



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPTO. INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

“ESTUDIO DE UN MÉTODO MATEMÁTICO PARA DETECTAR, LOCALIZAR Y CLASIFICAR EVENTOS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA”

Alvaro Isaías Acuña Avila

SEMINARIO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO DE EJECUCIÓN EN ELECTRÓNICA

CONCEPCIÓN – CHILE
AÑO 2017



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPTO. INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**“ESTUDIO DE UN MÉTODO MATEMÁTICO PARA
DETECTAR, LOCALIZAR Y CLASIFICAR EVENTOS
DE CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA”**

Alvaro Isaías Acuña Avila

DOCENTE PATROCINANTE
John Correa Toloza

DOCENTE ADJUNTO O CORRECTOR
Gustavo Sanhueza Garrido

*“Caí con todo el peso,
pero si es fuerte la caída,
más importante será mi
regreso...”*

Me Vieron Cruzar-Calle 13

ÍNDICE

LISTA DE TABLAS	6
NOMENCLATURA.....	9
ABREVIACIONES	9
RESUMEN.....	10
OBJETIVO PRINCIPAL	11
OBJETIVOS ESPECÍFICO	11
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	12
CAPÍTULO 1. TRANSFORMADA WAVELET.....	13
INTRODUCCIÓN	13
ANÁLISIS DE LA SEÑAL TIEMPO-FRECUENCIA.....	14
1.1 Transformada de Fourier.....	14
1.2 Transformada de Fourier de Tiempo Reducido o STFT.....	18
1.3 Transformada Wavelet Continua (CWT).....	21
1.4 Variables de Translación y Escala de la Wavelet Madre.....	24
1.5 Transformada Wavelet Discreta (TWD).....	28
1.6 Análisis Multiresolución (AMR o) y Algoritmo DWT Rápido.....	29
CAPÍTULO 2. ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LOS ESTANDARES IEEE DE LA CALIDAD Y MONITOREO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.....	34
INTRODUCCIÓN	34
CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA	35
ESTÁNDARES DE CALIDAD DE PRODUCTO ELÉCTRICO.....	35
2.1 Armónicas de Corriente	36
2.2 Fluctuaciones de Tensión.....	37
2.3 Severidad del Flicker	38
2.4 Cargas Desequilibradas.....	39
SISTEMA DE MONITOREO DEL PRODUCTO ELÉCTRICO	41
EVENTOS ELÉCTRICOS.....	44
2.5 Transitorio Tipo Impulso	44
2.6 Transitorio Oscilatorio	44
2.7 Variaciones de Corta Duración	46
2.7.1 Sag.....	46
2.7.2 Swell	47
2.7.3 Interrupción de Corta Duración.....	48
2.8 Variaciones de Larga Duración.....	48
2.8.1 Sobretensión.....	49
2.8.2 Baja Tensión.....	50
2.8.3 Interrupciones Sostenidas	50
2.9 Desequilibrio de Voltaje	50
2.10 Distorsión de la Forma de Onda	51
2.10.1 Offset DC.....	51
2.10.2 Armónicos	52
2.10.3 Interarmónicos	52

2.10.4 Hendiduras (<i>Notching</i>).....	53
2.10.5 Ruido	53
2.11 Flicker	53
2.12 Variaciones de Frecuencia en el Sistema de Potencia	54
CAPÍTULO 3. DETECCIÓN, LOCALIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS EVENTOS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.....	55
INTRODUCCIÓN	55
RUTINA DE CÁLCULO.....	56
3.1 Selección de la Wavelet Madre a utilizar.....	56
3.2 Cálculo de la energía de una señal.....	56
3.3 Cálculo de la desviación de la energía de una señal.....	57
DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE EVENTOS MEDIANTE LA SECUENCIA DE DETALLES.....	58
DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE EVENTOS MEDIANTE LA ENERGÍA DE LOS COEFICIENTES.....	64
DESCOMPOSICIÓN, ENERGÍA DE LOS COEFICIENTES WAVELET Y CÁLCULO DE LA DESVIACIÓN DE LOS NIVELES DE DETALLE DE UNA FTE SWITCHING	78
CONCLUSIONES	87
BIBLIOGRAFÍA	89
ANEXOS	90

Lista de Tablas

<i>Tabla 2.1: Clasificación de las armónicas de corriente tomadas de la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio, Septiembre 2015, Santiago de Chile.</i>	36
<i>Tabla 2.2: Armónicas de Tensión tomadas de la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio, Septiembre 2015, Santiago de Chile.</i>	40
<i>Tabla 2.3: Fenómenos Eléctricos Norma IEEE Estándar 1159 1995.</i>	43
<i>Tabla 2.4: Tolerancia para las Tensiones de acuerdo a la Norma ANSI C84.1.</i>	49
<i>Tabla 3.1: Energía de los coeficientes wavelet de una señal sinusoidal pura.</i>	71
<i>Tabla 3.2: Cálculo de la desviación de energía de un evento Sag.</i>	72
<i>Tabla 3.3: Cálculo de la desviación de energía de un evento Swell.</i>	73
<i>Tabla 3.4: Cálculo de la desviación de energía de un evento Flicker.</i>	74
<i>Tabla 3.5: Cálculo de la desviación de energía de un evento Oscilatorio a Baja Frecuencia.</i>	75
<i>Tabla 3.6: Cálculo de la desviación de energía de un evento armónico.</i>	76
<i>Tabla 3.7: Cálculo de la desviación de energía de una corriente contaminada Fuente Switching.</i>	80
<i>Tabla 3.8: Cálculo de la desviación de energía de una corriente no contaminada.</i>	83
<i>Tabla 3.9: Cálculo de la desviación de energía de una Tensión de Línea.</i>	86

Lista de Figuras

Figura 1. 1:Señales de Tiempo.....	15
Figura 1. 2:Transformada de Fourier señales de ejemplo.....	17
Figura 1. 3:Comparación de la resolución Tiempo-Frecuencia.....	18
Figura 1. 4:Espectrogramas STFT.....	20
Figura 1. 5:Comparación de las ventanas de los distintos métodos a) STFT y b) CWT.....	22
Figura 1. 6:Ejemplo de funciones Wavelet Madre más usadas en la práctica.....	23
Figura 1. 7:Plano Tiempo-Escala.....	24
Figura 1. 8:Versiones escaladas y trasladadas de la Wavelet Madre db4.....	25
Figura 1. 9:CWT de la señal $f_1(t)$	26
Figura 1. 10:CWT de la señal $f_2(t)$	27
Figura 1. 11:Explicación AMR.....	29
Figura 1. 12:Ejemplo de descomposición AMR.....	30
Figura 1. 13:DWT de la señal cuadrada $f_1(t)$	32
Figura 1. 14:DWT de la señal $f_2(t)$ con perturbación.....	33
Figura 2. 1:Transitorio de impulso de corriente originada por un rayo (IEEE 1159 1995).....	44
Figura 2. 2:Transitorio oscilatorio causado por el fenómeno Back to Back en la conmutación de condensadores (IEEE 1159 1995).....	45
Figura 2. 2. 3:Transitorio oscilatorio de baja frecuencia causado por la energización de bancos de condensadores (IEEE 1159 1995).....	45
Figura 2. 2. 4:Transitorio oscilatorio de baja frecuencia causado por la ferorrresonancia de un transformador sin carga (IEEE 1159 1995).....	46
Figura 2. 3:Depresiones de tensión (IEEE 1159 1995).....	47
Figura 2. 4:Swell (IEEE 1159 1995).....	47
Figura 2. 5:Interrupción momentánea debido a un incidente y a una operación subsecuente del reconectador (recloser) tomado de la Norma IEEE 1159 1995.....	48
Figura 2. 6:Sobretensión superior al 110% del valor de voltaje nominal con una duración superior a 1 minuto.....	49
Figura 2. 7:Tendencia del desequilibrio de un alimentador diferencial.....	51
Figura 2. 8:Señal con distorsión armónica (NTC 5000, 02).....	52
Figura 2. 9:Hendidura de tensión causada por la operación del convertidor.....	53
Figura 2. 10:Ejemplo de la fluctuación de voltaje causada por la operación de un Horno de arco.....	54
Figura 3. 1:Descomposición de un hueco de tensión “Sag” en 4 niveles de detalle utilizando la función Db4.....	59
Figura 3. 2:Descomposición de un “Swell” en 4 niveles de detalle utilizando la función Db4.....	60
Figura 3. 3:Descomposición de un “Flicker” en 4 niveles de detalle utilizando la función Db4.....	61
Figura 3. 4:Descomposición de un evento oscilatorio de baja frecuencia en 4 niveles de detalle utilizando la función Db4.....	62
Figura 3. 5:Descomposición armónica de una señal monofásica de corriente característica de una carga no lineal en 4 niveles de detalle utilizando la función Db4.....	63
Figura 3. 6:Vector característico para diferentes perturbaciones que afectan la red eléctrica ..	64
Figura 3. 7:Evento Sag y su energía por nivel de detalle.....	65
Figura 3. 8:Evento Swell y su nivel de energía por nivel de detalle.....	66
Figura 3. 9:Evento Flicker y su nivel de energía por nivel de detalle	67

<i>Figura 3. 10:Evento Transitorio de baja frecuencia y su nivel de energía por nivel de detalle. .</i>	<i>68</i>
<i>Figura 3. 11:Corriente característica de una carga monofásica no lineal y su respectivo nivel de energía por cada nivel de detalle .</i>	<i>69</i>
<i>Figura 3. 12:Energía de los coeficientes wavelet por cada nivel de detalle .</i>	<i>71</i>
<i>Figura 3. 13:Cálculo de la desviación de energía por cada nivel de detalle de un evento Sag ...</i>	<i>72</i>
<i>Figura 3. 14:Cálculo de la desviación de energía por cada nivel de detalle de un evento Swell .</i>	<i>73</i>
<i>Figura 3. 15:Cálculo de la desviación de energía por cada nivel de detalle de un evento Flicker .</i>	<i>74</i>
<i>Figura 3. 16:Cálculo de la desviación de energía por cada nivel de detalle de un evento Oscilatorio de Baja Frecuencia.</i>	<i>75</i>
<i>Figura 3. 17:Cálculo de la desviación de energía por cada nivel de detalle de una señal de corriente característica monofásica no lineal .</i>	<i>76</i>
<i>Figura 3. 18:Descomposición a nivel de detalle 4 de una señal de corriente contaminada utilizando la función Db4.</i>	<i>78</i>
<i>Figura 3. 19:Energía de cada nivel de detalle de una corriente Fuente SWITCHING.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 3. 20:Cálculo de la desviación de energía de una señal de corriente contaminada de una FTE SWITCHING.</i>	<i>80</i>
<i>Figura 3. 21:Descomposición de 4 niveles de detalle de una señal de corriente no contaminada.</i>	<i>81</i>
<i>Figura 3. 22:Coeficientes de 7 niveles de energía de una señal de corriente no contaminada</i>	<i>82</i>
<i>Figura 3. 23:Cálculo de la desviación de 7 niveles de detalles de una señal de corriente no contaminada.</i>	<i>83</i>
<i>Figura 3. 24:Descomposición de 4 niveles de detalle de una tensión de línea.</i>	<i>84</i>
<i>Figura 3. 25:Coeficientes de energía de 7 niveles de detalle de una señal de una tensión de línea.</i>	<i>85</i>
<i>Figura 3. 26:Cálculo de la desviación de energía de 7 niveles de detalle de una tensión de línea.</i>	<i>86</i>

Nomenclatura

Abreviaciones

Mayúsculas

SEP	: Sistema Eléctrico de Potencia.
FFT	: Transformada de Fourier.
TW	: Transformada Wavelet.
TF	: Transformada de Fourier.
NT SyCS	: Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio.
SI	: Sistema Interconectado.
CDEC	: Centro de Despacho Económico de Carga.
HVDC	: Corriente Continua de Alta Tensión.
DO	: Dirección de Operación del CDEC.
CDC	: Centro de Despacho y Control del CDEC.
SITR	: Sistema de Información en Tiempo Real.
EDAC	: Esquema de Desconexión Automática.
EDAG	: Esquema de Desconexión Automática de Generación.
ERAG	: Esquema de Reducción Automática de Generación.
PDCE	: Plan de Defensa Contra Contingencias Extremas.
CWT	: Transformada Wavelet Continua.
DWT	: Transformada Wavelet Discreta.
AMR	: Análisis Multiresolución.
DAC	: Conversor Análogo Digital.

RESUMEN

En el presente seminario de título se estudia el uso de la transformada wavelet para implementar computacionalmente un método que permite determinar los eventos de calidad que se producen en la red de energía a partir de un procesamiento digital de la señal. Los eventos de calidad se simulan en un plano conjunto tiempo-frecuencia, siendo una ventaja en comparación a la transformada de Fourier que solo entrega información de la señal en el dominio de la frecuencia. Este análisis de señales eléctricas permite detectar, localizar y clasificar los eventos de calidad de la energía eléctrica para mantener la estabilidad en el suministro eléctrico.

Este seminario de título tiene gran relevancia, ya que permite entregar conocimientos para una nueva propuesta matemática en el procesamiento de señales, especialmente en el área eléctrica. Este nuevo método entrega información en el dominio del tiempo en un cierto ancho de banda en el cual, se visualiza las posibles perturbaciones en los eventos de calidad para prevenir fallas en los dispositivos eléctricos.

El aporte de este seminario ante los problemas que ocurren en la red eléctrica, se propone diseñar en Matlab un programa en base a la transformada wavelet que permite detectar y localizar para luego clasificar los eventos de calidad en una planilla Excel a partir del análisis de los coeficientes de energía de la señal eléctrica e identificar los tiempos de ocurrencia de los fenómenos que puedan producir fallas en el sistema de energía, obteniendo resultados satisfactorios al momento de analizar una señal.

OBJETIVO PRINCIPAL

- Detección, localización y clasificación de eventos de calidad de la energía eléctrica aplicando un método matemático.

OBJETIVOS ESPECÍFICO

- Estudiar la transformada Wavelet.
- Diseñar un algoritmo en MATLAB para detectar y localizar eventos de la calidad de energía a partir de la simulación de señales eléctricas.
- Clasificación de eventos en base a los coeficientes de energía utilizando una planilla EXCEL.

INTRODUCCIÓN GENERAL

Actualmente en Chile y el mundo se investiga lo que se denomina la red de energía eléctrica inteligente. Uno de los principales componentes son los monitores inteligentes, que detectan las posibles perturbaciones que provocan fallas en los dispositivos eléctricos y electrónicos. En la red de energía se conectan cargas lineales, las cuales, forman señales estacionarias en la que no varía su amplitud y frecuencia, obteniendo señales puras. Del mismo modo se conectan cargas no lineales que son cargas que varían en el tiempo produciendo señales no estacionarias, en la cual se encuentran los eventos de calidad de energía eléctrica. Este seminario de título esta enfocado en el estudio de las señales no estacionarias, donde la transformada wavelet es una herramienta matemática que permite el análisis de este tipo de señales, entregando una representación de tiempo-frecuencia de forma simultánea. Para analizar este tipo de señales se desarrolla un algoritmo en MATLAB que permite localizar y detectar a través de una representación simultánea de tiempo-frecuencia las posibles perturbaciones que ocurren en la red de energía. Este algoritmo entrega los coeficiente de energía de la señal analizada, de los cuales, se trabajan en una planilla EXCEL para obtener una representación en un gráfico lineal que permite al usuario visualizar de manera práctica la clasificación del tipo de evento que ocurre en la red de energía.

El capítulo 1 define de forma general los principales métodos matemáticos que se utilizan en la actualidad para el procesamiento de señales. Se estudia la transformada Wavelet que es una herramienta matemática que permite el análisis de señales no estacionarias obteniendo una representación de tiempo-frecuencia de forma simultánea. Para entender de mejor manera esta herramienta se analiza la Transformada de Fourier y la Transformada de tiempo reducido o STFT con sus principales características.

En el capítulo 2 se estudia y analiza los estándares IEEE de la calidad y monitoreo de la energía eléctrica basado en la NT chilena, la cual, hace referencia a normas internacionales del producto eléctrico. Se clasifican los distintos eventos eléctricos que se producen en la red de energía con sus respectivas características técnicas.

El capítulo 3 se detectan, localizan y clasifican los eventos de calidad de la energía eléctrica utilizando la Transformada Wavelet db4, en el que se propone un método de cálculo realizando un algoritmo en la plataforma Matlab. Se realizan las simulaciones de los eventos de calidad. Se muestra paso a paso como es posible detectar, localizar y clasificar el tipo de perturbación en determinado evento eléctrico, luego de comparan estos algoritmos a partir de las muestras de una señal eléctrica real , para así poder estimar a que tipo de evento eléctrico pertenece.

CAPÍTULO 1. TRANSFORMADA WAVELET.

INTRODUCCIÓN

Al momento de representar una señal, ésta es mostrada en el dominio del tiempo $f(t)$ o en función del dominio de la frecuencia mediante la Transformada de Fourier $F(w)$. Estos métodos funcionan correctamente cuando son señales periódicas, pero en caso que ocurra una perturbación en la señal original, el análisis con la TF pierde toda la información temporal de la variación de la anomalía.

Para contrarrestar esta situación se utiliza la TW, ya que es una herramienta matemática que permite realizar un análisis instantáneo de tiempo-frecuencia para cada punto de la señal, ya que aísla sus componentes transitorios y detecta los tiempos en que se producen las perturbaciones de la señal no periódica en la energía eléctrica.

Para comprender manera simple la TW se comienza explicando la TF, para luego proceder con el análisis de la Transformada Wavelet y así poder detectar y localizar eventos de calidad de la energía eléctrica.

ANÁLISIS DE LA SEÑAL TIEMPO-FRECUENCIA

1.1 Transformada de Fourier

El matemático francés Joseph Fourier expuso que “ toda señal periódica, sin importar cuán complicada parezca, puede ser reconstruida a partir de sinusoides cuyas frecuencias son múltiplos enteros de una frecuencia fundamental, eligiendo amplitudes y fases adecuadas”.

Lo anterior es de mucha utilidad para las áreas de ingeniería porque la información contenida en el espectro de señales es relevante.

Dicho lo anterior, la TF de una señal periódica cualquiera $f(t)$ es:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) * e^{i\omega t} * dt \quad (1.1)$$

Donde:

$f(t)$: Señal analizada en función del tiempo.

$e^{i\omega t}$: Componente exponencial.

ω : Frecuencia angular $2\pi f$ (rad/s).

f : Frecuencia (Hz).

Al observar la ecuación (1.1) y teniendo en cuenta la identidad de Euler (1.2) se puede comprender de manera simple el porque es posible representar la señal original mediante senos y cosenos, ya que se aplica la identidad a la componente exponencial.

$$e^{i\omega t} = \cos(\omega t) + i\text{sen}(\omega t) \quad (1.2)$$

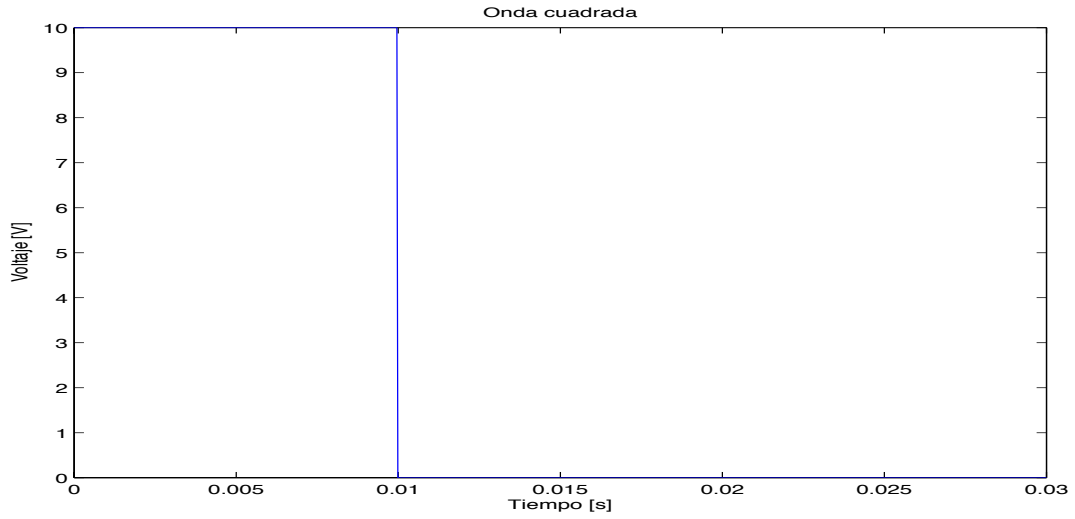
Otro punto a analizar de la ecuación (1.1) es que la información que se obtiene es la relacionada con el contenido de frecuencia de la señal. Para el caso en donde la señal analizada es estacionaria (periódica) y tiene un contenido de frecuencia que no varía en el tiempo, esta herramienta es útil, pero para casos donde se tienen fallas o distorsiones transitorias, no lo es, porque no entrega información en el dominio del tiempo.

En las figuras 1.1 y 1.2 se observa la señal para cada caso con sus espectros armónicos en el dominio de la frecuencia. Se muestra una señal de voltaje de onda cuadrada, una señal de voltaje sinusoidal con perturbación y una señal de corriente característica de una carga monofásica no lineal.

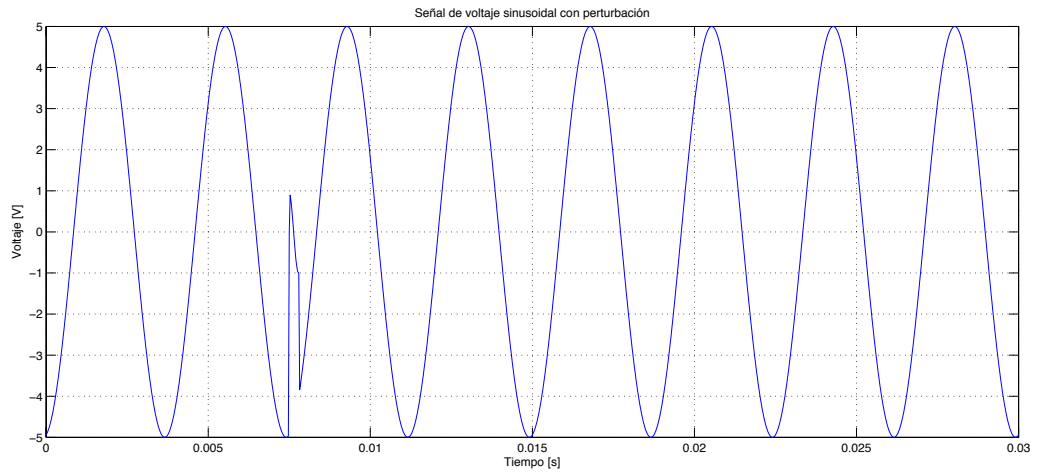
$$f_1(t) = \begin{cases} 10 & \text{si } 0 < t < 0.01 \text{ (s)} \\ 0 & \text{si } 0.01 < t < 0.03 \text{ (s)} \end{cases}$$

$$f_2(t) = 5 \cdot \sin(w \cdot 8 \cdot t + 30)(v)$$

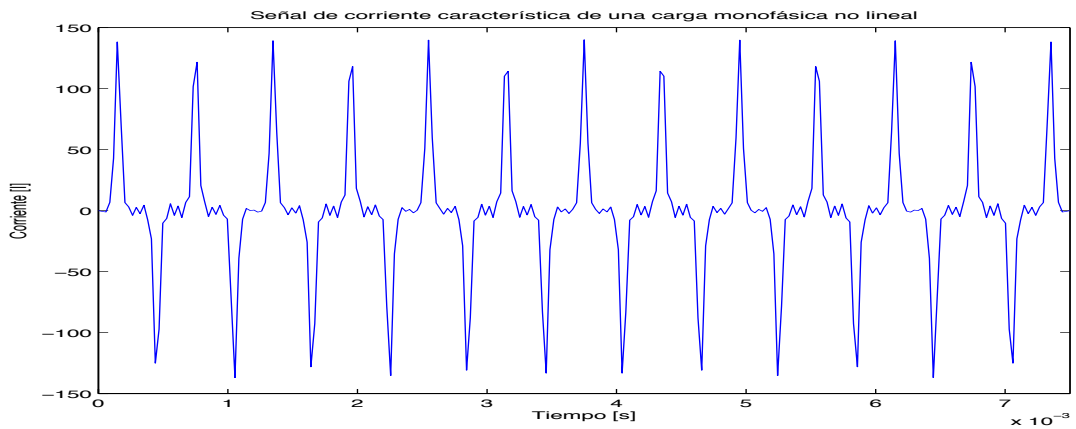
$$f_3(t) = 50\sqrt{2} \cdot \sin(2\pi \cdot 50 \cdot t) - 40\sqrt{2} \cdot \sin(2\pi \cdot 150 \cdot t) + 25\sqrt{2} \cdot \sin(2\pi \cdot 250 \cdot t) - 15\sqrt{2} \cdot \sin(2\pi \cdot 350 \cdot t) + 10\sqrt{2} \cdot \sin(2\pi \cdot 450 \cdot t) \text{ (A)}$$



(a)

