeficientes calculados aplicando la Transformada Wavelet Continua (CWT), lo que se representa de la siguiente manera.

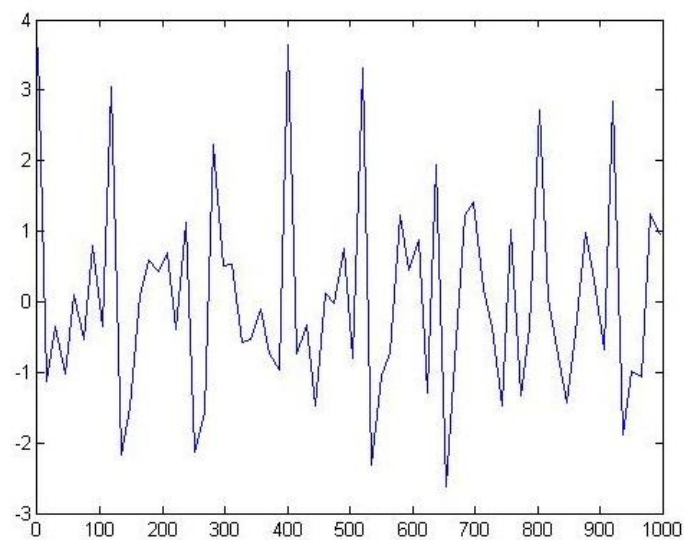


Figura 3.13: Señal en dos dimensiones aplicando CWT.

Fuente: Propia del Autor

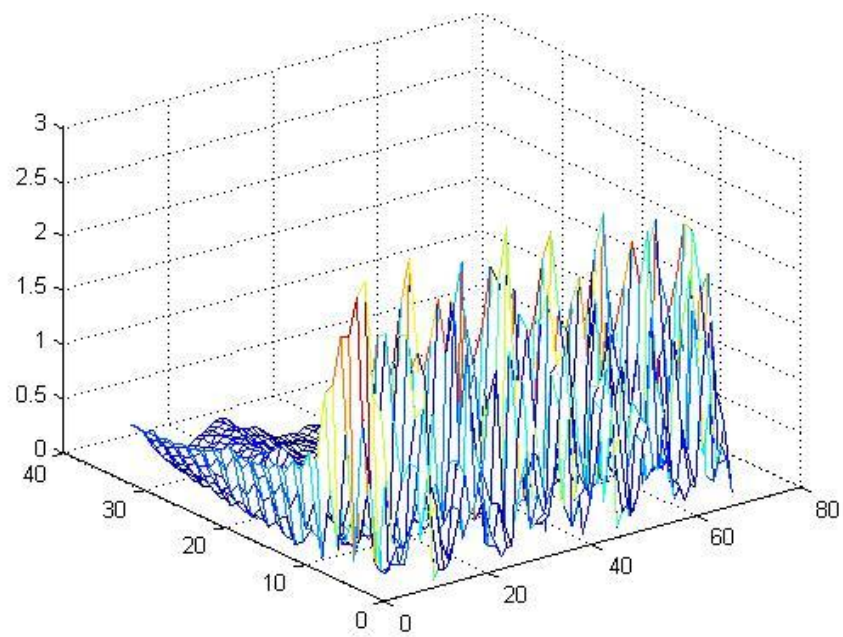


Figura 3.14: Señal en tres dimensiones aplicando CWT.

Fuente: Propia del Autor

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS.

4.1 Introducción.

Para este capítulo vamos a especificar algunos de los efectos que producen los armónicos en los sistemas eléctricos.

Además definir cómo es que los armónicos generan efectos de resonancia, sobrecalentamiento de conductores, como afectan a transformadores y los demás parámetros definidos en este capítulo.

También se realizará una comparación entre métodos de análisis de armónicos, para este trabajo se compara el análisis de Fourier con un nuevo método de estudio de señales como son las wavelets.

Y para finalizar, se describe el proceso del análisis de armónicos de focos ahorradores utilizando la transformada wavelet en escala y desplazamiento.

4.2 Efectos de los Armónicos en los sistemas eléctricos.

Actualmente existe un crecimiento muy elevado en el consumo de elementos de tipo no lineal, más el incremento de bancos de condensadores de compensación de factor de potencia, determinan un aumento en las fuentes de distorsión armónica y sus consecuencias negativas para sistemas eléctricos.

4.2.1 Resonancia.

La utilización de dispositivos, ya sean capacitivos o inductivos en sistemas de distribución que estén contaminados de distorsión armónica provocan el fenómeno de la resonancia, lo cual produce valores altos o bajos de impedancia. Estas variaciones en la impedancia modifican la corriente y la tensión en sistemas de distribución.[18]

4.2.2 Sobrecalentamiento de los conductores neutros.

Para sistemas trifásicos, la forma de onda de la tensión de cada fase, se encuentra desfasada 120° , entre fase y neutro, por lo que cuando cada fase tiene la misma carga, la corriente combinada en el neutro es cero. En el momento en que las cargas no se encuentran equilibradas, por el neutro circulará la corriente neta correspondiente al desequilibrio de las cargas. Aunque las corrientes fundamentales se anulen entre sí, no ocurre lo mismo con las corrientes armónicas. Además aquellas señales armónicas múltiplos impar del triple de la fundamental, los denominados armónicos “triple N” se suman en el conductor neutro, como se puede observar en la siguiente figura.[7]

