

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA: INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Tesis previa a la obtención del título de: INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:**

**ANÁLISIS DE TRANSITORIOS IMPULSIVOS Y OSCILATORIOS EN LAS REDES  
ELÉCTRICAS MEDIANTE LA TRANSFORMADA DE WAVELET.**

**AUTOR:**

**CARLOS MIGUEL LÓPEZ RIVAS**

**DIRECTOR:**

**EDWIN GUILLERMO QUEL HERMOSA**

**Quito, Febrero de 2015**

## **DECLARATORIA DE AUTORÍA:**

Yo, Carlos Miguel López Rivas 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, 23 de Febrero del 2015

---

**Carlos Miguel López Rivas**  
**CC: 0502348584**

**AUTOR**

**CERTIFICA:**

Haber dirigido y revisado prolijamente cada uno de los capítulos teóricos y técnicos del informe de la tesis, así como la investigación respecto a la “ANALISIS DE TRANSITORIOS IMPULSIVOS Y OSCILATORIOS EN LAS REDES ELECTRICAS MEDIANTE LA TRANSFORMADA DE WAVELET” realizada por el Sr. Carlos Miguel López Rivas, previa a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico en la Carrera de Ingeniería Eléctrica.

Por cumplir los requisitos autoriza su presentación.

Quito, 23 de Febrero del 2015

---

**Ing. Edwin Guillermo Quel Hermosa**  
**DIRECTOR**

## **DEDICATORIA.**

### **Carlos Miguel López Rivas**

Primeramente a Dios que me da la vida y las bendiciones cada día, a mí querida madre: María Irlanda Rivas Galarza, quien fue un apoyo emocional durante el tiempo en el que curse mis estudios.

A mi amada esposa, Gynna Fernanda Mejía Pacheco, quien me apoyo y alentó para continuar cuando parecía que me iba a dar por vencido.

A mis Hermanas, Fernanda López y familia, Paola López y familia quienes me apoyaron y depositaron su confianza en mí.

A mis profesores a los cuales les debo mi conocimiento y gusto por mi carrera  
A todos los que me apoyaron moralmente durante todo mi curso universitario.  
Para ellos es esta dedicatoria pues a ellos les debo su apoyo incondicional.

## **AGRADECIMIENTO.**

### **Carlos Miguel López Rivas**

A Dios, mi madre y a mi esposa por  
estar siempre a mi lado.

A mi tutor Ing. Edwin Quel  
por sus constantes aportes para la  
finalización de este trabajo.

Con inmensurable aprecio a todos  
quienes con su amistad motivaros al  
término de esta tesis.

## ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA: .....	2
CERTIFICA: .....	3
DEDICATORIA .....	4
AGRADECIMIENTO .....	5
ÍNDICE GENERAL .....	6
ÍNDICE DE FIGURAS .....	9
ÍNDICE DE TABLAS .....	10
GLOSARIO DE TÉRMINOS .....	0
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I .....	2
PERTURBACIONES EN LAS REDES DE ENERGÍA ELÉCTRICA PRODUCIDAS POR TRANSITORIOS .....	2
1.1    Problemas Producidos en las Redes de Energía Eléctrica Producto de Transitorios .....	2
1.1.1    Las Variaciones de la Frecuencia .....	3
1.1.2    Los Armónicos .....	3
1.1.3    El Espectro Armónico .....	5
1.1.4    La 3ª y La 5ª armónica .....	6
1.1.5    Compensación de la energía reactiva en redes distorsionadas por armónicos .....	6
1.1.6    Variaciones de Tensión de corta duración VTCD .....	7
1.1.7    Salto de Tensión (Swell) .....	8
1.1.8    La Calidad de Energía .....	8
1.2    Análisis de Transitorios Impulsivos .....	8
1.2.1    Interrupciones .....	13
1.2.2    Subtensión .....	14
1.2.3    Sobretensión .....	14
1.3    Análisis de Transitorios Oscilatorios .....	15
1.3.1    Transitorio Oscilatorio .....	15
1.3.2    Características de las Ondas de Tensión y Corriente .....	18
1.3.3    Distorsión de la Señal .....	18
1.3.4    Normatividad para el Manejo de Armónicos .....	18
1.3.5    Cargas Lineales .....	21
1.3.6    Cargas No Lineales .....	21
1.3.7    Estándar IEEE .....	22
1.3.8    Interarmónica .....	22
CAPÍTULO II .....	24
ANÁLISIS DE SEÑALES MEDIANTE LA TRANSFORMADA DE WAVELET .....	24
2.1    Análisis Espectral de Señales .....	24
2.1.1    Dominio de la Frecuencia .....	24
2.1.2    Función densidad espectral de Energía .....	25
2.1.3    Comparación de la Transformada de Fourier y Transformada Wavelet .....	25

2.2	Transformada de Wavelet.....	26
2.2.1	Análisis Wavelet Haar.....	28
2.2.2	Mexican Hat (Sombrero Mexicano).....	29
2.2.3	Morlet.....	29
2.3	Análisis de las Wavelet Madre .....	31
2.3.1	La elección de una Wavelet .....	31
2.3.2	Momentos Wavelet .....	31
2.3.3	Transformada Wavelet Continua (CWT).....	31
2.3.4	Raíz Loci de Soluciones de mayor Grado.....	32
2.3.5	Transformada Wavelet Discreta (DWT).....	33
2.3.6	Transformada Wavelet discreta (DWT) y Análisis Multiresolución (ARM).....	34
2.3.7	Familia Wavelets Daubechies .....	35
2.3.8	Teoría del Banco de Filtros .....	36
2.3.9	Estructuras DWT.....	36
2.3.10	Filtro de Estructura de los Bancos .....	36
2.3.11	Filtros Bancos de Diagrama de Bloques .....	37
2.4	Aplicaciones de la Transformada de Wavelet .....	37
CAPÍTULO III.....		39
DISEÑO DE HERRAMIENTA EN MATLAB PARA LA EMULACIÓN DE TRANSITORIOS Y SU ANÁLISIS MEDIANTE LA TRANSFORMADA DE WAVELET .....		39
3.1	Diseño de herramienta en Matlab para la emulación de Transitorios y su análisis mediante la Transformada Wavelet.....	39
3.2	Diseño de Herramienta Matemática en Matlab para Análisis de señales mediante la Transformada de Wavelet <sup>49</sup>	
3.2.1	Implementación del módulo de análisis Wavelet.....	49
3.2.2	Algoritmo Rápido y Banco de Filtros .....	50
3.2.3	Algoritmos de Descomposición y Reconstrucción.....	50
3.2.4	Tratamiento de Fronteras .....	51
3.2.5	Desarrollo del Análisis de la Transformada Wavelet Madre.....	51
3.3	Diseño de Herramienta en Matlab para análisis de transitorios mediante la Transformada de Wavelet.	53
3.3.1	Comandos Matlab Necesarios para la Comprensión y Filtrado con Wavelet .....	53
CAPÍTULO IV.....		56
ANÁLISIS DE TRANSITORIOS IMPULSIVOS Y OSCILATORIOS EN LAS REDES DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE LA TRANSFORMADA DE WAVELET .....		56
4.1	Análisis y Simulación de Transitorios Impulsivos mediante la Transformada de Wavelet.....	56
4.2	Análisis y Simulación de transitorios oscilatorios mediante la Transformada de Wavelet .....	58
4.2.1	Ejemplo de ruido analizado mediante la transformada Wavelet. ....	60
4.2.2	Análisis de una Señal sin Perturbación .....	62
CONCLUSIONES .....		65
RECOMENDACIONES.....		67
Referencias.....		69



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Descomposición de la onda.....	2
Figura 1.2 Tensión Frecuencia de una Onda.....	5
Figura 1.3 Tercera y Quinta Armónica.....	6
Figura 1.4 Transitorio Impulsivo Positivo.....	9
Figura 1.5 Campo Magnético creado por un Rayo.....	10
Figura 1.6 Transitorio Oscilatorio.....	16
Figura 1.7 Cruce por Cero.....	17
Figura 2.1 Wavelet Haar.....	29
Figura 2.2 Wavelet Mexican Hat.....	30
Figura 2.3 Morlet Wavelet.....	30
Figura 2.4 Funciones Wavelet.....	31
Figura 2.5 Representación del Tratamiento de Señales que da la Transformada Wavelet.....	31
Figura 2.6 Función del Tiempo.....	34
Figura 2.7 Función Espectral del Tiempo.....	34
Figura 2.8 Señal multi-resolución de cuatro niveles.....	36
Figura 2.9 Familia Wavelets de Daubechies.....	37
Figura 2.10 Diagrama de Banco de Filtros.....	38
Figura 3.1 Pantalla Principal.....	40
Figura 3.2 Pantalla de Ingreso de Datos.....	43
Figura 3.3 Descomposición Wavelet.....	53
Figura 3.4 Reconstrucción Wavelet.....	53
Figura 4.1 Datos de la Bobina de encendido.....	60
Figura 4.2 Señal Ideal y Señal con perturbación en una Bobina de encendido.....	60
Figura 4.3 Resultante del análisis de una Bobina de encendido.....	61
Figura 4.4 Datos de un conductor de baja tensión a 110V.....	62
Figura 4.5 Señal Ideal y señal con perturbación de un conductor a 110V.....	63
Figura 4.6 Análisis de un conductor que genera transitorios oscilatorios.....	63
Figura 4.7 Datos para generar ruido en un sistema de perturbación térmica.....	65
Figura 4.8 Señal Ideal vs Señal con Ruido.....	66
Figura 4.9 Anaálisis de resultados de una señal con ruido.....	66
Figura 4.10 Ingreso de datos con perturbación inexistente.....	67
Figura 4.11 Similitud entre señales sin perturbacion y señal ideal.....	68
Figura 4.12 Análisis de señal sin perturbación.....	68

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Armónicos Circundantes en la Red.....	3
Tabla 1.2 Resumen de las Perturbaciones con Solucione.....	4
Tabla 1.3 Generación de Armónicos y sus efectos en las Redes Eléctricas.....	20
Tabla 1.4 Armónicos de corriente en sistemas de 120-69000.....	21
Tabla 1.5 Armónicos de corriente en sistemas de 69-161K.....	21
Tabla 1.6 Armónicos de corriente en sistemas mayores a 161Kv.....	21

## **GLOSARIO DE TÉRMINOS**

<b>I</b>	Corriente
<b>V</b>	Voltaje
<b>Hz</b>	Hertz
<b>PQ</b>	Power Quality
<b>VCTD</b>	Variaciones de tensión de corta duración
<b>Sags</b>	Caidas de Tensión
<b>Swell</b>	Salto de tensión
<b>p.u.</b>	Por unidad
<b>ns</b>	nano-segundos
<b>Hz</b>	Gigahertz
<b>EDS</b>	Descarga electrostática
<b>SPD</b>	Protección contra sobretensiones
<b>MOV</b>	Varistores de óxido metálico
<b>ASD</b>	Control de velocidad automático
<b>CC</b>	Corriente continua
<b>PLC</b>	Programador Lógico controlable
<b>THD</b>	Distorsión armónica total
<b>PCC</b>	Punto de acoplamiento común
<b>KV</b>	Kilovoltio
<b>SCR</b>	Relación de corto circuito
<b>ICS</b>	Corriente de corto circuito
<b>ISL</b>	Corriente de carga
<b>Cv</b>	Constante de admisibilidad
<b>CWT</b>	Transformada Wavelet Continua

# Análisis de Transitorios Impulsivos y Oscilatorios en las Redes Eléctricas Mediante la Transformada de Wavelet

Carlos Miguel López Rivas

[Carlosmigue84@hotmail.com](mailto:Carlosmigue84@hotmail.com)

Universidad Politécnica Salesiana

*Resumen*—“Los transitorios en las redes eléctricas son perturbaciones que están presentes en el día a día, El planteamiento de este trabajo busca incorporar un sistema para la detección de estos fenómenos, explícitamente por un moldeamiento en un software, sobre la respuesta de los transitorio impulsivos y en las redes de energía eléctrica, para ello se utiliza la transformada de Wavelet y se propone algunas mejoras en el sistema, basado en una respuesta eficiente y estable. Se parte de una descripción de las perturbaciones y se analiza los datos que son fuente para el estudio planteado”

*Índice de Términos*— Alteración en la forma de onda eléctrica, Armónicos, Calidad de la energía eléctrica, Espectro armónico, Perturbaciones, Transformada Wavelet, Transitorios Impulsivos, Transitorios Oscilatorios, Variación en la frecuencia.

---

# Analysis Impulsive and Oscillatory Transients in Electricity Network by Wavelet Transform

Carlos Miguel López Rivas

[Carlosmigue84@hotmail.com](mailto:Carlosmigue84@hotmail.com)

Universidad Politécnica Salesiana

*Abstract—Transients in power networks are disturbances that are present in day to day, The approach of this paper seeks to incorporate a system for detecting these phenomena explicitly for shaping a software on the response of impulsive transient and in electricity networks, this first wavelet transform is used and proposed some improvements in the system, based on an efficient and stable response. It starts with a description of the disturbances and the data source for the study are discussed raised.*

*Index Terms—Altered electrical waveform, harmonics, electric power quality, harmonic spectrum, disturbances, Wavelet Transform, Impulsive transient, Oscillatory transient, frequency variation.*

## INTRODUCCIÓN

El análisis de las señales eléctricas actualmente promueve la creatividad y el desarrollo de nuevas herramientas para aplicarlas a los avances tecnológicos de la información, pues este es el caso en el que se puede intervenir con la transformada Wavelet en un modelo matemático que resulte de ayuda significativa, para el beneficio y la buena calidad de energía para usuarios de las redes eléctricas.

La calidad del servicio de energía eléctrica se debe al diseño del sistema, la continuidad se garantiza desde los centros de generación hasta los usuarios. La exigencia del mercado por el incremento en la demanda diaria es la consecuencia con la que el sistema debe luchar. Por lo tanto, mantener la calidad del servicio es la meta de las empresas que buscan aumentar la producción de energía. Esto involucra la revisión de las técnicas de análisis, con la finalidad de aumentar la eficiencia del sistema eléctrico, así como la calidad de energía.

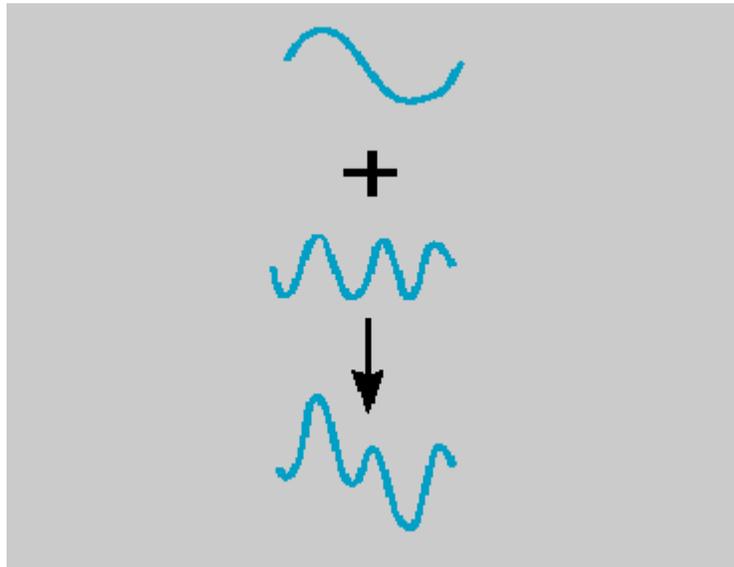
# CAPÍTULO I

## PERTURBACIONES EN LAS REDES DE ENERGÍA ELÉCTRICA PRODUCIDAS POR TRANSITORIOS

En este capítulo se tratara sobre el tema de las perturbaciones en las redes de energía eléctrica producidas por los transitorios, cuáles son las características y la formación de armónicos, así como los métodos de análisis para comprender su comportamiento.

### 1.1 Problemas Producidos en las Redes de Energía Eléctrica Producto de Transitorios.

Los armónicos repercuten en la *Calidad de la Energía Eléctrica*, sistema eléctrico da a simple vista una idea clara, pero su estudio se basa en parámetros fundamentales que determinan un suministro de energía y estos son: la tensión de alimentación (V) y la corriente (I).



*Figura 1.1 Descomposición de la onda.*  
*Fuente: Composición de energía reactiva y filtrada de armónicos baja y media tensión*

El análisis de la calidad de energía se ha profundizado los últimos años, por este motivo se han desarrollado métodos de medición y construcción de equipos para calidad de energía, perfeccionándolos con el tiempo.

### 1.1.1 Las Variaciones de la Frecuencia

Se producen por alteraciones de la frecuencia con una medida promedio de 10 segundos, son el principal problema de los motores eléctricos, tanto asíncronos como síncronos y de algunos aparatos electrodomésticos, etc., pues provocan un funcionamiento no adecuado.

La frecuencia se define como resultado de multiplicar el número de orden del armónico por la frecuencia fundamental (60 Hz), por ejemplo [21]

$$3^{\text{a}} \text{ armónica } 3 \times 60 \text{ Hz} = 180 \text{ Hz}$$

$$5^{\text{a}} \text{ armónica } 5 \times 60 \text{ Hz} = 300 \text{ Hz}$$

$$7^{\text{a}} \text{ armónica } 7 \times 60 \text{ Hz} = 420 \text{ Hz}$$

NOMBRE	1° (Fundamental)	3°	5°	7°	9°	11°	13°	15°	17°
FRECUENCIA (HZ)	60	180	300	420	540	660	780	900	1020
SECUENCIA	+	0	-	+	0	-	+	0	-

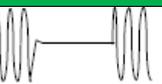
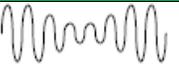
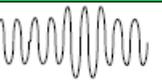
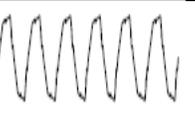
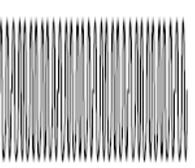
*Tabla 1.1 Armónicos Circundantes en la Red.*

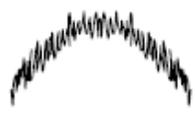
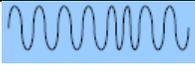
*Fuente: Los siete tipos de problemas en el suministro eléctrico*

Son muy poco comunes las variaciones de frecuencia en sistemas estables de la red eléctrica, especialmente en los sistemas interconectados. Cuando existe una infraestructura pobre de alimentación o poseen generadores, la variación en la frecuencia es común, sobre todo cuando está sobrecargado un generador. La tolerancia de equipos informáticos, hace que no se vean afectados por estas variaciones. Las afectaciones se ven en dispositivos sensible que dependan del ciclado de la alimentación en el tiempo o cualquier motor. Esta variación puede lograr más o menos velocidad, haciendo que provoque calor o un funcionamiento ineficaz con un consumo adicional de corriente.