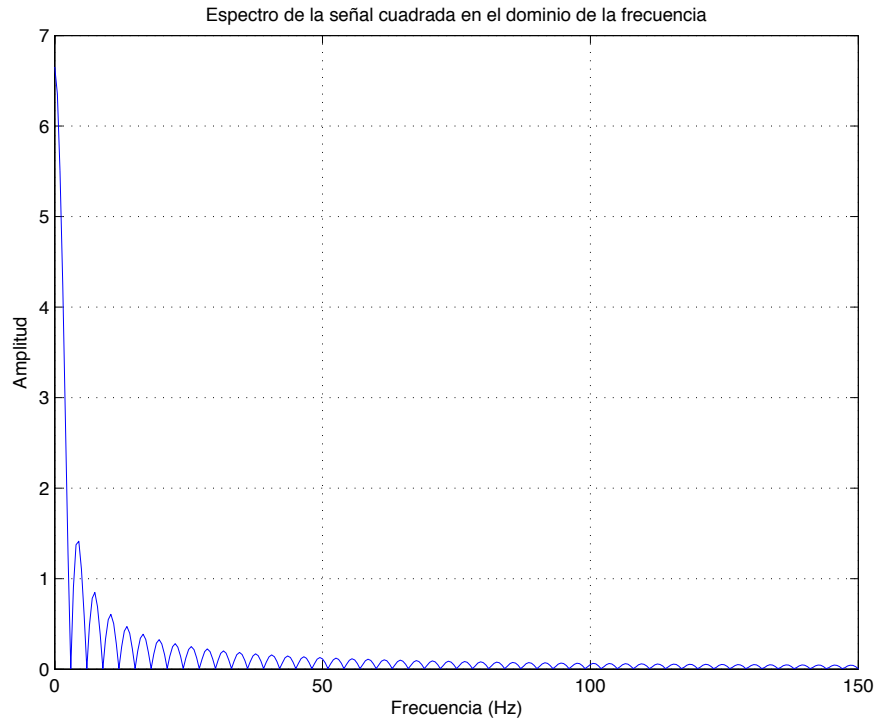


(b)

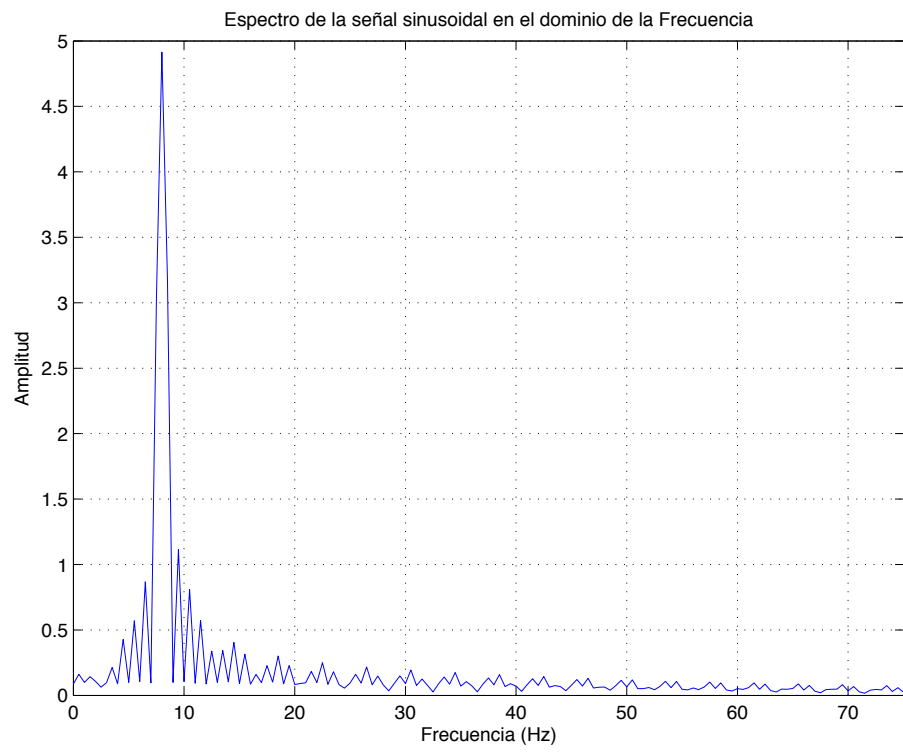


(c)

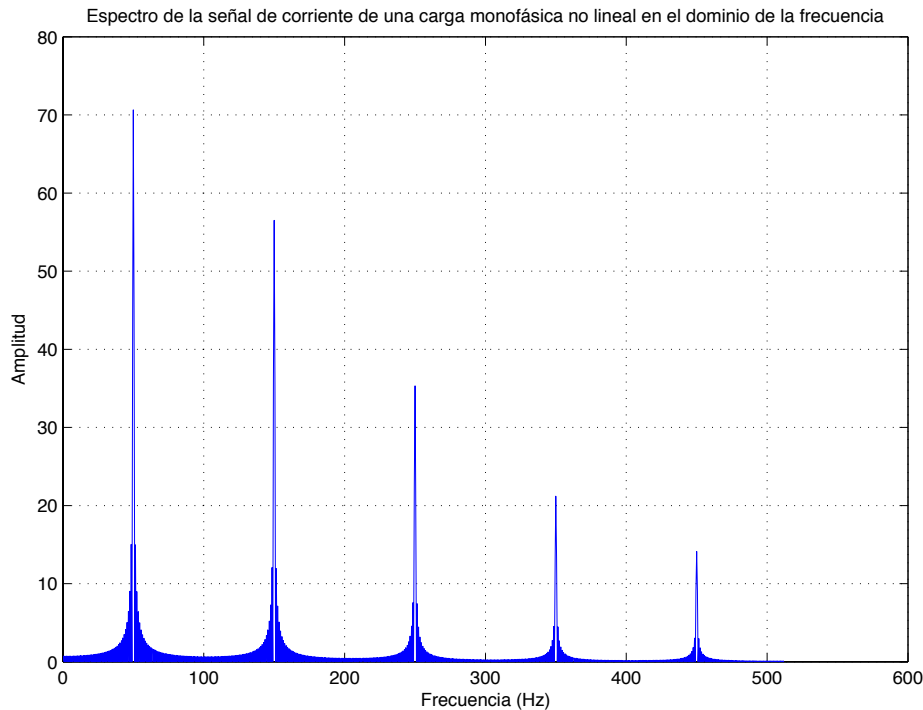
Figura 1.1: Señales de Tiempo.
 (a) Gráfica f_1 (b) Gráfica f_2 (c) Gráfica f_3



(a)



(b)



(c)

Figura 1. 2: Transformada de Fourier señales de ejemplo.

(a) Espectro f_1 (b) Espectro f_2 (c) Espectro f_3

En la figura 1.1 se muestra tres señales $f(t)$ en función del tiempo, a las cuales se le aplica la TF para visualizar su contenido armónico. En la figura 1.2.a se observa el espectro armónico de la señal de voltaje en el dominio de la frecuencia, en la cual, la mayor cantidad de amplitud esta contenida la frecuencia fundamental de aproximadamente 33.3 Hz de la señal de voltaje f_1 .

En el espectro armónico de la figura 1.2.b se muestra la mayor cantidad de amplitud donde se encuentra la frecuencia fundamental de 8 Hz con una fase de 30° .

Del mismo modo en la figura 1.2.c se representa el espectro armónico de la señal real de corriente característica monofásica no lineal hasta el noveno armónico con su respectiva amplitud.

En las señales f_1 , f_2 , y f_3 se puede corroborar que al aplicar la TF se obtiene el espectro en el dominio de la frecuencia, pero no permite identificar el instante de tiempo en el que ocurre una perturbación como la que ocurre en la señal $f_2(t)$, ya que solo se muestra las frecuencia dominante. En este caso la frecuencia fundamental de la señal sinusoidal es de 8 (Hz) con una fase de 30° .

Expuesto lo anterior y dado que la TF no permite localizar y/o identificar el instante de tiempo en el que ocurre la perturbación, es que se planteó la Transformada Corta de Fourier o STFT, que se analiza a continuación.

1.2 Transformada de Fourier de Tiempo Reducido o STFT.

Proviene del inglés Short-Time Fourier Transform y da solución al problema generado por la TF. Esta transformada permite analizar las señales no estacionarias en el tiempo mediante un proceso llamado ventanamiento o ventana, que consiste en dividir una señal $f(t)$ en pequeños intervalos de tiempo, en el que se asume que para cada segmento la señal analizada es estacionaria. Por lo tanto, es posible calcular la TF para cada período de tiempo. En la figura 1.3 se observa una representación de dos tipos de ventanas tiempo-frecuencia.

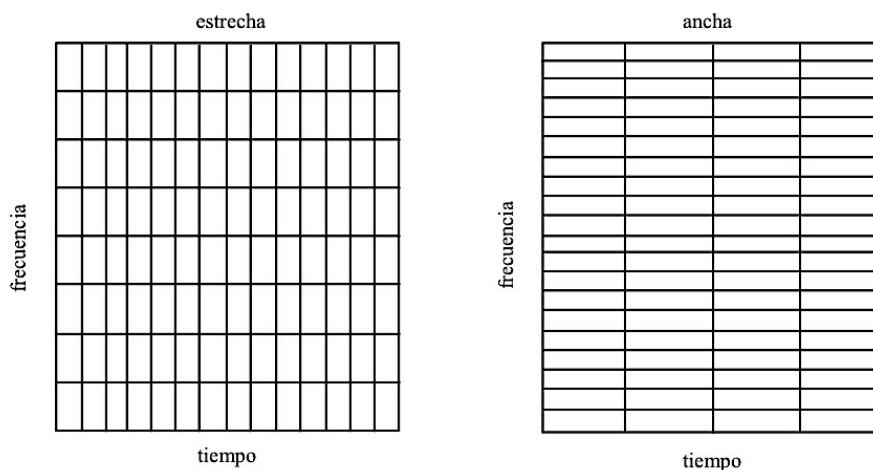


Figura 1. 3: Comparación de la resolución Tiempo-Frecuencia.

Para dividir la señal en pequeños instantes de tiempo se utiliza la función tiempo-ventana $g(t)$, que tiene la particularidad de ser diferente de cero en un breve instante de tiempo, siendo el ancho el largo de cada segmento de la señal. Con esta función ventana, se enmarca una porción de la señal original $f(t)$, la cual se considera que puede estar en estado estacionario, por tanto es posible calcular la TF. Una vez obtenido el espectro de frecuencia en la porción de la señal, se traslada la función ventana hasta que no se traslape con la anterior, repitiendo el análisis y cálculo hasta cubrir totalmente toda la señal $f(t)$.

De la figura 1.3 se infiere que si se ensancha la ventana en el tiempo se estrecha en frecuencia, por lo tanto la STFT no permite que el ensanchamiento sea simultáneo por el principio de incertidumbre de Heisemberg definido más adelante.

La forma matemática de lo explicado anteriormente es la siguiente:

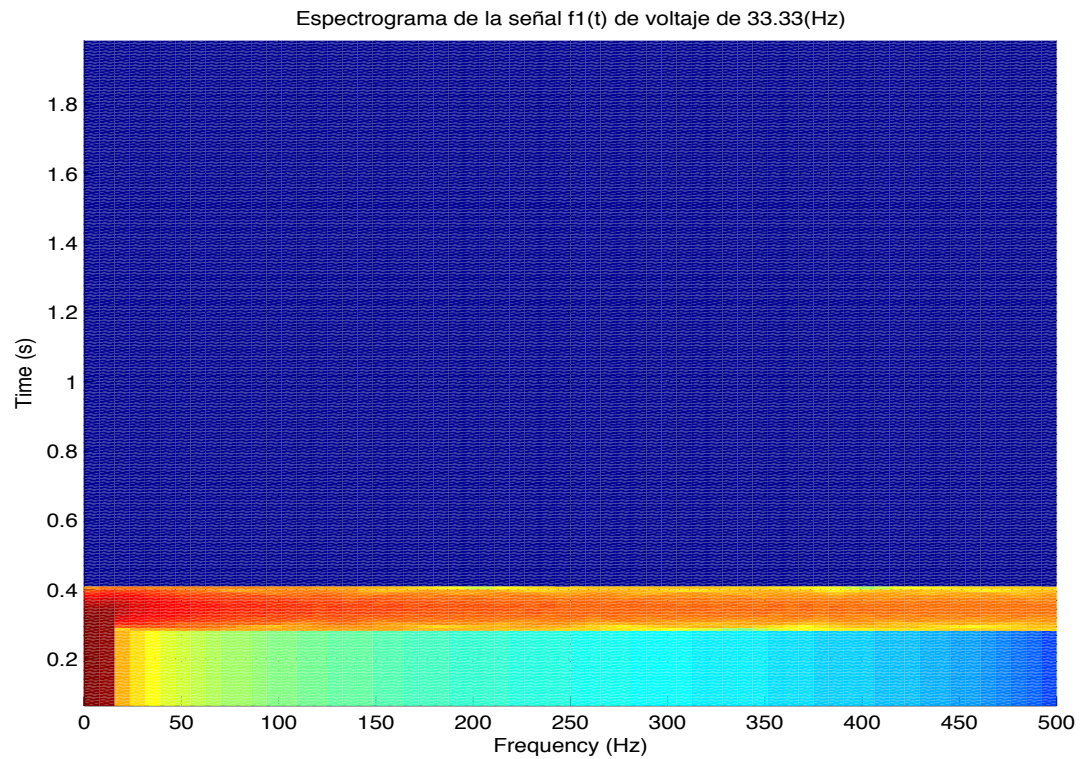
$$STFT(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot g^*(t - \tau) \cdot e^{-i\omega t} \cdot dt \quad (1.3)$$

Donde se tiene que:

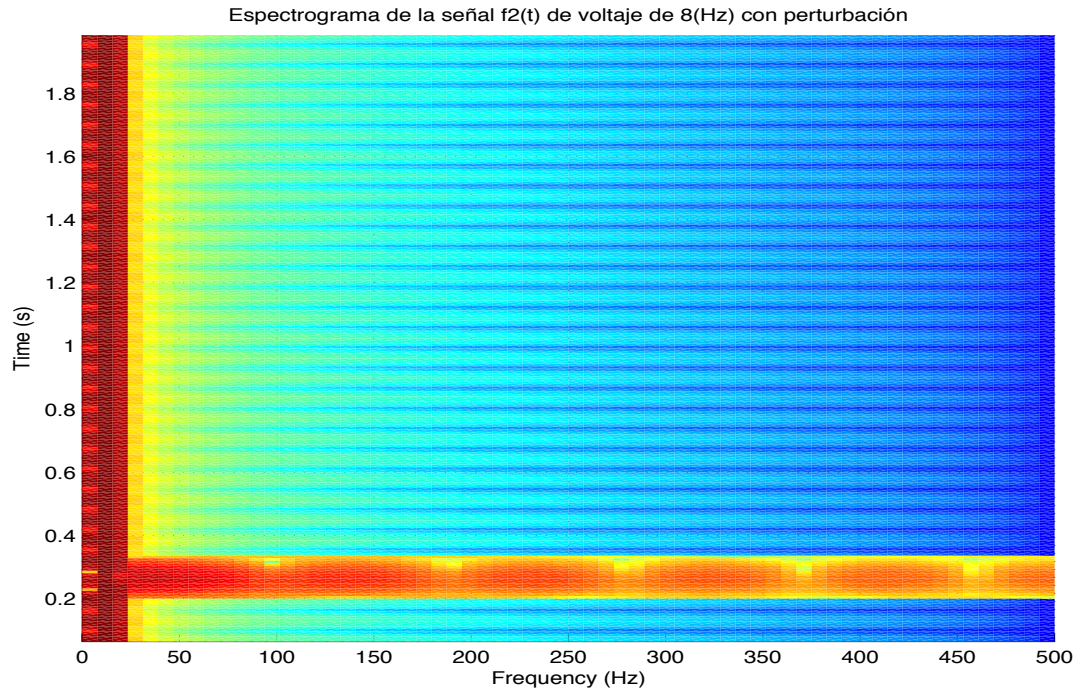
- $f(t)$: Señal original analizada.
- g^* : Función de ventana conjugada.
- τ : Translación en el tiempo de la función ventana.
- $e^{i\omega t}$: Componente exponencial.

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$: Frecuencia angular (rad/s).

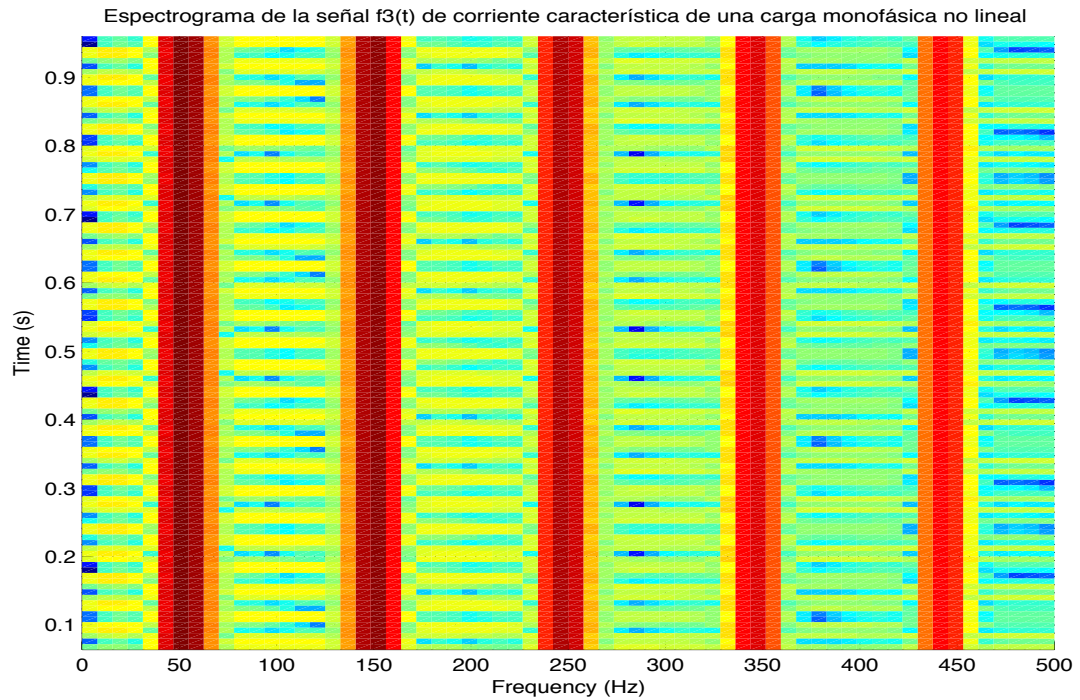
A continuación se observa que en la figura 1.4 se aplica la STFT a las señales f_1 , f_2 y f_3 mostrando su espectrograma de tiempo (s) vs frecuencia (Hz). Esto se hace para visualizar si en la señal original existe una perturbación y así, poder corroborar si la STFT es una buena herramienta para monitorear, identificar y localizar las perturbaciones que pueden provocar fallas en los sistemas eléctricos y electrónicos.



(a)



(b)



(c)

Figura 1. 4: Espectrogramas STFT.

(a) Espectrograma f_1 (b) Espectrograma f_2 (c) Espectrograma f_3

En la figura 1.4.a se muestra el espectrograma de la señal $f_1(t)$, donde se observa que efectivamente al aplicar la STFT a la señal $f_1(t)$ hay una representación de tiempo vs frecuencia, sin embargo, no es posible identificar de manera exacta el tiempo y frecuencia en el que ocurre el cambio de la señal cuadrada de voltaje.

El espectrograma de la figura 1.4.b, se observa que existe una perturbación en el tiempo, pero al igual que en la figura 1.4.a no se puede determinar de manera exacta porque al determinar el tipo de ventana de la STFT, se debe llegar a un equilibrio entre el tiempo y frecuencia para así tener una buena resolución que muestre de forma clara lo que ocurre en el espectrograma de la señal $f_2(t)$.

En la figura 1.4.c se observa de manera clara el contenido armónico de la señal de corriente monofásica sin ninguna perturbación o cambio de corriente en el dominio del tiempo.

Realizando un análisis comparativo de las figuras 1.4, se observa que al ser señales estacionarias o no estacionarias, la STFT entrega una visión del espectrograma en el dominio de la frecuencia y en el dominio del tiempo de forma simultánea, presentes en la señal original, pero no es posible determinar de manera exacta y clara el instante de tiempo en el que ocurre alguna perturbación o cambio en la amplitud de la corriente o voltaje. Sin embargo pese a lo anterior, entrega una buena información del valor del espectro armónico para cada instante de frecuencia como es en el caso de la señal de corriente monofásica $f_3(t)$ cuando la elección de la ventana STFT es adecuada, pero al aumentar la resolución en el dominio de la frecuencia, disminuye la resolución en el dominio del tiempo debido al principio de incertidumbre de Heisemberg.

El Principio de Incertidumbre de Heisemberg establece que no se puede determinar de manera simultánea y precisa ciertos pares de variables físicas, siendo esto válido para el caso de frecuencia y el tiempo. Por lo tanto, mientras mayor es la resolución en el tiempo y menor la longitud de la ventana, peor es la frecuencia que se obtiene, y viceversa. En otras palabras el problema que presenta la STFT es que no es capaz de entregar la representación exacta de tiempo-frecuencia de una señal, por lo que no se puede saber que perturbaciones están presentes en ciertos instantes de tiempo. Lo que si es posible es conocer los intervalos de tiempo en los cuales están presentes determinadas bandas de frecuencia.

Anteriormente para el caso de la TF, se introdujo la STFT para mejorar sus aplicaciones, a continuación, para dar solución a estos problemas se introduce la transformada wavelet continua.

1.3 Transformada Wavelet Continua (CWT).

La transformada wavelet continua nace a partir de las limitantes de la STFT como una manera de superar el problema de resolución y es una herramienta que posibilita el análisis de señales no periódicas en el tiempo. Esta herramienta permite obtener una buena representación tiempo-frecuencia de forma simultánea, presentando en este contexto una solución al principio de Incertidumbre de Heisemberg. La CWT no evalúa la TF de las señales ventana y el ancho de la ventana es variable según el componente del espectro de frecuencia evaluado. (ver figura 1.5). Esta transformada permite representar una señal $f(t)$ en términos de versiones trasladadas y contraídas de alguna de las ondas estandarizadas más conocidas como la wavelet madre $\Psi(t)$ [1].

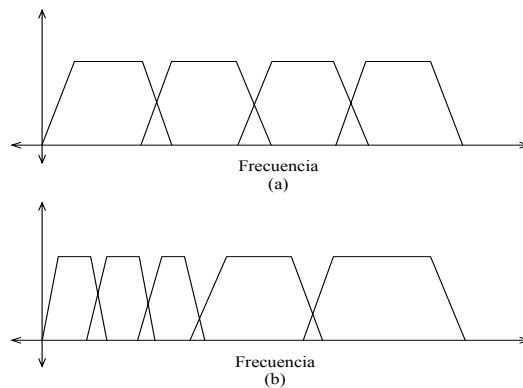


Figura 1. 5: Comparación de las ventanas de los distintos métodos a) STFT y b) CWT

En la figura 1.5 se observa la comparación de la STFT y CWT, donde se muestra la ventaja de aplicar la CWT porque el ancho de la ventana es variable, en cambio la STFT tiene el mismo ancho de la ventana en todo instante en el que se evalúa el componente del espectro de frecuencia.

Lo anterior se resume en las siguientes ecuaciones:

$$CWT(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \Psi_{a,b}^*(t) dt \quad (1.4)$$

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1.5)$$

En donde se tiene que:

- $f(t)$: Señal analizada.
- $\Psi(t)^*$: Wavelet Madre Conjugada.
- a : Factor de escala.
- b : Translación en el Tiempo de la Wavelet Madre.

En la ecuación (1.5), se muestra que la función Wavelet Madre depende exclusivamente de los parámetros a y b que controlan el ancho y posición en el tiempo de la función $\Psi(t)$.

En 1909 desde que Alfred Haar mencionara en su tesis la palabra wavelet varios autores han desarrollado diferentes tipos de ondículas con características diferentes. A continuación se muestran las más usadas en la práctica.

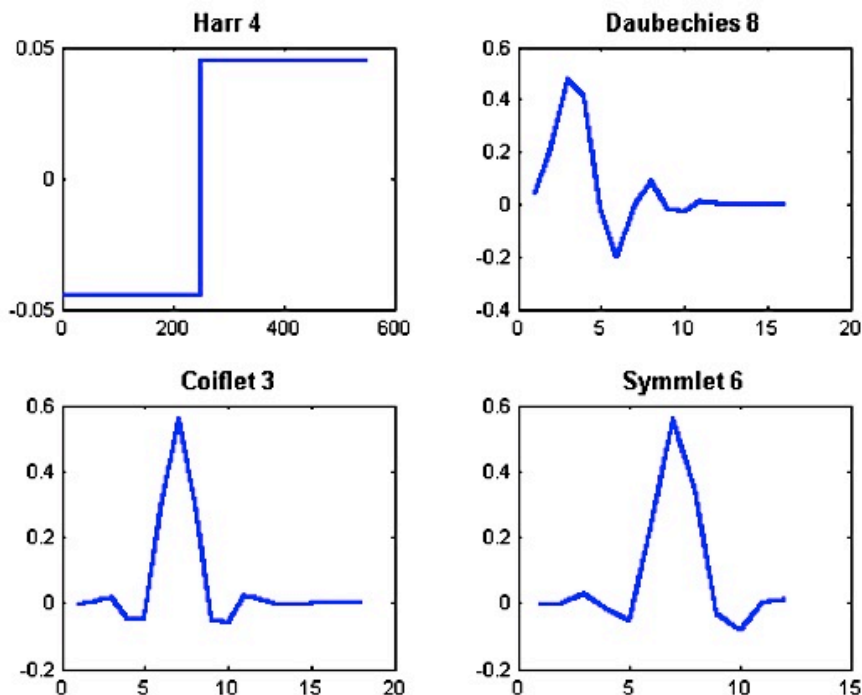


Figura 1. 6: Ejemplo de funciones Wavelet Madre más usadas en la práctica.

En la figura 1.6 se observan cuatro wavelet, la primera es la wavelet Haar y la más simple, de soporte compacto, es ortogonal y biortogonal, se aplica tanto para la DWT y CWT. Una wavelet biortogonal quiere decir que son pares de ondículas de las cuales se utiliza para la descomposición y reconstrucción de una señal. La wavelet Daubechies es la más utilizada en el análisis de las redes eléctricas, la db1 es idéntica a la wavelet Haar. Es ortogonal y biortogonal, de soporte compacto, se aplica tanto para la DWT como para la CWT. Se extiende desde la dB1 hasta la dB15. La wavelet Coiflet de denomina coifN donde N representa el orden de la ondícula, es ortogonal y biortogonal, de soporte compacto y se aplica tanto para la CWT y DWT.