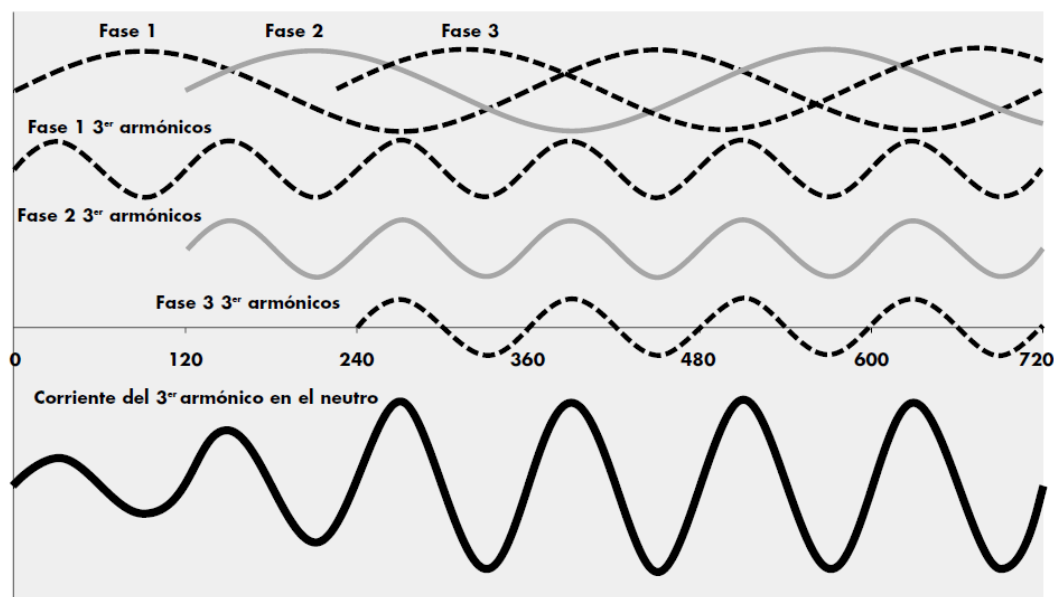


Figura 4.22: Suma de las tres corrientes triple N en el neutro.

Fuente: D. Chapman, “Armónicos Causas y efectos,” 2001.

4.2.3 Efecto sobre los transformadores

En transformadores las corrientes armónicas que circulan provocan un aumento de las pérdidas en las bobinas por efecto Joule. También debido a la histéresis las tensiones armónicas causan pérdidas en el hierro.[18]

Se puede tomar a consideración una aproximación, considerando que las pérdidas en las bobinas varían con el cuadrado de la THD de corriente, y para las pérdidas en el núcleo varían linealmente en función de la THD de tensión. La distorsión en voltaje causa pérdidas adicionales en el núcleo pero su impacto es poco significativo.[18]

Además de lo mencionado las corrientes armónicas tienen más efectos en transformadores, los cuales se detallan a continuación.

- Reducción de la eficiencia provocada tanto por el incremento en la corriente eficaz como por las corrientes de Eddy que son función cuadrada de la frecuencia.
- Incremento en costos de operación.
- Capacidad de operación reducida con relación a su nominal.

- Incremento en temperatura, pudiendo exceder los límites de elevación sobre la temperatura ambiente, provocando fallas prematuras.

4.2.4 Sobrecarga de los condensadores de corrección de factor de potencia.

En un condensador de corrección de factor de potencia la impedancia disminuye cuando la frecuencia aumenta, al contrario sucede con la impedancia de la fuente normalmente inductiva y aumenta con la frecuencia. Por lo que, es probable que el condensador deje pasar fuertes intensidades de armónicos de orden superior que puedan producir daños.[7]

4.2.5 Problemas producidos por los armónicos de tensión.

Una carga no lineal, produce corriente de cargas distorsionada, provocando una caída de tensión distorsionada en la impedancia del cable. Debido a la forma de onda de tensión distorsionada resultante, esta se aplica a todas las demás cargas que se encuentran conectadas al circuito, que como resultado se tiene que circulan corrientes armónicas, incluso en cargas líneas del circuito.[7]

4.2.6 Efectos de los armónicos en equipos de consumidor.

Los armónicos, en teoría, deberían de afectar a tiristores de equipos que controlan velocidad variable, existen casos en que el voltaje causa mala operación a través de tiristores. En otros casos los efectos de resonancia en varios equipos pueden terminar en sobre-voltajes. Además los voltajes armónicos pueden causar el disparo en circuitos de disparo.

En equipos receptores de televisión, los armónicos afectan el pico de voltaje y causan el cambio de tamaño y el brillo de la imagen.

Para los diseñadores son limitaciones el aceptar armónicos en computadores y sistemas de procesamiento de alimentación de circuitos.

Cuando las lámparas fluorescentes o de mercurio poseen balastos con capacitores, los cuales con la inductancia del propio balastro y del circuito tienen una frecuencia

resonante que corresponde a un armónico generado, puede resultar en falla o calentamiento.

Todos estos problemas mencionados, también pueden ser experimentados por los consumidores que se encuentren conectados en la misma barra.[7]

4.3 Comparación con otros métodos de análisis de armónicos.

4.3.1 Análisis de Fourier.

Es un operador lineal, transforma señales basadas en el tiempo a las señales basadas en la frecuencia.



Figura 4.23: Esquema de Transformada de Fourier

Fuente: C. B. Uvo, “Fourier and Wavelets Transforms,” pp. 1–19, 1995.