### 1.1.2 Los Armónicos

Es una señal compleja cuya forma se distorsiona en frecuencia y es múltiplo entero de la frecuencia fundamental, el análisis fundamental sobre esta señal se lo hace con la transformada de Fourier.

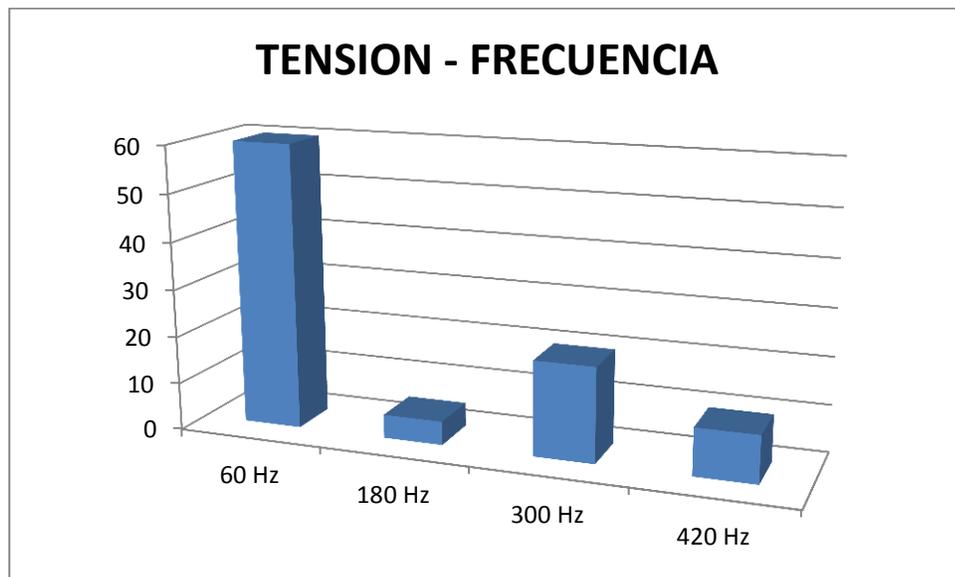
Categoría de la perturbación	Forma de la onda	Efectos	Posibles causas	Posibles Soluciones
<b>1. Transitorios</b>				
Impulsiva		Perdida de datos, posibles daños, paro del sistema	Rayos, ESD, impulsos de conexión, liberación de fallas de la red	TVSS, mantener humedad entre 35-50%
Oscilatoria		Perdida de datos, posibles daños.	Desconexión de cargas inductivas/capacitivas	TVSS, UPS, reactores/bobinas de choque, interruptor de cruce por cero
<b>2. Interrupciones</b>				
		Perdida de datos, posibles daños, cierre	Conmutación, fallas de la red, disparo de disyuntores, fallas de componentes	UPS
<b>3. Bajada de tensión/subtension</b>				
Bajada de tensión		Paro del sistema, perdida de datos, cierre	Cargas de arranque, fallas	Acondicionador de 4energía, UPS
Subtension		Paro del sistema, perdida de datos, cierre	Fallas de la red, cambios de carga	Acondicionador de 4energía, UPS
<b>4. Aumento de tensión/sobretensión</b>				
Aumento de tensión		Disparo por interferencia, danos al equipo/vida reducida	Cambios de carga, fallas de la red	Acondicionador de energía, UPS, transformadores de "control" ferresonante
Sobretensión		Danos al equipo/vida reducida	Cambios de carga, fallas de la red	Acondicionador de energía, UPS, transformadores de "control" ferresonante
<b>5. Distorsión de la forma de onda</b>				
Desplazamiento por CC		Transformadores calentados, corriente por falta de masa, disparo por interferencia	Rectificadores, fuentes de alimentación defectuosos	Encontrar el problema y reemplazar el equipo defectuoso
Armónicas		Transformadores, calentados, paro del sistema	Cargas electrónicas (cargas no lineales)	Reconfigurar la distribución, instalar transformadores de factor k, usar fuentes conmutativas con PFC
Interarmónicas		Parpadeo de la luz, calentamiento, interferencia de la comunicación	Cenales de control, equipos, cicloconvertores, convertidores de frecuencia, motores de inducción, dispositivos de generación de arco	Acondicionador de energía, filtros, UPS

Corte Intermitente		Paro del sistema, pérdida de datos	Mecanismos de velocidad variable, soldadores con arco, atenuadores de luz	Reconfigurar la distribución, trasladar las cargas sensibles, instalar filtros, UPS
Ruido		Detención del sistema, pérdida de datos	Transmisores (radio), equipos defectuosos, masa ineficiente, proximidad a fuente EMI/RFI	Quitar transmisores, reconfigurar puesta a tierra, alejarse de la fuente EMI/RFI, aumentar el blindaje, filtros, transformador de aislamiento
6. Fluctuaciones de tensión		Paro del sistema, parpadeo de luces	Funcionamiento intermitente de los equipos de carga	Reconfigurar la distribución, trasladar las cargas sensibles, acondicionador de energía, UPS
7. Variaciones de la frecuencia eléctrica		Falla del equipo sincrónico. Sin efecto sobre los equipos informáticos	Generadores de reserva regulados en forma ineficiente	Actualizar el regulador del generador

*Tabla 1.2 Resumen de las Perturbaciones con Soluciones  
Fuente: Los siete tipos de problemas en el suministro eléctrico*

### 1.1.3 El Espectro Armónico

Es la descomposición de una señal en sus armónicos en el dominio de la frecuencia, el siguiente diagrama de barras representa el porcentaje de cada una de las señales armónicas, cuya suma da la señal total analizada.

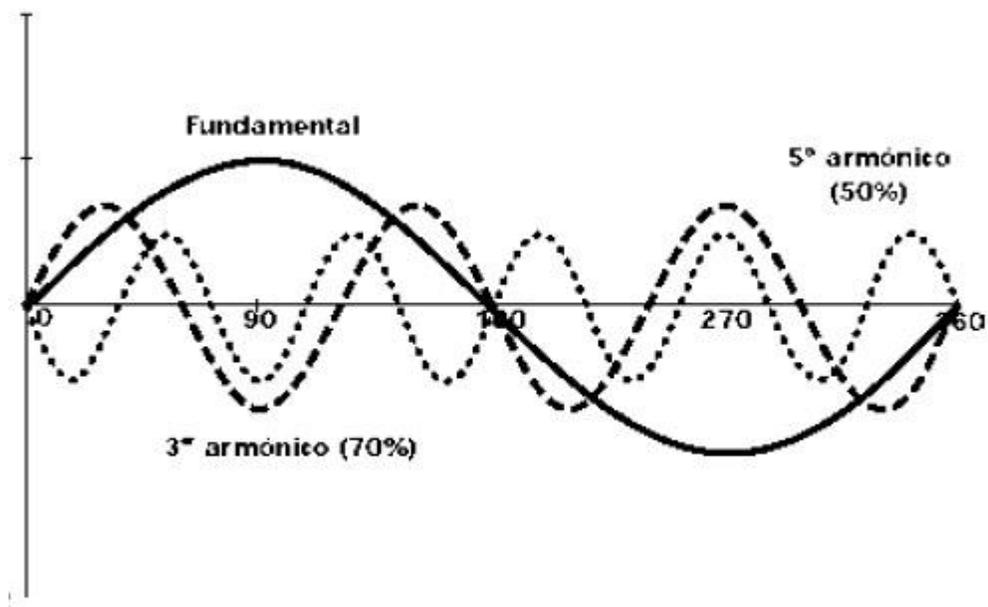


*Figura 1.2 Tensión Frecuencia de una Onda.  
Fuente: Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial*

### 1.1.4 La 3ª y La 5ª armónica

En la figura siguiente se representa la onda fundamental que tiene una amplitud igual a tres veces la 3ª armónica y las dos alcanzan el valor pico en el mismo instante.

La 5ª armónica, difiere de la 3ª armónica, no es múltiplo eléctrico de la fundamental por lo que se desplaza por las tres fases R, S, T, es la primera onda que tiene efectos en los condensadores y al sistema trifásico, igual que la 7ª, 11ª etc.[22]



*Figura 1.3 Tercera y Quinta Armónica.  
Fuente: Los efectos de los armónicos y sus soluciones*

### 1.1.5 Compensación de la energía reactiva en redes distorsionadas por armónicos

En un circuito complejo en el que se producen distorsión por armónicos en las redes, se suelen colocar diferentes tipos de cargas (lineales y no lineales) así como una batería de condensadores para la compensación del factor de potencia de la instalación.

Una posible clasificación de los transitorios se lo hace atendiendo a su comportamiento frente a una señal ideal. Así, este tipo de perturbaciones se pueden presentar en conductores, semiconductores, incluso en los aislantes.

Para caracterizar a los transitorios, se define como la deformación de la onda fundamental en el dominio de la frecuencia, debiéndose su aparición a fenómenos

capacitivos e inductivos.

La corriente continua puede tener alteraciones transitorias la cual se crea en un campo eléctrico que no cambia de sentido, pero si en la intensidad. La corriente alterna se crea por un campo que varía en intensidad y sentido.

Es necesario aclarar que los transitorios son un problema que no se nota pero tienen consecuencia en los aparatos que consumen energía eléctrica, es la razón principal por la que se extiende el estudio en este sentido.

En conductores diferentes y para una misma intensidad del campo aplicado, la velocidad media de desplazamiento de la tensión depende de la naturaleza del conductor, este fenómeno puede crear perturbaciones muy poco perceptibles [23]

Cualquier anomalía en el sistema eléctrico, observada por el usuario final, este usa un lenguaje que no es el apropiado, desde subidas o bajadas de tensión, hasta usando expresiones como se fue la luz.

Al referirse a los límites eléctricos que permitan funcionar adecuadamente a un equipo durante su vida útil normalmente se lo conoce como “*Power Quality*”, los límites se relacionan con las desviaciones de forma ideal de la onda, la corriente y el voltaje durante un tiempo dado.

### **1.1.6 Variaciones de Tensión de corta duración VTCD**

Las condiciones de falla dan origen a las VTCD, Las grandes cargas energizadas requieren conexiones inestables o grandes corrientes de arranque en los cables de potencia. Dependiendo de las condiciones del sistema y de la localización de la falla esto puede ocasionar:

- Interrupción completa de tensión
- Caídas de tensión (Sags)
- Saltos de tensión (Swells).

La reconfiguración de cargas implica corregir los desbalances de tensión o tratar de tener un cambio en la red de alimentación eléctrica entrante esto si el desequilibrio no es causado por cargas internas [24]

### **1.1.7 Salto de Tensión (Swell)**

El incremento del valor eficaz de la tensión es la característica principal del denominado salto de tensión y tiene valores promedio que van de 1,1 a 1,8 [p.u] con un tiempo de duración de 0,5 a 1 minuto.

Cuando este salto es continuo en el sistema se concluye diversos resultados, como el no seguro y adecuado funcionamiento de los equipos eléctricos disminuyendo el tiempo de vida útil, afectando el bienestar de las personas.

### **1.1.8 La Calidad de Energía**

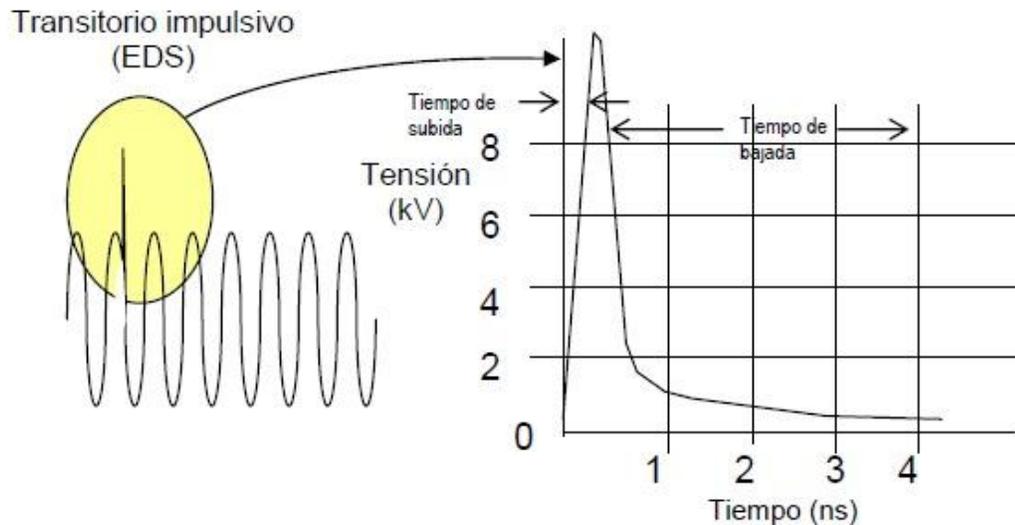
La (Regulación No. CONELEC-004/01) referente la Calidad del Servicio Eléctrico del Ecuador, establece tres aspectos.

- Calidad del Servicio Técnico.
- Calidad del Servicio Comercial.
- Calidad del Producto.

## **1.2 Análisis de Transitorios Impulsivos**

Los transitorios impulsivos son eventos repentinos de cresta alta que elevan la tensión y/o los niveles de corriente en dirección positiva o negativa. Estos tipos de eventos pueden clasificarse más detenidamente por la velocidad a la que ocurren (rápida, media y lenta). Los transitorios impulsivos pueden ser eventos muy rápidos (5 nanosegundos [ns] de tiempo de ascenso desde estado estable hasta la cresta del impulso) de una duración breve e (menos de 50 ns).

Un ejemplo de un transitorio impulsivo positivo causado por un evento de descarga electrostática se ilustra en la Figura 1.4

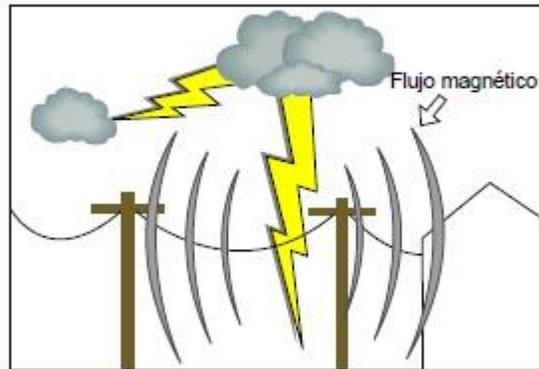


*Figura 1.4 Transitorio Impulsivo Positivo*  
*Fuente: Los siete tipos de problemas en el suministro eléctrico*

El transitorio impulsivo es a lo que se refiere la mayoría de la gente cuando dice que ha ocurrido una sobretensión prolongada o transitoria. Se han utilizado muchos términos diferentes, como caída de tensión, imperfección técnica, sobretensión breve o prolongada, para describir transitorios impulsivos [25]

Las causas de los transitorios impulsivos incluyen rayos, puesta a tierra deficiente, encendido de cargas inductivas, liberación de fallas de la red eléctrica y ESD (descarga electrostática). Los resultados pueden ir desde la pérdida (o daño) de datos, hasta el daño físico de los equipos. De todas estas causas, el rayo es probablemente la más perjudicial.

El problema de los rayos se reconoce fácilmente al presenciar una tormenta eléctrica. La cantidad de energía que se necesita para iluminar el cielo nocturno sin duda puede destruir equipos sensibles. Más aun, no es necesario un impacto directo de un rayo para causar daños. Los campos electromagnéticos creados por los rayos, pueden causar gran parte de los daños potenciales al inducir corriente hacia las estructuras conductivas cercana.



*Figura 1.5 Campo magnético creado por un Rayo*  
*Fuente: Los siete tipos de problemas en el suministro eléctrico*

Dos de los métodos de protección más viables contra los transitorios impulsivos consisten en la eliminación de la ESD potencial, y el uso de dispositivos de supresión de sobretensiones (popularmente conocidos como supresores de sobretensión transitoria: TVSS, o dispositivo de protección contra sobretensiones: SPD).