La función Symmlet es ortogonal y biortogonal de soporte compacto y se aplica tanto para la CWT y DWT, son ondículas cercanas a la simetría obtenidas a partir de modificaciones de la wavelet db.

Para reconstruir la señal original $f(t)$, la función $\Psi(t)$ elegida debe cumplir con determinadas condiciones mínimas de admisibilidad, como por ejemplo tener media cero, es decir:

$$\Psi(0) = 0 \quad (1.6)$$

Donde $\Psi = \Psi(\omega)$ corresponde a la TF de $\Psi(t)$, por lo tanto se desprende que la función necesariamente debe ser una onda y tener valores positivos y negativos. Además $\Psi(t)$ debe decaer rápidamente cuando $\omega \rightarrow 0$, por lo tanto Ψ es una función ventana pasa banda en el dominio de la frecuencia ya que al menos se detiene en $f = 0$.

1.4 Variables de Translación y Escala de la Wavelet Madre.

La variable de escalamiento (o escala) " a ", es la compresión (o estiramiento) de la señal wavelet madre " Ψ ", con el fin de obtener información y analizar diferentes frecuencias de la señal $f(t)$. La variación de este parámetro permite modificar el ancho de banda de la Wavelet, pero no su forma.

Esta versión comprimida de la función wavelet madre se utiliza para satisfacer las demandas de altas frecuencias a baja escala, mientras que el estiramiento es en baja frecuencia con una alta escala, por lo tanto el ancho de la función ventana es variable y depende directamente del valor de f , es decir, para pequeños valores de " a " permite obtener información de $f(t)$ localizada en el dominio del tiempo " t ", sin embargo, si los valores son mayores se obtiene la información de $f(\omega)$ localizada en el dominio de la frecuencia. Por lo tanto, se puede concluir que para escalas pequeñas se obtiene una buena resolución en el tiempo, mientras que para escalas mayores se obtiene una mejor resolución en frecuencia (ver Figura 1.7).

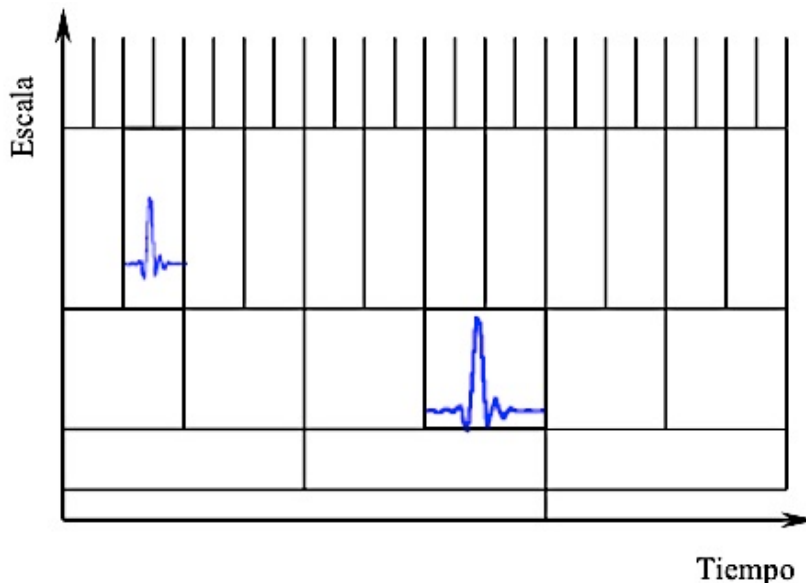


Figura 1. 7: Plano Tiempo-Escala.

En la figura 1.7 se muestra la representación tiempo-escala de la wavelet daubechies, por lo tanto, este tipo de onda parece ser el más adecuado para determinar variaciones instantáneas y puntuales de una señal $f(t)$. Este tipo de wavelet es la más indicada para el análisis de señales eléctricas debido a la facilidad de identificar eventos eléctricos.

Del párrafo anterior se puede inferir que la CWT es una representación gráfica en tiempo-escala, por lo tanto, mediante la definición de una constante $c > 0$, se puede realizar una representación tiempo-frecuencia de la forma:

$$a \rightarrow a = \frac{c}{\omega} \tag{1.7}$$

Donde :

- c : Constante de calibración en unidades de frecuencia.
- a : Escala.
- ω : Frecuencia angular (rad/s).

De esta forma, la CWT localiza la señal $f(t)$ en el dominio del tiempo así como en el dominio de la frecuencia de forma simultánea.

Por otra parte, con la variable de translación " b ", se obtiene información en el dominio del tiempo de la función analizada. Esto se relaciona con el desplazamiento y localización de la ventana a medida que se desplaza por la señal. Este coeficiente permite trasladar $\Psi(t)$ por todo el intervalo en el que esta definida la señal $f(t)$, es decir, si la escala a utilizar es pequeña se realiza un gran número de translaciones, en cambio si la escala es grande el número será menor. Por lo tanto, del parámetro " b ", se obtiene la cantidad por la cual $\Psi(t/a)$ ha sido trasladada en el dominio del tiempo.

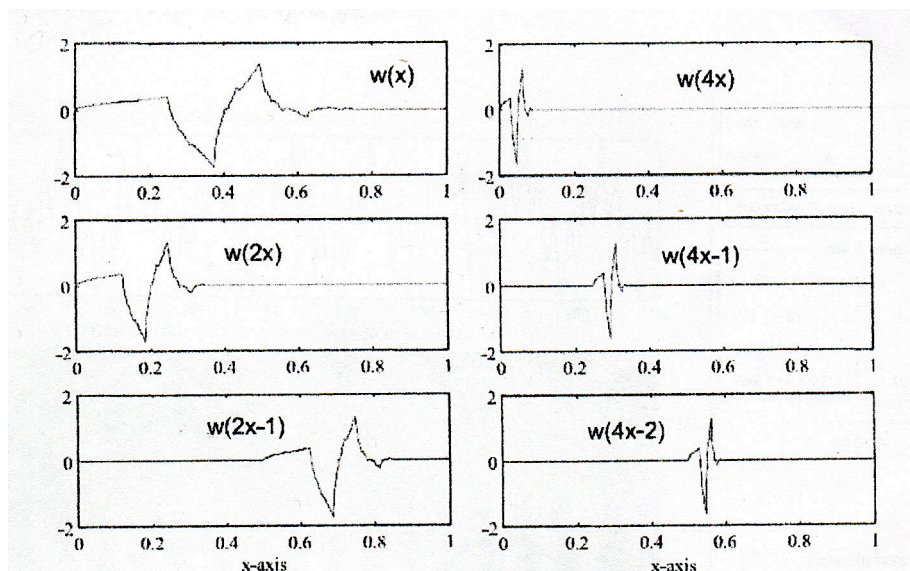


Figura 1. 8: Versiones escaladas y trasladadas de la Wavelet Madre db4 .

En la figura 1.8 muestra de manera simple la translación y la escala de la Wavelet Madre de la familia Daubechies dB4, como se observa, es accesible para realizar un buen análisis de la señal original. La wavelet daubechies es la más utilizada actualmente en la práctica para estudiar las redes eléctricas, ya que permite detectar perturbaciones en períodos cortos de tiempo del orden de los milisegundos (Db4) o para períodos de tiempo superior a un minuto (Db7), donde la respuesta en el tiempo es más lenta, la cual, es ideal para el análisis de señales eléctricas.

En el presente seminario de título se trabaja con la Db4, ya que debido a las características que presenta es la más indicada para realizar análisis de eventos que ocurren en la red eléctrica, permite la transformada wavelet continua y discreta, tiene una rápida respuesta en frecuencia capaz de detectar posibles perturbaciones en períodos cortos de tiempo (ms) o períodos largos de tiempo inferior a 3 (min), permite la reconstrucción exacta de la señal original y se ha desarrollado en Matlab un algoritmo más rápido que la TF y STFT.

Para realizar el proceso de cálculo de la CWT se realiza lo siguiente:

- Seleccionar una Wavelet Madre.
- Dados los valores ‘a’ y ‘b’, calcular un coeficiente CWT(a,b) mediante las ecuaciones 1.4 y 1.5, que represente la correlación entre la wavelet y la sección de la señal a analizar. Mientras mayor sea esta correlación, mayor es la similitud y los resultados dependerán de la forma wavelet.
- Desplazar la wavelet en sentido positivo del eje temporal y repetir los pasos anteriores hasta que se haya cubierto a la totalidad de la señal.
- Escalar la wavelet en el tiempo y repetir los pasos anteriores.

Con el programa *MATLAB* se obtiene una representación gráfica de la CWT. Esto es mediante la extensión del software *Wavelet Toolbox*, al cual es posible acceder escribiendo *wavemenu* en Command Window, para luego seleccionar la opción de análisis *Wavelet Continuo 1-D(Continuous Wavelet 1-D)*.

En las figuras 1.9 y 1.10 se muestra el análisis de la CWT de las señales de ejemplo $f_1(t)$ y $f_2(t)$. Estas señales fueron ejecutadas previamente para ser exportadas desde el *Workspace* a la *Wavelet Toolbox* para mostrar un ejemplo de la CWT.

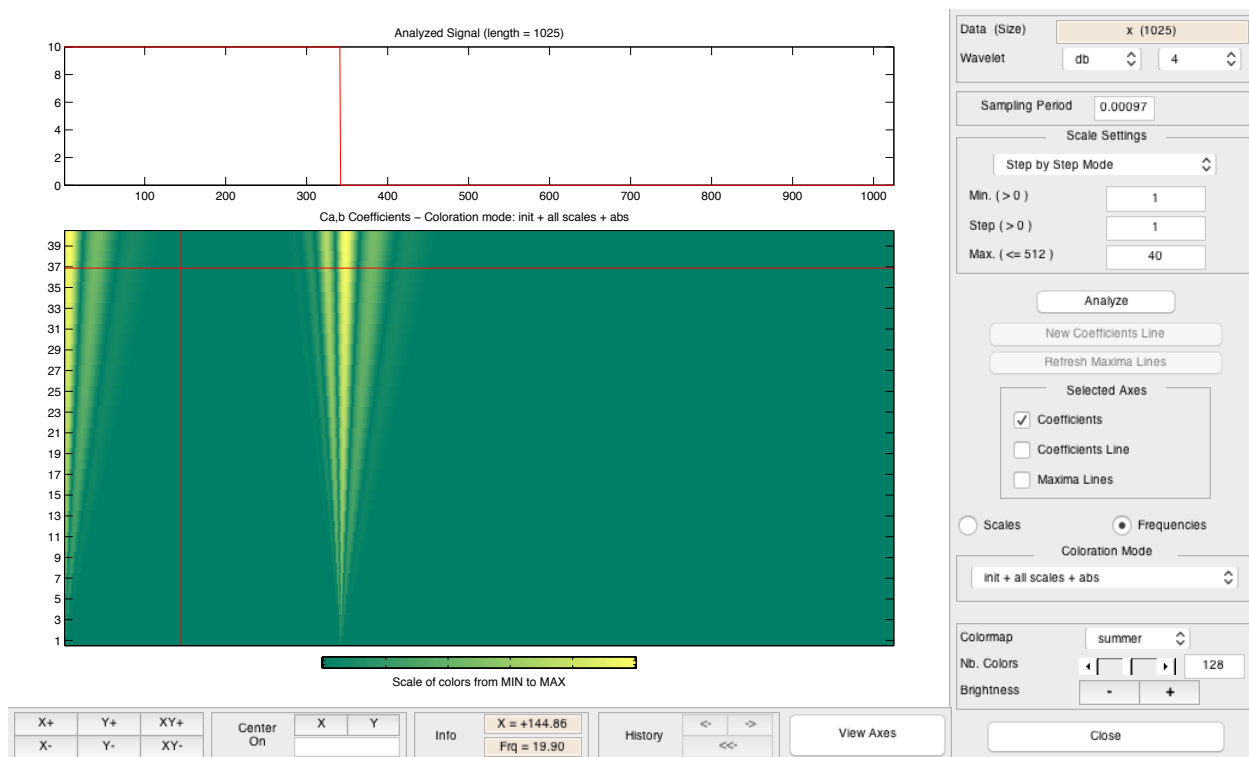


Figura 1. 9: CWT de la señal $f_1(t)$.

Se observa en la figura 1.9 un cambio de color en el espectro de la CWT, donde aproximadamente entre los 300 y 400 (ms) se produce la caída de voltaje de la señal cuadrada.

Por lo tanto al aplicar la CWT a la señal de voltaje $f_1(t)$ se puede tener claridad en el intervalo de tiempo en donde ocurre algún tipo de alteración en la señal eléctrica observando la señal original y su espectro.

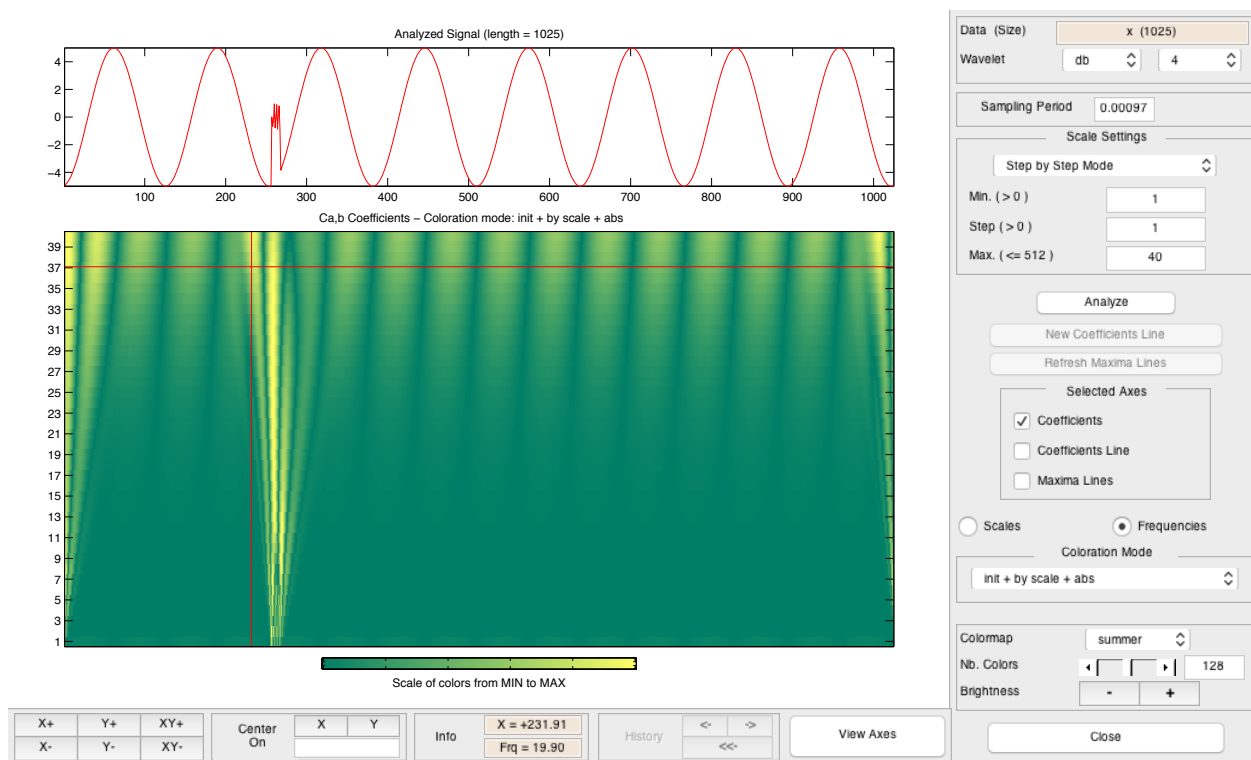


Figura 1. 10: CWT de la señal $f_2(t)$.

Del mismo modo se muestra en la figura 1.10 un cambio de color en el espectro de la CWT, en el instante donde ocurre una perturbación de la señal de voltaje $f_2(t)$ entre en el intervalo de los 200 y 300 (ms).

De las figuras analizadas anteriormente se observa que la interfaz del programa da la posibilidad de seleccionar la Wavelet Madre y el valor de la escala seleccionada, cuyo rango debe estar entre $0 < escala \leq 64$. Se debe ingresar el tiempo en segundos ($1/[Hz]$) a partir de la frecuencia de muestreo en *Sampling Period*, el cual, en este caso es de $0.00097[s]$, ya que el número de puntos seleccionados para la señal original es de 1024.

Para conocer la frecuencia de algún coeficiente de escala ‘ a ’, se debe llevar el cursor hacia el sector deseado y en la parte inferior del espectro se observa la frecuencia en (Hz) en un cuadro llamado ‘Info’ (Frq).

Para calcular de forma analítica la frecuencia respectiva de cada escala ‘ a ’ se utiliza la ecuación 1.8 mostrada a continuación.

$$f(Hz) = \frac{C_{frecuencia}}{a} \cdot f_m \tag{1.8}$$

Donde:

$C_{frecuencia}$: Centro de Frecuencia de la Wavelet Madre Daubechies db4=0.7143.
 f_m : Frecuencia de Muestreo en [Hz] de la señal analizada.
 a : Coeficientes.

De lo anterior, se desprende que para el ejemplo de las figuras 1.9 y 1.10 el coeficiente ‘ a ’ para 19,9 [Hz] es 37 respectivamente, por lo tanto, a partir de los valores anteriores se observa que la escala y la frecuencia son inversamente proporcionales, puesto que para valores pequeños de frecuencia se tienen mayores valores de escala y viceversa, el cual, era lo esperado al analizar la ecuación 1.7.

Al analizar solo el espectro de la CWT no hay evidencia del tiempo en que ocurre una perturbación, porque carece de información en el dominio del tiempo, por lo tanto, si se analiza una señal eléctrica real no se podrá saber de forma exacta donde ocurre la perturbación observando solo el espectro de la CWT. Esta herramienta muestra claramente el cambio de frecuencia de la señal analizada al observar su espectro, por lo tanto, es una muy buena opción para el análisis de transientes en señales eléctricas.

1.5 Transformada Wavelet Discreta (TWD).

Actualmente los cálculos matemáticos de las TW se realizan por computadores, la CWT necesariamente debe ser llevada al plano discreto, debido a que mientras mayor sea el número de datos disponibles para el análisis (refiriéndose a que la señal sea “más continua”), mayor será el tiempo y los recursos empleados para obtener los resultados. Por lo tanto para hacer posible el paso entre el mundo continuo y discreto se debe discretizar los parámetros de escala ‘ a ’ y traslación ‘ b ’ y así obtener la transformada wavelet discreta.

Para discretizar los parámetros ‘ a ’ y ‘ b ’ se utiliza la red diádica, definida según las ecuaciones 1.9 y 1.10 mostradas a continuación:

$$a = 2^{-j} \tag{1.9}$$

$$b = k \cdot 2^{-j} \tag{1.10}$$

Donde $j, k \in Z$, por lo tanto, la función continua de la ecuación 1.5 se transforma en discreta 1.11, correspondiendo a la versión diádica de la función wavelet.

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \cdot \Psi(t \cdot 2^j - k) \tag{1.11}$$

La función wavelet $\psi_{j,k}(t)$, trae asociada una función de escala $\emptyset_{j,k}(t)$, que se determina por la elección de la wavelet madre mostrada en la ecuación 1.12.

$$\emptyset_{j,k}(t) = 2^{j/2} \cdot \emptyset(t \cdot 2^j - k) \tag{1.12}$$

Realizando el producto interior de las ecuaciones 1.11 y 1.12 con una señal $f(t)$, se obtiene los coeficientes wavelet de detalle ($d_{j,k}$) y aproximación ($c_{j,k}$) mostradas en las siguientes expresiones:

$$d_{j,k}(t) = \langle f(t), \psi_{j,k}(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \psi_{j,k}(t) dt \quad (1.13)$$

$$c_{j,k}(t) = \langle f(t), \phi_{j,k}(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \phi_{j,k}(t) dt \quad (1.14)$$

1.6 Análisis Multiresolución (AMR o) y Algoritmo DWT Rápido.

El análisis multiresolución (AMR) es el método de diseño de la mayoría de las DWT. Fue diseñado para descomponer señales discretas en varias escalas con el fin de obtener la representación Tiempo-Frecuencia de las señales. Este AMR permite a los algoritmos actuar de forma rápida y efectiva y está fuertemente ligado al uso de la TWD.

El AMR también se conoce como algoritmo piramidal y para este caso opera con filtros de distinta frecuencia de corte que son usados para analizar la señal en diferentes escalas. Consta de filtros pasa alto $h_1(n)$ y pasa bajo $h(n)$ para analizar las componentes de alta y baja frecuencia.

El AMR funciona básicamente descomponiendo la señal analizada $f(t)$. Comienza aplicando a la señal los filtros $h_1(n)$ y $h(n)$, esto quiere decir que se convoluciona la señal original con ambos filtros (cada uno por separado), obteniendo $c_{n-1,k}$ y $d_{n-1,k}$, los cuales representan la aproximación de la señal (coeficientes de escala) y el nivel de detalle de la señal (coeficientes wavelet). El hecho de que los coeficientes de escala representen la aproximación de la señal original y el coeficiente wavelet el detalle, se asocia al hecho de que h y h_1 representan filtros pasa bajo y pasa alto. En la figura 1.11 se observa un esquema que resume lo anterior.

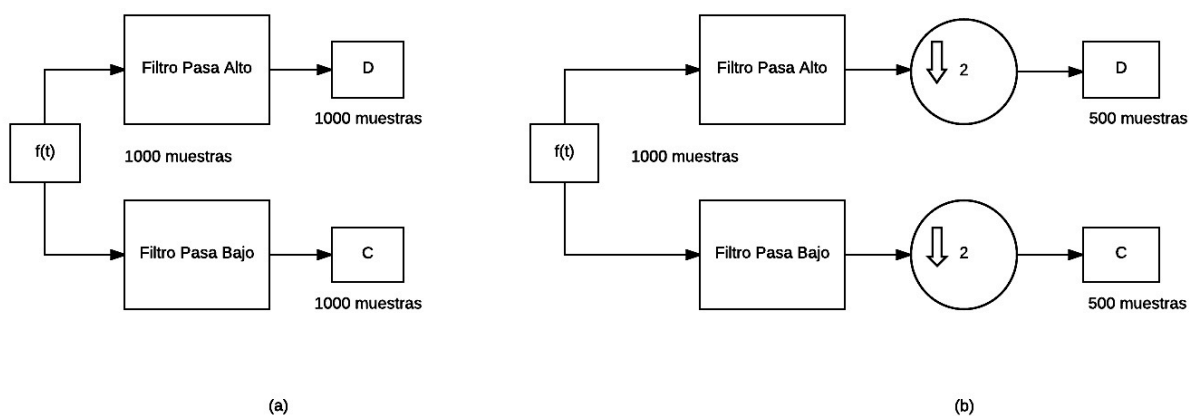


Figura 1. 11: Explicación AMR.

El proceso que se muestra en la figura 1.11 implica que al descomponer la señal original en diferentes bandas de frecuencia se obtiene el doble de muestras originales, ya que los datos de salida duplican a los de entrada. Esto quiere decir que si la señal $f(t)$ esta compuesta por un número de 1000 muestras, a la salida se tendrá una aproximación y un detalle de 1000 datos cada una. Por lo tanto, el tiempo de simulación para estos sistemas es relevante y debe ser lo más rápido posible y esta cantidad de datos es demasiado elevada. Para dar solución a esto, se utiliza

la técnica de downsampling, que consiste en reducir el tamaño de los datos de salida en un coeficiente dado. Para este caso, el número de muestras se reduce a la mitad, por lo que se realiza un submuestreo por dos, consiguiendo construir el primer nivel de descomposición que se muestra en la figura 1.11-b.

En la figura 1.12, se observa un esquema de descomposición para una señal cualquiera.

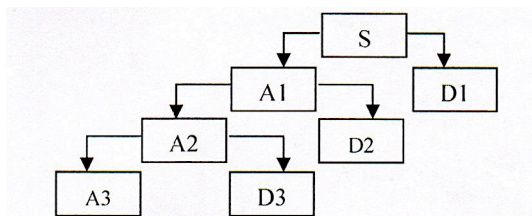


Figura 1. 12: Ejemplo de descomposición AMR.

Supongamos que en la figura 1.12 se va a descomponer una señal $f(n) = S$ con un número de muestras igual a $N = 2^n$. El análisis inicia separando la señal analizada en una aproximación A1 y un detalle D1 correspondiente al primer nivel de descomposición, realizando inmediatamente un submuestreo por dos, con lo cual se tiene un número de muestras igual a $N = 2^{n-1}$ para cada uno de los coeficientes. Luego, la aproximación obtenida en el primer nivel se descompone en dos nuevas aproximaciones A2 y detalle D2, teniendo una longitud de $N = 2^{n-2}$ cada una. A medida que se avanza en los niveles de descomposición, la resolución en el tiempo va disminuyendo, mientras que la de frecuencia se incrementa. Este procedimiento se repite hasta que la aproximación y el detalle estén representados por un solo coeficiente, por lo tanto, se tiene un número de muestras $N = 2^{n=0}$. Esto significa que el número de niveles a realizar es de $n = \log_2(N)$.

Del análisis anterior, se tiene un vector de longitud ‘N’, el cual, tiene un solo término que es el encargado de representar la forma aproximada de la señal (coeficientes de escala) y los demás términos con información sobre el detalle (coeficientes wavelet) obtenido en los diferentes niveles de descomposición. Además es posible la reconstrucción de la señal original $f(t)$ mediante la ecuación 1.15, seleccionando el nivel ‘n’ dependiendo de la señal en serie de tiempo y de la wavelet utilizada [2].

$$f(t) = A_n + D1 + D2 + D3 + \dots Dn \tag{1.15}$$

En algunos casos los componentes de alta frecuencia son considerados como fuentes de ruido, por lo cual, puede ser conveniente deshacerse de ellos, siendo esto sumamente útil en el procesamiento de señales.