Cualquier función periódica se puede descomponer a una suma de ondas de seno y coseno, es decir, cualquier función periódica $f(x)$ puede ser representado por

$$a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos kx + b_k \sin kx) \quad (25)$$

Dónde:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi}^{2\pi} f(x) dx; \quad a_k = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(kx) dx; \quad (26)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin(kx) dx; \quad (27)$$

Funciones de base: senos y cosenos

Tirar hacia atrás: transformar al dominio de la frecuencia, la información se pierde tiempo. No sabemos cuándo un evento ocurrió.

Transformada discreta de Fourier: Estima la transformada de Fourier de la función de un número finito de sus puntos de muestra.

Transformada de Fourier de ventana: Representa señales no periódicas.

Trunca senos y cosenos para adaptarse a una ventana de especial anchura.

Corta la señal en secciones y se analiza cada sección por separado.

Ejemplo:

Transformada de Fourier de venta, donde la ventana es una onda cuadrada

- Se utiliza una sola anchura de la ventana
- Senos y cosenos se truncan para adaptarse a la anchura de la ventana.
- La misma resolución a todos los lugares del plano tiempo-frecuencia.[19]

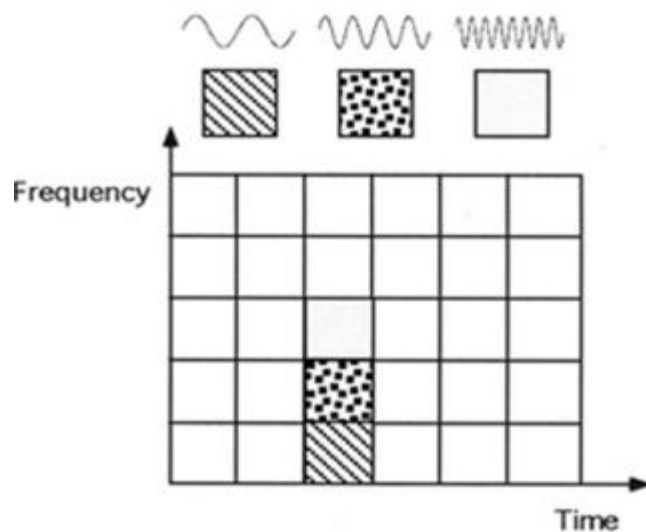


Figura 4.24: Transformada de Fourier de ventana.

Autor: C. B. Uvo, "Fourier and Wavelets Transforms," pp. 1–19, 1995.

4.3.2 Transformada Wavelet.

El espacio y el análisis de frecuencia (escala y tiempo), es un operador lineal. Una técnica de ventanas con regiones de tamaño variable. Largos intervalos de tiempo que se necesita información más precisa de baja frecuencia.

Regiones más cortas donde la información de alta frecuencia es de interés. Funciones de base: número infinito de ondas (funciones de base más complicados). Variación en el tiempo y la frecuencia (tiempo y la escala) de modo que el ejemplo anterior se convierte en la siguiente figura

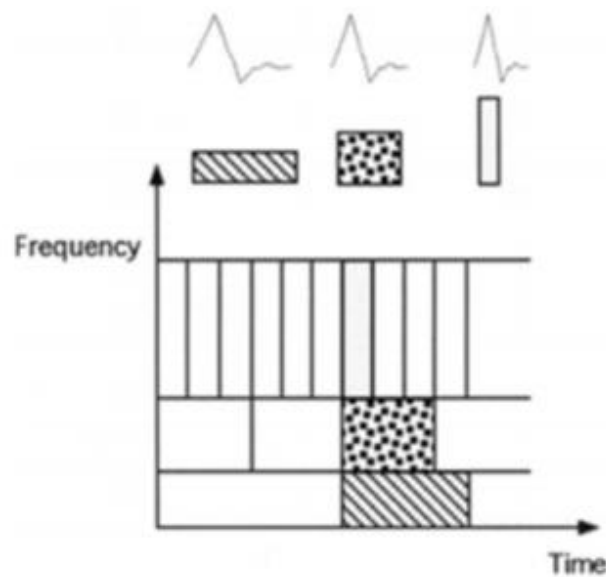


Figura 4.25: Transformada Wavelet

Fuente: C. B. Uvo, "Fourier and Wavelets Transforms," pp. 1–19, 1995.

Definición: wavelet es una forma de onda de duración limitada efectivamente que tiene un valor medio de cero.

Escala aspecto: La señal presenta una variación local muy rápido.

Tiempo aspecto: la detección de ruptura y bordes. Estudio de fenómenos de corta duración como los procesos transitorios [19]

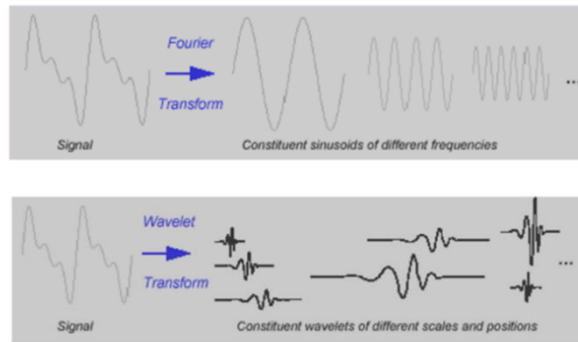


Figura 4.26: Fourier vs Wavelet

Fuente: C. B. Uvo, "Fourier and Wavelets Transforms," pp. 1–19, 1995.

4.3.3 Transformada Wavelet vs Transformada de Fourier.

En términos muy generales: se puede pensar en la diferencia en términos del principio de incertidumbre de Heisenberg, una versión de la que dice que "ancho de banda" (dispersión de frecuencia) y "duración" (diseminación temporal) no pueden ser ambos arbitrariamente pequeños.