Mientras que una ESD puede generar un arco en su dedo sin causarle daño, más allá de provocarle una leve sorpresa, es más que suficiente para quemar toda la tarjeta madre de una computadora y hacer que no funcione más. En los centros de datos, instalaciones de fabricación de tarjetas de circuito impreso o ambientes similares donde las tarjetas de circuito impreso están expuestas a la manipulación humana, es importante disipar el potencial de que ocurra una ESD. Por ejemplo, casi cualquier entorno apropiado de un centro de datos requiere acondicionar el aire en el ambiente. Acondicionar el aire no es simplemente enfriarlo para ayudar a eliminar el calor de los equipos del dentro de datos, sino también regular la cantidad de humedad en el aire. Mantener la humedad en el aire entre un 40-55% disminuirá el potencial de que ocurra una ESD. Es necesario utilizar accesorios y equipamiento para mantener el cuerpo humano con descarga a tierra. Estos equipamientos incluyen muñequeras, tapetes y escritorios antiestáticos y calzado antiestático. La mayoría de estos accesorios y equipamientos están conectados a un cable conectado a la estructura del establecimiento, lo que protege al personal contra choques

eléctricos y disipa una posible ESD a tierra. [3]

Los SPD se utilizan desde hace muchos años. Estos dispositivos aún se utilizan en la actualidad en los sistemas de la red eléctrica además de los dispositivos para grandes instalaciones y centros de datos– como también para uso diario en negocios pequeños y hogares; su rendimiento mejora con los adelantos en la tecnología de varistores de óxido metálico (MOV). Los MOV permiten una supresión consistente de los transitorios impulsivos, los aumentos de tensión y otras condiciones de alta tensión, y pueden combinarse con dispositivos de disparo térmico como disyuntores, termistores, y otros componentes como tubos de gas y tiristores. En algunos casos los circuitos de los SPD se incorporan en los dispositivos eléctricos, como fuentes de alimentación de computadoras con capacidades de supresión incorporadas. En forma más común se utilizan en dispositivos independientes de supresión de sobretensión, o se incluyen un UPS para brindar supresión de sobretensión y alimentación a batería de emergencia en caso de que ocurra una interrupción (o cuando los niveles de suministro se encuentran fuera de los límites de las condiciones de suministro nominales o seguras) [3]

La conexión en cascada de los dispositivos SPD y UPS es el método más efectivo de protección contra las perturbaciones energéticas para los equipos electrónicos. Utilizando esta técnica, un dispositivo SPD se coloca en la entrada de servicio y se dimensiona para disipar gran parte de la energía proveniente de cualquier transitorio entrante. Los posteriores dispositivos en el subpanel eléctrico y en el equipo sensible en sí mismo bloquean la tensión a un nivel que no daña ni perturba al equipo. Debe prestarse especial atención al dimensionamiento tanto del valor nominal de la tensión como del valor nominal de disipación de energía de estos dispositivos, y a la coordinación de los mismos para un funcionamiento eficaz. Asimismo debe prestarse atención a cuán efectivo es el dispositivo de supresión de sobretensión en el caso de que el MOV alcance el punto de falla. Mientras que un MOV es consistente en sus capacidades de supresión de sobretensión a lo largo del tiempo, igual se degrada con el uso, o puede fallar si se excede su tasa de supresión efectiva. Es importante que si el MOV alcanza el punto en que ya no resulta útil, los SPD tengan la capacidad de cortar el circuito y evitar que cualquier anomalía perjudicial del

suministro llegue a los equipos que protege. [1]

La tensión eléctrica se define por parámetros como la frecuencia, la amplitud, la forma de onda y en caso de sistemas trifásicos por la simetría de las tensiones. Las variaciones en el tiempo a las que están sujetas estas características durante el funcionamiento del sistema deben mantenerse dentro de márgenes específicos para asegurar el buen funcionamiento de la red como de los equipos conectados, las denominadas perturbaciones transitorias en tiempos reales o impulsivos son variaciones que pueden ocasionar problemas en el correcto funcionamiento del sistema [26]

Para definir características se tiene estándares internacionales como IEEE Std. 1159-2009 e IEC61000-4-30 y para las perturbaciones en la calidad de la energía eléctrica tienen distintos métodos de medida. Cabe destacar distintos tipos de perturbaciones y la gran cantidad de herramientas para procesar señales necesarias para detectar las perturbaciones.

Para referenciar una señal de tipo real es necesario estudiar y analizar la metodología de medida, evaluación y clasificación de los parámetros de la calidad de la energía eléctrica. Proceder con un Diseño y el desarrollo de nuevas técnicas de medida, además de clasificar las perturbaciones de baja frecuencia que se pueden tener en el suministro de energía eléctrica, da una visión completa de los problemas que producen los transitorios en las redes eléctricas.

El objetivo principal es definir las características de las perturbaciones no estacionarias en la tensión de suministro eléctrico, según estándares de calidad del suministro de energía de organizaciones internacionales se proponen métodos de detección y medida, así como la literatura científica propone otros métodos de procesado de señales.

Poco a poco se han establecido regulaciones de calidad de servicio eléctrico bien estructuradas. El ente regulador estatal prevé el análisis sobre los transitorios en las redes eléctricas, las regulaciones establecen que se debe monitorear y corregir los problemas de las perturbaciones para el bien de los usuarios.

La Calidad de la energía que se suministra, debe basarse en los parámetros eléctricos, La calidad del servicio regula las interrupciones de servicio estableciendo límites para su frecuencia y duración [27]

Teniendo en cuenta que las cocinas de inducción generan transitorios impulsivos, se ha visto la posibilidad de desarrollar y evaluar nuevas herramientas que permitan caracterizar la respuesta de los sistemas eléctricos de potencia considerando todo tipo de perturbación en tiempo real.

Es necesario desarrollar instrumentos basados en información de las redes eléctricas para representar las ondas distorsionadas y aplicar las metodologías de respuesta para los casos más frecuentes y comunes.

Una aplicación para procesar datos sobre transitorios en tiempo real, es las cocinas a inducción generan perturbaciones impulsivas que pueden tener un efecto de retorno hacia las redes de distribución.

Para determinar con certeza que se trata de este tipo de transitorio, el pico que alcanza la onda es grande, por lo tanto las protecciones que deben ocuparse de evitar esta perturbación perjudicial del suministro y que no llegue a los equipos que protege. A este tema se lo analiza mediante la protección contra transitorios en la línea de datos.

### **1.2.1 Interrupciones**

Precisamente, el corte de electricidad es una perturbación severa, pues en caso de negocios puede incurrir en grandes gastos. Una interrupción, ya sea instantánea, puede causar trastornos, danos y tiempo de inactividad, en todo tipo de usuario [28]

Los dispositivos automáticos de protección que no pueden devolver el suministro a causa de una falla, Comúnmente se denomina “Interrupción Sostenida”, haciendo necesaria la intervención manual, por lo general sucede en la red eléctrica comercial. El término “corte”

se refiere a un componente que ha dejado de funcionar en la red.

Para descubrir fenómenos para reportes de confiabilidad los operadores usan términos de salida o interrupción. Sin embargo, el usuario final piensa que una salida es una interrupción que es parte de un proceso causando confusión. La Norma IEEE 1008 define a la salida, no como un fenómeno específico, sino a la falla de un componente y al estado del mismo en un sistema. Entonces, no tiene relación de confiabilidad en la continuidad de servicio usar el término salida en el Contexto de monitoreo de Calidad de la Energía Eléctrica. Así, se define interrupción a la ausencia de tensión por largos periodos.

Las variaciones de larga duración pueden ser:

- Sobretensiones
- Subtensiones
- Interrupciones Sostenidas

### **1.2.2 Subtensión**

La baja de tensión crea problemas de corta duración. El término baja de tensión ha sido reemplazado por subtension, también se refiere a la entrega corta de suministro eléctrico comercial durante una alta demanda, el efecto de esta perturbación puede crear sobrecalentamiento en motores y durante un tiempo prolongado puede provocar una falta de carga en elementos no lineales. Los elementos con capacidad de regular tensión mediante un inversor antes de utilizar baterías, evita reemplazar frecuentemente a las mismas, si una subtension es constante puede ocasionar problemas graves a los equipos.

Se define a la subtension como la reducción del valor eficaz de la tensión de 0.8 a 0.9 [p.u.] en el tiempo superior a 1 minuto. Las cargas y las salidas de los bancos de capacitores o las sobrecargas en los alimentadores pueden producir subtensiones, así los equipos actúan y retoman los límites normales de la tensión [29]

### **1.2.3 Sobretensión**

Los problemas de larga duración que crean aumentos de tensión son las denominadas sobretensiones, es muy común tenerlos en los taps del transformador cuando están mal

configurados y reducen la carga por el uso de energía fuera de temporada y aun se suministra energía para la estación de alto uso. La sobretensión crea un uso de alta corriente disparándose disyuntores aguas abajo, incluyendo el sobrecalentamiento y sobrecarga de equipos.

La medición que se obtiene de una perturbación instantánea se produce cuando la entrada al sistema está en el umbral de perceptibilidad. Con la aparición de varios transitorios instantáneos, se presenta una sensación visual.

Las descargas eléctricas son la principal causa de los transitorios impulsivos. Debido a que tienen altas componentes eléctricas, los elementos resistivos de las redes amortiguan estos transitorios. Los transitorios impulsivos pueden tener diferentes características de un lugar a otro y pueden ser la causa que antecede al transitorio oscilatorio produciendo resonancias en el sistema.

El mal funcionamiento o avería de los equipos son los efectos que pueden tener los transitorios impulsivos, especialmente equipos sensibles a estas perturbaciones de tecnologías de la información.

### **1.3 Análisis de Transitorios Oscilatorios**

La calidad de la energía eléctrica en el tiempo actual es el principal insumo sobre todo para el mundo industrial, sin una energía que preste confiabilidad, no se hablaría de empresas estables y sería probable el advenimiento de una crisis. Por esta razón es indispensable saber administrar este recurso energético [30]

#### **1.3.1 Transitorio Oscilatorio**

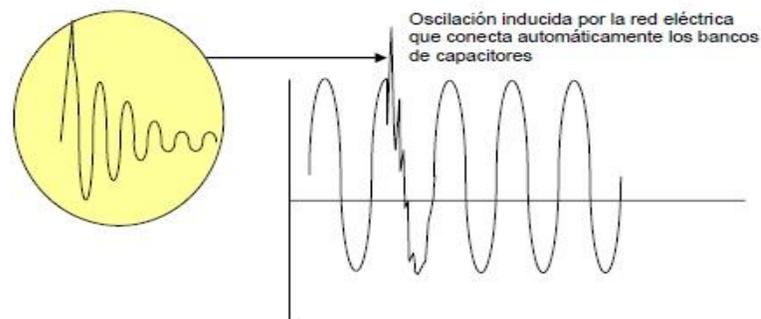
Un transitorio oscilatorio es un cambio repentino en la condición de estado estable de la tensión o la corriente de una señal, o de ambas, tanto en los límites positivo como negativo de la señal, que oscila a la frecuencia natural del sistema. En términos simples, el transitorio hace que la señal de suministro produzca un aumento de tensión y luego una bajada de tensión en forma alternada y muy rápida. Los transitorios oscilatorios suelen bajar a cero dentro de un ciclo (oscilación descendente).

Estos transitorios ocurren cuando uno conmuta una carga inductiva o capacitiva, como un motor o un banco de capacitores. El resultado es un transitorio oscilatorio porque la carga resiste el cambio. Esto es similar a lo que ocurre cuando uno cierra de repente un grifo que

flúa con rapidez y oye un golpeteo en la cañería. El agua que fluye resiste el cambio, y ocurre el equivalente en fluido de un transitorio oscilatorio.

Por ejemplo, al apagar un motor en rotación, se comporta brevemente como un generador a medida que pierde energía, por lo que produce electricidad y la envía a través de la distribución eléctrica. Un sistema de distribución eléctrica grande puede actuar como un oscilador cuando se conecta o desconecta el suministro. Dado que todos los circuitos poseen alguna inductancia inherente y capacitancia distribuida que brevemente se energiza en forma descendente.

Cuando los transitorios oscilatorios aparecen en un circuito energizado, generalmente a consecuencia de operaciones de conexión de la red eléctrica (especialmente cuando los bancos de capacitores se conectan automáticamente al sistema), pueden ser muy perturbadores para los equipos electrónicos. La Figura 1.6 ilustra un transitorio oscilatorio típico de baja frecuencia atribuible a la energización de los bancos de capacitores.



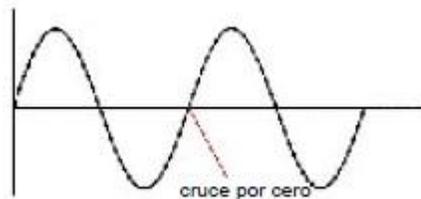
*Figura 1.6 Transitorio Oscilatorio*  
*Fuente: Los siete tipos de problemas en el suministro eléctrico*

El problema más reconocido asociado con la conexión de capacitores y su transitorio oscilatorio es el disparo de controles de velocidad automáticos (ASD). El transitorio relativamente lento provoca una elevación en la tensión de enlace de CC (la tensión que controla la activación del ASD) que hace que el mecanismo se dispare fuera de línea con una indicación de sobretensión [31]

Una solución común para el disparo de los capacitores es la instalación de reactores o bobinas de choque de línea que amortiguan el transitorio oscilatorio a un nivel manejable.

Estos reactores pueden instalarse delante del mecanismo o sobre el enlace de CC y están disponibles como unas características estándar o como una opción en la mayoría de los ASD.

Otra solución incipiente para los problemas de transitorios en la conexión de capacitores es el interruptor de cruce por cero. Cuando el arco de una onda senoidal desciende y alcanza el nivel cero (antes de transformarse en negativa), esto se conoce como cruce por cero, como se ilustra en la Figura 1.7. Un transitorio causado por la conexión de capacitores tendrá una magnitud mayor cuanto más lejos ocurra la conexión de la sincronización de cruce por cero de la onda senoidal. Un Interruptor de cruce por cero soluciona este problema al monitorear la onda senoidal para asegurar de que la conexión de los capacitores ocurra lo más cerca posible a la sincronización de cruce por cero de la onda senoidal.



*Figura 1.7 Cruce por Cero*

*Fuente: Los siete tipos de problemas en el suministro eléctrico*

Obviamente, los sistemas UPS y MOV son también muy eficaces para reducir los daños que puedan causar los transitorios oscilatorios, especialmente entre los equipos comunes de procesamiento de datos, como las computadoras en red. Sin embargo, los dispositivos MOV y UPS a veces no pueden evitar las ocurrencias de transitorios oscilatorios entre sistemas que sí puede evitar en Interruptor de cruce por cero y /o dispositivo tipo bobina de choque en equipos especializados, como la maquinaria de plantas de fabricación y sus sistemas de control. [1]

Esta es una perturbación de alta frecuencia que deforma la señal, La duración es mínima inferior a un medio ciclo que puede aumentar el pico o disminuirlo y decae oscilatoriamente.

El fenómeno antes descrito se denomina *movimiento ondulatorio*. Entonces, la forma de onda se representa matemáticamente, que se desplaza desde el principio de la línea desde

un tiempo inicial ( $t=0$ ) hasta un tiempo final ( $x=1$ ), existiendo un instante en donde la forma se distorsiona [32]

Un problema en la calidad de la energía eléctrica se da cuando ocurre cualquier desviación de la tensión, la corriente o la frecuencia que provoque la mala operación de los equipos y afecta en la economía o bienestar de los usuarios; o con alguna interrupción del flujo de energía eléctrica.

Los transitorios Oscilatorios son característicos de los equipos de alta frecuencia como motores eléctricos, bombas, etc. Sin número de empresas han logrado minimizar sus efectos con la automatización de sus procesos mediante dispositivos electrónicos y de computación por ejemplo los microcontroladores, computadores, PLC, etc.

Las características no lineales tensión- corriente de los equipos son los causantes de los transitorios con distorsión armónica, especialmente en los sistemas de potencia, su denominación ocurre dependiendo del tipo de armónico que tenga.

### **1.3.2 Características de las Ondas de Tensión y Corriente**

El máximo valor que toma la amplitud de una onda sinusoidal recibe el nombre de “pico o cresta”, el valor máximo negativo, se lo denomina “vientre o valle” y el punto donde la onda se anula al pasar de positivo a negativo, o viceversa, se conoce como “nodo” o “cero” o “punto de equilibrio”.

### **1.3.3 Distorsión de la Señal**

La desviación del estado estacionario de la onda sinusoidal es una distorsión de forma de onda, el contenido espectral de la onda es la característica especial de este tipo de distorsión entre los cuales podemos notar

- Interarmónicos
- Ruido
- DC Adicional (DC offset)
- Armónicos

### **1.3.4 Normatividad para el Manejo de Armónicos**

La Norma IEEE 519 “Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”, sugiere los límites de contaminación armónica permisible de tensión y de corriente en los siguientes parámetros:

- Los límites armónicos individuales
- Límites de distorsión armónica total (THD por sus siglas en inglés).

Otras normas aplicables al manejo de armónicos son las siguientes:

- IEC 61000-3-2, 3-12 Normatividad en equipos en baja tensión
- IEC 61000-3-6: Normatividad para sistemas en media tensión, alta tensión y extra alta tensión.
- IEC 61000-4-7 y 4-30: normatividad de medición de armónicos.

La IEEE 519 e IEC 61000-3-6 tienen el mismo objetivo, pero utilizan diferentes enfoques conceptuales, entre los cuales destacan:

- IEEE no tiene normatividad en los equipos.
- La filosofía fundamental de la IEEE es la “responsabilidad compartida”, es decir limitar a los usuarios un nivel de transmisión de corriente equitativa, por lo que los usuarios no pueden crear condiciones de resonancia indeseables, de igual manera las compañías de servicios deben controlar las resonancias del sistema para limitar la distorsión de voltaje.
- La filosofía fundamental de la IEC es “mantener la calidad de la tensión”, es decir que los usuarios no pueden inyectar corrientes armónicas que conducen a la producción excesiva de armónicos de tensión de igual manera las características y lineamientos del suministrador son definidos por los requisitos del sistema y no pueden ser manipulados para permitir corrientes armónicas de usuarios más grandes.

La IEEE 519 considera que el “punto de acoplamiento común” (PCC por sus siglas en inglés) como el punto de interfaz de usuario-suministrador tomando en cuenta tanto limitaciones de corriente armónica para los usuarios finales y límites de tensión armónicas aplicados en toda la red de servicios públicos tomando en cuenta el PCC para asegurar la

calidad de la tensión de alimentación. [2]

Se sugieren límites de tensión armónica para armónicos individuales así como distorsión armónica total. Diferentes límites se aplican a diferentes niveles de voltaje como puede verse en la tabla 1.3

<b>Armónicos de tensión</b>		
Tensión en PCC	Límite individual	THD
<69 kV	3.0	5.0
69-161 kV	1.5	2.5
>161 kV	1.0	1.5

*Tabla 1.3 Armónicos de Tensión*

*Fuente: Generación de Armónicos y sus efectos en las Redes Eléctricas*

Los límites de corriente se proporcionan para los armónicos individuales y THD (TDD) para los sistemas de distribución general. Todos los valores están en porcentaje y en base a un intervalo de demanda de 15 o 30 minutos aquí se emplea como parámetro la relación de corto circuito (SCR por sus siglas en inglés) que está dada por la relación entre la corriente de corto circuito (ISC) y la corriente de carga (ISL), ( $SCR=ISC/ISL$ ).