La representación gráfica de la DWT se obtiene utilizando el comando *wavemenu*, seleccionando el “Análisis discreto unidimensional (*Wavelet 1-D* en la pantalla de selección).

Esta herramienta entrega una descomposición de la señal de estudio en coeficiente de aproximación y detalle a partir de la ecuación 1.15. Para este análisis la función Wavelet Madre seleccionada debe encontrarse en la biblioteca del programa Matlab.

Cada nivel de descomposición tiene un rango de frecuencia, que se obtiene con las siguientes fórmulas:

$$a_{Na} = 0 \quad (1.16)$$

$$a_{Nb} = \frac{\text{frecuencia muestreo}}{2^{N+1}} \quad (1.17)$$

$$d_{Na} = \frac{\text{frecuencia muestreo}}{2^{N+1}} \quad (1.18)$$

$$d_{Nb} = \frac{\text{frecuencia muestreo}}{2^N} \quad (1.19)$$

Donde ‘N’ es el nivel para el cual se desea conocer el rango de frecuencia. A continuación en la figuras 1.13 y 1.14 se analiza una descomposición a nivel 5 a una frecuencia de muestreo de 1[kHz] a 1024 puntos, por lo tanto, los rangos de frecuencia son los siguientes:

$$\begin{aligned} a_5 &= 0 - 15,625 [Hz] && : 32 \text{ muestras.} \\ d_5 &= 15,625 - 31,25 [Hz] && : 32 \text{ muestras.} \\ d_4 &= 31,25 - 62,5 [Hz] && : 64 \text{ muestras.} \\ d_3 &= 62,5 - 125 [Hz] && : 128 \text{ muestras.} \\ d_2 &= 125 - 250 [Hz] && : 256 \text{ muestras.} \\ d_1 &= 250 - 500 [Hz] && : 500 \text{ muestras.} \end{aligned}$$

En las figuras 1.13 y 1.14 se muestra el resultado de la DWT empleando el AMR para las dos señales de ejemplo $f_1(t)$ y $f_2(t)$ analizadas hasta ahora, en donde se observa que ambas señales se descomponen en 5 niveles, mostrando la señal original, la aproximación del último nivel 5 y los 5 detalles obtenidos.

En ambas figuras 1.13 y 1.14, se observa que es muy complejo identificar el contenido exacto de frecuencia presente en cada nivel de detalle, sin embargo, es posible identificar los cambios de frecuencia en los distintos niveles de descomposición en su respectivo ancho de banda.

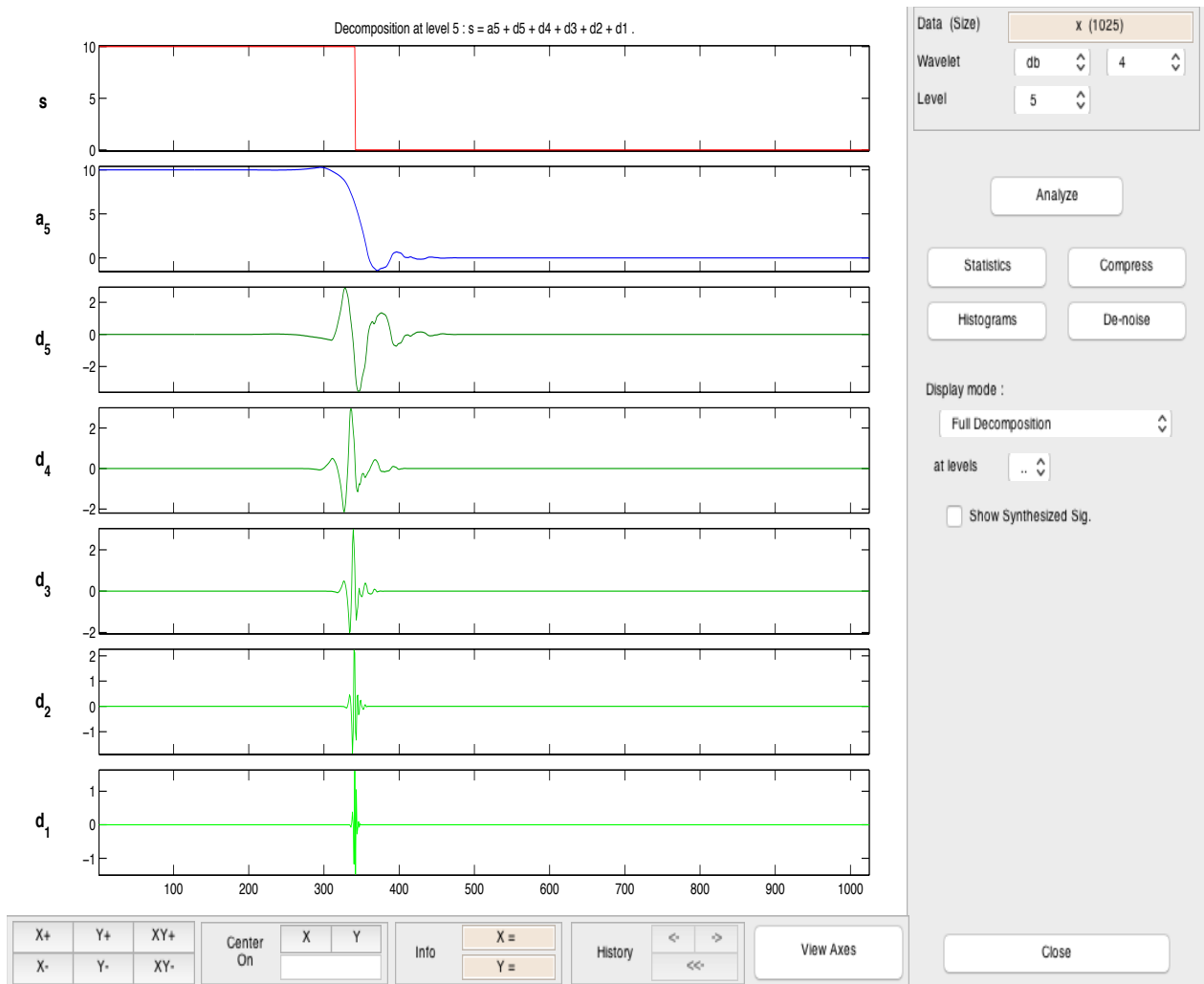


Figura 1. 13: DWT de la señal cuadrada $f_1(t)$.

En la figura 1.13 se muestra una perturbación en el dominio del tiempo de la señal aproximadamente en los 350(ms) a partir del primer nivel de descomposición en un ancho de banda entre los 250-500 (Hz) . A medida que aumenta el nivel de detalle, el ancho de banda de frecuencia disminuye al igual que la resolución en el tiempo, sin embargo aumenta la resolución en frecuencia.

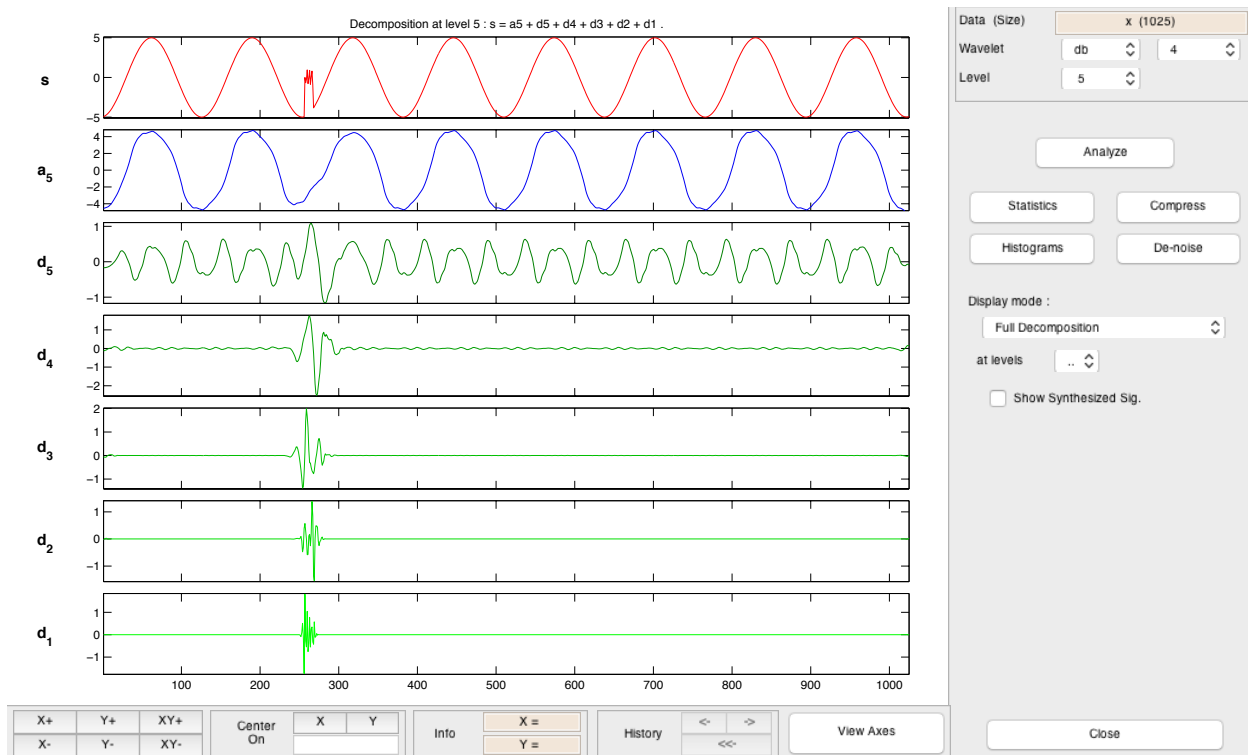


Figura 1. 14: DWT de la señal $f_2(t)$ con perturbación.

La figura 1.14 presenta una perturbación en el dominio del tiempo aproximadamente en los 250 (ms). Este AMR permite visualizar si existe alguna alteración en la forma de onda de cualquier tipo de señal especialmente en señales no estacionarias. En los capítulos posteriores se hará un estudio a mayor detalle de este tipo de análisis.

Al hacer un análisis comparativo de las figuras 1.13 y 1.14, se observa que la DWT es una herramienta que permite determinar y localizar perturbaciones de una señal en el dominio del tiempo en un cierto ancho de banda para cada uno de los niveles de detalle.

Para clasificar los eventos de calidad de la energía eléctrica utilizando la TW, se plantea un método que se basa en el cálculo de las diferencias de energía por nivel, es decir, se calcula la energía de los coeficientes a través de un algoritmo en MATLAB (que es equivalente a la energía de los detalles de la señal) tanto para la señal sinusoidal pura a frecuencia fundamental (50 Hz) como para la señal $f(t)$ con posibles perturbaciones, luego se exportan estos coeficientes de energía al programa EXCEL para obtener una representación en un gráfico lineal del tipo de evento que ocurre en la red de energía. Más adelante se analiza este tipo de cálculo.

Al estudiar la TW se determina que es un método matemático apto para realizar el análisis de eventos de las señales eléctricas porque permite detectar y localizar las perturbaciones en el dominio del tiempo en determinado ancho de banda de forma simultánea. A continuación se analiza la Norma Chilena de Seguridad y Calidad de Servicio que se basa en la Norma IEEE-519 de 1992 y la Norma Estándar 1159 de 1995, que determinan los tipos de eventos eléctricos existentes en la red de energía.

CAPÍTULO 2. ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LOS ESTÁNDARES IEEE DE LA CALIDAD Y MONITOREO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la calidad de la energía eléctrica tiene una mayor importancia debido al incremento del número de cargas sensibles y contaminantes en el sistema eléctrico, dando paso a que se produzcan perturbaciones que afectan a la red causando la degradación en la calidad de la energía eléctrica.

En este capítulo se estudia los eventos de calidad de la energía eléctrica y su monitoreo de acuerdo a la Norma técnica de seguridad y calidad de servicio, basada en la Norma IEEE-519 1992 y la Norma Estándar 1159 1995, en esta norma técnica se establecen exigencias que deben cumplir los concesionarios de cualquier naturaleza[3][4].

Los distintos eventos eléctricos están clasificados en cuatro tipos según la norma chilena, armónicas de corriente y voltaje, fluctuaciones de voltaje, severidad de parpadeo o flicker y cargas desequilibradas con sus respectivas características técnicas, además se establece una tabla de resumen con sus características y clasificaciones en que se detalla su contenido espectral, tiempo de duración y magnitud del voltaje.

CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Se entiende por calidad de la energía eléctrica a la estabilidad del voltaje, corriente, la frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico, ante la ausencia de perturbaciones que afectan la red eléctrica[5].

Los efectos asociados a los problemas de calidad de la energía eléctrica son:

- Incremento del costo, deterioro de la confiabilidad, disponibilidad y confort.
- Incremento en las pérdidas de energía.
- Daños a la producción, a la economía y la competitividad empresarial.
- Mala regulación de voltaje.
- Bajo factor de potencia.

Actualmente, el estudio de la calidad de la energía eléctrica ha adquirido mucha importancia, esto se debe al aumento de productividad y competitividad de las empresas, por ende para aumentar su competitividad requieren optimizar su proceso productivo mediante:

- El uso de equipos de alta eficiencia como motores eléctricos.
- Reduciendo los costos por sobredimensionamiento y tarifas.
- Automatizando sus procesos mediante dispositivos electrónicos, como por ejemplo, microcontroladores PIC, computadores, PLC, etc.
- Reduciendo las pérdidas energéticas.
- Evitando el envejecimiento prematuro de los equipos.

La alta demanda de equipos de control y automatización han aumentado los problemas de confiabilidad en la producción, ya que los equipos electrónicos son una fuente de perturbaciones para la calidad de la energía eléctrica porque distorsionan las ondas de tensión y corriente. Estos equipos de control y automatización son muy sensibles a distorsión o magnitud de la onda de tensión por lo que una pequeña variación en la calidad de la energía eléctrica ocasiona fallas que paralicen la producción provocando una pérdida de tiempo y costos inesperados, por lo tanto, cada vez hay que encontrar soluciones más óptimas, por lo cual, el estudio de los fenómenos de la calidad de energía eléctrica es indispensable[6].

ESTÁNDARES DE CALIDAD DE PRODUCTO ELÉCTRICO

Actualmente debido a los problemas de contaminación en la red eléctrica, es necesario estudiar los parámetros de calidad para mejorar el confort, la confiabilidad, el costo, el consumo, la demanda y el diseño de los sistemas de suministro eléctrico.

A continuación se estudia y analiza la NT SyCS de Septiembre 2015 que define las exigencias mínimas del SI.

Artículo 5-71

Los coordinados deberán dar cumplimiento a los Estándares de Calidad de Producto Eléctrico del presente título, con el fin de limitar su contribución a la contaminación de la red.

Artículo 5-72

Los clientes deberán asegurar que el diseño de sus instalaciones les permite operar dentro de los rangos aceptables exigidos en el presente artículo.

La NT de septiembre 2015 define que los fenómenos eléctricos pueden ser de cuatro tipos tales como:

- Armónicas de Corriente y voltaje.
- Fluctuaciones de Voltaje.
- Severidad de Parpadeo o Flicker.
- Cargas desequilibradas.

2.1 Armónicas de Corriente

La NT las define como las componentes sinusoidales que están presentes en la forma de onda de la corriente de un Elemento Serie del SI, cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de 50Hz, caracterizados por su respectiva amplitud y fase.

En condiciones normales de operación se debe cumplir con un período de registro de mediciones de una semana cualquiera del año o de siete días consecutivos que; el 95% de los valores estadísticos de las armónicas de corriente y de su índice de distorsión total, cumplen con lo indicado con la siguiente tabla (artículo 5-72):

Tabla 2.1: Clasificación de las armónicas de corriente tomadas de la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio, Septiembre 2015, Santiago de Chile.

Máxima distorsión armónica de corriente, como porcentaje del valor de corriente I_L a frecuencia fundamental para tensiones bajo 100 [kV]						
I_{sc}/I_L	H: Orden de la armónica (armónicas impares)					Índice TDD _T
	H < 11	11 ≤ H < 17	17 ≤ H < 23	23 ≤ H < 35	35 ≤ H	
≤ 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

* Todos los equipos de generación están limitados a los valores indicados de distorsión armónica de corriente, independiente del valor de I_{sc}/I_L .

a) Las armónicas pares están limitadas al 25% de los límites establecidos para las armónicas impares

b) Se deberá controlar hasta la armónica H = 50

Donde;

I_{SC} : Máxima corriente de cortocircuito en el empalme.

I_L : Máxima corriente de carga de frecuencia fundamental que fluye desde el punto de control hacia la carga.

TDD_1 : Distorsión de Demanda Total de Corriente y se expresa como:

$$TDD_1 = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^K I_k^2}}{I_L} \quad (2.1)$$

con;

I_k : k-ésima armónica de la señal de corriente.

K : Armónica de mayor orden en la señal de corriente, máximo $H=50$.

Además se debe tener en cuenta las siguientes situaciones:

- Para el caso de empalme de Tensión igual o superior a 100kV, los límites son del 50% de los valores indicados en la tabla 1.3.
- Si la fuente generadora de armónicas es un convertidor con un número de pulsos “q” mayor que seis, los límites indicados en la tabla deberán ser aumentados por un factor igual a la raíz cuadrada de un sexto de “q”.

El valor estadístico de las armónicas de corriente y de su índice de distorsión debe ser obtenido para cada intervalo de diez minutos, como resultado de evaluar estadísticamente un conjunto de mediciones efectuadas en dicho intervalo.

2.2 Fluctuaciones de Tensión

La NT las define como variaciones cíclicas o aleatorias de la tensión con períodos o intervalos del orden de los segundos y minutos que afectan la operación de algunos dispositivos de consumo y las clasifica en dos categorías de acuerdo a su duración, la de corta duración que va desde los 10[ms] hasta un minuto y de larga duración que es superior a un minuto.

Las fluctuaciones de corta duración se clasifican en:

- Instantáneas, de duración típica entre 10[ms] y 600[ms] y de magnitud típica entre 10% y 92,5% de la tensión nominal y entre 107,5% y 180%.
- Momentáneas, de duración típica entre 600[ms] y 3[s] y de magnitud típica 10% y 92,5% de la tensión nominal y entre 107,5% y 140%.
- Temporales, de duración típica entre 3[s] y un minuto y de magnitud típica entre 10% y 92,5% de la tensión nominal y entre 107,5% y 120%.

Las fluctuaciones de larga duración se clasifican en:

1. Caída de tensión de duración típica mayor que un minuto y de magnitud típica entre 80% y 92,5% de la tensión nominal.

2. Subida de tensión de duración típica mayor que un minuto y de magnitud típica entre 107,5% y 120%.

Las disminuciones de tensión de magnitud típica bajo el 10% de la tensión nominal, son interrupciones clasificadas en:

1. Momentáneas : de duración típica entre 10[ms] y 3[s].
2. Temporal: de duración típica de 3[s] y un minuto.
3. Sostenida: de duración típica mayor que un minuto y de magnitud típica nula.

Para las fluctuaciones de corta duración, no se establece un límite máximo ya que el CDEC puede determinar un límite máximo a partir de estudios, en cuyo caso este límite máximo se debe comunicar con 1 año de anticipación a su vigencia.

2.3 Severidad del Flicker

Se define como el grado de intensidad de las variaciones de tensión en sistemas de corriente alterna, cuyas instalaciones deben ser operadas de modo de cumplir con los límites de severidad de parpadeo o flicker de las Normas Internacionales IEC 868, EN 60868 y EN 61000-4-5.

- El parpadeo se mide en base a índices de severidad de corto plazo (Pst) y de largo plazo (Plt), de la magnitud de parpadeo de tensión (flicker) según establecen las Normas indicadas.
- Las variables de medición de cada nudo debe ser las tensiones fase-fase o fase-neutro, según corresponda, medidos en forma simultánea. A partir de las mediciones de las tres tensiones se debe evaluar las variables calculadas: Pst (10 minutos) y Plt (2 horas).
- A partir de las tensiones medidas se debe proceder a determinar la magnitud del índice Pst para cada período de 10 minutos de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Pst = \sqrt{0,314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}} \quad (2.2)$$

La ecuación 2.2 tiene implícita la clasificación de la señal de tensión en una función de distribución acumulada con el objetivo de determinar los parámetros $P_{0,1}$, P_1 , P_3 , P_{10} y P_{50} que corresponden a los niveles de la señal de tensión que están excedidos el 0,1%, 1%, 3%, 10% y 50% del tiempo, respectivamente.

Una vez completado un intervalo de dos horas midiendo un índice Pst (doce valores de índice Pst) se procede a evaluar el índice Plt (2 hrs) de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Plt = \frac{1}{12} \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} Pst_i^3} \quad (2.3)$$

Al terminar el período de mediciones y registros, se procede a determinar en cada uno de los nudos de medición y para cada una de las tres tensiones, el valor estadístico percentil 95% para los índices Pst y Plt . Entre los valores estadísticos correspondientes al percentil 95% de Pst y

Plt , de cada fase, se elige el valor de mayor magnitud para ser comparado con los respectivos valores límites que se indican a continuación.

El índice de severidad de parpadeo o “flicker”, es evaluado estadísticamente en intervalos consecutivos de 10 minutos, durante un período de registro de mediciones de una semana cualquiera del año o de siete días consecutivos, y no debe exceder en el sistema eléctrico, el valor de, 1,0 para tensiones iguales o inferiores a 110[kV] ni exceder 0,8 para tensiones superiores a 110[kV].

El índice de severidad de “flicker”, evaluado estadísticamente en intervalos consecutivos de 2 horas durante un período de registro de mediciones de una semana cualquiera del año o de siete días consecutivos, no debe exceder de 0,8 para tensiones iguales o inferiores a 110[kV] y no exceder 0,6 para tensiones superiores a 110[kV].

2.4 Cargas Desequilibradas

Para puntos de control en tensiones iguales o inferiores a 23[kV], se debe cumplir que el 95% de los valores estadísticos registrados en una semana cualquiera del año o de siete días consecutivos, de la componente de secuencia negativa de la tensión, no deberá exceder el 2% de la correspondiente componente de secuencia positiva. El valor estadístico de la componente de secuencia negativa de tensión, será obtenido en cada intervalo de 10 minutos, como resultado de procesar un conjunto de mediciones efectuadas en dicho intervalo.

Para puntos de control en tensiones superiores a 23[kV] se deberá cumplir que el 95% de los valores estadísticos registrados en una semana cualquiera del año o de siete días consecutivos, de la componente de secuencia negativa de la tensión, no deberá exceder el 1,5% de la correspondiente componente de secuencia positiva.

Artículo 5-73

Las instalaciones de transmisión deben limitar la contribución a la contaminación de la red operando sus sistemas de modo que la distorsión armónica de la tensión esté en los rangos que se establece en la Norma IEEE 519-1992 y que se indican a continuación.

En todo sistema eléctrico, en condiciones normales de operación, se debe cumplir para un período de registro de mediciones de una semana cualquiera del año o de siete días consecutivos, que el 95% de los valores estadísticos de las armónicas de la tensión y de su índice de distorsión total, cumplen con lo indicado en la tabla siguiente. El valor estadístico de las armónicas de la tensión y de su índice de distorsión es obtenido para cada intervalo de 10 minutos, como resultado de evaluar estadísticamente un conjunto de mediciones efectuadas en dicho intervalo.

Tabla 2.2: Armónicas de Tensión tomadas de la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio, Septiembre 2015, Santiago de Chile.

Armónicas impares no múltiplos de 3			Armónicas impares múltiplos de 3			Armónicas pares		
Orden	Tensión (%)		Orden	Tensión (%)		Orden	Tensión (%)	
	≤ 110 [kV]	> 110 [kV]		≤ 110 [kV]	> 110 [kV]		≤ 110 [kV]	> 110 [kV]
5	6	2	3	5	2	2	2	1,5
7	5	2	9	1,5	1	4	1	1
11	3,5	1,5	15	0,3	0,3	6	0,5	0,5
13	3	1,5	21	0,2	0,2	8	0,5	0,4
17	2	1	> 21	0,2	0,2	10	0,5	0,4
19	1,5	1				12	0,2	0,2
23	1,5	0,7				> 12	0,2	0,2
25	1,5	0,7						
> 25	0,2 + 1,3 × 25/H	0,2 + 0,5 × 25/H						

Se deberá controlar hasta la armónica H = 50.

Los valores de tensiones armónicas se expresan en porcentaje de la tensión nominal.

Respecto al índice de distorsión armónica se establece que al aplicar la estadística del 95% a los valores registrados del índice de distorsión total armónica, se debe cumplir, para un período de registro de mediciones de una semana cualquiera del año o de siete días consecutivos y para tensiones iguales o inferiores a 110[kV], que este índice deberá ser inferior a 8%.

Al aplicar la estadística del 95% a los valores registrados del índice de distorsión total armónica, se debe cumplir, para un período de registro de mediciones de una semana cualquiera del año o siete días consecutivos y para tensiones superiores a 110[kV], que este índice deberá ser inferior a 3% y se calcula de acuerdo con la siguiente expresión:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{k=50} V_k^2}}{V_1} * 100 \tag{2.4}$$

Donde:

THD_v : índice de distorsión armónica total de la tensión (%).

V_k : componente armónica de tensión de orden k .

V_1 : componente fundamental de la tensión

En el caso de las instalaciones de los enlaces HVDC deben limitar la contribución a la contaminación de la red según los estándares siguientes:

- Armónicas de corrientes según lo indicado en el Artículo 5-72 a) para el nivel de tensión que corresponda.
- Fluctuaciones de tensión según lo indicado en el Artículo 5-72 b) para el nivel de tensión que corresponda, lleva una estadística que se informara al CDEC.
- Severidad del parpadeo según lo indicado en el artículo 5-72 c), para el nivel de tensión que corresponda.
- Armónicas de tensión según lo indicado en el presente artículo.