El clásico de la Transformada de Fourier permite realizar una medición con cero ancho de banda: la evaluación $f(k)$ nos dice con precisión el tamaño del componente de frecuencia k . Pero al hacerlo, se pierde todo el control de la duración espacial; es decir no sabe cuándo el tiempo se hace señal. Este es el caso límite del principio de incertidumbre: la precisión absoluta de la frecuencia y cero control sobre la propagación temporal. (Mientras que la señal original, cuando se mide a una hora fija, le da sólo una precisión absoluta de la amplitud en ese tiempo fijo, pero cero información sobre el espectro de frecuencias de la señal, y representa el otro extremo del Principio de Incertidumbre.)[20]

La transformada wavelet se aprovecha de los casos intermedios del Principio de Incertidumbre. Cada medición de ondas (la transformada wavelet correspondiente a un parámetro fijo) le dice algo acerca de la extensión temporal de la señal, así como algo sobre el espectro de frecuencia de la señal. Es decir, a partir del parámetro w (que es el análogo del parámetro de frecuencia k de la transformada de Fourier), podemos derivar una frecuencia característica $k(w)$ y un tiempo característico $t(w)$,

y decir que nuestra función inicial incluye una señal de "más o menos frecuencia k (w) que ocurrió en "más o menos el tiempo t (w)".

El objetivo tanto de la Transformada de Fourier como la Transformada Wavelet es descomponer una señal en ondas.[20]

A continuación se presentan varios aspectos que deben considerarse a la hora de analizar una señal con alguna de las dos transformadas.

- El análisis de Fourier es inestable, cuando son señales de tipo intermitente, si se añade un impulso localizado en el tiempo de una señal, todo el espectro de Fourier se verá afectado, a diferencia de Wavelet donde solo algunos coeficientes se modifican.
- El análisis Wavelet en muchos casos proporciona una mejor compresión de datos que los que se obtiene con la Transformada de Fourier.
- En el análisis de la Transformada de Fourier de tiempo corto (STFT) se recorre la señal con un solo tamaño de ventana.
- Con la Transformada de Wavelet se puede examinar señales con tiempos de cálculo reducidos y permite tener más información de la señal de análisis, comparado con la Transformada de Fourier.

4.4 Análisis de los armónicos en escala y desplazamiento.

4.4.1 El escalamiento.

El escalamiento de la wavelet es el alargamiento o la compresión de la Wavelet madre. Este factor de escalamiento está definido por la letra a . Este factor de escalamiento funciona de igual manera para todas las wavelets. Para obtener una mayor compresión de la wavelet, el factor de escalamiento debe ser pequeño.[21]

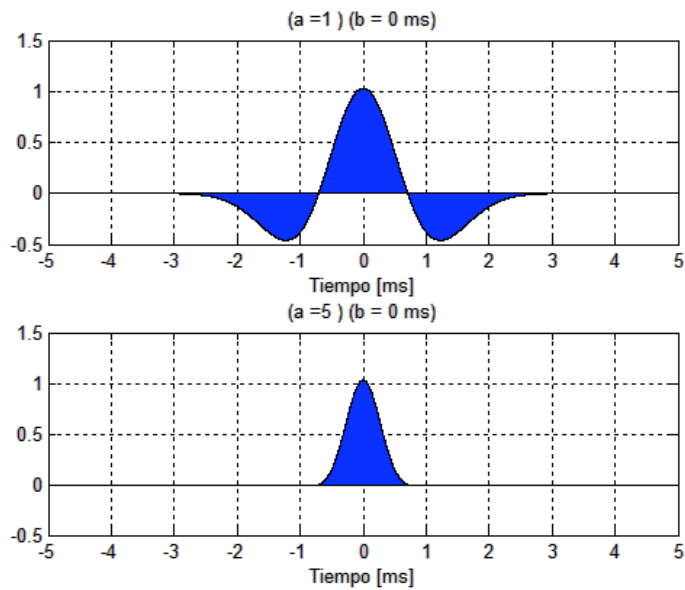


Figura 4.27: Escalamiento en Wavelet

Fuente: J. C. Jimmy Cortes, Hugo Cano, “DEL ANÁLISIS DE FOURIER A LAS WAVELETS - TRANSFORMADA CONTINUA WAVELET (CWT),” no. 37, pp. 133–138, 2007.

4.4.2 El desplazamiento.

El desplazamiento no es más que el adelanto o el retraso en la aparición de la señal. Para lograr esto se utiliza matemáticamente la función de la forma $f(t-k)$, donde k es el desplazamiento.

Una wavelet es una función del tiempo $\Psi = \Psi(t)$ de energía finita, oscilante y bien concentrada. Esta función es luego dilatada y trasladada en el tiempo. Por ejemplo, $\Psi(2t)$ duraría la mitad del tiempo, mientras que $\Psi(t/2)$ duraría el doble.