<b>Límites de corrientes armónicas: sistemas de 120-69000 V</b>						
SCR	$h < 11$	$11 < h < 17$	$17 < h < 23$	$23 < h < 35$	$35 < h$	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

*Tabla 1.4 Armónicos de Corriente en sistema de 120-69000V*

*Fuente: Generación de Armónicos y sus efectos en las Redes Eléctricas*

Para niveles de tensión más altos, se permiten porcentajes más bajos de la contaminación armónica.

Límites de corrientes armónicas: sistemas de 69-161 kV						
SCR	$h < 11$	$11 < h < 17$	$17 < h < 23$	$23 < h < 35$	$35 < h$	TDD
<20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.0	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

*Tabla 1.5 Armónicos de Corriente en sistema de 69-161Kv  
Fuente: Generación de Armónicos y sus efectos en las Redes Eléctricas*

Los límites para las cargas conectadas directamente al sistema de transmisión son las más estrictas:

Límites de corrientes armónicas: sistemas mayores de 161 kV						
SCR	$h < 11$	$11 < h < 17$	$17 < h < 23$	$23 < h < 35$	$35 < h$	TDD
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
$\geq 50$	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

*Tabla 1.6 Armónicos de Corriente en sistemas mayores de 161Kv  
Fuente: Generación de Armónicos y sus efectos en las Redes Eléctricas*

Según la norma IEEE 1159, Monitoring Electric Power Quality y la IEC 61000-3-4. Describen los diferentes fenómenos, las técnicas de instrumentos de medición y la interpretación de los resultados de un problema ocasionado por los transitorios en las redes eléctricas.

La normativa establecida en la IEC, considera como se debe procesar los datos que se obtienen desde una perturbación en las redes eléctricas y en la norma IEEE se toman límites para las lecturas de los datos

### **1.3.5 Cargas Lineales**

La corriente es pura en un circuito resistivo, al contrario la corriente de un circuito inductivo es atrasada y lo que sucede en sentido viceversa, con una corriente de un circuito capacitivo es adelantada

### **1.3.6 Cargas No Lineales**

Se demanda una corriente no senoidal para cargas no lineales, el paso por la impedancia del sistema provoca una caída de voltaje no senoidal, esto distorsiona el voltaje en la carga.

El aumento de tensión o sobretensión, es regulado por equipos de acondicionamiento. Sin embargo, si hay una sobretensión constante, se debe corregir el suministro desde la red. El síntoma de los aumentos de tensión más comunes es el calor excesivo. Los equipos que funcionan a condiciones nominales, y de repente producen calor se debe a un aumento de tensión, es común encontrarse con este tipo de casos y es un tema que del que se puede obtener mejor resultado.

### **1.3.7 Estándar IEEE**

Este estándar determina novedades significativas. Este estándar se divide en: El 1159.1 la definición de los requisitos del sistema de medida para caracterizar perturbaciones electromagnéticas. El 1159.2 define la forma de convertir valores de tensión y corriente y el 1159.3 define formatos para intercambio de información con la calidad de la energía.

Las perturbaciones en una red de energía, pueden ser producto del diseño, pues las principales son:

- Caídas de tensión
- Interrupciones
- Armónicos Oscilatorios
- Desbalance
- Ruido
- Picos
- Sobre tensión.

Para entender las posibles soluciones a este tipo de transitorios en las redes eléctricas, es necesario hacerlo en las redes de transmisión y subtransmisión, pues soluciones desde el lado de distribución son más costosas y difíciles de implementar.

### **1.3.8 Interarmónica**

La existencia de equipos que actúan como convertidores de frecuencia estática generan una distorsión interarmónica por la presencia de una señal sobrepuesta en la señal de tensión, entre los equipos que son propensos a crear este fenómeno pueden ser los motores

a inducción y sobre todo los dispositivos de generación de arco. Los problemas más importantes que recaen en la alimentación interarmónica son los ciclo convertidores.

Las luces incandescentes, el parpadeo en pantallas de visión, la interferencia en las comunicaciones o el posible calentamiento, son los efectos más notables de las interarmónicas.

Controlar el ruido es una tarea que tiene muchos enfoques, y para lograr un resultado algunas veces es necesario utilizar algunas técnicas como por ejemplo instalar equipos de aislamiento blindado con puesta a tierra o instalar filtros de ruido, etc.

Las variaciones de corriente pueden causar fluctuaciones de tensión en cualquier carga. En los sistemas de transmisión y distribución este fenómeno es producido por los hornos de arco. Las luces incandescentes que parpadean son un síntoma claro de este problema. Algunos métodos para resolver este tipo de armónico es instalar acondicionadores de línea de alimentación o dispositivos UPS, también se lo puede resolver eliminando carga.

## **CAPÍTULO II**

### **ANÁLISIS DE SEÑALES MEDIANTE LA TRANSFORMADA DE WAVELET**

En este capítulo se tratará sobre el tema de la Transformada Wavelet, usando las técnicas comunes como ventanas con regiones de tamaño variable, así como los medios que permiten el uso de intervalos grandes de tiempo para aquellos segmentos en los que se requiere mayor precisión en baja frecuencia. También se determinara las características y la formación de señales armónicas, así como los métodos de análisis para comprender su comportamiento.

#### **2.1 Análisis Espectral de Señales**

El termino Espectro determina un pico infinitesimalmente angosto, el termino señal es una senoide discreta infinita. Las características de estas señales son:

- Picos altos
- Derramamiento reducido
- Resolución reducida

Como propiedad indispensable en el análisis espectral de señales se establece que el desplazamiento de una función en el dominio del tiempo, la magnitud en el espectro no se altera. Se puede decir que un desplazamiento en el tiempo equivale a una desviación de fase en el dominio de la frecuencia.

##### **2.1.1 Dominio de la Frecuencia**

Puesto que es un proceso casual el tener una multitud de funciones casuales, se debe tener en cuenta que una característica espectral diferente es correspondiente a cada función de diferente forma.

La obtención de muchos resultados importantes es por la aplicación del teorema de al convolución. Existen dos tipos de convolución: uno en el dominio de la frecuencia y otro en el dominio del tiempo.

En una señal que es arbitraria la suma ponderada de impulsos da la respuesta definitiva de su comportamiento, así se destaca que la respuesta de un sistema lineal a cualquier secuencia de entrada, es una señal que tiene impulsos unitarios que sumados se obtienen la señal total.

La localización en el tiempo y la frecuencia, tiene la seguridad de utilizar una Wavelet para frecuencia y en tiempo, así se puede tener una mejor resolución del análisis de las ondas originales.

### **2.1.2 Función densidad espectral de Energía**

La función densidad espectral de energía se calcula de la energía media total, en el dominio del tiempo es numéricamente igual al cálculo de la energía media total en el dominio de la frecuencia.

La función de densidad de energía no tiene unidades, es el análisis bajo la curva de la señal, obteniendo el resultado de la energía media total. El cálculo de esta función es correspondiente con la transformada conjugada de Fourier.

Cuando la función gira y se desplaza sobre el eje del tiempo se considera una función girada, si esta función se desplaza multiplicándose se entiende que se hizo la función por el tiempo.

Con la determinada frecuencia de muestreo implica que la transformada de Fourier de una función vale cero, la información de la función se da en muestras uniformes a intervalos menores de  $\frac{1}{2}$  de la frecuencia de muestreo.

Con los dibujos que se deducen de los diagramas de bloques se obtiene datos que sirven para los resultados numéricos correspondientes, y concluir con un análisis espectral de las señales que se obtuvieron inicialmente.

El retardo del tiempo o el parámetro de desplazamiento se relacionan con la transformada Wavelet. Indicando la secuencia de dirección de la onda original se denota la frecuencia con la que se debe trabajar.

### **2.1.3 Comparación de la Transformada de Fourier y Transformada Wavelet**

En esta sección se discuten algunas de las similitudes y diferencias entre la transformada de Fourier y la transformada wavelet.

Tanto la transformada de Fourier y transformada wavelet vienen dados por las ecuaciones integrales en la forma de una correlación. En la transformada de Fourier la correlación con dilataciones de la función de  $e^{-it}$ . En la transformada wavelet la correlación es con dilataciones y traducciones del análisis wavelet, que puede ser cualquier wavelet. [5]

## 2.2 Transformada de Wavelet

El principio de incertidumbre de Heisenberg dice del problema de la resolución tiempo-frecuencia y está en cualquiera que sea la forma de resolver mediante una transformada, sin embargo, el análisis multiresolución se emplea para analizar cualquier señal. Así cualquier señal es identificada para diferentes frecuencias con diferentes resoluciones. Cada componente espectral, por lo tanto, esta transformada no es idéntica a la de Fourier. La transformada Wavelet tiene esta idea básica para transitorios que encontramos en la red de energía.

Un punto a destacar es que las ondas de señales eléctricas no son fáciles de descifrar. Para muchos problemas, las wavelets son eficaces, pero hay un montón de ejemplos en los que los métodos existentes realizan igual de bien o mejor.

En muchas situaciones, las ondas Wavelet a menudo ofrecen una especie de seguro, que a veces funcionan mejor que algunos métodos en diferentes clases de problemas, pero por lo general funcionan tan bien en todas las clases. [5]

Para las wavelets de Haar, que por sí mismas no se solapan, sólo una wavelet según la escala de solapa con una discontinuidad (u otra característica). Esta propiedad está en contraste con, por ejemplo, la base de Fourier consiste en funciones de seno y coseno en frecuencias diferentes: cada base de seno / coseno interactuarán con una discontinuidad no importa dónde se encuentra, por lo tanto, influir en cada coeficiente de Fourier. Contiene muchos bordes que pueden ser considerados como discontinuidades, es decir, transiciones bruscas donde el nivel de gris de la imagen cambia rápidamente. Una imagen es una de dos dimensiones (2D) de objetos, y los coeficientes de onda aquí son ellos mismos 2D a diferentes. Escalas (esencialmente el  $k$  encima cambia de ser 1D a 2D).

La resolución en tiempo mejora con la transformada Wavelet de alta frecuencia, la resolución en el dominio de la frecuencia mejora con la transformada Wavelet de baja frecuencia. Las componentes de frecuencia se encuentran mejor en el tiempo antes que en una de baja frecuencia.

Básicamente, filtrar una señal en el dominio del tiempo mediante filtros pasa bajo y pasa alto es la función de la transformada Wavelet eliminando componentes de alta y baja frecuencia de la señal. Por ejemplo, si se tiene una señal con frecuencias de 1500 Hz, la señal es dividida por un filtro pasa alto y un pasa bajo: una parte corresponde a frecuencias

entre 0 y 750 Hz. Y otra de 750 a 1500 Hz. Luego, se toma una de las dos partes y se sigue con la misma división, así esta operación se denomina descomposición de la señal.

Es la función en el dominio del tiempo y su transformada en el dominio de la frecuencia. Si se analiza con Fourier, se tiene la característica de la dualidad, la transformada inversa de Fourier puede representar en el dominio del tiempo de una señal.

Es una función con traslaciones discretas, en cada nivel de resolución se forman dos bases ortonormales con las funciones de escala y las de wavelets, además, la versión dilatada de la función escala básica y de la wavelet madre son formadas por las funciones escala y wavelets respectivamente.

La transformada Wavelet discreta determinada por los subespacios de aproximación y detalle, se obtiene de una señal original y de la cual se tiene señales suavizadas o detalles omitidos

Para resolver la transformada wavelet es necesario saber que se lo puede hacer mediante filtros pasa bajos o filtros pasa altos, con una decimacion o submuestreo de a 2 eliminándose los impares.

Una propiedad importante para clasificar una función como Wavelet, cumpliendo con el criterio matemático de tener energía finita, y de la constante de admisibilidad  $C_v$

Para poder hablar sobre el análisis de señales por medio de Wavelets es necesario especificar que una Wavelet es una señal o forma de onda que tiene una duración finita y que cumple con los siguientes criterios matemáticos [16]

- a) Su valor promedio debe ser cero:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0$$

- b) Debe ser una función de energía finita:

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty$$

- c) Si  $\psi(\omega)$  es la transformada de Fourier de  $\psi(t)$  es decir:

$$\psi(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) e^{-j\omega t} dt$$

Se debe cumplir la condición de admisibilidad:

$$c_v = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$$

Donde  $\omega$  es la frecuencia y debe tener la componente de la serie de Fourier igual a cero, el valor de  $C_v$  depende de la selección de la Wavelet.

Así como el análisis por Fourier consiste en la descomposición de una señal en funciones sinusoidales de diferentes frecuencias, el análisis por wavelets descompone la señal en un conjunto de funciones (Wavelets) derivadas de una Wavelet madre o señal prototipo, las cuales son obtenidas por medio de la traslación y el dilamento de la Wavelet madre necesarios para considerarse funciones Wavelets y de las cuales familias de Wavelets son, Msn. Haar. Mexican Hat. (Sombrero mexicano), Morlet, Daubechies, Coiflets, Meyer, Symlets y Biortogonal entre otras. A continuación se muestran algunas de estas funciones. [2]

### 2.2.1 Analisis Wavelet Haar.

La Wavelet Haar es un ejemplo clásico de funciones wavelets. Se muestra en la Figura 2.1 y se define en la ecuación. Esta wavelet Haar proporciona buena resolución en el tiempo pero pobre en la frecuencia.

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < 0.5 \\ -1 & 0.5 \leq t < 1 \\ 0 & \text{en otro} \end{cases}$$

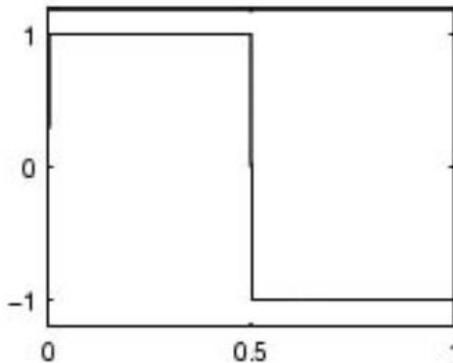


Figura 2.1 Wavelet Haar

Fuente: La transformada Wavelet Aplicada a los Sistemas Eléctricos de Potencia

### 2.2.2 Mexican Hat (Sombrero Mexicano)

La wavelet Mexican Hat se muestra en la Figura 2.2 y se define como la segunda derivada de una función Gaussiana, tal como se muestra en la ecuación. Esta wavelet tiene muy buena la localización tanto en el tiempo como en la frecuencia [17]

$$\psi(t) = -\frac{d^2}{dt^2} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) = (1-t^2) \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right)$$

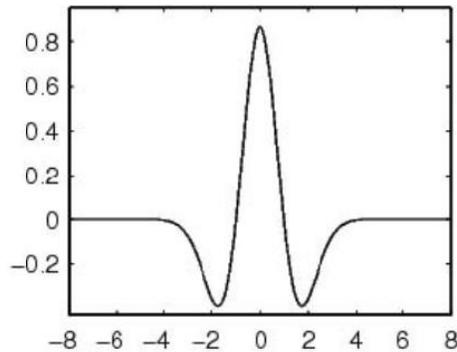


Figura 2.2 Wavelet Mexican Hat

Fuente: La transformada Wavelet Aplicada a los Sistemas Eléctricos de Potencia

### 2.2.3 Morlet

La Wavelet Morlet se muestra en la Figura 2.3 y se define según la ecuación [18]

$$\psi(t) = \cos(5t) * \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right)$$

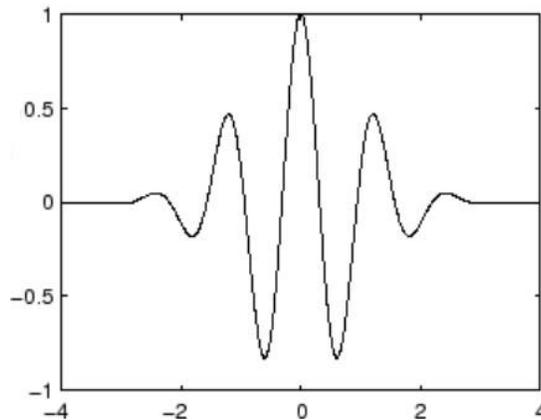
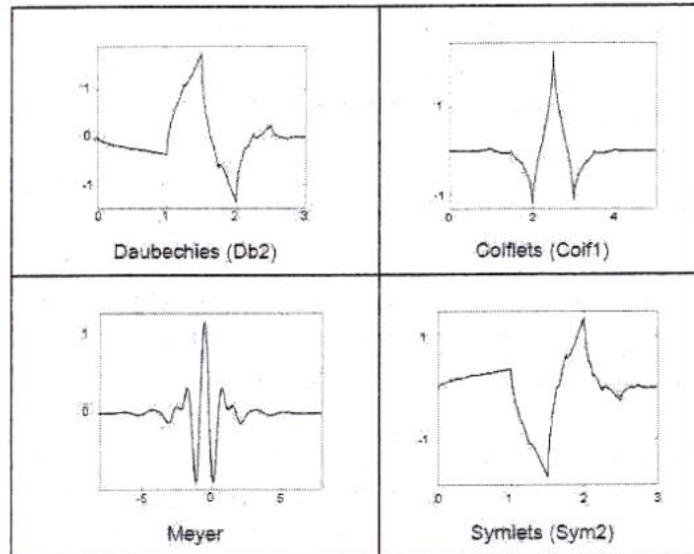


Figura 2.3 Morlet Wavelet

Fuente: La transformada Wavelet Aplicada a los Sistemas Eléctricos de Potencia

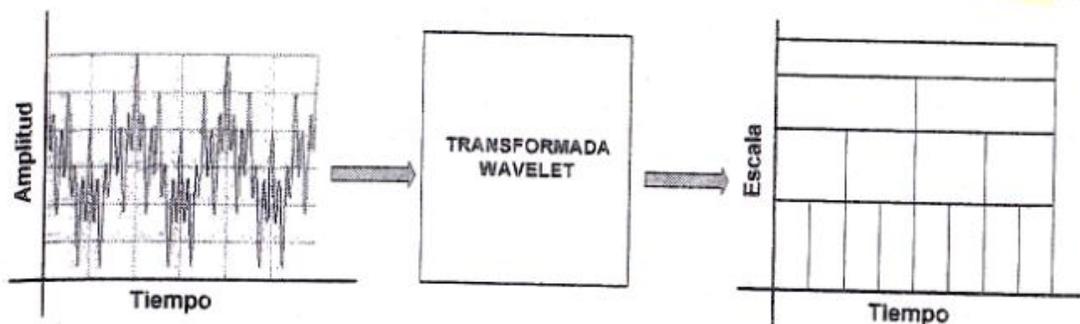
En la siguiente figura 2.4 se muestran otras funciones Wavelet [19]



*Figura 2.4 Funciones Wavelet*

*Fuente: La transformada Wavelet Aplicada a los Sistemas Eléctricos de Potencia*

El análisis Wavelet surge como solución a este inconveniente en la resolución tanto temporal como frecuencia proporcionando un análisis de multiresolución que consiste en la observación de la señal en distintas escalas de tiempo y frecuencia, de tal manera que los componentes de alta frecuencia son localizados con menor error en la frecuencia.