Artículo 5-74

Las instalaciones de generación deben limitar la contribución a la contaminación de la red de modo que las distorsiones de armónicas de tensión estén en los rangos que se indican en el Artículo 5-73.

Tratándose de parques eólicos o fotovoltaicos, estos deberán limitar además la contribución a la contaminación de la red, medidas en el punto de conexión al SI, según los estándares siguientes:

- a) Armónicas de corriente según lo indicado en el Artículo 5-72 a) para el nivel de tensión que corresponda.
- b) Fluctuaciones de tensión según lo indicado en el Artículo 5-72 b) para el nivel de tensión que corresponda. Solo se lleva una estadística que se informara al CDEC.
- c) Severidad del parpadeo según lo indicado en el Artículo 5-72 c), para el nivel de tensión que corresponda.
- d) Armónicas de tensión según lo indicado en el Artículo 7-72 para el nivel de tensión que corresponda.

Artículo 5-75

La medición y el control de la calidad de producto eléctrico de los coordinados se efectúan mediante auditorías técnicas que decida realizar la DO.

Las auditorías técnicas pueden ser decididas frente a una denuncia formal que reciba la DO de parte de otro Coordinado, cuanto no se estén cumpliendo los estándares exigidos.

En caso que la auditoría técnica demuestre que la denuncia no era fundada, los costos de la auditoría recaen en quien la formuló; en caso contrario, los costos son de quien esté incumpliendo los estándares, sin perjuicio de su obligación de ajustarse a los estándares establecidos en el presente título.

La exactitud de las mediciones debe ser compatible con la exigencia que se necesita controlar. Para controlar armónicas y pulsaciones de tensión se debe usar instrumentación que cumpla con la condición de tener una mejor exactitud que el 5% del límite de distorsión permitida.

Los instrumentos de medición a utilizar deben cumplir la norma IEC61000-4-30, clase A.

SISTEMA DE MONITOREO DEL PRODUCTO ELÉCTRICO

El Artículo 4-26 de la NT SyCS establece que la CDC debe disponer de un sistema de monitoreo permanente en los puntos del SI que la DO determine, que le permita verificar en todo momento el desempeño de las principales instalaciones del SI en todos los estados de operación y ante contingencias.

El sistema de monitoreo tiene que tener una arquitectura básica consistente en un centro concentrador de información y una red de sistemas dispersos de recolección y procesamiento de mediciones a nivel local, los cuales transmiten la información al centro concentrador para su procesamiento y análisis. La DO determina los registros que deben ser transmitidos en tiempo real al CDC. Si la tecnología implementada por el SITR así lo permite, cualquiera de las funciones antes indicadas puede ser efectuada por el SITR.

El sistema de monitoreo se basa en una instalación de equipos encargados de realizar el registro dinámico del sistema de potencia, a través de la adquisición en tiempo real de variables relevantes del SI, que permita registrar la ocurrencia de perturbaciones en el sistema y cambios de estado operativo. Las características de los registros deben ser tales que el procesamiento de los mismos permita verificar o realizar:

- a) El nivel de amortiguamiento presente en las oscilaciones de potencia en el SI, con el objeto de establecer si se cumplen los estándares exigidos en la NT, o si existe necesidad de implementar medidas correctivas.
- b) El correcto funcionamiento de las protecciones del SI, en cuanto a los valores de ajuste, tiempos de intervención requeridos y su adecuada coordinación.
- c) Análisis post operativos de fallas o perturbaciones severas ocurridas en el SI, en especial aquellas de escasa probabilidad de ocurrencia, o que hubieran iniciado por causas desconocidas.
- d) El desempeño de los EDAC, EDAG, ERAG y sistemas de protección multitareas en general; y, en particular, la contribución de las instalaciones de Clientes a estos esquemas en los puntos de la DO.
- e) El desempeño del PDCE diseñado por la DO.
- f) El margen de estabilidad estática o dinámica del SI dados los puntos de monitoreo de interés.

Actualmente es necesario tomar en consideración un conjunto más amplio de indicadores de calidad, debido a los efectos que provoca sobre la confiabilidad, costo, consumo, demanda y el diseño de los sistemas del suministro eléctrico.

A continuación se muestra una tabla de la norma IEEE Estándar 1159 1995 que resume la clasificación y características típicas de los fenómenos eléctricos.

Tabla 2.3: Fenómenos Eléctricos Norma IEEE Estándar 1159 1995.

Categorías	Contenido Espectral	Duración	Magnitud de Voltaje
1.0 Transientes			
1.1 Impulsivos			
1.1.1 Nanosegundos	5 ns rise	< 50 ns	
1.1.2 Microsegundos	1µs rise	50 ns – 1 ms	
1.1.3 Milisegundos	0,1 ms rise	> 1 ms	
1.2 Oscilatorios			
1.2.1 Baja Frecuencia	< 5 kHz	0,3 – 50 ms	0 – 4 pu
1.2.2 Media Frecuencia	5 – 500 kHz	20 µs	0 – 8 pu
1.2.3 Alta Frecuencia	0,5 – 5 MHz	5µs	0 – 4 pu
2.0 Variaciones de Corta Duración			
2.1 Instantáneas			
2.1.1 Sag (Valles)		0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 pu
2.1.2 Swell (Crestas)		0,5 – 30 ciclos	1,1 – 1,8 pu
2.2 Momentáneas			
2.2.1 Interrupciones		0,5 ciclos – 3s	< 0,1 pu
2.2.2 Sag (Valles)		30 ciclos – 3s	0,1 – 0,9 pu
2.2.3 Swell (Crestas)		30 ciclos – 3s	1,1 – 1,4 pu
2.3 Temporales			
2.3.1 Interrupciones		3 s – 1 min	< 0,1 pu
2.3.2 Sag (Valles)		3 s – 1 min	0,1 – 0,9 pu
2.3.3 Swell (crestas)		3 s – 1 min	1,1 – 1,2 pu
3.0 Variaciones de Larga Duración			
3.1 Interrupciones Sostenidas		> 1 min	0,0 pu
3.2 Bajo Voltaje		> 1 min	0,8 – 0,9 pu
3.3 Sobrevoltajes		> 1 min	1,1 – 1,2 pu
4.0 Desbalance de Voltaje		Estado Estable	0,5 – 2%
5.0 Distorsión Forma de Onda			
5.1 Desplazamiento de C.D		Estado Estable	0 – 0,1%
5.2 Armónicos	0 – 100th H	Estado Estable	0 – 20%
5.3 Interarmónicos	0 – 6kHz	Estado Estable	0 – 2%
5.4 Hendiduras		Estado Estable	
5.5 Ruidos	Banda – ancha	Estado Estable	0 – 1%
6.0 Fluctuaciones	< 25 Hz	Intermitente	0,1 – 7%
7.0 Variaciones de Frecuencia		< 10 s	

EVENTOS ELÉCTRICOS

2.5 Transitorio Tipo Impulso

Se define como el cambio súbito y unidireccional (positivo o negativo) a una frecuencia distinta a la de suministro, en condición de estado estable de la tensión, la corriente o ambos. Se caracteriza, normalmente, por los tiempos de subida (1 a 10 μs) y bajada (20 a 150 μs) y por su contenido espectral.

La onda modelo para este fenómeno es la onda 1,2/50 μs de 2000 V, la cual aumenta su valor peak a 2000 V en 1,2 μs y luego decae a la mitad de su valor peak en 50 μs .

Este fenómeno eléctrico es causado principalmente por descargas atmosféricas y puede provocar transitorios oscilatorios por inducción electromagnética.

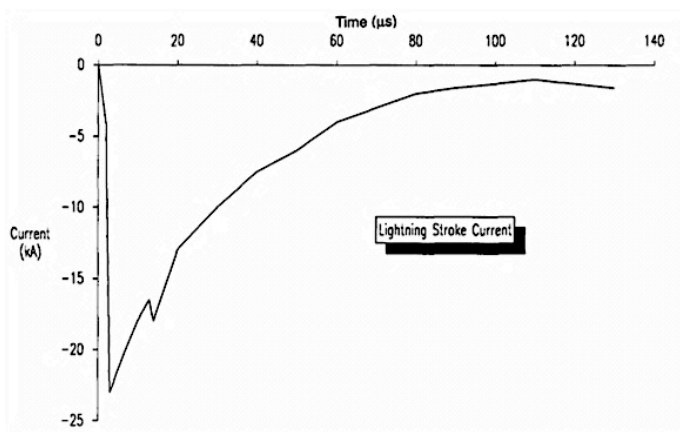


Figura 2. 1: Transitorio de impulso de corriente originada por un rayo (IEEE 1159 1995).

2.6 Transitorio Oscilatorio

Es un cambio repentino a una frecuencia diferente a la de suministro en la condición de estado estable de la tensión, la corriente o ambos, cuyos valores instantáneos cambian de polaridad positiva y negativa. Se caracterizan por su frecuencia, magnitud y duración.

Los transitorios oscilatorios son causados principalmente por la conexión de condensadores, por reencendidos durante la desconexión de transformadores y por la conexión de líneas. Por su frecuencia se clasifican en:

Transitorio oscilatorio de alta frecuencia: posee una componente de frecuencia mayor que 500 kHz y una duración típica media de microsegundos o varios ciclos de la frecuencia fundamental.

Transitorio oscilatorio de media frecuencia: es aquel con una componente de frecuencia que se encuentra entre 5 y 500 kHz, con una duración de orden de microsegundos y se presentan por la energización de condensadores como muestra la Figura 2.2 o también puede presentarse como una respuesta del sistema a un transitorio tipo impulso.

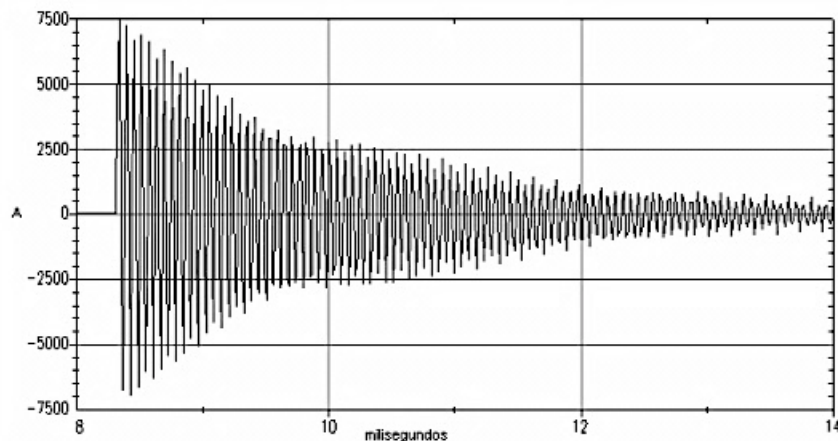


Figura 2.2: Transitorio oscilatorio causado por el fenómeno Back to Back¹ en la conmutación de condensadores (IEEE 1159 1995).

Transitorio de baja frecuencia: es un transitorio con una componente de frecuencia característica inferior a 5 kHz y una duración de 0,3 ms a 50 ms que ocurre frecuentemente en los sistemas de distribución y son causado por la energización de bancos de condensadores con frecuencias entre los 300 y 900 Hz, una magnitud peak entre 1,3 a 1,5 p.u. y una duración entre los 0,5 y 3 ciclos. Un ejemplo de este tipo de evento se muestra en la Figura 2.2.2.

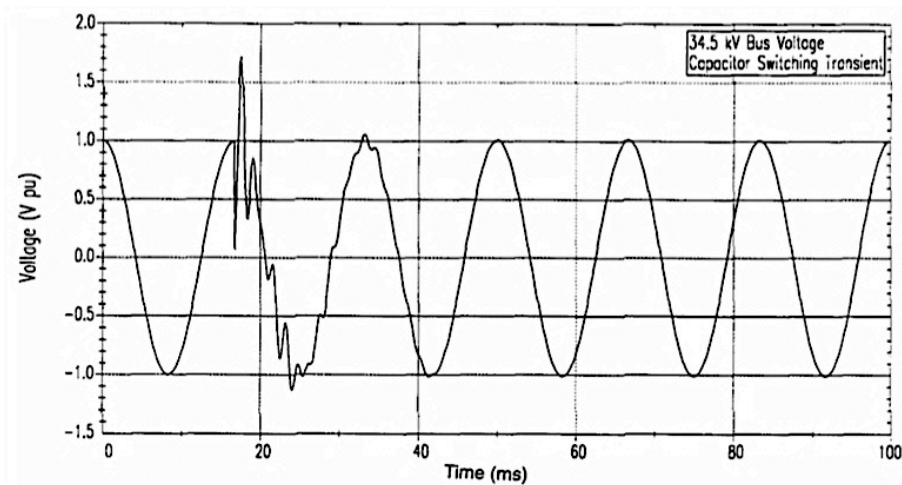


Figura 2.2.3: Transitorio oscilatorio de baja frecuencia causado por la energización de bancos de condensadores (IEEE 1159 1995).

¹ Back to Back: es la energización de banco de condensadores en paralelo.

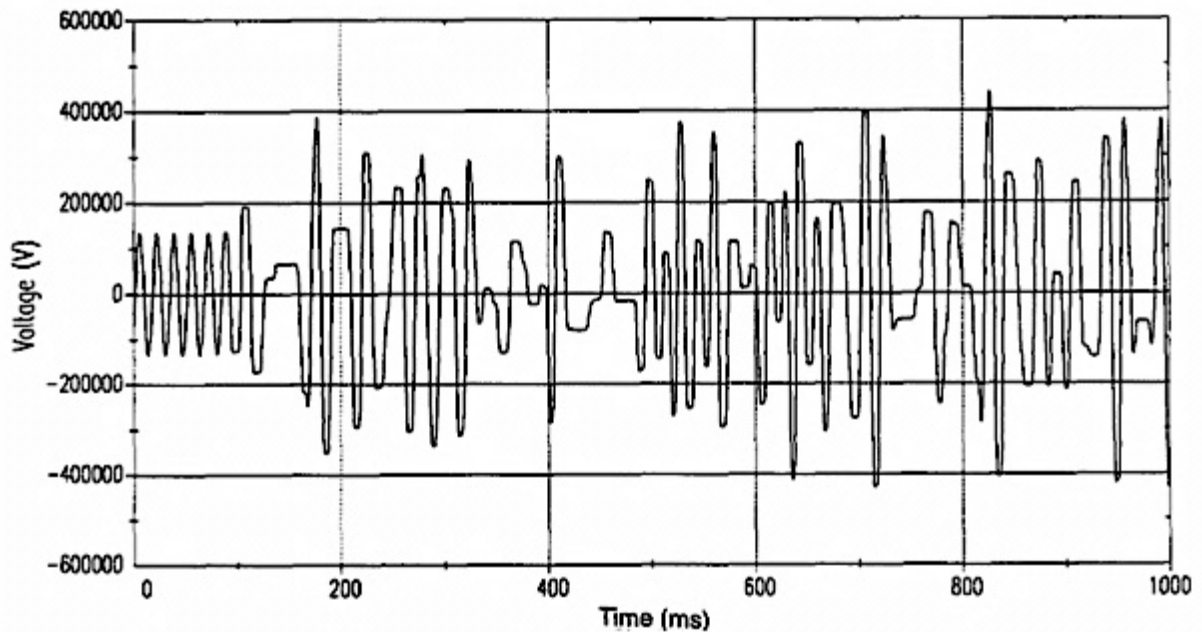


Figura 2.2.4: Transitorio oscilatorio de baja frecuencia causado por la ferorrresonancia de un transformador sin carga (IEEE 1159 1995).

2.7 Variaciones de Corta Duración

Se definen como la desviación del valor RMS de la onda de tensión del valor nominal para un tiempo mayor a 0,5 ciclos y menor o igual a 1 minuto a una frecuencia nominal de 50 Hz.

2.7.1 Sag

También conocidos como DIP o Huecos de Tensión, se define como la reducción del valor RMS de la señal de tensión entre 0,1 y 0,9 p.u. a la frecuencia nominal con una duración entre 0,5 ciclos y 1 minuto. Es asociado normalmente a fallas del sistema, conmutación de grandes cargas, arranques de motores entre otros dispositivos y los efectos nocivos dependen de la duración y profundidad.

Para mitigar los efectos de los sag se debe estabilizar la señal de tensión a través de acondicionadores de red, los cuales existen con diferentes principios y tecnologías.

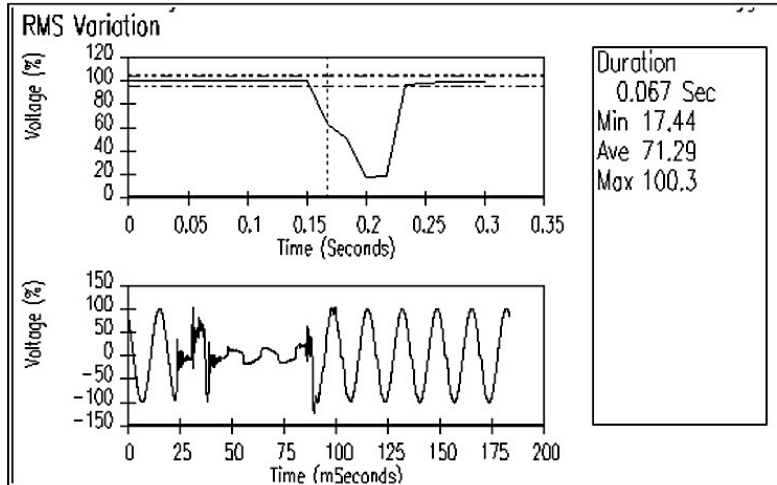


Figura 2. 3: Depresiones de tensión (IEEE 1159 1995).

2.7.2 Swell

Se define como un incremento del valor R.M.S. de la tensión o corriente entre 1,1 y 1,8 p.u. con una duración desde 0,5 ciclos a 1 minuto.

Los Swell o crestas son asociadas a fallas en el sistema, el caso más típico de las elevaciones de tensión es la desconexión de grandes cargas y la conexión de grandes bancos de condensadores.

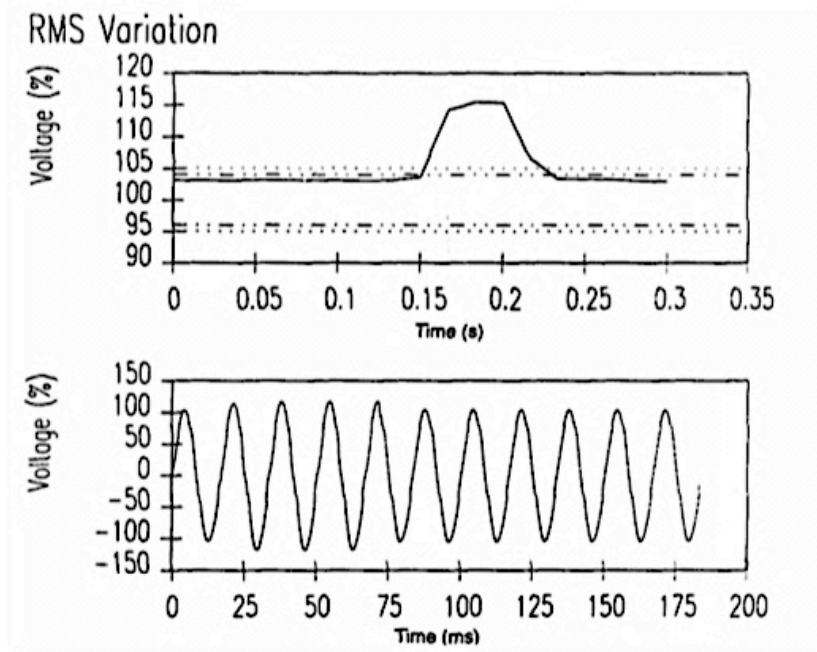


Figura 2. 4: Swell (IEEE 1159 1995).

2.7.3 Interrupción de Corta Duración

Una interrupción de corta duración ocurre cuando la tensión o la corriente de la carga disminuye a menos de 0,1 p.u. por un período de tiempo que no excede un minuto. Las interrupciones son resultado de fallas en el sistema, equipos averiados o debido al mal funcionamiento de los sistemas de control y se caracterizan por su duración porque la magnitud de la tensión es siempre inferior al 10% de su valor nominal.

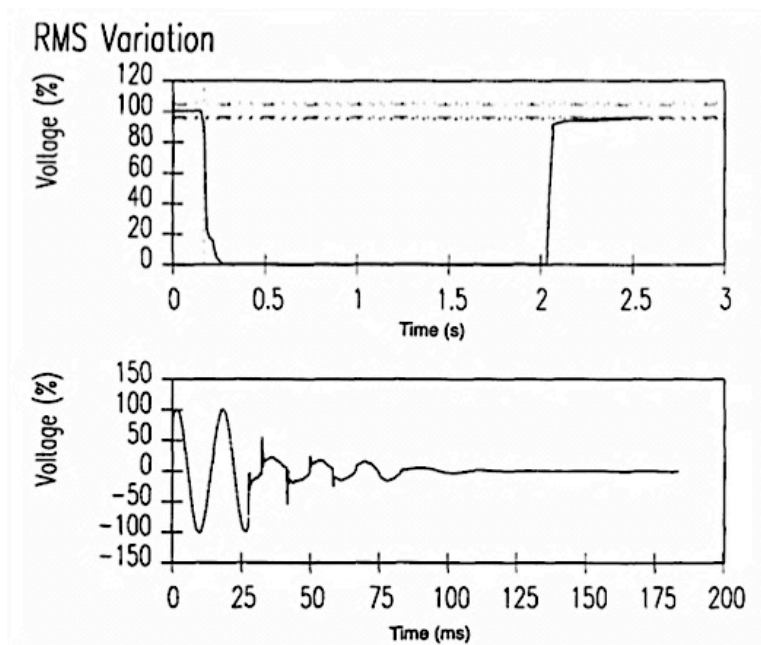


Figura 2. 5: Interrupción momentánea debido a un incidente y a una operación subsecuente del reconectador (recloser) tomado de la Norma IEEE 1159 1995.

2.8 Variaciones de Larga Duración

Corresponden a la desviación del valor R.M.S de la tensión a partir de la tensión nominal, con una duración superior a 1 minuto.

Se considera una variación de voltaje de larga duración cuando excede el límite de la norma ANSI C84.1 por más de 1 minuto, la cual, se debe prestar atención a los valores fuera de estos rangos.

Tabla 2.4: Tolerancia para las Tensiones de acuerdo a la Norma ANSI C84.1.

Valor Nominal	Rango Deseable	Rango Aceptable
120	126-114	127-110
208	218-197	220-191
240	252-228	254-220
277	291-263	293-254
480	504-456	508-440
2.400	2.525-2.340	2.540-2.280
4.160	4.370-4.050	4.400-3.950
4.800	5.040-4.680	5.080-4.560
13.800	14.490-13.460	14.520-13.110
34.500	36.230-33.640	36.510-32.780

2.8.1 Sobretensión

Es el incremento de la tensión en estado estacionario superior al 110% del valor nominal del circuito o del sistema con una duración mayor a 1 minuto. Son usualmente ocasionadas por la desconexión de grandes cargas o a la conexión de banco de condensadores y generalmente se observan cuando el sistema es muy débil para mantener la regulación de tensión o cuando el control de tensión es inadecuado.

Una sobretensión común se ocasiona por una incorrecta selección del TAP del transformador.

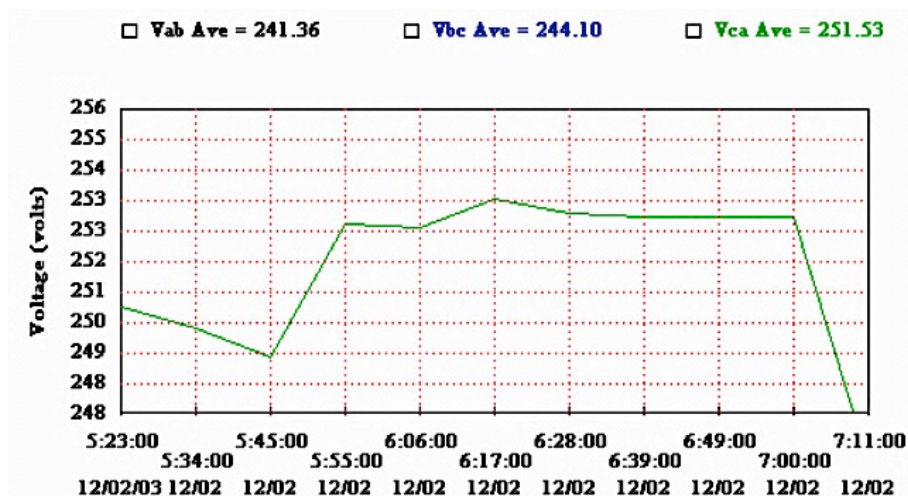


Figura 2. 6: Sobretensión superior al 110% del valor de voltaje nominal con una duración superior a 1 minuto.

2.8.2 Baja Tensión

Es la reducción en el valor R.M.S de la tensión en estado estacionario a menos del 90% del valor nominal del circuito o sistema durante más de 1 minuto.

Se producen por la conexión de grandes cargas o la desconexión de un banco de condensadores, usualmente los circuitos sobrecargados pueden producir baja tensión en los terminales de la carga. Esta situación perdura hasta que los equipos de regulación logran restablecer el correcto funcionamiento del sistema.

La sobretensión y baja de tensión no se ocasionan por fallas en el sistema, si no que son causadas por las variaciones de la carga u operaciones de conexión y desconexión. Estas variaciones se registran cuando se monitorea el valor R.M.S de la tensión versus tiempo.

2.8.3 Interrupciones Sostenidas

Es una tensión menor al 0,1 p.u. durante más de 1 minuto que frecuentemente es permanente y requiere una intervención manual para restaurar el sistema.