En la siguiente grafica está representado el desplazamiento.[21]

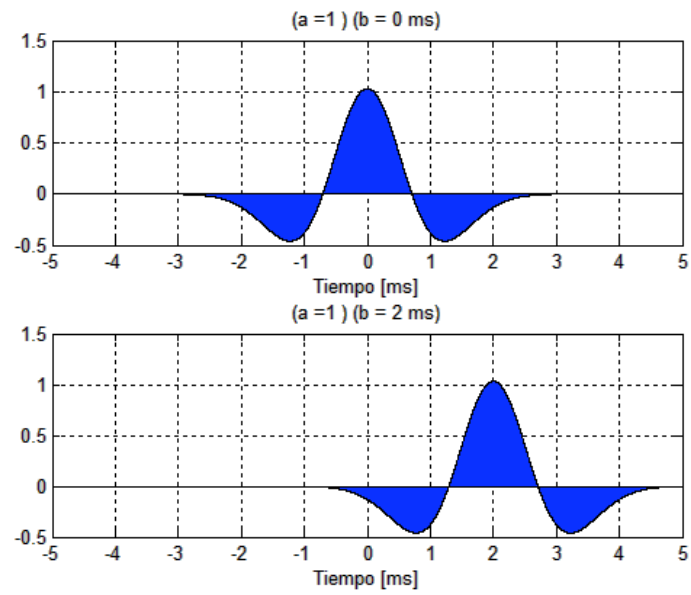


Figura 4.28: Desplazamiento Wavelet

Fuente: J. C. Jimmy Cortes, Hugo Cano, “DEL ANÁLISIS DE FOURIER A LAS WAVELETS - TRANSFORMADA CONTINUA WAVELET (CWT),” no. 37, pp. 133–138, 2007.

4.4.3 Armónicos de focos ahorradores en escala y desplazamiento.

Tomando como referencia los ítems anteriores, se toma la señal de los armónicos producidos por los focos ahorradores en las secuencias expuestas en el capítulo anterior y obtenemos los siguientes resultados.

Para la secuencia 1 se representa de la siguiente manera

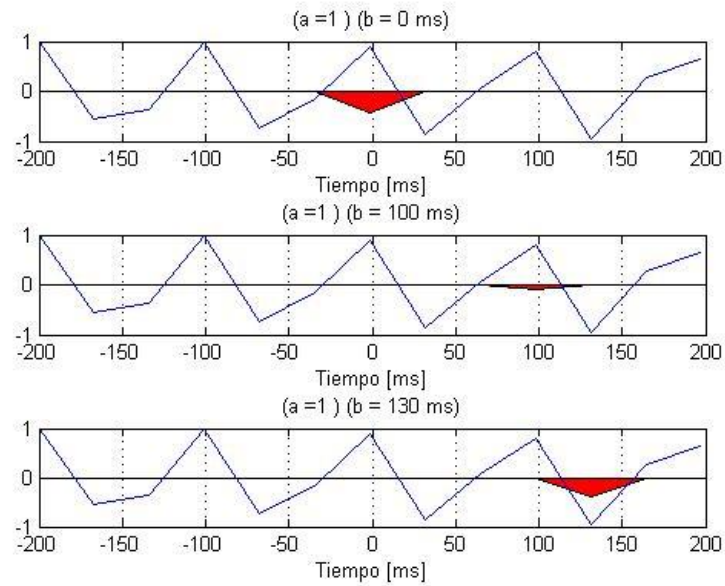


Figura 4.29: Escala y desplazamiento mediante wavelet, secuencia 1

Fuente: Propia del Autor

En la siguiente grafica observamos los resultados para la secuencia 2.

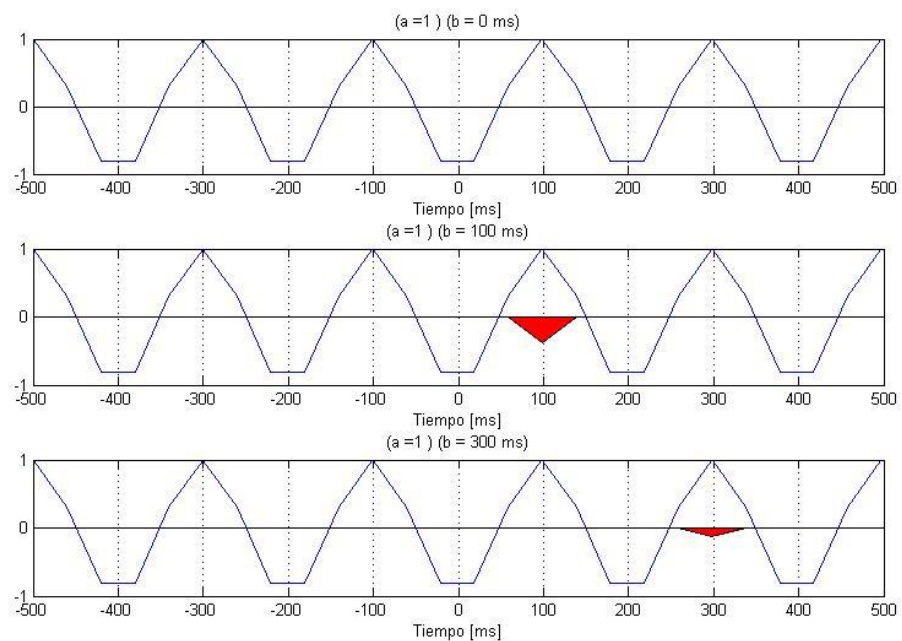


Figura 4.30: Escala y desplazamiento mediante wavelet, secuencia 2

Fuente: Propia del Autor

En la siguiente grafica se presentan los resultados de la secuencia 2 solo focos ahorradores.