*Figura 2.5 Representación del tratamiento de Señales que da la Transformada Wavelet*

*Fuente: La transformada Wavelet Aplicada a los Sistemas Eléctricos de Potencia*

El análisis por medio de la Transformada Wavelet se divide en dos formas diferentes: análisis por medio de la Transformada Wavelet Continua (CWT) y por medio de la Transformada Wavelet Discreta.

## 2.3 Análisis de las Wavelet Madre

La expansión en serie de wavelets define la wavelet madre. Una función continua representa una secuencia infinita de términos. En general la información de la transformada es abundante. Eligiendo una apropiada wavelet madre, sin incurrir en una aproximación es posible truncar la serie. Si una wavelet posee duración finita y la función wavelet madre está bien localizada, entonces el alto índice asociado a las traslaciones serán despreciables. Al igual si el alto índice correspondiente al cambio de escala resulta insignificante.

### 2.3.1 La elección de una Wavelet

La mayoría de las aplicaciones de bases wavelet explotan su capacidad para aproximar eficientemente clases particulares de funciones con unos coeficientes de onda diferentes de cero. Esto es cierto no sólo para la compresión de datos, sino también para la eliminación de ruido y cálculos rápidos. Por lo tanto, el diseño de  $\psi$  debe ser optimizado para producir un número máximo de coeficientes wavelet  $\langle f, \psi_j, n \rangle$  que están cerca de cero. Una función  $f$  tiene unos coeficientes wavelet no despreciable si la mayoría de los a escala fina (alta – resolución) coeficientes de onda son pequeñas [20]

### 2.3.2 Momentos Wavelet

$$\int_{-\infty}^{+\infty} t^k \psi(t) dt = 0$$

Esto significa que  $\psi$  es ortogonal a cualquier polinomio de grado  $p-1$ . Lo cual demuestra que si  $f$  es regular y  $\psi$  también, es suficiente para desaparecer los momentos, entonces la wavelet coeficientes  $\langle f, \psi_j, n \rangle$  es de pequeñas escalas. En efecto, si  $f$  es igual a la wavelet, sobre un intervalo pequeño que es aproximado por un polinomio de Taylor de grado,  $k..If.k < p$  entonces wavelets son ortogonales a este polinomio de Taylor, y por lo tanto producen pequeña amplitud de coeficientes en escalas finas. [3]

### 2.3.3 Transformada Wavelet Continua (CWT)

Fue desarrollada como una técnica alternativa a la Serie de Fourier, con la finalidad de superar el problema de resolución existente en esta transformada. Es posible analizar

cualquier señal empleando una técnica alternativa llamada análisis multiresolución (MRA), el cual está diseñado para proporcionar una buena resolución temporal y pobre resolución en frecuencia para las altas frecuencias y buena resolución en frecuencia y baja en tiempo para altas frecuencias. Esta transformada se define de la siguiente manera:

$$C(\tau, s) = \int x(t) \psi_{\tau, s}^*(t) dt$$

Siendo la Wavelet madre:

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

Donde  $\tau$  y  $s$  son los parámetros de traslación y de escala respectivamente. [4]

Esta transformada puede ser esquematizada mediante los siguientes pasos:

- Se elige la Wavelet madre, la cual es un prototipo para generar las funciones ventanas de longitud finita y de naturaleza oscilatoria (su promedio es cero y decae rápidamente en los extremos).
- Se determina el  $C(\tau, s)$ , el cual cuanto mayor sea, mayor es la similitud, por lo cual los resultados dependerán de la forma de la Wavelet madre elegida.
- Se desplaza la Wavelet en el sentido positivo del eje del tiempo, repitiéndose los dos pasos anteriores hasta lograr el cubrimiento total de la señal.
- Se efectúa el cambio de escala de la Wavelet en el tiempo y se repiten los tres pasos anteriores.

### 2.3.4 Raíz Loci de Soluciones de mayor Grado

Si bien hemos demostrado que las soluciones de mayor grado posible dan mejores resultados, sigue siendo claro que la transformada de Fourier tiene soluciones que son sin embargo muy limitadas.

Para dar un ejemplo concreto examinamos brevemente el caso en que  $H_o(z) = (1 + z^{-1})^6$  y el lineal único grado fase 4 filtro de respuesta de impulso tiene complementaria coeficientes [10]

$$h_1(n) = [3, 18, 38, 18, 3] / 256 . \text{ Examinamos el } m = 1$$

$$Hi(z) = z^{-2} H_1(z) + \alpha (1 + z^{-2}) H_o(z)$$

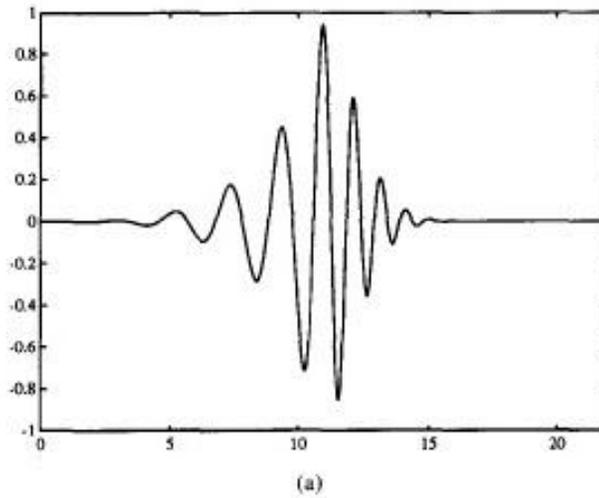


Figura 2.6 Función del Tiempo  
 Fuente: *Wavelets and Filter Banks: Theory and Design*

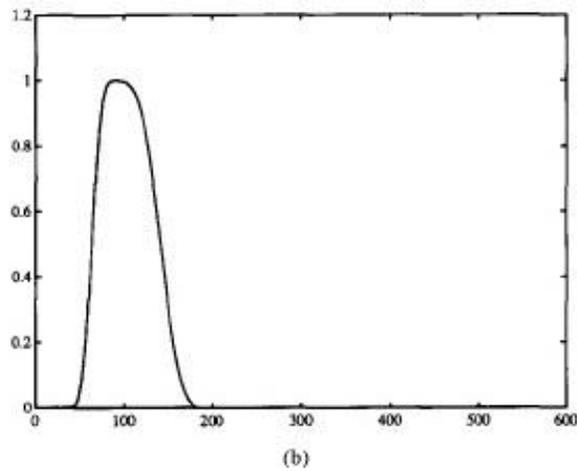


Figura 2.7 Función espectral del Tiempo  
 Fuente: *Wavelets and Filter Banks: Theory and Design*

### 2.3.5 Transformada Wavelet Discreta (DWT)

La discretización de la transformada Wavelet continua se logra muestreando el plano tiempo-escala mediante la siguiente expresión:

$$C[j, k] = \sum_{n \in \mathbb{Z}} x[n] \psi_{j,k}(n)$$

Siendo la Wavelet madre discretizada:

$$\psi_{j,k}[n] = 2^{\frac{j}{2}} \psi[2^{-j}n - k]$$

Donde  $s = 2^j, \tau = 2^j k, (j, k) \in \mathbb{Z}^2$ , son los parámetros de escala y traslación respectivamente.

Expresar una secuencia infinita de términos es saber que es una función continua, al igual que sucede con una serie de Fourier. Si las wavelet secundarias son semejantes es posible no cometer error en la aproximación truncando la serie en pocos términos. Más aún si la función es una función discreta de N puntos, donde N es potencia de dos. [4]

### 2.3.6 Transformada Wavelet discreta (DWT) y Análisis Multiresolución (ARM)

Wavelets se han aplicado con éxito en una amplia variedad de áreas de investigación como análisis de señales, procesamiento de imágenes, los datos compresión de datos y solución de ecuaciones diferenciales.

En los últimos años, las técnicas de análisis wavelet se han propuesto ampliamente en la literatura como una nueva herramienta para la detección, la localización y clasificación de los diferentes transitorios del sistema de potencia.

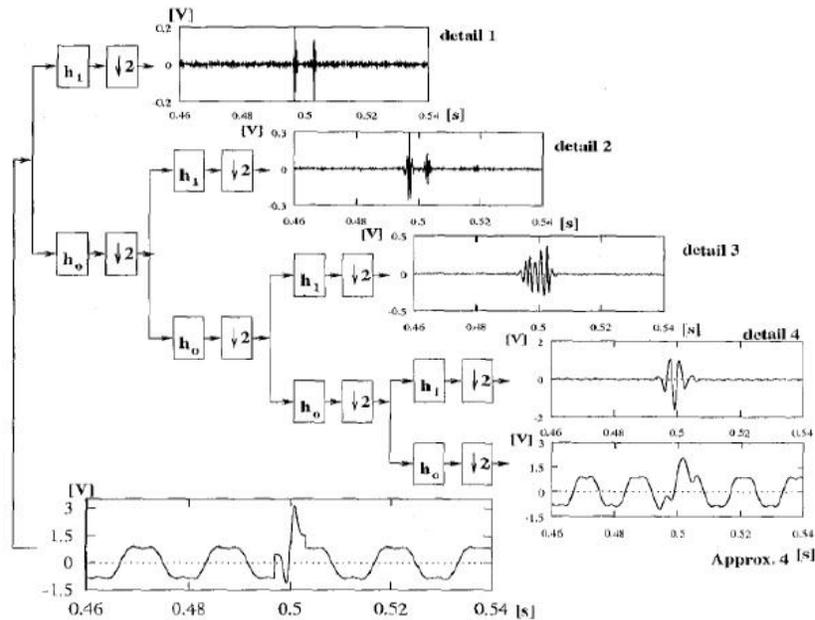
Wavelet es una nueva herramienta para la extracción de las características de distorsión. El ARM es una herramienta que utiliza la DWT para representar la señal de dominio de tiempo  $f(t)$  puede ser mapeada en el dominio wavelet y representado en diferentes niveles de resolución en cuanto a los siguientes coeficientes de expansión: [9]

$$C_{signal} = [C_0 | d_0 | d_1 | \dots | d_{f-n} | ]$$

Donde,  $d_i$ , representan el detalle coeficientes en diferentes niveles de resolución, y  $C_0$  presenta la última aproximada coeficientes. Transformada wavelet puede ser logrado por convolución y diezmado.

Los coeficientes de detalle  $d_j$ , y los coeficientes aproximados  $c_j$  se puede utilizar para reconstruir una versión detallada D1 y una versión aproximada A1, de la señal  $f(t)$  en esa escala. Efectivamente de los coeficientes la wavelet  $h(n)$  y la función de escalado coeficientes  $h_0(n)$  actuará como paso alto y paso bajo filtros digitales, respectivamente. La

respuesta de frecuencia  $H_0(\omega)$  y  $H_1(\omega)$  de wavelet madre de Daubechies (Db4) y su función de escalado se muestran en la Fig. . Estas dos funciones se dividen en el espectro de la señal de entrada  $f(t)$  igualmente.



*Figura 2.8 Señal multi-resolución de cuatro niveles*  
*Fuente: Detección of Power Quality Disturbances Using Wavelet Transform*

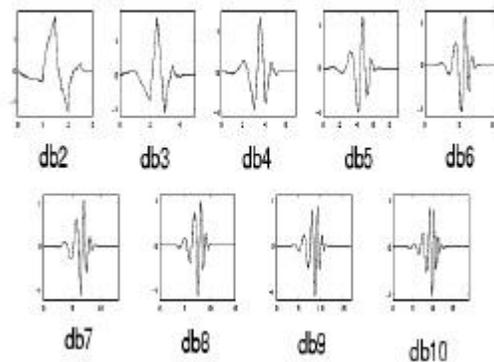
Decimación (o hacia abajo de muestreo) es una multi-tasa eficiente de procesamiento de la técnica digital para cambiar la toma de muestras de las frecuencia de una señal en el dominio digital y comprimir de manera eficiente los datos. Como se indica en la figura 2.8, la tasa de muestreo la compresión de datos y la reducción en detalle de coeficientes se obtienen descartando la segunda muestra resultante de convolución proceso.

Desde la mitad de los datos se descartan (por decimación 2), hay una posibilidad de pérdida de información (aliasing); sin embargo, los coeficientes de wavelet y de la función de escalado ( $h_1(n)$  y  $h_0(n)$ ) actuará como filtros digitales que limitan la banda de la entrada de  $c_j + 1$  y prevenir aliasing.

### 2.3.7 Familia Wavelets Daubechies

De acuerdo con los estándares IEEE, la transformada wavelet de Daubechies, es muy preciso para análisis de calidad eléctrica, perturbaciones entre todas las familias de

wavelets, para transitoria de fallas. Los nombres de la familia Daubechies wavelets se escriben como DbN, donde N es el orden, y db es el “apellido” de la onda.



*Figura 2.9 Familia Wavelets de Daubechies*  
*Fuente: Detección of Power Quality Disturbances Using Wavelet Transform*

### 2.3.8 Teoría del Banco de Filtros

Analizar una señal para determinar el número, frecuencia y posición de las sinusoides truncas de una compuesta por dos sinusoides de breve duración a la que se superpone ruido de fondo aleatorio, el contenido completo de una señal es representada mediante la transformada de Fourier. La información, por ejemplo, se complica porque se esconde en un espectro de fase. Las componentes transitorias de la señal se muestran en el espectro de amplitudes en picos individualizables, para dominar el espectro la determinación resulta confiable en aquellas componentes que posean una amplitud y duración de tamaño suficiente.

### 2.3.9 Estructuras DWT

La transformada wavelet proporciona una representación en el dominio de tiempo frecuencia para el análisis de las señales. Por lo tanto, hay dos métodos principales para producir e implementar la transformada wavelet. Estos métodos se basan en características en el dominio de tiempo o dominio de la frecuencia. El método basado en frecuencia es de bancos de filtros (FB) y el método basado en tiempo se denomina esquema lifting (LS).

### 2.3.10 Filtro de Estructura de los Bancos

En el método de FB, para un nivel de descomposición wavelet, la señal de entrada se divide en dos partes de frecuencia separadas haciendo pasar simultáneamente a través de un par de paso bajo,  $H(z)$ , y de paso alto,  $G(z)$ , los filtros. A continuación, el sub muestreo de

la salida del filtro para producir el paso bajo y salidas de paso alto (s, d). Por lo tanto, el método FB realiza la DWT basado en la convolución de derivaciones de filtro y muestras de la señal de entrada.  $H(z)$  y  $G(z)$  se puede escribir de la siguiente forma.

$$H(z) = h_0 + h_1 z^{-1} + h_2 z^{-2} + \dots + h_N z^{-N}$$

$$G(z) = g_0 + g_1 z^{-1} + g_2 z^{-2} + \dots + g_M z^{-M}$$

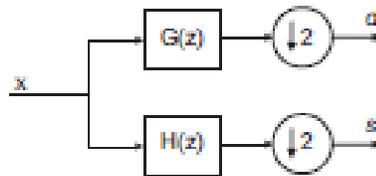


Figura 2.10 Diagrama del Banco de Filtros

Fuente: Implementación de una Toolbox básica para tratamientos de señales con Wavelets en un procesador digital de señal

### 2.3.11 Filtros Bancos de Diagrama de Bloques

Como ejemplo, consideremos el CDF (2,2) wavelet.  $H(z)$  y  $G(z)$  para esta transformación son:

$$H(z) = \frac{-1}{4\sqrt{2}} z^2 + \frac{1}{2\sqrt{2}} z + \frac{3}{2\sqrt{2}} + \frac{1}{2\sqrt{2}} z^{-1} + \frac{-1}{4\sqrt{2}} z^{-2}$$

$$G(z) = \frac{-1}{2\sqrt{2}} z^2 + \frac{1}{\sqrt{2}} z + \frac{-1}{2\sqrt{2}}$$

El filtro de paso bajo tiene 5 grifos y el paso alto tiene 3 grifos, así que llamarlo 5/3 wavelet aunque, la estructura FB es la anterior pero sólo es capaz de proporcionar la transformada wavelet en el dominio de la frecuencia y no en el dominio del tiempo. Además, en general, los coeficientes del filtro FB no son números enteros; Por lo tanto, no son apropiados para la aplicación de hardware, además, el número de cálculos aritméticos en el método FB es muy grande. [5]

## 2.4 Aplicaciones de la Transformada de Wavelet

La función “Escalonada” es constante en un intervalo, esta es la ventaja que ayuda a

visualizar el sitio don se produce un transitorio, si la función no cambia mucho durante un rango de frecuencia entonces se aproximara a la función analizada.