2.9 Desequilibrio de Voltaje

Existe un desequilibrio de voltaje en un sistema eléctrico cuando las tensiones entre las tres líneas no es igual y se define como la desviación máxima del promedio de la tensión trifásica dividido por el promedio de las tensiones de línea, expresado en porcentaje.

El desequilibrio de voltaje generalmente es provocado por cargas monofásicas lineales y no lineales conectadas en circuitos trifásicos, transformadores conectados en delta abierto y fallas de aislamiento en conductores no detectadas. Es recomendable que el desequilibrio de tensiones sea menor al 2% de acuerdo a la Norma IEEE 1159 1995.

$$\text{Desequilibrio de Voltaje(\%)} = \frac{\text{Máxima Desviación Respecto al Promedio}}{\text{Promedio de la Tensión}} * 100 \quad (2.5)$$

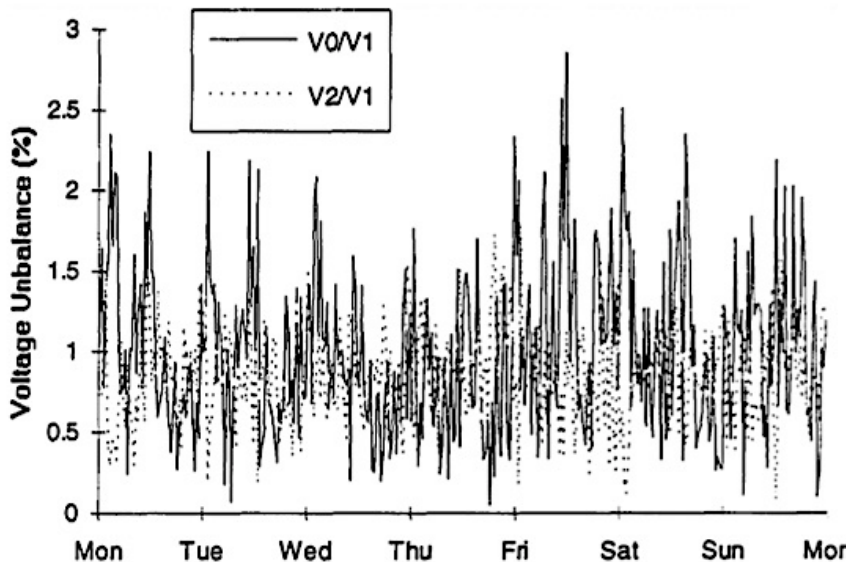


Figura 2. 7: Tendencia del desequilibrio de un alimentador diferencial.

2.10 Distorsión de la Forma de Onda

La distorsión de la forma de onda es la desviación en estado estable de una onda sinusoidal ideal de la tensión o la corriente a la frecuencia fundamental del sistema de potencia y se caracteriza por su contenido espectral.

A continuación se describen las cinco formas primarias de distorsión de la forma de onda:

- Offset DC
- Armónicos
- Interarmónicos
- Hendiduras
- Ruido

2.10.1 Offset DC

Se llama offset o desplazamiento DC debido a la presencia de una tensión o corriente directa en un sistema de corriente alterna y puede ocurrir por el efecto de la rectificación de media onda o controladores de luces incandescentes. Por ejemplo este tipo de controlador puede consistir en diodos que reducen el valor R.M.S. de la tensión de alimentación por rectificación de media onda.

La presencia de la corriente directa en redes de corriente alterna polariza los núcleos de los transformadores saturándolos en operación normal causando el calentamiento y la pérdida de vida útil de los equipos.

2.10.2 Armónicos

Es una onda sinusoidal de tensión o corriente cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental del sistema que se provoca por cargas no lineales. Los armónicos se pueden modelar como fuentes de corrientes inyectadas al sistema y se caracterizan con el espectro en frecuencia, la distorsión armónica total de corriente y voltaje (THDi y THDv) y la distorsión total de demanda (TDD). Una señal con distorsión armónica es la suma de varios armónicos que pueden o no estar en fase con la componente fundamental.

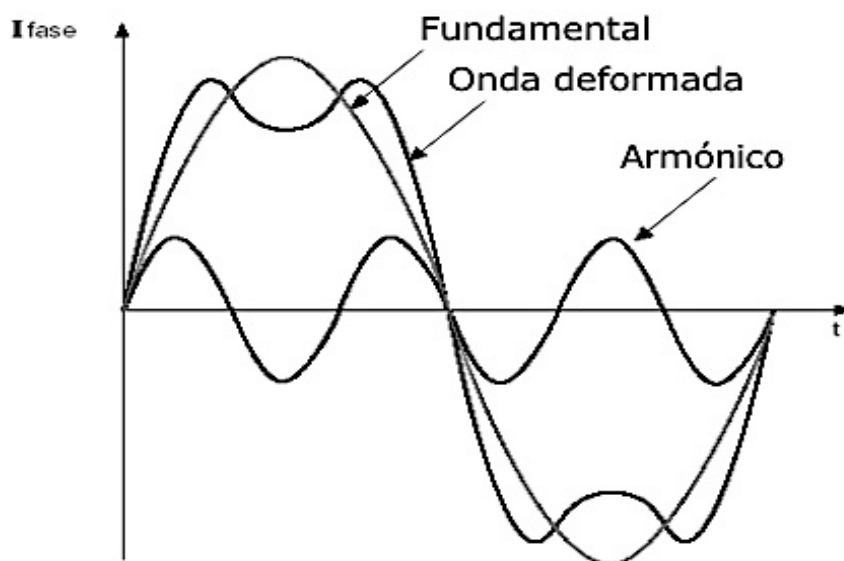


Figura 2.8: Señal con distorsión armónica (NTC 5000, 02)

2.10.3 Interarmónicos

Se definen como las tensiones o corrientes con componentes de frecuencia que no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. La principal fuente de interarmónicos son los convertidores estáticos de frecuencia, convertidores subsíncronos, cicloconvertidores, motores de inducción y dispositivos de arco, pero en general, cualquier carga no pulsante sincrónicamente con la frecuencia fundamental es una fuente potencial de interarmónicos. Los efectos que provocan son similares a los producidos por los armónicos debido a que son fuentes de las fluctuaciones de tensión y presentan alto riesgo a la generación de flicker. Para contrarrestar los efectos de los interarmónicos se diseñan filtros pasivos de potencia.

2.10.4 Hendiduras (Notching)

Son perturbaciones periódicas en la forma de onda de tensión, causada por la operación normal de los dispositivos de electrónica de potencia cuando la corriente es conmutada de una fase a otra, ocurren continuamente y se caracterizan por su espectro armónico. Las hendiduras o muescas de tensión causan fallas en las CPU, impresoras láser y mal funcionamiento de equipos electrónicos. Para eliminar las hendiduras de tensión hay que aislar los equipos sensibles de la fuente que las está produciendo o la inserción de reactancias inductivas puede servir para mitigar estos efectos.

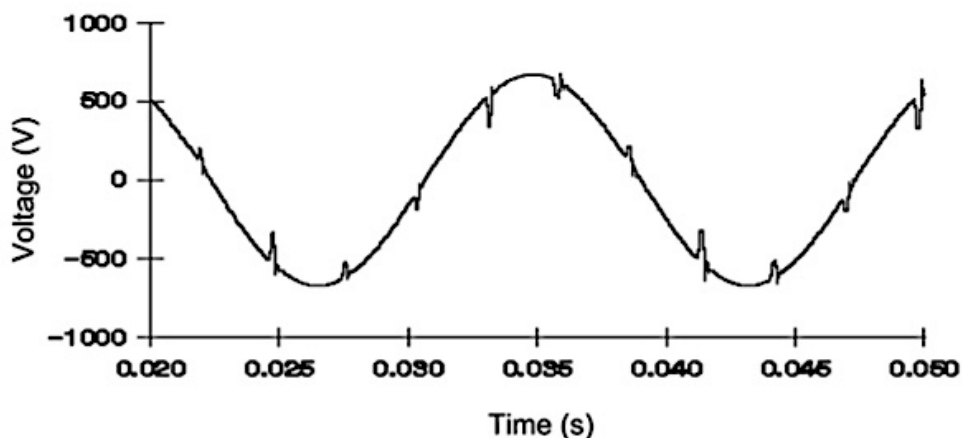


Figura 2.9: Hendidura de tensión causada por la operación del convertidor.

2.10.5 Ruido

El ruido es una señal eléctrica indeseable con un contenido espectral inferior a 200 kHz superpuesto a la tensión o corriente del sistema en los conductores de las fases, en los conductores neutros o líneas de señales. Es causado por equipos de electrónica de potencia, equipos de control, equipos de arco, fuentes conmutadas y cargas con rectificadores de estado sólido.

La causa más frecuente de ruido son los generadores de emergencia de baja calidad.

2.11 Flicker

La Comisión de Electrotecnia Internacional (IEC) lo define como una impresión subjetiva de fluctuación de la luminancia. Es un fenómeno de origen fisiológico y visual que se presenta en los usuarios de lámparas alimentadas por una fuente común a los circuitos de iluminación o a algún equipo de carga conectado a la red. Esta sensación de parpadeo se encuentra en las

fluctuaciones bruscas de tensión de la red en un rango menor al 10% del valor nominal en períodos de tiempo menor a 1 hora.

Principalmente el flicker es el resultado de fluctuaciones rápidas de pequeña amplitud en la tensión de alimentación que pueden ser provocadas por:

- Una variación fluctuante de potencia que absorben cargas como máquinas soldadoras, hornos de arco eléctrico, arranque de motores eléctricos, etc.
- Energización o desenergización de motores eléctricos, banco de condensadores, etc.

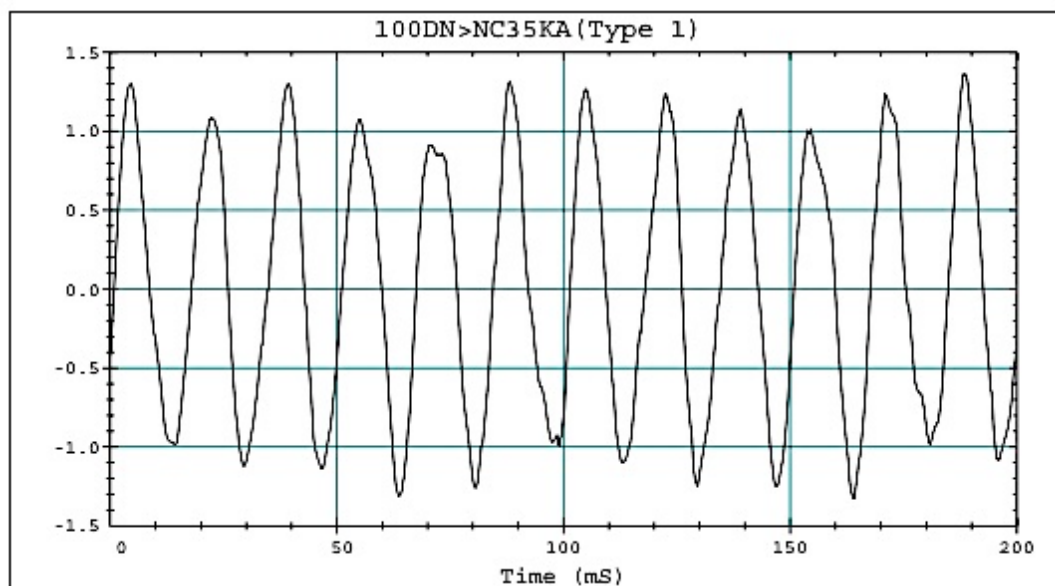


Figura 2.10: Ejemplo de la fluctuación de voltaje causada por la operación de un Horno de arco.

2.12 Variaciones de Frecuencia en el Sistema de Potencia

Se refiere a la desviación de la frecuencia fundamental del sistema eléctrico de su valor nominal especificado (50 Hz en el caso de Chile) y se relaciona directamente con la velocidad de rotación de los generadores. Normalmente ocurre una pequeña variación de frecuencia por la fluctuación del balance entre la generación y la demanda de potencia del sistema.

El en siguiente capítulo se estudia la TW mediante el AMR para detectar y localizar algunos de los tipos de eventos eléctricos que ocurren en la red de energía. Se utiliza un algoritmo en Matlab para determinar los coeficientes de detalle y aproximación y así clasificar este tipo de eventos eléctricos mediante un gráfico de líneas creado en Excel por los vectores característicos.

CAPÍTULO 3. DETECCIÓN, LOCALIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS EVENTOS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se detalla el programa para determinar los eventos de calidad de la energía eléctrica a través de simulaciones y pruebas del método propuesto. El programa es implementado empleando la herramienta computacional MATLAB. Este software permite realizar simulaciones entregando una interfaz gráfica interactiva y personalizable.

Este programa permite monitorear los eventos de calidad de la energía eléctrica y ejecutar el algoritmo del método propuesto para detectar, localizar y clasificar el tipo de perturbaciones que afectan la red de energía a partir de muestras de una señal de voltaje o corriente.

Además de lo anterior, se analiza y explica el tipo de wavelet madre y como utilizarla para detectar y localizar eventos de calidad.

RUTINA DE CÁLCULO.

Para detectar y localizar los eventos de calidad de la energía eléctrica es necesario contar con una herramienta que sea capaz de diferenciar discontinuidades o pequeñas variaciones de la forma de onda. La transformada wavelet permite detectar cambios bruscos en la forma de la señal. Por lo tanto, dependiendo de la característica o forma que tenga la función wavelet, se puede obtener una adecuada o inadecuada detección del evento de calidad.

3.1 Selección de la Wavelet Madre a utilizar.

Existe una variedad de wavelet madre para análisis continuos y discretos, cada una de ella con sus ventajas y desventajas dependiendo de la aplicación en la que se utilice. Por ende, la elección de la función para detectar y localizar eventos eléctricos, debe cumplir con los siguientes criterios:

- Permitir el análisis continuo y discreto para poder comparar ambos métodos.
- Debe estar disponible en librerías y comandos en el programa Matlab, para permitir su uso y aplicación.
- No debe consumir demasiados recursos computacionales.
- Debe tener buena respuesta en frecuencia.

La función Wavelet madre de la familia Daubechies cumple estas características, ya que tiene la particularidad de ser del tipo de wavelet ortogonal con soporte compacto en el tiempo, que la convierte en una herramienta útil de cálculo porque tiene una extensión infinita en el espacio de frecuencias. Al ser una wavelet ortogonal es apropiada para la aplicación del algoritmo de multiresolución.

3.2 Cálculo de la energía de una señal

El cálculo de la energía de una señal se basa en el Teorema de Parseval: “ La energía que contiene una función en el dominio del tiempo es igual a la suma de la energía que se concentra en los diferentes niveles de descomposición de una señal, realizada con la transformada discreta wavelet”. Esto quiere decir, que si a una señal se le ha aplicado el AMR, su energía es igual a la suma de las energías de sus detalles y aproximación de más alto nivel [6]. Esto se resume en la ecuación (3.1):

$$\sum_{n=1}^N |f(n)|^2 = \sum_{n=1}^N |a_j(n)|^2 + \sum_{j=1}^j \sum_{n=1}^N |d_j(n)|^2 \quad (3.1)$$

donde se tiene que:

$f(n)$: Señal analizada en el dominio del tiempo.
N	: Número total de muestras de la señal.
$\sum_{n=1}^N f(n) ^2$: Energía total de la señal $f(n)$.

$\sum_{n=1}^N |a_j(n)|^2$: Energía total concentrada en el nivel ‘j’ de la aproximación de la señal.
 $\sum_{j=1}^j \sum_{n=1}^N |d_j(n)|^2$: Energía total concentrada en los ‘detalles’ de la señal, desde el nivel 1 al ‘j’.

3.3 Cálculo de la desviación de la energía de una señal

El método para calcular la energía fue desarrollado utilizando los comandos wavelet de la caja de herramientas de la biblioteca del programa Matlab, éste consta de seis pasos que se detalla a continuación:

- Una vez se aplica la TWD, se obtienen los coeficientes de ‘aproximación’ y ‘detalle’.
- Evaluación del cuadrado de los coeficientes wavelet encontrados en el paso anterior.
- Cálculo de la energía de la señal para cada nivel de detalle y aproximación wavelet utilizando la ecuación (3.1).
- Se repite los pasos del 1 al 3 para una señal sinusoidal con frecuencia fundamental o de referencia.
- La energía obtenida en el paso 3 se compara con la energía obtenida en el paso 4. El resultado de esta comparación es la desviación de energía de la señal, que se calcula con la ecuación (3.2).

$$dp(j)(\%) = \left[\frac{en_dist(j) - en_ref(j)}{en_ref} \right] \times 100\% \quad (3.2)$$

Donde:

- j : Nivel de la transformada wavelet.
- $dp(j)$: Desviación entre las distribuciones de energía de la señal en estudio y la señal sinusoidal fundamental de referencia, para cada nivel de la TW.
- $en_dist(j)$: Distribución de energía concentrada en cada nivel de la TW para la señal en estudio.
- $en_ref(j)$: Distribución de energía concentrada en cada nivel de la TW para la señal de referencia.
- en_ref : Energía concentrada en el nivel correspondiente a la componente fundamental de la señal de referencia (se concentra la mayor cantidad de energía).

- La desviación de $dp(j)(\%)$ se gráfica para obtener una curva de porcentaje de variación de energía versus niveles de energía para cada señal en estudio.

DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE EVENTOS MEDIANTE LA SECUENCIA DE DETALLES

Se emplea el programa de descomposición a partir de la ecuación 1.15 en el que se obtiene los coeficientes de detalle y aproximación de la secuencia de muestras de la señal hasta el nivel de resolución deseado. Aplicando el AMR de la transformada wavelet (algoritmo de reconstrucción o TW inversa) a cada uno de estos coeficientes, se obtiene respectivamente las secuencias de aproximación y detalle de la señal en el dominio del tiempo.

La estrategia que se plantea en este seminario de título, utiliza el AMR para obtener la secuencia de detalles de la señal para detectar el comienzo y/o el final de un evento relacionado a la calidad de la energía. Esto es posible, ya que la TW discrimina los cambios bruscos de pendientes (altas frecuencias) dada sus características. Por lo tanto, es posible localizar en el dominio del tiempo el instante donde presenta la perturbación o el cambio brusco en la onda.

A continuación se presentan algunos ejemplos más comunes de eventos ocurridos en la red eléctrica que provocan mal funcionamiento de los sistemas. Las señales que se analizan son simulaciones en Matlab de eventos eléctricos que obedecen a las normas internacionales.

Se simula, en el programa Matlab, una perturbación Sag (hueco de tensión), se puede detectar el comienzo y el final del evento en el dominio del tiempo a partir de la primera secuencia de detalles que se muestra en la figura (3.1). Este evento ocurre en una señal de voltaje de 50 (Hz) muestreada a 1024 muestras por ciclo durante 1 (Seg) con fase de 90°.

En la figura 3.1 se muestra el nivel de detalle D1 entre los 250-500 (Hz) cuyo ancho de banda es de 250(Hz), cálculo obtenido a partir de las ecuaciones 1.16, 1.17, 1.18 y 1.19, se detecta una perturbación localizada a los 300 (ms) y 802(ms) aproximadamente, tiempo en el cual se detecta un leve cambio en la tensión. También se observa que la respuesta en frecuencia es apropiada para la extracción de información en el dominio del tiempo.

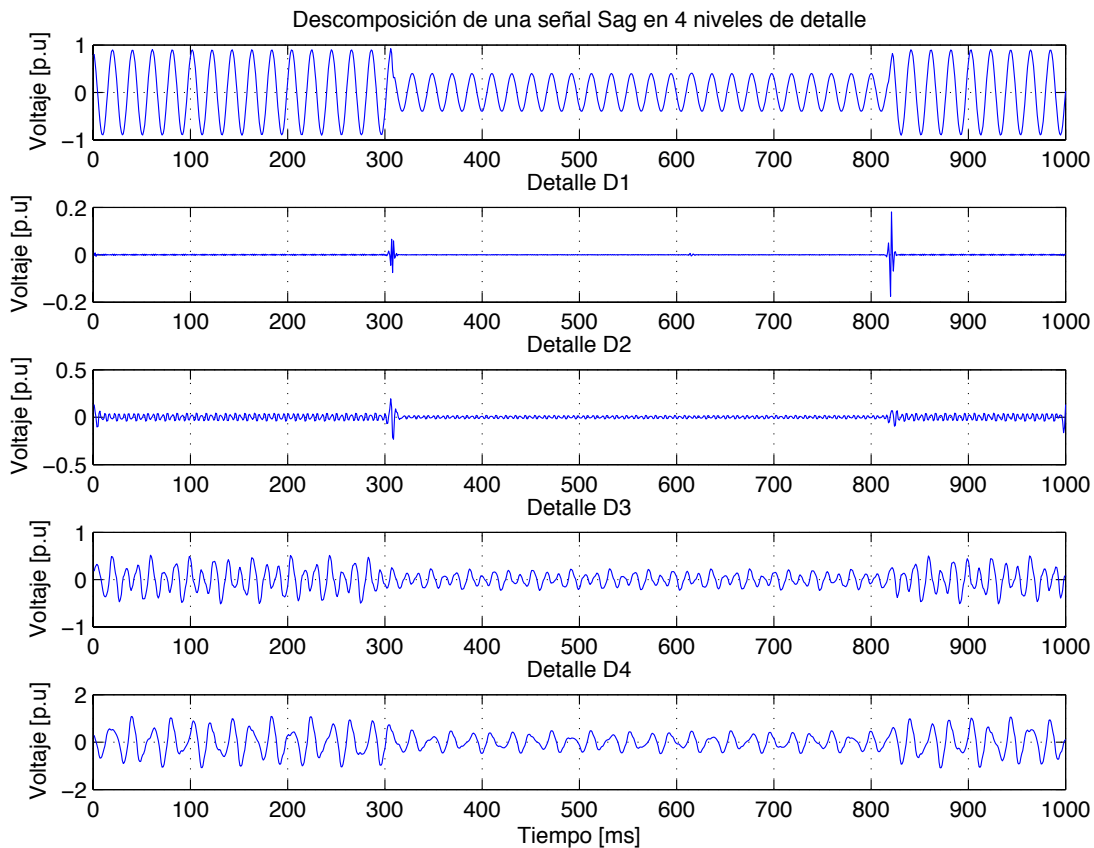


Figura 3.1: Descomposición de un hueco de tensión “Sag” en 4 niveles de detalle utilizando la función Db4.

En la figura 3.2 se observa un evento Swell que ocurre en una señal de voltaje de 50 (Hz) muestreada a 1024 muestras por ciclo en 1 (Seg) con una fase de 90°. En el primer nivel de detalle D1 se detecta una perturbación en la tensión localizada a los 300 y 802 (ms) aproximadamente, en un rango de frecuencia entre los 250-500 (Hz).

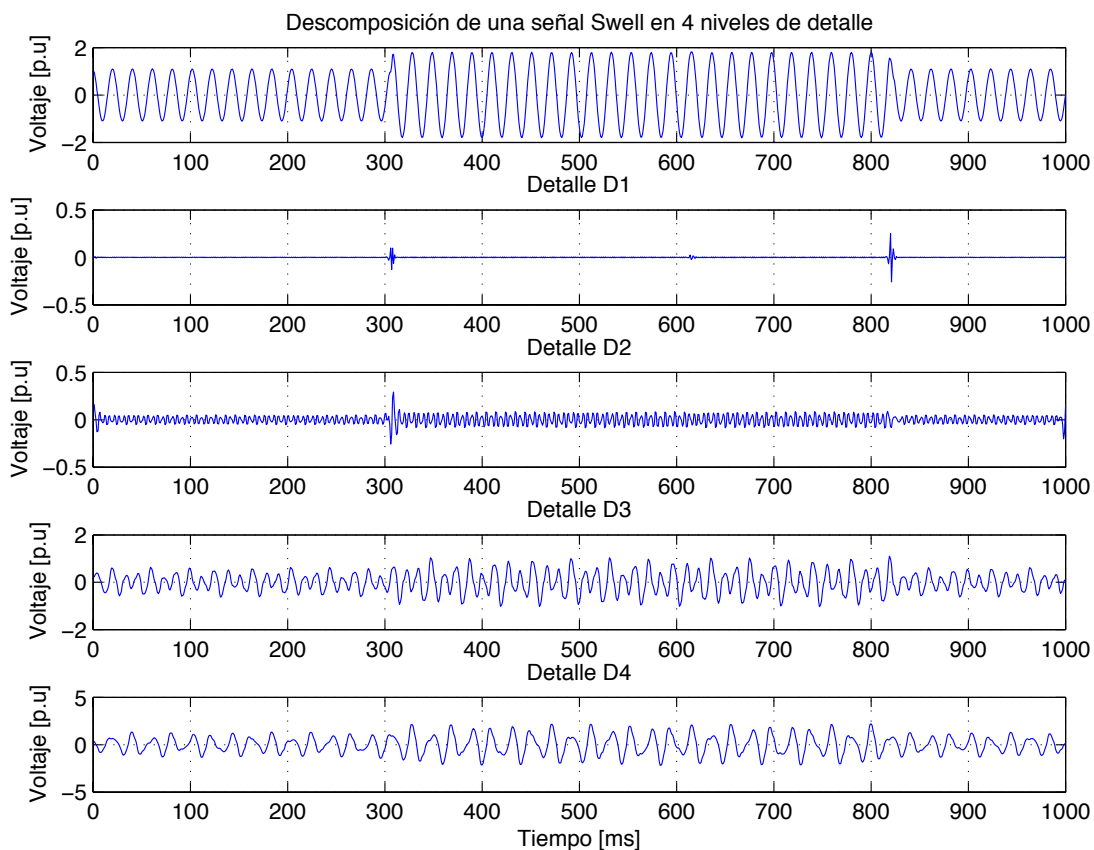


Figura 3.2: Descomposición de un “Swell” en 4 niveles de detalle utilizando la función Db4.