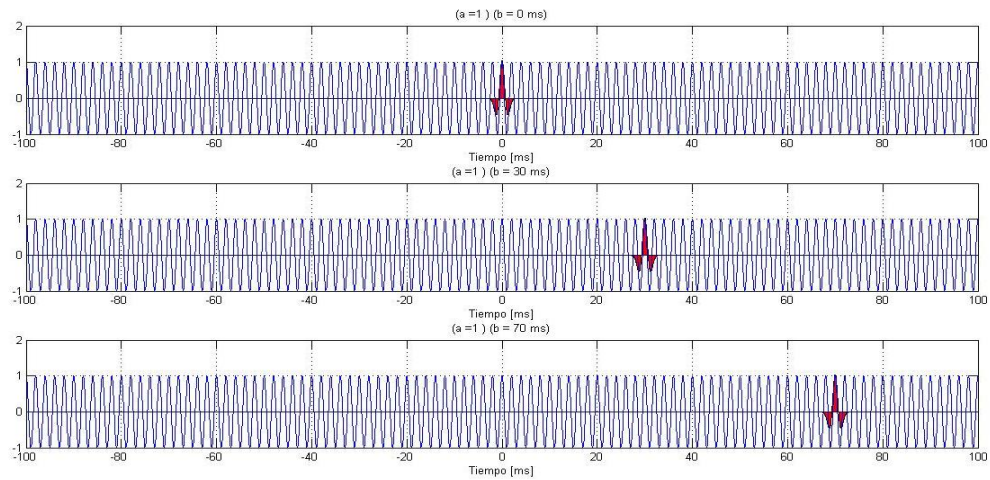


Figura 4. 31: Escala y desplazamiento mediante wavelet, secuencia 2, solo focos ahorradores.

Fuente: Propia del Autor

Una vez obtenidos los coeficientes, estos se ilustran en una gráfica de escalamiento b contra tiempo a, localizando puntos de intensidad proporcional al valor del coeficiente C. Los coeficientes contienen la información que permite la reconstrucción de la señal.

Matlab, dentro de Wavelet toolbox, incluye algunas funciones que permiten calcular la CWT de forma simple.

CONCLUSIONES.

Se determinó que los focos ahorradores son una fuente importante de armónicos para las redes de distribución, pero sabiendo que los focos ahorradores siempre forman parte de un sistema eléctrico en el que se incluyen cargas líneas, la distorsión total de corriente será inferior al caso en el cual la carga sea exclusiva de focos ahorradores.

Del análisis y estudio de la herramienta matemática Wavelet se puede concluir que para analizar la descomposición de la señal, la Wavelet más eficiente fue la de Haar.

Del análisis y estudio de la herramienta matemática Wavelet se puede concluir que para analizar la escala y desplazamiento de señales, la Wavelet más eficiente fue la Gaussiana 2.

Se puede concluir que el uso de la herramienta matemática Wavelet es más eficiente en este tipo de análisis que la Transformada de Fourier.

El reemplazo de focos incandescentes por focos ahorradores representan para el país y la sociedad en general beneficios económicos, mientras que para las empresas eléctricas de distribución, este reemplazo implica la presencia de armónicos de corriente, que se constituyen en una fuente generadora de distorsiones, tanto para el sistema de distribución como para el sistema de generación

Los armónicos de frecuencias bajas aumentan las pérdidas debido a las corrientes inducidas por el campo magnético en el conductor.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de los armónicos en focos ahorradores, el método de la Transformada Wavelet se muestra más simple y flexible. La Transformada Wavelet permite el análisis en diferentes tiempos y escalas de resolución.

Actualmente la Transformada Wavelet, con sus variantes se ha convertido en una herramienta, usada de forma exitosa en muchas aplicaciones de procesamiento de señales.

RECOMENDACIONES.

Se recomienda que al momento de elegir focos ahorradores, estos sean de buena calidad. Preferiblemente escoger focos ahorradores de marcas conocidas que presenten todos sus datos de placa.

Se recomienda que se realice un análisis de armónicos en residencias antes de implementar el diseño eléctrico.

Se recomienda un desarrollo teórico más avanzado para desarrollar un análisis más adecuado en la elección de la Transformada Wavelet para cada aplicación específica.

Se recomienda que en planes y en pensum académicos a la universidad se incluya el estudio de la Transformada Wavelet, puesto que facilita el análisis de señales eléctricas en general.

Se recomienda realizar un análisis de parámetros eléctricos para determinar el tipo de carga que generan los armónicos para proceder a su corrección.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. G. D. P, J. Arcila, and C. Steblina, “Efectos del uso masivo de bombillos ahorradores de energía sobre los transformadores de distribución Effects of energy saving light bulbs on distribution transformers,” vol. 15, pp. 69–76, 2008.
- [2] F. Vasco, “Capítulo ii: estudio de funcionamiento de los focos ahorradores.”
- [3] “ASÍ FUNCIONAN LAS LÁMPARAS AHORRADORAS CFL.” [Online]. Available: http://www.asifunciona.com/electronica/af_cfl/af_cfl_4.html.
- [4] S. C. SRL, “Análisis de iluminación, basado en ampollitas de bajo consumo, que este alimentado por paneles fotovoltaicos.”
- [5] NORMA IEEE 519, “Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia,” 1992.
- [6] J. Joseph, “Los Armónicos y la Calidad de la Energía Eléctrica,” 1830.
- [7] D. Chapman, “Armónicos Causas y efectos,” 2001.
- [8] Iza Diana; Iza Roberto, “Análisis del Efecto de Focos Ahorradores en la Calidad de Energía Eléctrica a Nivel de Generación Mediante la Implementación de un Módulo Didáctico para Laboratorio,” 2010.
- [9] O. Aragonés, “Estudio y Modelación en régimen permanente de cargas no lineales para el análisis armónico de redes eléctricas,” 1996.
- [10] S. Kouro, R. Rodrigo, and A. De Fourier, “Tutorial introductorio a la Teoría de Wavelet,” pp. 1–8, 2002.
- [11] A. De Señales, “Introducción a la Transformada Wavelet,” ... *Señales y Sist. Univ. Navarra*, 2006.
- [12] J. Martínez and R. Castro, “Análisis de la teoría ondículas orientada a las aplicaciones en ingeniería eléctrica: Fundamentos,” p. 161, 2002.
- [13] PEKE, “Teoría de Wavelets,” 2006.
- [14] E. Téllez Ramírez, “Distorsión Armónica,” *Autom. Product. Y Calid. S.a. C.V*, no. 222, pp. 1–31, 2008.
- [15] J. A. Suárez, G. F. Di Mauro, and D. A. C. Agüero, “de atenuación y diversidad en áreas residenciales,” vol. 3, no. 5, pp. 429–435, 2005.
- [16] H. Díaz and R. Castro, “Aplicación de la transformada wavelet en los sistemas eléctricos de potencia,” *Notas de curso*, pp. 1–20, 2007.