En los últimos años, las investigaciones referentes a los Wavelets se han incrementado de una manera considerable, dado que permite realizar el análisis de ciertos tipos de ondas que la anterior transformada no podía efectuarlas

La trasformada de Wavelet permite identificar fenómenos transitorios en el estudio de señales de voltaje o corriente de una manera eficiente, por lo que para este caso puede utilizarse para:

- Clasificación según el espectro de la señal transitoria partiendo de la transformada Wavelet.
- Implementación de la wavelet madre para determinar los valores de voltaje y corriente que se generan a causa de una perturbación transitoria.
- Identificación de la corriente de conexión basada en wavelet tiene la ventaja de que diferentes clases de corrientes de conexión en estos equipos pueden ser correctamente identificadas frentes a fallas internas en el mismo; además, fallas externas en transformadores pueden distinguirse de las fallas internas.

## **CAPÍTULO III**

### **DISEÑO DE HERRAMIENTA EN MATLAB PARA LA EMULACIÓN DE TRANSITORIOS Y SU ANÁLISIS MEDIANTE LA TRANSFORMADA DE WAVELET**

En este capítulo se tratará sobre el análisis en una herramienta creada en MATLAB y sus características para simular señales eléctricas reales, sumando transitorios en redes de energía eléctrica, que se trató en el Capítulo I, además se incorpora el estudio de la transformada Wavelet con sus características que son estudios del Capítulo II y se dan las opciones necesarias que den la idea precisa del problema que se propuso.

#### **3.1 Diseño de herramienta en Matlab para la emulación de Transitorios y su análisis mediante la Transformada Wavelet**

Simular los transitorios en sistemas eléctricos de potencia, utilizando como herramienta Matlab, se lo hace trabajando con datos obtenidos desde las características de la señal que aparecen con perturbaciones extrañas a la onda señal que se desea obtener.

La simulación empieza con la creación en GUI de las estructuras visuales que se encuentran en la pantalla principal del programa, cada elemento se relaciona con cada uno de las variables creadas en el archivo de lenguaje de programación, esto se lo hace utilizando lo TAGS de relacionamiento entre la figura y la programación.

La pantalla principal del programa, ofrece información general, un gráfico del sello del Logo de la Universidad, cuatro botoneras (PARAMETRIZAR, ANALIZAR, LIMPIAR Y SALIR) y dos cuadros cada uno con un nombre (SEÑAL SIN PERTURBACION Y SEÑAL CON PERTURBACION) en los cuales se obtendrán las señales de entrada ideal y la señal de entrada con perturbación, como se muestra en la figura 3.1



*Figura 3.1 Pantalla Principal*

*Fuente: Carlos M López R.*

Los Nombres que aparecen en la pantalla central tienen sus propiedades para cada uno, es así como se muestran con diferentes colores, tipo de letra y tamaño. Las botoneras poseen sus propios nombres y características, asignadas a cada uno un TAG de identificación, a continuación se muestran cada uno de ellos.

<b>BOTON</b>	<b>TAG</b>
PARAMETRIZAR	datos
ANALIZAR	calcular
LIMPIAR	limp
SALIR	salir

Inicialmente se tiene el comunicado de una variable de salida (function varargout) permitiendo que retorne la información de entrada al programa hacia la ventana en la cual se tiene la programación principal mostrando a la vez los resultados entre una señal de entrada con perturbaciones transitorias y una señal que debería ser la ideal (Principal (varargin)).

Al declarar gui\_Singleton se está combinando datos que se relacionan entre los que se utilizan en la programación y los datos de salida en el diagrama GUI inicializando en 1, estas se pueden comenzar desde las variables de entrada que utilizan los TAGS que se nombraron en la pantalla Principal Wavelet de la siguiente manera:

```

function varargout = Principal(varargin)

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',           mfilename, ...
                  'gui_Singleton',      gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn',     @Principal_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',     @Principal_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',     [], ...
                  'gui_Callback',       []);

```

El comando nargin ofrece la posibilidad de obtener el número de variables que se están declarando en la programación, ischar puede obtener el número de caracteres que se están ingresando al programa, definiendo estas declaraciones se puede inicializar el GUI con las llamadas desde la figura de ingreso de datos, todas estas llamadas son transformadas a caracteres string. Si de otra manera se compara las variables de salida en un rango dado en el cual se puede trabajar entonces las variables de entrada toman el nombre de los datos ingresados, caso contrario estas variables quedan con los mismos valores iniciales.

```

if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if narginout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

```

Ahora se pone en marcha la función principal del programa con variables que generan una región de integración entre el GUI y la pantalla de programación, especificando el tipo de evento que ocurre, manejando el código de aceleración, sobre las variables de entrada.

En esta línea se presenta la programación que se utiliza para obtener una gráfica del Logo de la Universidad Politécnica Salesiana, cabe resaltar que esta grafica debe estar inmersa en la carpeta donde se encuentran todas las demás pantallas de programación, a continuación se presenta toda la estructura que se utiliza para la obtención de esta gráfica.

```

function Principal_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
POLY=imread('POLY.png');
axes(handles.figure1);
imshow(POLY);

```

```
axis off  
guidata(hObject, handles);
```

La Pantalla Principal da una idea clara de la perturbación transitoria que existe, además de tener una vista de la señal ideal que se debería tener, esto sin embargo es posible analizarlo solamente ingresando los datos necesarios que son los que dan forma a la señal original.

La Pantalla de ingreso de datos está compuesta por una serie de botoneras a las cuales se les asigno un TAG, que será utilizado por los diversos algoritmos para desarrollar el análisis de señales. Se ha elegido determinar tres tipos de transitorios existentes en las redes eléctricas, los transitorios impulsivos, los transitorios oscilatorios y los transitorios que ocasionan ruido excesivo, los cuales se analizan ingresando datos que sirven para cada característica y se los puede ubicar en el programa con los nombres de cada uno en la parte superior de la pantalla datos (IMPULSOS, VARIACION, RUIDO), la elección de cada uno abre la posibilidad de ingresar datos para la simulación.

The image shows a software window titled "W\_DATO" with a yellow border. At the top, there are three tabs: "IMPULSOS", "VARIACION", and "RUIDO". The "VARIACION" tab is currently selected. The main content area has a black background. In the center, the word "DATOS" is written in large, red, italicized letters. Below this, the word "VALORES" is written in green. A white-bordered box contains six input fields, each with a blue label: "AMPLITUD [V]", "FRECUENCIA [Hz]", "T. INICIAL [mS]", "T. FINAL [mS]", "% PERTURBACION", and "P. CICLO". At the bottom center of the window is a blue button with the text "REGRESAR" in white.

*Figura 3.2 Pantalla de Ingreso de Datos  
Fuente: Carlos M. López R.*

Para esta pantalla se utiliza la programación que permite acoger datos para la simulación, inicializando cada uno y haciendo que sean de características propias para las líneas de programación.

La importancia de tener opciones que permitan ingresar datos son de relevancia pues a cada uno de las diferentes casillas han sido configuradas para tener una identidad propia como el color, el tamaño, etc.

A cada TAG de los casilleros se cambian con la opción `str2double` pues permite leer los valores escritos en el casillero y convertirlos en números. La creación de un puntero se realiza con la intención de escoger la opción a analizar y haciendo visible los casilleros a utilizarlos.

A continuación se presenta la programación de la pantalla de ingreso de datos:

```
function varargout = W_DATO(varargin)

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @W_DATO_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @W_DATO_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function W_DATO_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

handles.output = hObject;

guidata(hObject, handles);

function varargout = W_DATO_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

varargout{1} = handles.output;
```

```

function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)

function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function amp_Callback(hObject, eventdata, handles)

.
function amp_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function freq_Callback(hObject, eventdata, handles)

function freq_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function T0_Callback(hObject, eventdata, handles)

function T0_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function TFi_Callback(hObject, eventdata, handles)

function TFi_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function pert_Callback(hObject, eventdata, handles)

function pert_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

```

```

        set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function nc_Callback(hObject, eventdata, handles)

function nc_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit8_Callback(hObject, eventdata, handles)

function edit8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit9_Callback(hObject, eventdata, handles)

function edit9_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit10_Callback(hObject, eventdata, handles)

function edit10_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function VOLVER_Callback(hObject, eventdata, handles)
global a f t0 tf ar n op
a=str2double(get(handles.amp,'str'));%leo los valores escritos en el
cuadro y los convierte en numeros
f=str2double(get(handles.frec,'str'));
t0=str2double(get(handles.T0,'str'));
tf=str2double(get(handles.TFi,'str'));
ar=str2double(get(handles.pert,'str'));
n=str2double(get(handles.nc,'str'));
t0=t0/1000;
tf=tf/1000;
close W_DATO
% -----
function IMPULS_Callback(hObject, eventdata, handles)
global op      %puntero para saber que opción se selecciona, IMPULSO
op=2;         %carga el valor de OP para el SWITCH

```

```

set(handles.G1,'visible','on'); %pone visible los controladores para
cargar datos

% -----
function VAR_Callback(hObject, eventdata, handles)
global op
op=1;
set(handles.G1,'visible','on');

% -----
function RUI_Callback(hObject, eventdata, handles)
global op
op=3;
set(handles.G1,'visible','on');

```

Los datos que se obtiene del ingreso de los mismos son analizados en diferentes casos dependiendo de la opción elegida por el operador y por los diferentes procesos que realice la Transformada Wavelet.

En estas líneas de programación se encuentra los comandos que determinan el ingreso y así se devuelven para ser analizados, definiendo variables globales que existen en todo el programa y dependiendo del caso se escoge solo en la línea de programación que retorna de los parámetros escogidos por el operador.

El caso 1 corresponde a la deformación de la onda en variación de Voltaje, que define el vector de términos independientes para calcular los valores ingresados, y así realizando la forma de onda correspondiendo a una suma punto a punto con las ondas y dibujando la onda con perturbación.

En el caso 2 su implementación es la misma con la salvedad que se crea un tiempo escalado para los pulsos, aprovechando la teoría de pulsos `DELTA DE D'RACK` y se suma la función inicial mas los impulsos creados.

El caso 3 es la implementación de una opción variable la cual genera una serie de impulsos que no tienen una secuencia definida, por lo cual la señal se genera por diversos elementos que distorsionan totalmente la onda

Además se selecciona la opción otherwise en el caso que no se escoja ninguna opción, así no se produce el paro del sistema.

```

function varargout = Principal(varargin)

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Principal_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @Principal_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function Principal_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
POLY=imread('POLY.png');
axes(handles.figure1);
imshow(POLY);
axis off
guidata(hObject, handles);

%varargout{1} = handles.output;

function datos_Callback(hObject, eventdata, handles)
W_DATO      %abre ventana donde se cargan los datos para generar las
ondas
uiwait      %espera a que se retorne de la pantalla abierta
global a f t0 tf ar n op f1 f2 %definir las variables globales para el
programa total

switch op    %permite escoger solo la porcion de programa que se desea
ejecutar
    case 1    %caso uno función con deformación
        t=t0:(tf-t0)/10000:tf; % defino el vector de terminos
independientes, para calcular valores
        f1=a*sin(2*pi*f*t);      %calculo la forma de onda del voltaje
        for k=1:n                %inicio para realizar la suma de ondas
punto a punto
            f2=f1+((ar/100*a)*sin(2*(2*k-1)*pi*t*f)/(2*k-1));
        end
        axes(handles.figure2)    %activo la grafica donde dibujar
        plot(t,f1)               %grafico funcion sin perturbación

set(gca,'Color','black','XColor','white','YColor','white','Xgrid','on','Y
grid','on') %características de la gráfica
        axes(handles.figure3)    %activo la grafica siguiente donde
dibujar la función con la perturbación correspondiente
        plot(t,f2,'r')

```

```

set(gca, 'Color', 'black', 'XColor', 'white', 'YColor', 'white', 'Xgrid', 'on', 'Y
grid', 'on')

    case 2
        f2=0.0;
        t=t0:(tf-t0)/10000:tf;
        f1=a*sin(2*pi*f*t);      %calculo la forma de onda del voltaje
        t1=1000*t;              %creo un tiempo escale para los pulsos
        for k=min(t1):max(t1)    %inicio la creación de los pulso a la
forma de onda inicial
            f2=f2+(ar/100*a)*sinc((2*pi*60*(t1-n*k))); %se crean los
pulson usando el comando DELTA DE D'RACK
        end
        axes(handles.figura2)
        plot(t, f1)

set(gca, 'Color', 'black', 'XColor', 'white', 'YColor', 'white', 'Xgrid', 'on', 'Y
grid', 'on')
        f3=f1+f2; % sumo la función inicial mas los pulsos creados
        axes(handles.figura3)
        plot(t, f3, 'r')

set(gca, 'Color', 'black', 'XColor', 'white', 'YColor', 'white', 'Xgrid', 'on', 'Y
grid', 'on')

    case 3
        t=t0:(tf-t0)/10000:tf;
        f1=a*sin(2*pi*60*t);
        f2= f1 + (ar/10*a)*randn(1, length(t));
        axes(handles.figura2)
        plot(t, f1)

set(gca, 'Color', 'black', 'XColor', 'white', 'YColor', 'white', 'Xgrid', 'on', 'Y
grid', 'on')
        axes(handles.figura3)
        plot(t, f2, 'r')

set(gca, 'Color', 'black', 'XColor', 'white', 'YColor', 'white', 'Xgrid', 'on', 'Y
grid', 'on')

        otherwise % es el caso en que no se escoja ninguna opción, se
lo usa para evitar que el programa se cuelgue
            axes(handles.figura2)
            cla
            axes(handles.figura3)
            cla

end

function limp_Callback(hObject, eventdata, handles)
axes(handles.figura2)
cla

```

```

axes(handles.figura3)
cla
function calcular_Callback(hObject, eventdata, handles)
W_analisis
uiwait

function salir_Callback(hObject, eventdata, handles)
close Principal

function text4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

function figura2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

### **3.2 Diseño de Herramienta Matemática en Matlab para Análisis de señales mediante la Transformada de Wavelet**

El diseño de una herramienta en Matlab para realizar una simulación de los transitorios que se presentan en las redes de energía eléctrica, con un análisis de soporte compacto suficiente tanto en el dominio de la frecuencia como en el tiempo que están presentes en comportamientos tanto oscilatorios o impulsivos, comprende una importancia en el estudio de estas perturbaciones.

Los transitorios se dan por un factor de incidencia sobre la señal a analizar, esta es provocada por una impedancia en los sistemas eléctricos, esta hace que se distorsione la tensión, producto de cargas no lineales, esta es la razón principal que en Matlab se necesita para crear un transitorio sobre una onda que normalmente se encuentran en las redes eléctricas.

#### **3.2.1 Implementación del módulo de análisis Wavelet**

En el software se han programado los algoritmos de descomposición y reconstrucción de señales utilizando las diferentes wavelets presentadas con anterioridad. El usuario puede elegir la familia Wavelet a utilizar y el número de descomposiciones a realizar. Así el sistema calcula los coeficientes de aproximación y de detalle de cada nivel de descomposición, permitiendo visualizar y modificar el proceso paso a paso, utilizando las herramientas de visualización y manejo de información que ofrece el programa.

A continuación el sistema desarrollado permite recuperar la señal original a partir de los coeficientes de aproximación y de detalle si estos no son alterados. En esta reconstrucción el usuario puede modificar los coeficientes utilizados y de esta forma realizar análisis diversos sobre las diferentes componentes de la señal. [10]

### 3.2.2 Algoritmo Rápido y Banco de Filtros

La transformada wavelet se realiza a una señal de energía finita  $f(t)$  utilizando bancos de filtros. El primer paso consiste en representar  $f(t)$  por una función  $n(t)$   $f$  en  $n$   $V$  como sigue:

$$f_n(t) = \sum_{K=-\infty}^{\infty} C_{n,k} \phi(2^n t - k)$$

### 3.2.3 Algoritmos de Descomposición y Reconstrucción

Para hallar  $f_{n-1}(t)$ ,  $y$ ,  $g_{n-1}(t)$  es decir, la descomposición de la señal en la aproximación  $f_{n-1}(t)$  y los detalles  $g_{n-1}(t)$ , es necesario obtener las secuencias  $c_{n-1,k}$  y  $d_{n-1}$  a partir de:

$$d_{n-1,k} = \sum_l b_{l-2k} c_{n,l} \quad c_{n-1,k} = \sum_l a_{l-2k} c_{n,l}$$

$$d_{n-1,k} = \sum_l b_{l-2k} c_{n,l} \quad c_{n-1,k} = \sum_l a_{l-2k} c_{n,l}$$

Las relaciones anteriores muestran que para el cálculo de las secuencias  $c_{n-1,k}$  y  $d_{n-1}$  la secuencia  $c_n$ ,  $l$  es convolucionada con las secuencias  $a_l$  y  $b_l$ , calculando sólo las muestras de salida de índice par. Esta operación se denomina sub-muestreo y es denotado por  $2 \downarrow$ .

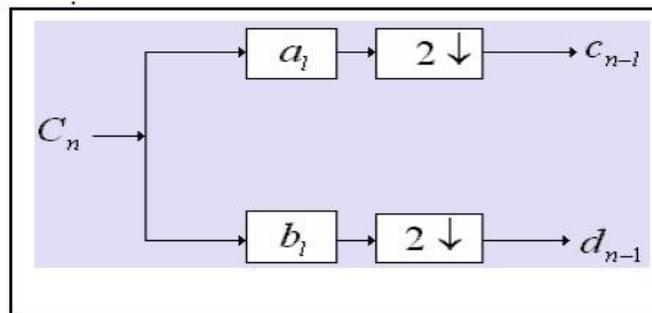


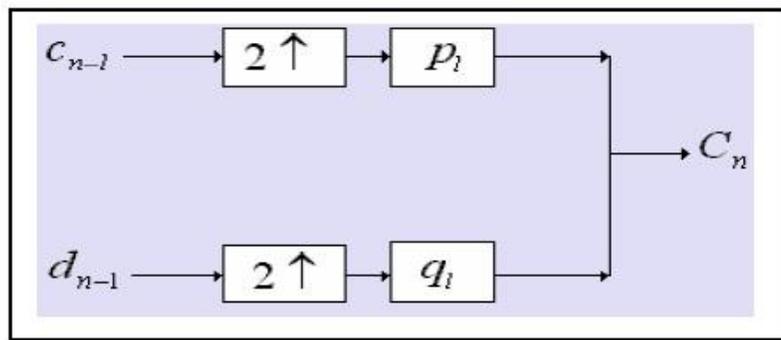
Figura 3.3 Descomposición Wavelet

Fuente: Implementación de una Toolbox básica para tratamientos de señales con Wavelets en un procesador digital de señal

Para reconstruir  $f_n(t)$  a partir de  $f_{n-1}(t)$  y  $g_{n-1}(t)$  se debe calcular

$$c_{n,k} = \sum_l \{P_{K-2l}c_{n-1,l} + q_{K-2l}d_{n-1,l}\}$$

Puede observarse que para desarrollar esta ecuación como una operación de convolución es necesario insertar ceros en las muestras para  $l$  impar en  $C_{n-1,l}$  y  $d_{n-1}$ . La adición de estos ceros a las muestras es conocida como sobre-muestreo y se denota por



*Figura 3.4 Reconstrucción Wavelet*

*Fuente: Implementación de una Toolbox básica para tratamientos de señales con Wavelets en un procesador digital de señal*

### 3.2.4 Tratamiento de Fronteras

Clásicamente, la DWT es definida para secuencias cuya duración es alguna potencia de dos, pero en general es necesario extender el número de muestras a otros tamaños.

El algoritmo básico de la DWT, esquema simple de convoluciones y sub-muestreo, no está limitado para longitudes diádicas. Como es usual cuando una convolución se desarrolla sobre señales de longitud finita, aparece distorsión en los bordes. Para tratar esto, los bordes pueden ser procesados de forma diferente que los otros puntos de la señal.

### 3.2.5 Desarrollo del Análisis de la Transformada Wavelet Madre

El análisis de una señal mediante la transformada Wavelet, se la realiza con una estructura de código necesaria solamente para este tema, es así que se tiene varias líneas de código que interpretan la transformada Wavelet, utilizando los mismos TAGS de las pantallas GUI, que se ha descrito en el subcapítulo anterior.

La aplicación de la Transformada Wavelet Continua, se lo hace ingresando en una variable los datos que se van a obtener, en este caso esta variable se denomina cwtS1, en la cual se guarda el resultado de la transformada de la función 2 (f2). Para poder utilizar en una diferente línea de programación la información de la transformada aplicada, se necesita utilizar otra variable cwtS2.

Para tener una mejor resolución de la transformada Wavelet se realiza la creación de una variable en función de la cantidad de ceros que tiene el vector donde se guarda los resultados de wavelet, con la intención de mejorar la resolución en la señal de entrada de la transformada Wavelet.

La programación en Matlab recomienda que se seleccione valores que están en un rango de valores que se comparan con el vector con la cantidad de ceros iguales, luego se realiza el cambio de la inversa de la Transformada Wavelet para Reconstruir la señal que se desea obtener.

Toda las operaciones que se realizan con la Transformada Wavelet madre deben ser representadas gráficamente con las ondas correspondientes y al final se deduce un algoritmo necesario para que se analicen los datos de Tiempo Mínimo, Tiempo Máximo y los datos de las amplitudes obtenidas.