En la figura 3.3 se muestra una descomposición de un evento flicker, en el cual, se detecta que en el nivel de detalle D4 se produce una perturbación localizada aproximadamente a los 250 (ms) en un ancho de banda entre los 62,5-125 (Hz), donde se encuentra la frecuencia fundamental..

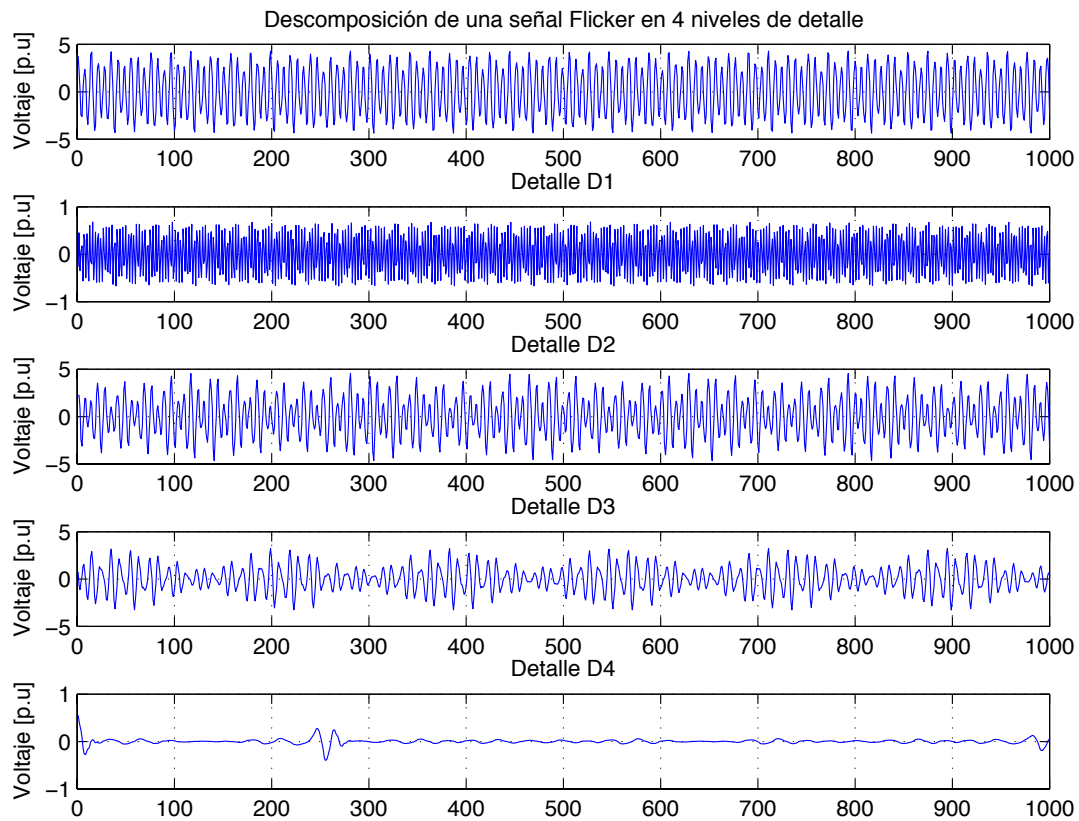


Figura 3.3: Descomposición de un “Flicker” en 4 niveles de detalle utilizando la función Db4.

En la figura 3.4 se analiza un fenómeno transitorio de baja frecuencia menor a los 5 (KHz). Se detecta que en el nivel de detalle D1 ocurre la perturbación localizada aproximadamente a los 250 (ms) y a los 301 (ms) en un rango de frecuencia entre los 250-500 (Hz). En el primer nivel de detalle se encuentran las frecuencias altas. A medida que aumenta el nivel de detalle disminuye la resolución en el dominio del tiempo y aumenta la resolución en el dominio de la frecuencia.

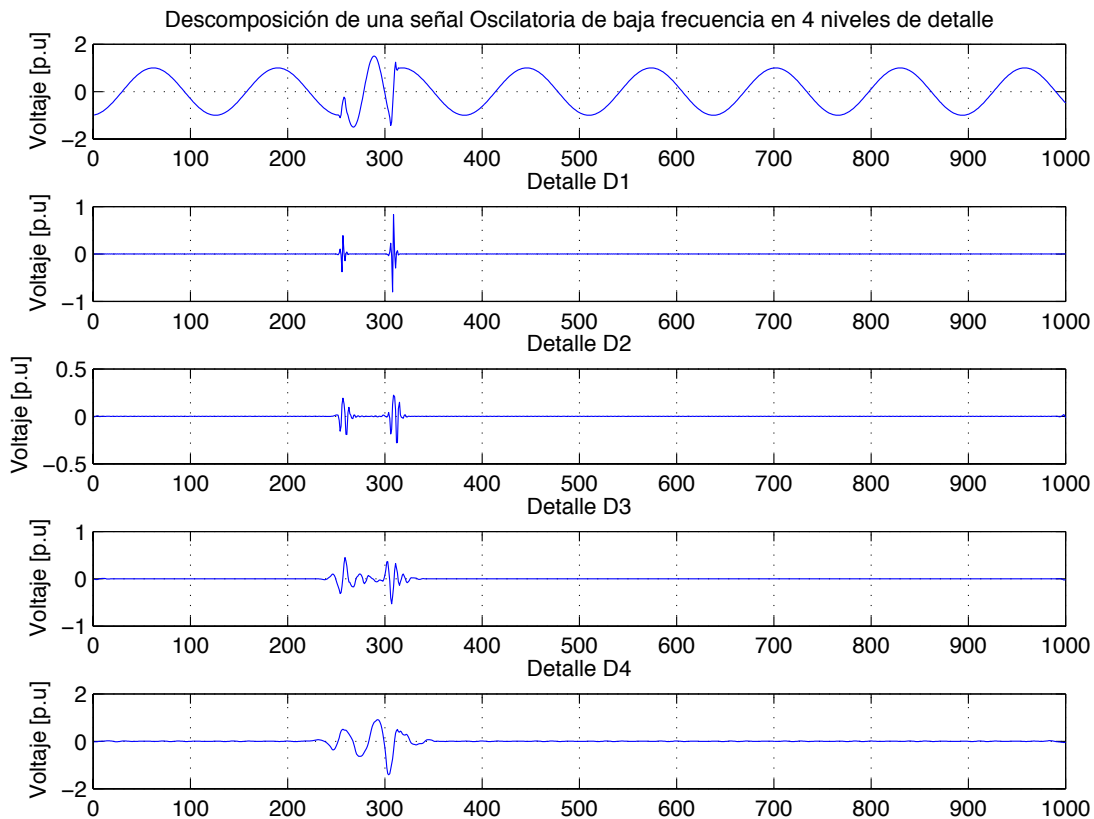


Figura 3.4: Descomposición de un evento oscilatorio de baja frecuencia en 4 niveles de detalle utilizando la función Db4.

En la figura 3.5 se descompone una señal de corriente armónica monofásica no lineal, se detecta que en el nivel de detalle D1 ocurre una pequeña perturbación de corriente localizada aproximadamente a los 260 (ms).

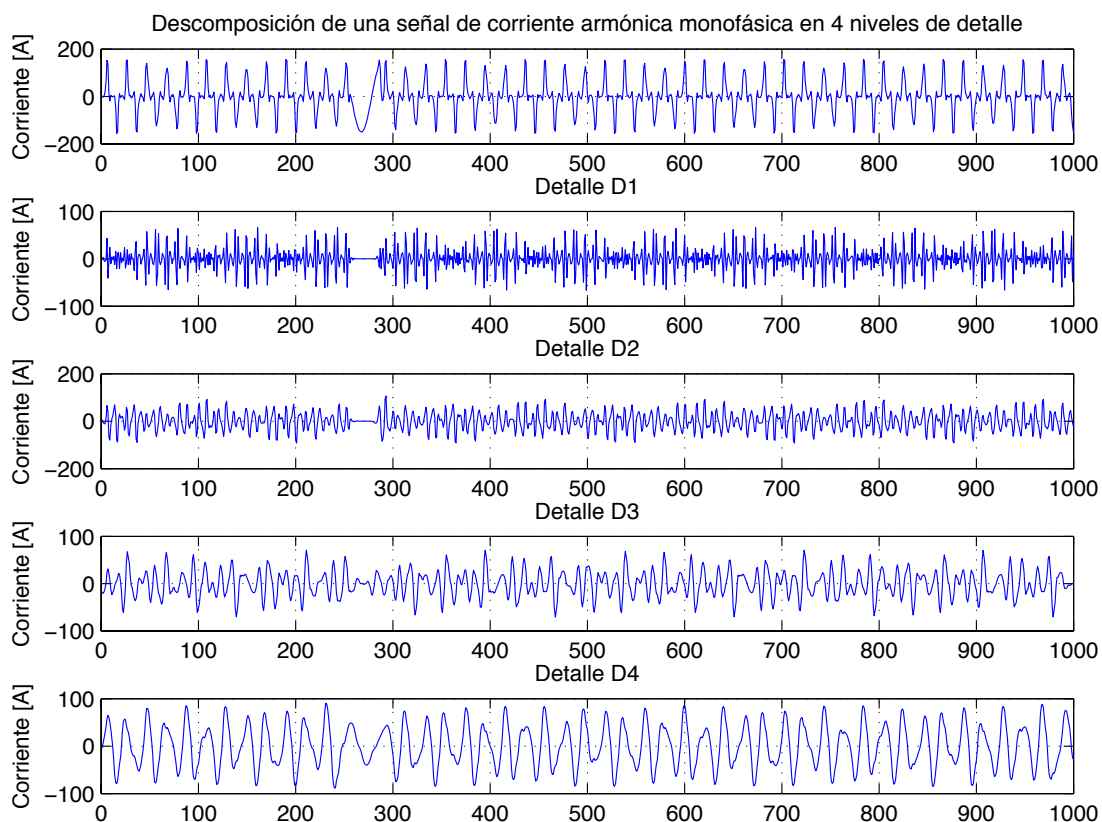


Figura 3.5: Descomposición armónica de una señal monofásica de corriente característica de una carga no lineal en 4 niveles de detalle utilizando la función Db4.

Realizando un análisis comparativo de las figuras 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5 se deduce que el AMR es un buen método para detectar y localizar perturbaciones en el dominio del tiempo que ocurren en la red eléctrica. En el primer nivel de detalle D1 ocurre principalmente la primera detección de la perturbación ya que fundamentalmente contiene las altas frecuencias y una mayor frecuencia de muestreo. Para identificar correctamente el tipo de evento en condiciones normales de operación se debe cumplir con un período de registro de mediciones de una semana cualquiera del año o de siete días consecutivos tomando muestras en intervalos de 10 (min) aproximadamente (artículo 5-72 NT SyCS). Por lo tanto, los eventos tratados en este seminario de título son simulaciones aproximadas de señales eléctricas que permiten aplicar el AMR y así poder detectar y localizar perturbaciones eléctricas en el dominio del tiempo.

DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE EVENTOS MEDIANTE LA ENERGÍA DE LOS COEFICIENTES

A partir de la energía de los coeficientes wavelet de aproximación y detalle se puede identificar y diferenciar cada uno de los eventos estudiados en el capítulo 2 considerados en este seminario de título.

Como ya se estudió el cálculo de la energía de una señal, utilizando la ecuación 3.1, es posible conocer la distribución de la energía de la señal en el rango de frecuencias que exista en cada nivel de descomposición, dependiendo de la frecuencia de muestreo y la función wavelet (en este caso Db4) que determina el ancho de banda de cada nivel de descomposición a partir de la ecuación 1.16, 1.17, 1.18 y 1.19.

Este método calcula la energía de los coeficientes de cada nivel de detalle basado en el Teorema de Parseval utilizando la ecuación 3.1, tanto para la señal sinusoidal a frecuencia fundamental o pura como para la señal con perturbaciones, para compararlas en el punto siguiente a partir de la ecuación 3.2. Estos valores de la desviación de la energía para cada nivel de descomposición determinan un patrón vectorial de la señal pura como de la señal original, siendo posible diferenciar los tipos de eventos y sus posibles perturbaciones en el monitoreo de la red de energía como lo es un sag, swell, flicker, oscilatorios de alta, media o baja frecuencia, armónicos entre otros.

El patrón que se obtiene es un vector característico, que representa la variación de energía en cada detalle en cierto tipo de evento eléctrico. Por lo tanto, estudiando el vector característico, se puede determinar el tipo de perturbación que existe en la señal de la red eléctrica [7][8]. En la figura 3.6 se muestra diferentes tipos de vectores característicos en distintos niveles de energía que corresponden a determinados eventos de calidad de la red de eléctrica.

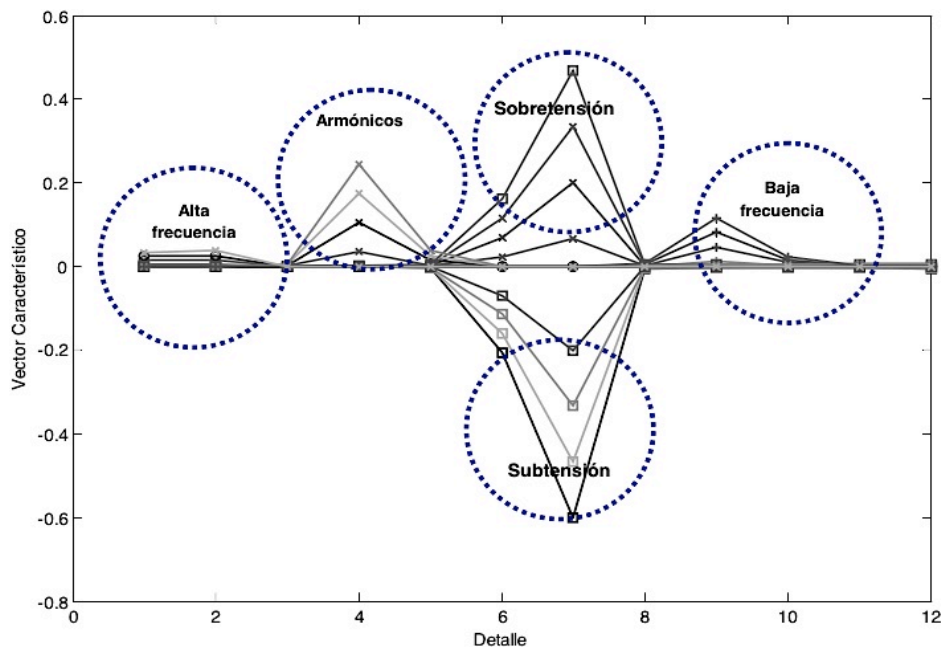


Figura 3.6: Vector característico para diferentes perturbaciones que afectan la red eléctrica .

En la figura 3.6 se observa que hay distintas zonas en las que se puede diferenciar los distintos tipos de perturbaciones ocurridas en un cierto evento eléctrico. Para una señal de tensión o corriente con una perturbación desconocida, comparándolo con el vector característico se determina el tipo de evento en la red eléctrica. Es importante conocer en cada caso el valor del vector de energía que tiene la señal sinusoidal con frecuencia fundamental o de referencia, esta señal de referencia es una señal sinusoidal pura y es comparada con la señal original.

El valor de la energía en cada detalle depende de la frecuencia de muestreo y del tipo de función wavelet, por lo tanto, el vector característico de la energía se la señal y seno puro a estudiar debe estar a la misma frecuencia de muestreo, misma fase y utilizar la misma función wavelet. Al variar el vector característico cambia la fase de la señal al igual que la duración en el tiempo, teniendo gran importancia cuando la longitud de la señal no es muy grande porque cuando aumenta el índice de detalle, la diferencia de energía entre ambas aumenta.

A continuación se analizan algunos eventos mediante la energía de sus coeficientes.

En la figura 3.7 se aprecia como el detalle 4 es el que posee un nivel de energía superior al contener en su ancho de banda la frecuencia fundamental de 50 Hz. Al estudiar solo los niveles de energía de la señal eléctrica no se puede determinar si efectivamente ocurre alguna perturbación eléctrica en dicho evento.

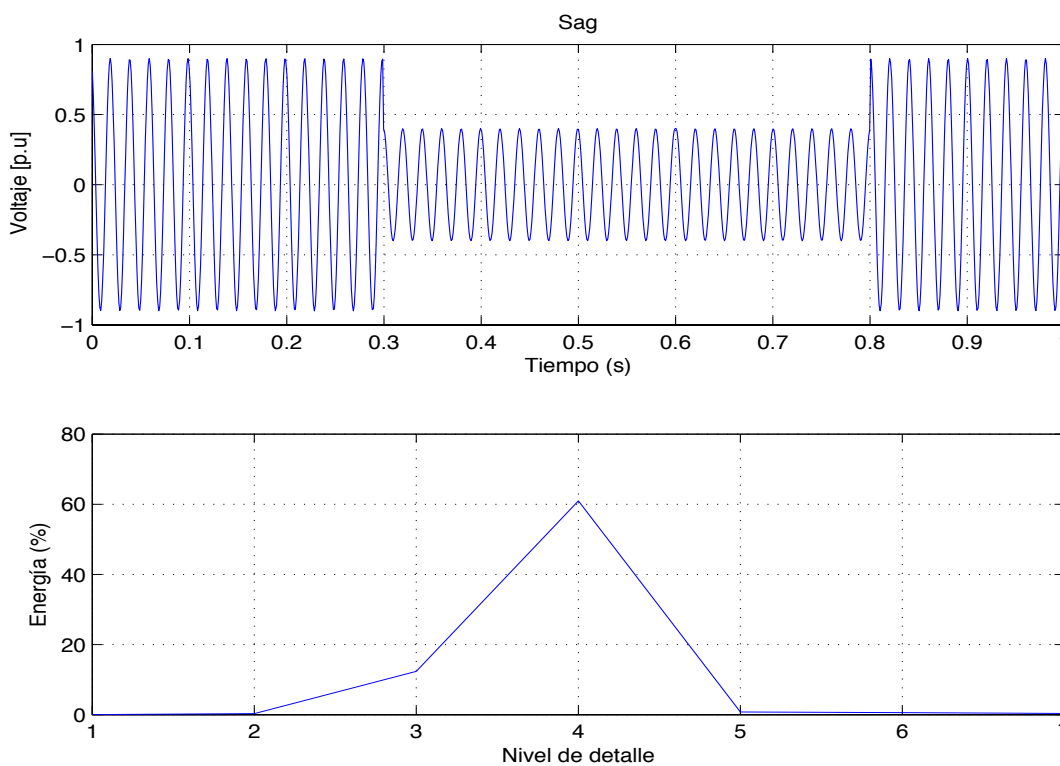


Figura 3.7: Evento Sag y su energía por nivel de detalle.

Al observar el vector característico de la figura 3.8 se deduce que en el nivel de detalle 4 se presenta el máximo nivel de energía al contener la frecuencia fundamental de la señal eléctrica, sin embargo, no es posible determinar si existe alguna perturbación en el dominio del tiempo, pero al comparar la figura 3.7 con la figura 3.8 se produce una diferencia de energía, en la cual, la figura 3.8 tiene mayor porcentaje de energía que la figura 3.7, por lo tanto ocurre un aumento de voltaje de la señal eléctrica que indica que es un evento Swell.

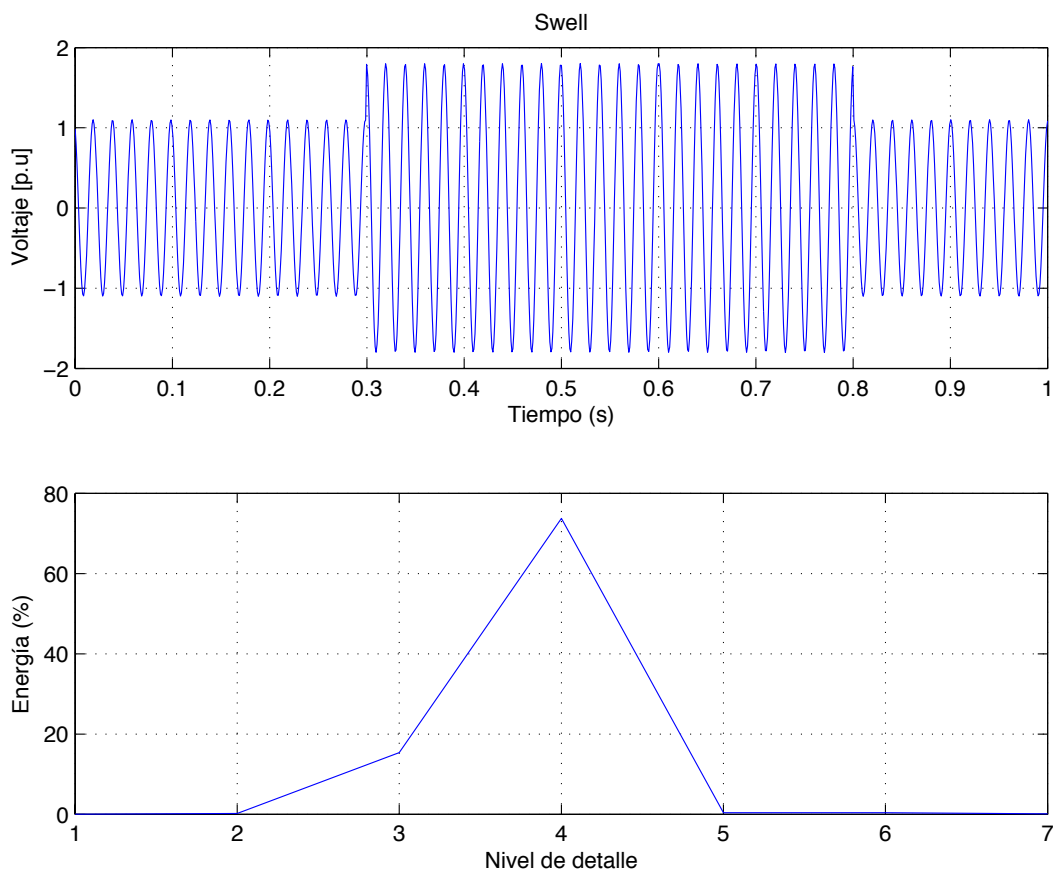


Figura 3.8: Evento Swell y su nivel de energía por nivel de detalle.

En la figura 3.9 se muestra que en el segundo nivel de detalle ocurre una perturbación a alta frecuencia que contiene en su ancho de banda la frecuencia fundamental de la señal analizada. Además se observa que a medida que aumenta el nivel de detalle disminuye su energía, por lo tanto carece de información relevante para el análisis de la perturbación.

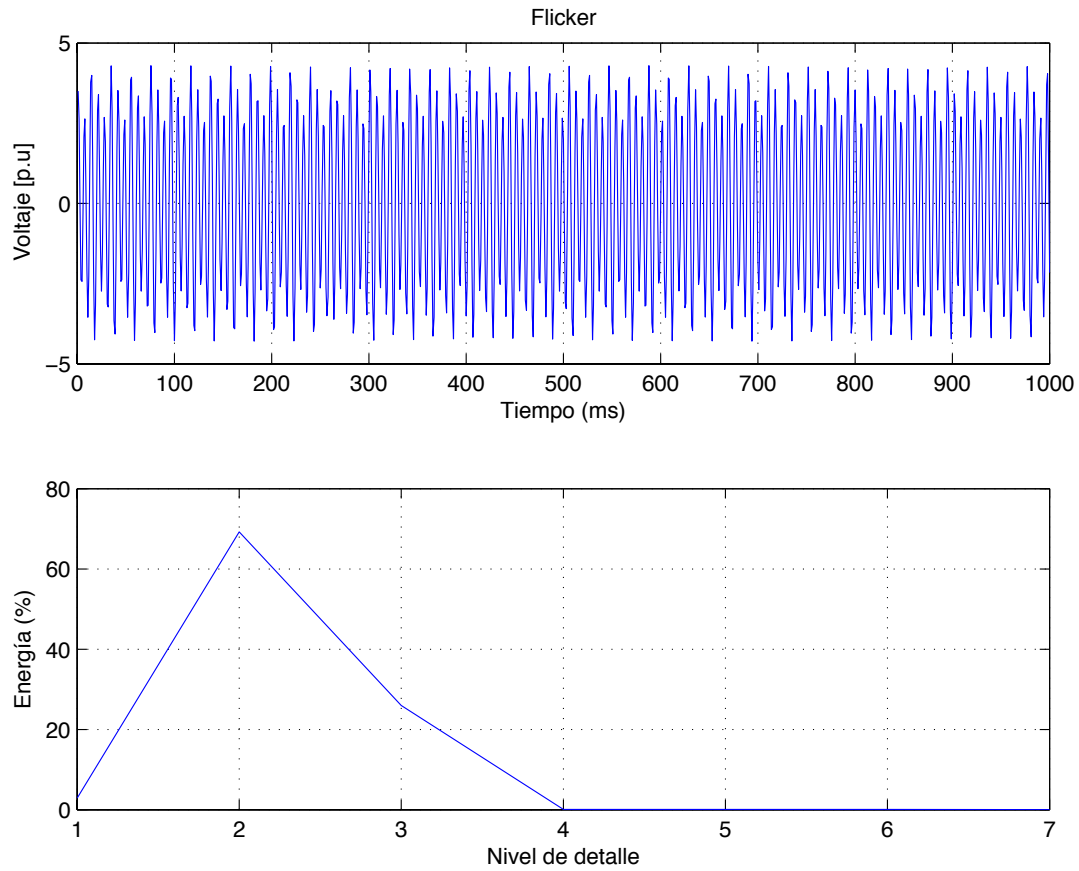


Figura 3.9: Evento Flicker y su nivel de energía por nivel de detalle .

Se observa que en la figura 3.10 en el sexto nivel de detalle aumenta el nivel de energía, por lo tanto la frecuencia fundamental del evento se encuentra contenido en ese ancho de banda. También se infiere que en el nivel sexto ocurre una perturbación a baja frecuencia al ser comparada con el vector característico de la figura 3.6.