- [17] F. Vasco, "Capítulo IV: Analisis experimental del funcionamientos de los focos ahorradores frente a disitntos tipos de cargas."
- [18] Universidad Politecnica Salesiana, "Armonicos en las Redes Eléctricas," pp. 4–7, 2013.
- [19] C. B. Uvo, "Fourier and Wavelets Transforms," pp. 1–19, 1995.
- [20] J. a Cortés, H. B. Cano-Garzón, and J. a Chaves, "Del análisis de Fourier a las Wavelets - Transformada continua wavelet (CWT)," *Sci. Tech.*, vol. XIII, no. 34, pp. 133–138, 2007.
- [21] J. C. Jimmy Cortes, Hugo Cano, "DEL ANÁLISIS DE FOURIER A LAS WAVELETS - TRANSFORMADA CONTINUA WAVELET (CWT)," no. 37, pp. 133–138, 2007.
- [22] G. Bacino and J. R. Sánchez, "ANÁLISIS DE TRANSITORIOS Y ARMÓNICOS UTILIZANDO LA TRANSFORMADA WAVELET."
- [23] M. D. E. L. C. O. I. E and M. D. E. L. C. O. I. E, "Índice De Contenidos," pp. 1–86, 2005.
- [24] P. General and D. E. L. Problema, "Los armonicos en las instalaciones electricas 1. planteamiento general del problema."
- [25] J. Gomes and L. Velho, "From Fourier Analysis to Wavelets," *Design*, 1999.
- [26] E. Moposita, "Evaluacion Tecnica - Economica de las Lamparas Fluorescentes Compactas," 2012.
- [27] A. M. Moros, "Caracterizacion de senales de precipitacion mediante la transformada de fourier y la transformada wavelet," 2010.
- [28] E. L. Profeco, "Lámparas ahorradoras."
- [29] G. Ramon, "Analisis Wavelet Aplicado a la medida de Armonicos.," 2006.
- [30] S. Time and F. Transform, "Capítulo 2 teoría de wavelets," no. 7.
- [31] F. Vasco, "Capitulo iii análisis de armónicos y factor de potencia."
- [32] T. Wavelet, "Capitulo 2 transformada wavelet," 1946.

ANEXOS

ANEXO A

SECUENCIA 1 DE ADQUISICION DE DATOS DE %THD DE CORRIENTE

Tabla A.1: 1era medición programada en el TDP de una vivienda

FOCOS AHORRADORES	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18
LFC CUARTO MASTER	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LFC CUARTO 1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LFC CUARTO 2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LFC BAÑO 1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LFC GRADAS	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LFC CUARTO HUESPEDES	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LFC COMEDOR	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LFC SALA	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LFC COCINA	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LFC BAÑO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
EQUIPOS ELECTRONICOS (CARGA NO LINEAL)																		
PLASMA 42"	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
TV 21"	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
EQUIPO DE SONIDO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
CARGADOR LAPTOP	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
LCD 32"	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
DVD	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
IMPRESORA	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
MICROONDAS	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

DONDE :	
ENCENDIDO	1
APAGADO	0

Autor: F. Vasco, “Capítulo IV: Analisis experimental del funcionamientos de los focos ahorradores frente a disitntos tipos de cargas.”

ANEXO B

SECUENCIA 2 DE ADQUISICION DE DATOS DE %THD DE CORRIENTE

Tabla B.1: 2da medición programada en el TDP de una vivienda

FOCOS AHORRADORES	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17
LFC CUARTO MASTER	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
LFC CUARTO 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
LFC CUARTO 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
LFC BAÑO 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
LFC GRADAS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
LFC CUARTO HUESPEDES	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
LFC COMEDOR	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
LFC SALA	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
LFC COCINA	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
LFC BAÑO	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EQUIPOS ELECTRONICOS (CARGA NO LINEAL)																	
PLASMA 42"	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TV 21"	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EQUIPO DE SONIDO	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CARGADOR LAPTOP	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LCD 32"	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DVD	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMPRESORA	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

DONDE :	
ENCENDIDO	1
APAGADO	0

Autor: F. Vasco, “Capítulo IV: Analisis experimental del funcionamientos de los focos ahorradores frente a disitntos tipos de cargas.”

ANEXO C
PROGRAMAS EN MATLAB COMPOSICIÓN Y DESCOMPOSICIÓN DE
SEÑALES.