```
cwtS1 = cwtft(f2); %aplico la transformada continua de wavelet
cwtS2 = cwtS1; %guardo los datos en otra variable
cwtS2.cfs = zeros(size(cwtS1.cfs)); %se crea una variable en funcion de
la cantidad de ceros que tiene el vector donde se guarda los resultados
de wavelet
cwtS2.cfs(13:15,:) = cwtS1.cfs(13:15,:); % se selecciona los valores que
estan dentro de un porcentaje *** recomendado en matlab***
xrec = icwtft(cwtS2);% calculo la inversa de wavelet para reconstruir la
señal
axes(handles.figura1)
plot(t,f2);
title('SEÑAL CON RUIDO','color','r');
set(gca,'Color','black','XColor','white','YColor','white','Xgrid','on','Y
grid','on')

axes(handles.figura2)
plot(t,xrec,'b')
title('SEÑAL RECONSTRUIDA','color','r');
set(gca,'Color','black','XColor','white','YColor','white','Xgrid','on','Y
grid','on')
legend('SEÑAL RECONSTRUIDA')

axes(handles.figura3)
plot(t,f1,'r');
```

```

set(gca, 'Color', 'black', 'XColor', 'white', 'YColor', 'white', 'Xgrid', 'on', 'Y
grid', 'on')
legend('SEÑAL ORIGINAL')

axes(handles.figura4)
%plot(t, f2);
f3=f2-f1;
plot(t, f3, 'r');
set(gca, 'Color', 'black', 'XColor', 'white', 'YColor', 'white', 'Xgrid', 'on', 'Y
grid', 'on')

mm=max(xrec);
mn=min(xrec);
tm=t(xrec < 0);
tn=t(xrec > 0);
tn=tn(2);
tm=tm(2);
set(handles.Max, 'str', mm)
set(handles.min, 'str', mn)
set(handles.perio, 'str', tm)
set(handles.periom, 'str', tn)

```

### **3.3 Diseño de Herramienta en Matlab para análisis de transitorios mediante la Transformada de Wavelet.**

A fin de obtener el resultado, de un análisis en el cual se simula una señal eléctrica y una señal que tiene un transitorio, se expone al análisis de la transformada wavelet. Las señales eléctricas, su clasificación, las ondas que las componen, sus segmentos con sus respectivas duraciones, se presentan en los diversos métodos de elaboración de algoritmos y extracción de características, se describe los efectos y así poder discutir y analizar, para dar conclusiones con base a los objetivos planteados.

#### **3.3.1 Comandos Matlab Necesarios para la Comprensión y Filtrado con Wavelet**

El análisis de una señal filtrada con la transformada Wavelet, se obtiene conjuntamente con el tipo de señal que se desea realizar, para este caso se necesita conocer si las señales de entrada originales son de tipo impulsivas, oscilatorias o simplemente son señales con un ruido muy pronunciado.

Inicialmente se tiene el comunicado de una variable de salida (function varargout) permitiendo que retorne la información de entrada al programa hacia la ventana en la cual se hace la programación del análisis de comparación de resultados entre una señal de entrada con perturbaciones transitorias y una señal Wavelet Madre (W\_analisis vararigin).

Al declarar `gui_Singleton` se está combinando datos que se relacionan entre los datos que se utilizan en la programación y los datos de salida en el diagrama GUI inicializando en 1, estas se pueden comenzar desde las variables de entrada que utilizan los TAGS que se nombraron en la pantalla de análisis Wavelet de la siguiente manera:

```
function varargout = W_analisis(varargin)

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @W_analisis_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @W_analisis_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',   []);
```

El comando `nargin` ofrece la posibilidad de obtener el número de variables que se están declarando en la programación, `ischar` puede obtener el número de caracteres que se están ingresando al programa, definiendo estas declaraciones se puede inicializar el GUI con las llamadas desde la figura de ingreso de datos, todas estas llamadas son transformadas a caracteres string. Si de otra manera se compara las variables de salida en un rango dado en el cual se puede trabajar entonces las variables de entrada toman el nombre de los datos ingresados, caso contrario estas variables quedan con los mismos valores iniciales.

```
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
```

Para calcular la comparación de la transformada Wavelet Madre con la señal original, se realiza el escogitamiento del caso y de la transformada, con la intención de que se elimine los transitorios y los elementos que no pertenecen a la señal deseada.

```
function W_analisis_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

handles.output = hObject;

guidata(hObject, handles);
```

```

function varargout = W_analisis_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

varargout{1} = handles.output;

function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)

close W_analisis

function CALC_Callback(hObject, eventdata, handles)
global a f t0 tf ar n op %lee variables globales
switch op % selecciona el caso
    case 1
        t=t0:(tf-t0)/10000:tf;
        f1=a*sin(2*pi*f*t);
        for k=1:n
            f2=f1+((ar/100*a)*sin(2*(2*k-1)*pi*t*f)/(2*k-1));
        end
    case 2
        f2=0.0;
        t=t0:(tf-t0)/10000:tf;
        f1=a*sin(2*pi*60*t);
        t1=1000*t;
        for k=min(t1):max(t1)
            f2=f2+(ar/100*a)*sinc((2*pi*60*(t1-n*k)));
        end
        f2=f2+f1;
    case 3
        t=t0:(tf-t0)/10000:tf;
        f1=a*sin(2*pi*60*t);
        f2= f1 + (ar/100*a)*randn(1, length(t));
otherwise
    axes(handles.figura2)
    cla
    axes(handles.figura3)
    cla
end

```

En el nivel de comparación de la señal original afectada con un transitorio con respecto a una señal madre de transformada Wavelet, corresponde a un resultado de tiempo y frecuencia, permitiendo entender el motivo del transitorio y cuál es su origen.

Los trastornos que se producen en las señales eléctricas, se prueban en esta herramienta necesaria para detectarlos, especialmente los transitorios se presentan en las señales de voltaje, y en ocasiones en que la corriente es menor a 10 mA.

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS DE TRANSITORIOS IMPULSIVOS Y OSCILATORIOS EN LAS REDES DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE LA TRANSFORMADA DE WAVELET**

En este capítulo se tratará sobre el análisis de los resultados obtenidos mediante la aplicación de la Transformada Wavelet, aplicada a los transitorios más comunes que se encuentran en las redes de energía eléctrica, mediante una simulación utilizando una herramienta programada en Matlab y detectando las características de las diferentes perturbaciones, para encontrar una solución al problema descrito.

#### **4.1 Análisis y Simulación de Transitorios Impulsivos mediante la Transformada de Wavelet**

Para conocer en una señal las frecuencias presentes, la transformada de Fourier es la que se ha utilizado tradicionalmente, que es útil para describir los espectros dependientes del tiempo. La transformada Wavelet la cual se analizó en los capítulos anteriores, presentan mejores respuestas ante señales aperiódicas y como resultado se obtiene información acerca de las frecuencias y del momento en que estas se presentan.

Los elementos que son origen de los transitorios son las comúnmente conocidas como bobinas, pues un ejemplo real se lo encuentra en las bobinas de encendido que existen en los sistemas donde se energizan para producir un giro y dar el arranque para movilizar un motor principal, además estas bobinas se generan desde la baja tensión en un acumulador generalmente su voltaje es de 12 V encendiendo el sistema principal e inflamando la mezcla de combustible con lo que funciona el sistema principal.

Las características de este fenómeno común se dan con un voltaje de 12 V, con una frecuencia de 60 Hz, y con una perturbación que llega al 100% del voltaje de alimentación, presentándose casi el 10% de impulsos en un ciclo como se muestra en la pantalla de ingreso de datos:



Figura 4.1 Datos de una Bobina de encendido  
Fuente: Carlos M. López R.

Obteniendo una señal de entrada ideal y la señal con perturbación como se la muestra a continuación:

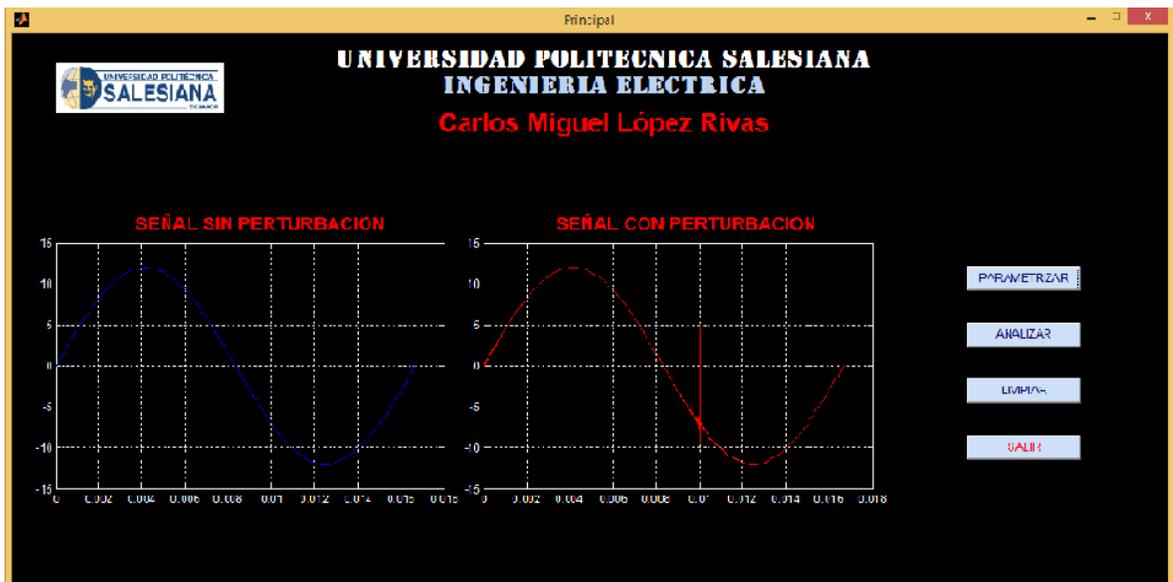


Figura 4.2 Señal Ideal con Perturbación en una bobina de encendido  
Fuente: Carlos M. López R.

Analizando este transitorio se obtiene como resultado que la Transformada Wavelet que se utilizó en este ejemplo es la transformada de Daubechies Db8, la cual se observa que tiene una dimensión igual a la del transitorio resultado de la cual se tiene una relación que se resta de la señal original y teniendo una respuesta igual.



*Figura 4.3 Resultante del análisis de una Bobina de encendido*  
*Fuente: Carlos M. López R.*

Los resultados reflejan que la máxima amplitud se obtiene a los 0,24 V, la mínima amplitud en los 0.14 V, el tiempo al que ocurre esta perturbación está en los 0.14 microsegundos y el mínimo tiempo está a los 1.6 microsegundos de la señal de entrada.

#### **4.2 Análisis y Simulación de transitorios oscilatorios mediante la Transformada de Wavelet**

La estimación de localización de fallas es realizada en una simulación de señales con perturbaciones. La detección de la ubicación de la falla utilizando métodos convencionales implica una muy complicada operación y se puede introducir error porcentual. El principal propósito de este trabajo es detectar distancia en tiempo y un fin de punto de falla con precisión y facilidad [12]

El mejor ejemplo de la ubicación de transitorios oscilatorios es en cualquier conductor que este separado por un material aislante incluyendo el aire, constituyéndose en un condensador, es así como en nuestro sistema la frecuencia es de 60 Hz.

Analizar un conductor que se convierte a la vez en un condensador determina los parámetros a analizar, pues si se lo hace en los sistemas de baja tensión, comúnmente encontramos redes actuales a 110 V, con una frecuencia de 60 Hz, si lo analizamos en

medio ciclo con nada más de una perturbación del 5% en medio ciclo tal como se menciona en los siguientes datos de ingreso:

VALORES	
AMPLITUD [V]	110
FRECUENCIA [Hz]	60
T. INICIAL [mS]	0
T. FINAL [mS]	8.3333
% PERTURBACION	5
P. CICLO	1

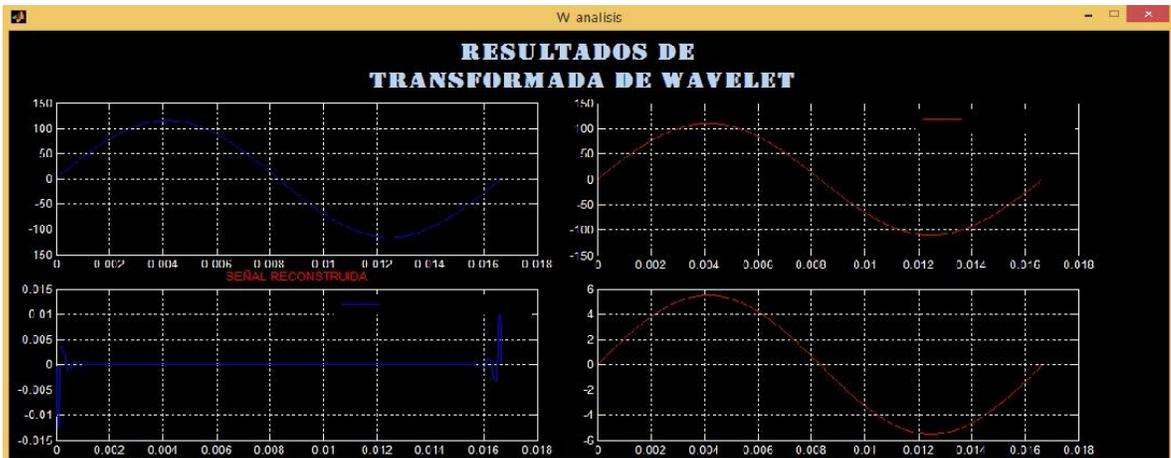
Figura 4.4 Datos de un conductor de baja tensión a 110V  
Fuente: Carlos M. López R.

Con la cual se tiene una señal sin perturbación que cumple con los requisitos necesarios para ser ideal y una señal con perturbación que llega a casi los 118 V de entrada lo cual no es consecuente con el óptimo de los datos.



Figura 4.5 Señal Ideal y señal con perturbación de un conductor a 110V  
Fuente: Carlos M. López R.

Los resultados que se obtienen de este análisis con la transformada Wavelet discreta, la cual se realiza con los parámetros de entrada y se modula hasta encontrar el umbral al que debe estar una señal ideal, claramente se encuentra una wavelet madre con la cual se compara la señal original resultando en varias oscilaciones que son los transitorios que se encuentran en la red.



*Figura 4.6 Análisis de un conductor que genera transitorios oscilatorios*  
*Fuente: Carlos M. López R.*

El pico más alto donde se encuentra el transitorios en amplitud es a los 0.012 V en un tiempo de 1.6 microsegundos y la amplitud mínima que alcanza el transitorio se da a los -0.012 V de amplitud considerándose que se tiene un variación casi impulsiva que genera un cambio en el valor de la oscilación propia de la señal, en un tiempo de 0.14 microsegundos.

#### **4.2.1 Ejemplo de ruido analizado mediante la transformada Wavelet.**

Las variaciones de la temperatura, y los gradientes de temperaturas en los sistemas electrónicos tienen una gran influencia sobre todos los dispositivos semiconductores.

Analizar un sistema que tenga un voltaje de 12V a una frecuencia de trabajo de 60 Hz, analizado en 2 ciclos, como es una señal que presenta una cantidad de ruido excesivo se deduce que su secuencia es variable en la señal.

Los datos que se ingresan para la simulación de este tipo de perturbaciones se lo hace de la siguiente forma:



*Figura 4.7 Datos para generar ruido en un sistema de perturbación térmica  
Fuente: Carlos M. López R.*

Se tiene una panorámica de la señal ideal comparada con la señal que está totalmente tergiversada con ruido que son producidas por las variaciones de temperatura que existe en algunos sistemas electrónicos.



Figura 4.8 Señal Ideal vs Señal con Ruido  
Fuente: Carlos M. López R.

Los datos que obtenemos nos informa que el voltaje máximo al cual se distorsiona está a 1.42V más que el voltaje nominal en un tiempo de 0.35 us, el mínimo voltaje está a -1.36V a un tiempo de 3.23 s

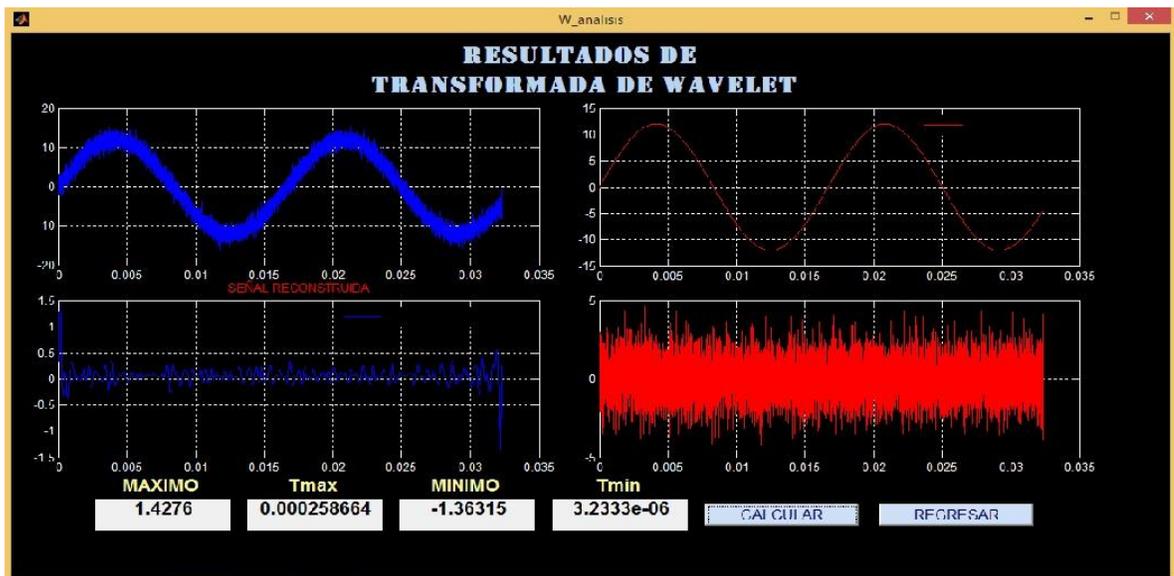


Figura 4.9 Análisis de resultados de una señal con ruido  
Fuente: Carlos M. López R.

#### 4.2.2 Análisis de una Señal sin Perturbación

Cabe destacar que la Transformada Wavelet sugiere una comparación de la señal ideal y

la señal Wavelet Madre, es así que si la señal de entrada es una señal sin perturbaciones como se lo puede ver en el siguiente ingreso de datos:

VALORES	
AMPLITUD [V]	110
FRECUENCIA [Hz]	60
T. INICIAL [mS]	0
T. FINAL [mS]	16.666
% PERTURBACION	0
P. CICLO	15

REGRESAR

*Figura 4.10 Ingreso de datos con perturbación inexistente  
Fuente: Carlos M. López R.*

La comparación en la pantalla principal del programa nos da una similitud entre la señal original y la señal perturbada de la siguiente manera:



Figura 4.11 Similitud entre señales con perturbaciones y sin perturbaciones  
 Fuente: Carlos M. López R.

En el análisis mediante la transformada Wavelet corresponde a lo que se entiende que no debe tener perturbaciones, esta razón es esencial para el conocimiento de la gráfica de perturbaciones.

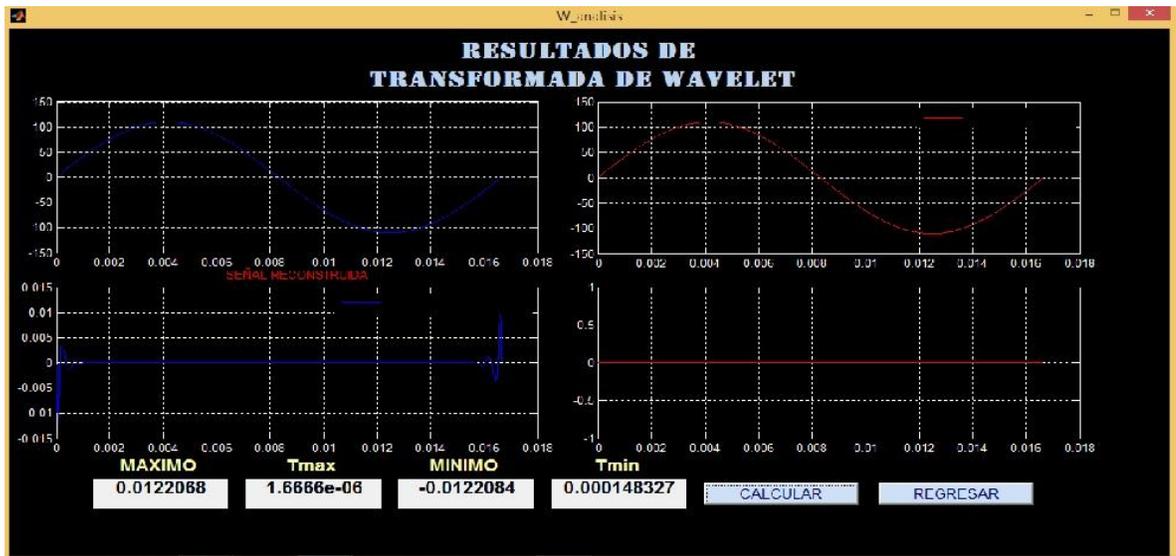


Figura 4.12 Señal sin perturbación  
 Fuente: Carlos M. López R.

## CONCLUSIONES

Para los equipos que se encuentran conectados sobre las redes de distribución, los transitorios son perjudiciales, ya que la poca duración y su reproducción aleatoria tienen repercusión en las frecuencias que son diferentes a las que originalmente se tiene en la red, con el método empleado se puede detectarlas con operación en tiempo real y con resultados efectivos para una coordinación de protecciones necesarias para evitar estas perturbaciones.

Las perturbaciones transitorias, son difíciles de detectar, existen métodos que responden a normas estándar IEC 61000-4-30, pero no se describe la forma de hacerlo. De otra manera no se especifican equipos de medida para transitorios, por esta razón es complicado encontrar características para comparar el funcionamiento. Todo esto queda con un amplio campo de investigación para detectar efectivamente este tipo de perturbaciones.

Esta investigación denota, varios métodos para la detección de transitorios y la extracción de los mismos en tiempo real tanto en las tensiones que corresponden a las redes de distribución como en las redes de baja tensión, es un aporte útil que se une a los métodos existentes.

La herramienta desarrollada en Matlab hace que se pueda resolver tanto con transitorios impulsivos como con oscilatorios, incluyendo armónicos variables en el tiempo que son muy frecuentes en las redes eléctricas.

El método empleado para la resolución de este trabajo, aplica la transformada Wavelet Continua, con la cual se puede localizar los transitorios dentro de un tiempo y a que amplitud llegan, confirmando la existencia de estas perturbaciones si la relación entre la señal de entrada sobrepasa el umbral de la señal que se obtiene como Wavelet Madre.

Si existe una perturbación, la nueva señal reconstruida se almacena en una nueva variable de memoria. Así se compara cualquier tipo de transitorio que exista en la red, si la señal original con perturbación transitoria supera el umbral de la señal generada por la Transformada Wavelet entonces se clasifica como evento transitorio sino como señal

normal.

Este análisis permite definir los problemas que existen en la red en el dominio tiempo frecuencia, y la amplitud extraída desde un porcentaje de influencia de la perturbación sobre la señal.

En general se extraen las ondas que perturban la señal, se reconstruye la señal ideal, y se tiene la señal de la Wavelet Madre que se utiliza según la señal de entrada, además se puede simular diferentes tipos de señales de entrada como son señales con transitorios impulsivos, señales con transitorios oscilatorios o a la vez señales que se obtengan con ruido extremo.

La Wavelet Madre que se utiliza, define la detección de transitorios en el dominio del tiempo – frecuencia en función de las mismas magnitudes de la señal original con perturbación transitoria.

Se realiza este trabajo sobre una base en modular en Matlab, pues esta es una base que no corresponde a una gran inversión, además de ser muy fácil configuración, la simulación permite obtener transitorios de cualquier orden, con una velocidad de respuesta eficiente con lo cual se logra una mejor visualización de los resultados.

Se ha desarrollado una transformada Wavelet madre que configura umbrales de ruido en distintas bandas de frecuencia, detectadas en las redes de energía eléctrica, haciendo posible establecer bases para discriminar este tipo de perturbaciones.

Se espera que estas líneas sean totalmente provechosas en el desarrollo de la investigación y sean un aporte necesario para mejorar la calidad de energía tanto en los resultados que se obtengan como en las aportaciones que se hacen sobre este tema.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda la transformada Wavelet Daubechies para el análisis de señales eléctricas, Esto permite que no existan restricciones para transitorios de cualquier tipo, sea una señal periódica o no periódica.

Para entender mejor los transitorios la frecuencia siempre será de 60 Hz y con una visión de la señal afectada en una ventana de 5 ciclos.

Se debe estar al tanto de las diferentes técnicas y soluciones que existen a nivel mundial sobre los transitorios existentes en las redes eléctricas, más si existen localidades donde se generen este tipo de perturbaciones frecuentemente.

La investigación deja abierta la posibilidad de seguir en este tema, concluyendo hasta tener una adquisición de datos reales, señalando nuevas direcciones de trabajo para señales con perturbaciones transitorias.

El primer objetivo de este trabajo es determinar un simulador de transitorios impulsivos y oscilatorios mediante la transformada Wavelet, es necesario determinar las características de los transitorios puntualmente, pues cada uno tiene una importancia similar a cualquier otra característica, la idea es encontrar los puntos sensibles de la señal de entrada en los que están presentes estas perturbaciones, las líneas de comandos existentes en la programación están determinadas por una eficiencia máxima, una vez identificados estos parámetros se considera que la simulación debe ser identificada por valores reales encontrados en las redes de energía eléctrica, dando un respectivo inicio para mejorar las mismas características para que no sean causantes de daños en los equipos donde usualmente se los encuentra.

Los datos a ingresar deben ser claros, de manera que se obtengan resultados con una buena calidad y ser fáciles de analizarlos, generalmente los transitorios se generan en la alimentación de los equipos o en los conductores de energía eléctrica, en caso de decidirse por un transitorio específico se debe escoger las opciones de impulsivos u oscilatorios, con

esta decisión se entiende que tipo de transitorio existe en el evento a analizar.

Los análisis utilizados en este trabajo pueden servir como base para realizar otras investigaciones, un posible campo en el que puede realizarse el estudio es en el campo de las señales de audio, por ejemplo se pueden extraer los transitorios existentes en los sonidos de una melodía y se los podría materizar para encontrar un mejor sonido de esta, o simplemente pensar en un sistema de eliminación de ruidos que se han detectado mediante la transformada Wavelet.

Se espera que estas líneas sean totalmente provechosas en el desarrollo de la investigación y sean un aporte necesario para mejorar la calidad de energía tanto en los resultados que se obtengan como en las aportaciones que se hacen sobre este tema.

## REFERENCIAS

- [1] S. Electric, "Composicion de Energia Reactiva y Filtrado de Armonicos Baja y Media Tension," Bac de Roda, Barcelona, 2008.
- [2] J. S. T. Horsley, "Los Siete Tipos de Problemas en el Suministro Electrico," American Power Conversion, 2009.
- [3] I. S. 141-2004, "Recomended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plant," New York, 2004.
- [4] F.-S. R. V.-S. R. LARA-CASANOVA, "GENERACION DE ARMONICOS Y SUS EFECTOS EN REDES ELECTRICAS," MEXICO, 2014.
- [5] R. S. F. D. R. S. Lee A. Barford, "An Introduction to Wavelets," Instruments and Photonics Laboratory, September, 1992.
- [6] K. H. G. P. Robert Gentleman, Wavelet Methods In Statistics Whit R, Baltimore: United Kingdom, 2012.
- [7] J. G. T. F. C. Aranda, La Transformada Wavelet Aplicada a los Sistemas Electricos de Potencia, Santiago de Cali, Colombia: editorial academica espanola.
- [8] S. Mallat, A Wavelet tour of signal processing, Burlington: Academic Press is an imprint of Elsevier, 2011.
- [9] A. A. G. A. M. L. H. R. Murillo, "Analisis Comparativo de Algunas Teorias en el Dominio de la Frecuencia Para la Deteccion de Distorsiones en Sistemas Electricos de Potencia," Pereira, 2009.
- [10] S. M. I. a. C. H. Martin Vetterli, "Wavelets and Filter Banks: Theory and Design," Septiembre 1992.
- [11] D. G. T. R. D. A. J. L. Dr. M. Sushama, "Detection of Power Quality Disturbances Using Wavelet," College of Engineering, INDIA., 2011.
- [12] O. J. O. R. D. A. S. B. C. A. G. Carlos Andres Nino Nino, "Implementacion de una Toolbox Basica para Tratamiento de Senales con Wavelets en un Procesador Digital de Senal," Santander, 2008.
- [13] H. Olkkonen, Discrete Wavelet Transforms: Algorithms and Applications, Janeza Trdine, Croatia: Teodora Smiljanic, 2012.
- [14] Y. S. Ekici, "Fault Location Estimation on Transmission Lines Using Wavelet and Artificial Neural Network," Las Vegas Nevada, USA, 2009.
- [15] A. B. F. J. Narcowich, A First Course in Wavelets with Fourier Analysis, Canada: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [16] O. Kayode, "WAVELET TRANSFORM IN THE DETECTION OF ELECTRICAL POWER QUALITY DISTURBANCES," *Int. J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 3, no. 2305–8269, pp. 22–31, 2013.
- [17] P. J. Seymour, "Los siete tipos de problemas en el suministro eléctrico," *American Power Conversion*, pp. 2–25, 2005.
- [18] A. Alzate, "Análisis comparativo de algunas teorías en el dominio de la frecuencia para la detección de distorsiones en sistemas eléctricos de potencia," *Univ. Tecnológica Pereira*, no. 0122–1701, pp. 60–65, 2008.
- [19] R. Lara, "Generación de Armónicos y sus Efectos en Redes Eléctricas," 2014.

- [20] G. Bacino and J. R. Sánchez, “ANÁLISIS DE TRANSITORIOS Y ARMÓNICOS UTILIZANDO LA TRANSFORMADA WAVELET.”
- [21] D. Eduardo and A. Carrera, “Implementación de la Transformada de Wavelet para medición de los diferentes tipos de perturbaciones en el Laboratorio de Maquinas Eléctricas,” 2014.
- [22] C. Niño, “Implementación de una toolbox básica para tratamiento de señales con wavelets en un procesador digital de señal,” 2004.
- [23] L. De Andrade and T. P. De Leão, “Fault Location for Transmission Lines Using Wavelet,” vol. 12, no. 6, pp. 1043–1048, 2014.
- [24] S. Nath, A. Dey, and A. Chakrabarti, “Detection of Power Quality Disturbances using Wavelet Transform,” vol. 3, pp. 750–754, 2009.
- [25] V. Kumar, S. K. Gawre, and T. Kumar, “Power Quality Analysis Using Wavelet Transform : A Review,” *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 2319–8753, pp. 130–136, 2014.
- [26] L. A. Barford, R. S. Fazio, and D. R. Smith, “An Introduction to Wavelets,” *Instruments and Photonics Laboratory*, vol. HPL-92–124, pp. 1–22, 1992.
- [27] R. Ignacio and D. García, “Análisis Wavelet aplicado a la medida de Armónicos, Interarmónicos y Subarmónicos en Redes de Distribución de Energía Eléctrica,” 2006.
- [28] M. Kezunovic and Y. Liao, “A Novel Software Implementation Concept for Power Quality Study,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 17, no. 2, pp. 544–549, 2002.
- [29] J. Barros, R. I. Diego, and M. de Apráiz, “Applications of wavelets in electric power quality: Voltage events,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 88, pp. 130–136, Jul. 2012.
- [30] S. Kouro, R. Rodrigo, and A. A. De Fourier, “Tutorial introductorio a la Teoría de Wavelet,” *Técnicas Modernas en Automática*, pp. 1–8, 2002.
- [31] A. Galli, “Exploring the Power of Wavelet Analysis,” *IEEE Comput. Appl. Power*, no. 0598–0156, pp. 37–41, 1996.
- [32] M. Vetterli, “Wavelets and Filter Banks: Theory and Design,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 40, no. 9, pp. 2207–2231, 1992.