Análisis wavelet frecuencias altas, bajas y descomposición y reconstrucción (para las dos secuencias y THD solo focos ahorradores).

```
% Señal Original
bsc = xlsread('ejemplo thd.xlsx',1);
ls = length(bsc);
%=====
% Grafica Señal Original
figure(1)
subplot (2,1,1),plot(bsc,'r')
% Haar Bases
[Phi, Psi, x]=wavefun('db4',10);
title('Señal Original');
grid on
%=====
% Grafica Area de Análisis - Ventana
subplot (2,1,2),plot(x,Psi,'r',x,Psi,'g')
% Perform one step decomposition of 'bsc' using 'db1' (Haar bases)
[ca1,cd1] = dwt(bsc,'db4');
% Perform one step reconstruction from coefficients 'ca1' and 'cd1'.
a1 = upcoef('a',ca1,'db4',1,ls);
d1 = upcoef('d',cd1,'db4',1,ls);
title('Descomposición de la Señal - Coeficientes Wavelet');
grid on
%=====
% Grafica los coeficientes con las Frec Bajas y Frec Altas
% Aplica la Transformada inversa de Wavelet IDWT
figure(3)
subplot(2,1,1)
plot(a1,'b')
title('Coeficientes Frecuencias Bajas');
grid on
subplot(2,1,2)
plot(d1,'k')
title('Coeficientes Frecuencias Altas');
% Invert directly decomposition of 's' using coefficients.
a0 = idwt(ca1,cd1,'db4',ls); % Transformada Discreta Inversa
grid on
%=====
% Descomposición de la seña a un nivel 3 con db
% Usando appcoef realiza una 1-D approximation coefficients
% Luego obtiene 1-D detail coefficients usando detcoef
% Reconstruye la señal con wrcoef - Reconstruct single branch from 1-
D wavelet coefficients
% Finalmente Multilevel 1-D wavelet reconstruction
figure(4)
plot([bsc',a0'])
title('Señal recuperada en base a los coeficientes');
grid on
pause
% Perform decomposition at level 3 of 'bsc' using 'db1'.
[c,l] = wavedec(bsc,3,'db4');

ca3 = appcoef(c,l,'db4',3);
% Extract detail coefficients at levels 1, 2 and 3,
% from wavelet decomposition structure [c,l].
cd3 = detcoef(c,l,3);
cd2 = detcoef(c,l,2);
cd1 = detcoef(c,l,1);
```

```

% Reconstruct approximation at level 3,
% from wavelet decomposition structure [c,l].
a3 = wrcoef('a',c,l,'db4',3);

% Reconstruct detail coefficients at levels 1,2 and 3,
% from the wavelet decomposition structure [c,l].
d3 = wrcoef('d',c,l,'db4',3);
d2 = wrcoef('d',c,l,'db4',2);
d1 = wrcoef('d',c,l,'db4',1);
% Reconstruct 's' from the wavelet decomposition structure [c,l].
a0 = waverec(c,l,'db4');

```

ANEXO D

REPRESENTACIÓN TRIDIMENSIONAL.

Representación tridimensional.

```
% Representación tridimensional
clear all
close all
bsc=xlsread('ejemplo thd.xlsx',3);
npuntos=bsc;
t=0:1/npuntos:1;
w=2*pi;
tiempo=1000*t;
x=cos(w*10*t)+cos(w*25*t)+cos(w*50*t)+cos(w*100*t);
figure(1)
plot(tiempo,x)
coefs=cwt(x,1:32,'sym6');
figure(2)
mesh(abs(coefs))
```

ANEXO E
ESCALA Y DESPLAZAMIENTO

Escala y desplazamiento

```
bsc = xlsread('ejemplo thd.xlsx',3);
n = bsc;
t=-100:1/n:100;
w=2*pi;
f=0.5;
phi=0;
%Gausiana de Orden 2
%X2 = (t-to).^2;
%F0 = (2/pi)^(1/4)*exp(-s*X2);
%psi = -2/(3^(1/2)) * (-1+2*X2).*F0;
subplot(3,1,1);
b=0; %Factor de desplazamiento
a=1 ; %Factor de Escala
X2 = (t-b).^2;
F0 = (2/pi)^(1/4)*exp(-a*X2);
psi = -2/(3^(1/2)) * (-1+2*X2).*F0;
plot(t,psi,'r');
fill(t,psi,'r');
hold
x=cos(w*f*t+phi);
plot(t,x);
xlabel('Tiempo [ms]');
title(['(a =',num2str(a),' ) (b = ', num2str(b),' ms)']);
grid;
subplot(3,1,2);
b=30; %Factor de desplazamiento
a=1 ; %Factor de Escala
X2 = (t-b).^2;
F0 = (2/pi)^(1/4)*exp(-a*X2);
psi = -2/(3^(1/2)) * (-1+2*X2).*F0;
plot(t,psi,'r');
fill(t,psi,'r');
hold
x=cos(w*f*t+phi);
plot(t,x);
xlabel('Tiempo [ms]');
title(['(a =',num2str(a),' ) (b = ', num2str(b),' ms)']);
grid;
subplot(3,1,3);
b=70; %Factor de desplazamiento
a=1 ; %Factor de Escala
X2 = (t-b).^2;
F0 = (2/pi)^(1/4)*exp(-a*X2);
psi = -2/(3^(1/2)) * (-1+2*X2).*F0;
plot(t,psi,'r');
fill(t,psi,'r');
hold
x=cos(w*f*t+phi);
plot(t,x);
xlabel('Tiempo [ms]');
title(['(a =',num2str(a),' ) (b = ', num2str(b),' ms)']);
grid;
```