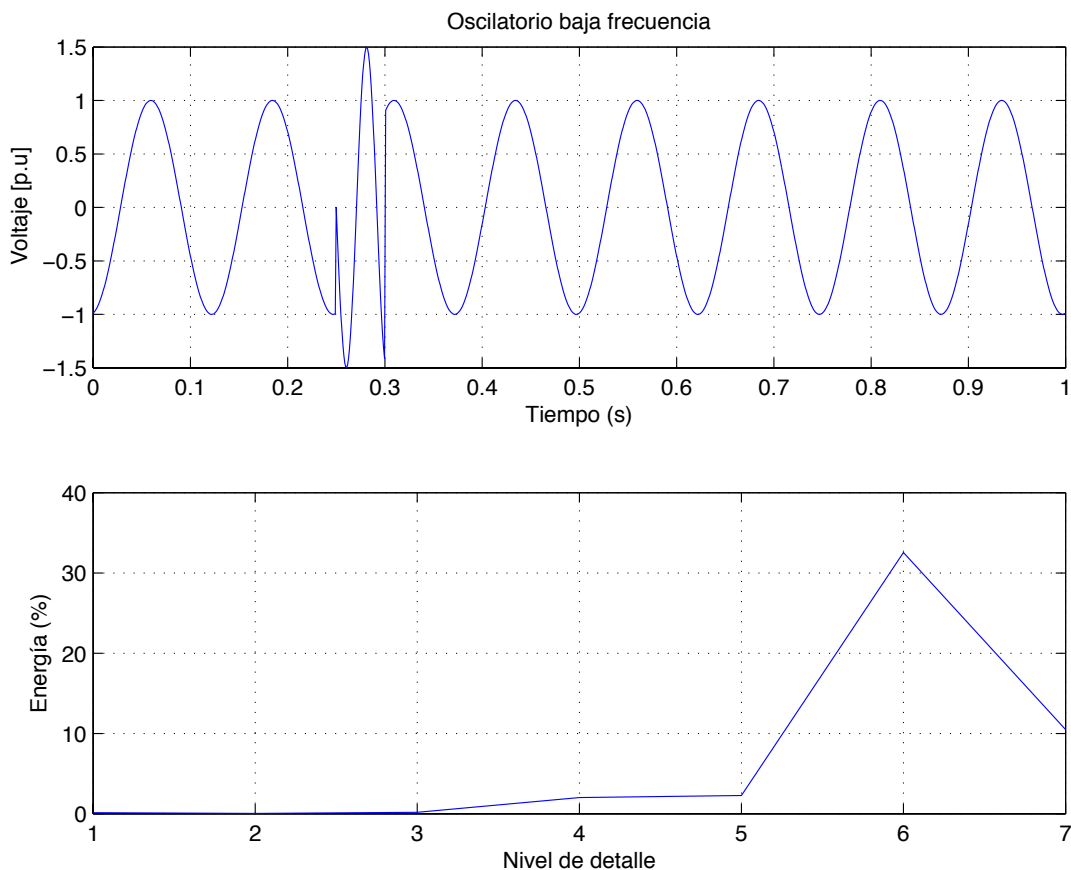


Figura 3.10: Evento Transitorio de baja frecuencia y su nivel de energía por nivel de detalle.

De la figura 3.11 se deduce que la señal de corriente monofásica en su primer nivel detalle muestra el noveno armónico a una alta frecuencia. En el nivel de detalle dos ocurre un aumento de energía que contiene al tercer y quinto armónico en su respectivo ancho de banda. En el nivel de detalle 4 se observa el mayor aumento de energía ya que su ancho de banda contiene el primer armónico correspondiente a la frecuencia fundamental de la señal de corriente monofásica. Los siguientes armónicos son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental.

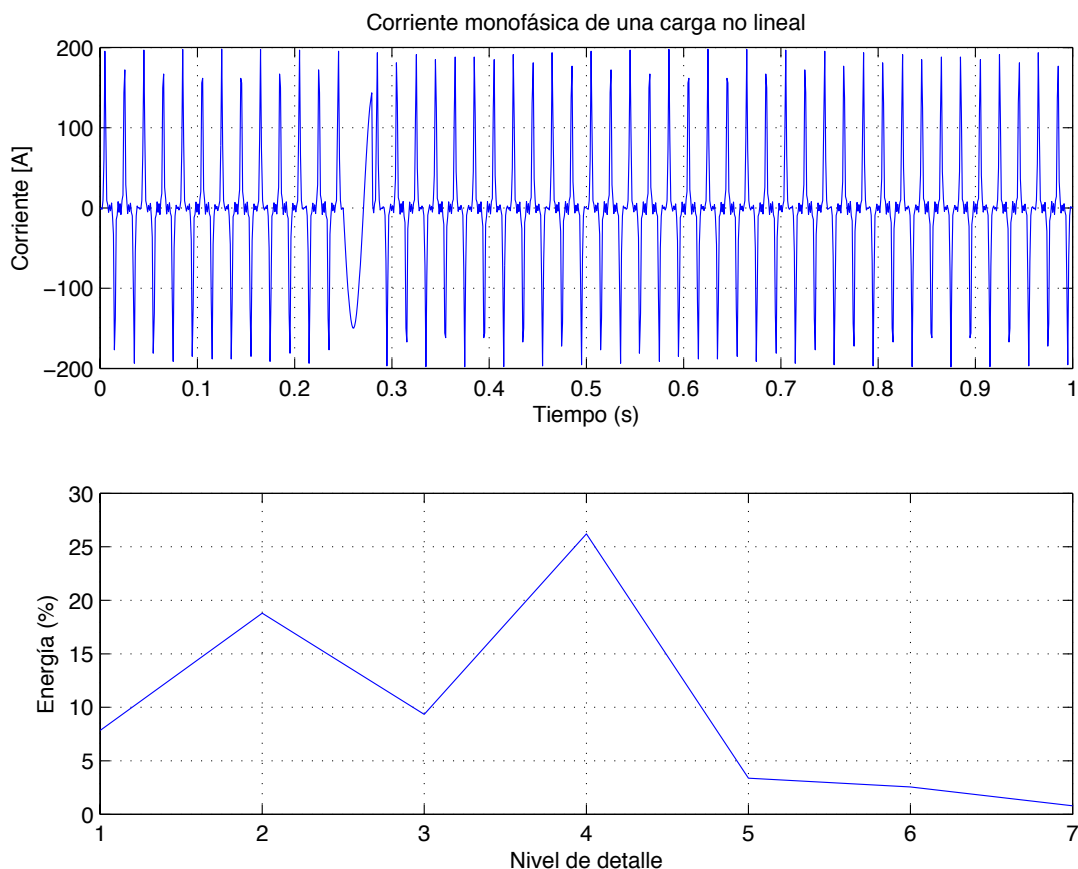


Figura 3.11: Corriente característica de una carga monofásica no lineal y su respectivo nivel de energía por cada nivel de detalle .

Haciendo un análisis comparativo de las figuras 3.7, 3.8, 3.9, 3.10 y 3.11 se infiere que el método para identificar eventos de calidad mediante los coeficientes de energía de la wavelet es un buen método, sin embargo, no permite detectar las posibles perturbaciones que afectan la red eléctrica, ya que es necesario contar con una señal de las mismas características que la señal original de la misma amplitud, frecuencia y fase. Para poder clasificar el tipo de evento eléctrico se exportan los coeficientes de energía al programa Excel utilizando el análisis de la desviación de energía.

A continuación se analiza el cálculo de la desviación de la energía para clasificar los eventos que afectan la red eléctrica, y así monitorear los eventos y posibles perturbaciones que pueden causar fallas en el sistema eléctrico.

Para el cálculo de la desviación de la energía de una señal se utiliza la ecuación (3.2) y es una comparación de la energía de los coeficientes de cada nivel de detalle que se va analizar versus una señal sinusoidal pura a frecuencia fundamental o de referencia.

Para realizar este cálculo de la desviación de energía, ambas señales deben tener:

- Igual frecuencia de muestreo.
- Las mismas fases.
- El tiempo de duración de la señal debe ser idéntico.
- Utilizar la misma función wavelet madre.
- Estar descompuesta en la misma cantidad de niveles de detalles.

A continuación se muestra la energía de los coeficientes por cada nivel de detalle de una señal sinusoidal a frecuencia fundamental con distintas fases.

Las tablas creadas en el programa Excel se basan en el cálculo de la ecuación 3.2, que permite determinar el cálculo de la desviación de energía de una señal. Posteriormente se grafican los resultados mostrados a través de un gráfico lineal que representa el vector característico, y así poder clasificar de manera visual a que evento eléctrico corresponde la señal analizada.

Tabla 3.1: Energía de los coeficientes wavelet de una señal sinusoidal pura.

Nivel	Energía (%) fase 0°	Energía (%) fase 90°	Energía (%) fase 30°	Ancho de banda
1	6,81E-04	9,15E-04	7,76E-04	256-500 (Hz)
2	0,1476	0,1905	0,1586	128-256 (Hz)
3	10	14	12	64-128 (Hz)
4	47,9919	69,034	56,7189	32-64 (Hz)
5	0,6605	0,2314	0,3615	16-32 (Hz)
6	1,4609	0,5147	0,4245	8-16 (Hz)
7	0,6616	0,2483	0,3544	4-8 (Hz)

En la figura 3.12 se observa la energía de los coeficientes wavelet por cada nivel de detalle con distintas fases. El nivel de detalle D4 es el que posee la mayor cantidad de energía ya que abarca un ancho de banda entre los 32-64 (Hz), esto se debe a que la frecuencia fundamental de la señal sinusoidal se encuentra en ese rango de frecuencias. El resto de los niveles de detalle debería tener energía nula, esto no es así, ya que la pendiente de atenuación de los filtros utilizados en la descomposición no es finita y los detalles próximos al cuarto nivel están influenciados por la onda de 50 Hz, que hace que aumente el nivel energía. La caída en la ganancia de los filtros será mayor cuanto mayor sea el orden de la función wavelet, y por lo tanto las energías de los detalles próximos al cuarto serán menores.

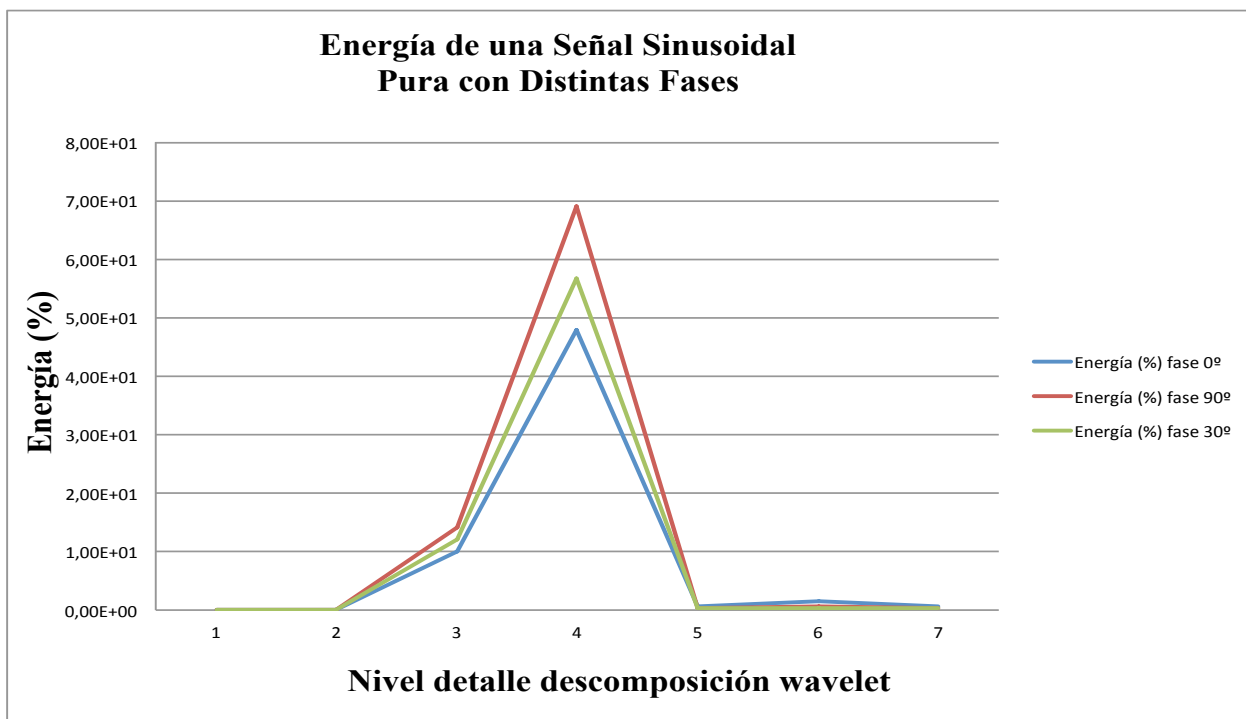


Figura 3.12: Energía de los coeficientes wavelet por cada nivel de detalle .

En el nivel de detalle 4 varía el nivel de energía, sin embargo, a bajas y altas frecuencias al ser comparada con la señal original simulada en Matlab la desviación de energía tendría un error en el vector característico provocando una alteración en la clasificación del evento eléctrico.

Tabla 1.2: Cálculo de la desviación de energía de un evento Sag.

Nivel	% en_dist(7)	Nivel	%en_ref7()	dp(7)(%)	Ancho de banda
1	0,0267	1	9,15E-04	0,03735177	256-500 (Hz)
2	0,2796	2	0,1905	0,12906684	128-256 (Hz)
3	12,3604	3	14	-2,5601877	64-128 (Hz)
4	60,9612	4	69,034	-11,693948	32-64 (Hz)
5	0,7662	5	0,2314	0,77469073	16-32 (Hz)
6	0,5919	6	0,5147	0,11182895	8-16 (Hz)
7	0,3440	7	0,2483	0,13862734	4-8 (Hz)

Se observa que en la figura 3.13 ocurre efectivamente un evento Sag. La desviación de energía es más significativa en el nivel de detalle cuatro ya que contiene la frecuencia fundamental en un ancho de banda entre 32-64 (Hz). La comparación entre el evento Sag y la señal sinusoidal a frecuencia fundamental, está en fase y a la misma frecuencia de muestreo, de tal manera que la medición es más exacta y tiende a un error menor de identificación y clasificación del evento eléctrico.

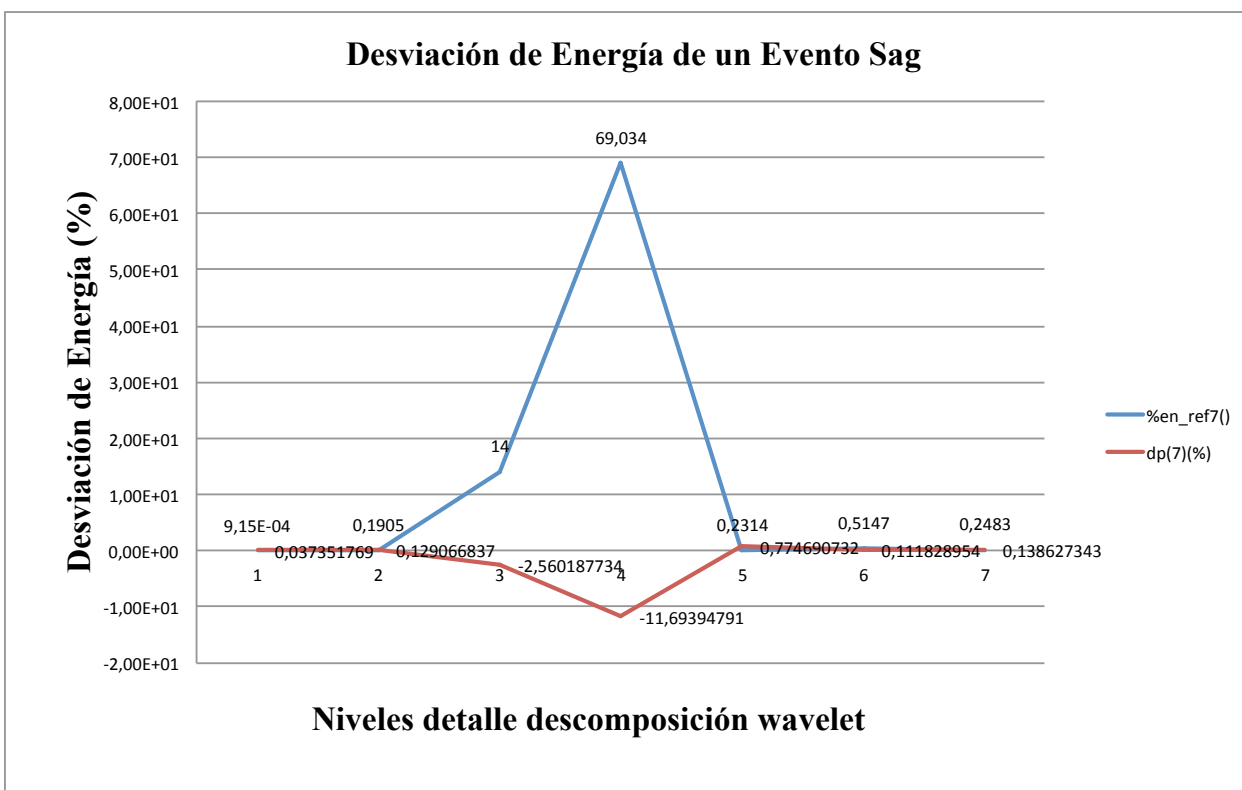


Figura 3.13: Cálculo de la desviación de energía por cada nivel de detalle de un evento Sag .

Tabla 3.3: Cálculo de la desviación de energía de un evento Swell.

Nivel	% en_dist(7)	Nivel	%en_ref(7)	dp(7)(%)	Ancho de banda
1	0,0157	1	9,15E-04	0,021417591	256-500 (Hz)
2	0,2243	2	0,1905	0,048961381	128-256 (Hz)
3	15,3632	3	14	1,789552974	64-128 (Hz)
4	73,7214	4	69,034	6,789987542	32-64 (Hz)
5	0,3915	5	0,2314	0,231914709	16-32 (Hz)
6	0,397	6	0,5147	-0,170495698	8-16 (Hz)
7	0,138	7	0,2483	-0,159776342	4-8 (Hz)

En la figura 3.14 se observa una pequeña desviación de energía en el nivel de detalle 4, con un leve aumento en la tensión y energía en el vector característico de la señal Swell (dp(7) %). Este aumento de energía se produce porque la frecuencia fundamental se encuentra en el ancho de banda entre los 32-64 (Hz) de detalle 4. Ambas señales están en fase y muestreadas a la misma frecuencia de muestreo de 1(Khz).

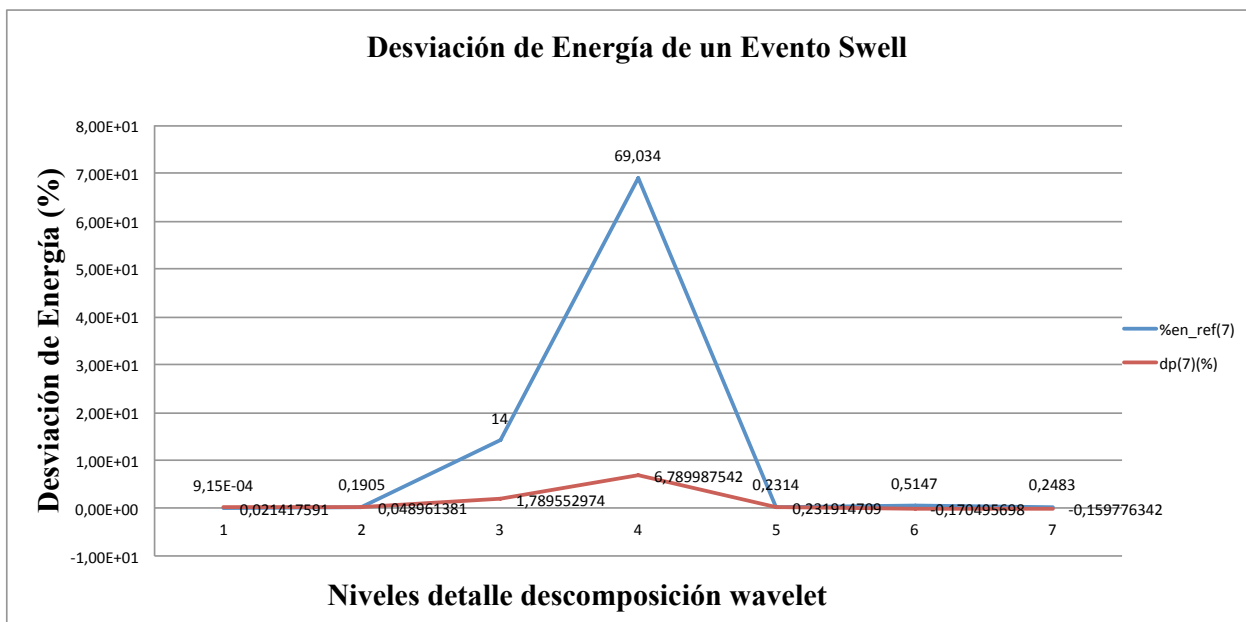


Figura 3.14: Cálculo de la desviación de energía por cada nivel de detalle de un evento Swell .

Tabla 3.4: Cálculo de la desviación de energía de un evento Flicker.

Nivel	% en dist(7)	Nivel	%en_ref(7)	dp(7)(%)	Ancho de banda
1	2,8917	1	6,81E-04	6,023973462	256-500 (Hz)
2	69,2283	2	0,1476	143,9424153	128-256 (Hz)
3	25,958	3	10	33,25144451	64-128 (Hz)
4	0,0862	4	47,9919	-99,82038636	32-64 (Hz)
5	0,0763	5	0,6605	-1,217288751	16-32 (Hz)
6	0,0498	6	1,4609	-2,94028784	8-16 (Hz)
7	0,0269	7	0,6616	-1,322514841	4-8 (Hz)

Se observa que en la figura 3.15 la señal Flicker (dp(7)%) en el nivel de detalle dos presenta la mayor desviación de energía, incluso más alto que la señal sinusoidal pura a frecuencia fundamental, esto se debe a que en el nivel de detalle 2, se provoca un aumento de tensión a alta frecuencia. A medida que aumenta el nivel de detalle el nivel de energía disminuye al igual que la frecuencia de la señal. En el nivel de detalle 4 se produce un hundimiento en el vector característico debido a la brusca variación de voltaje de la señal original.

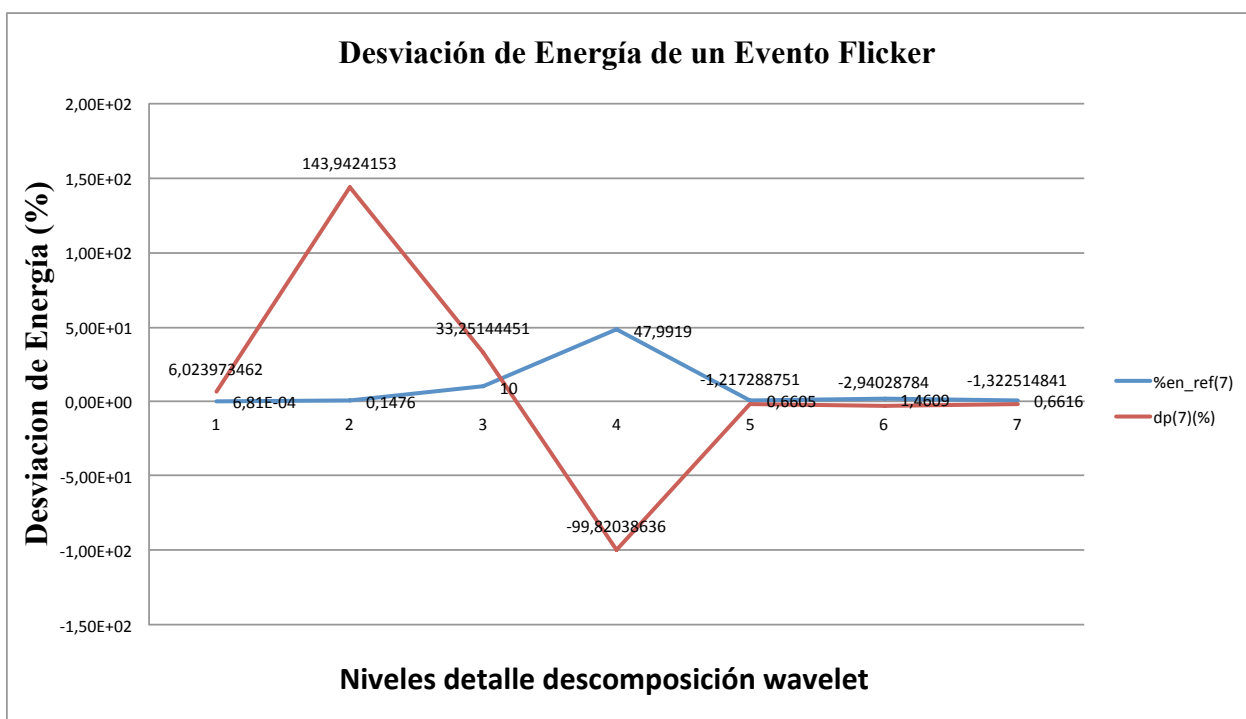


Figura 3.15: Cálculo de la desviación de energía por cada nivel de detalle de un evento Flicker .

Tabla 3.5: Cálculo de la desviación de energía de un evento Oscilatorio a Baja Frecuencia.

Nivel	% en_dist(7)	Nivel	%en_ref(7)	dp(7)(%)	Ancho de banda
1	0,1388	1	7,76E-04	0,243346839	256-500 (Hz)
2	0,0423	2	0,1586	-0,20504629	128-256 (Hz)
3	0,1787	3	12	-20,13261893	64-128 (Hz)
4	2,0068	4	56,7189	-96,46184958	32-64 (Hz)
5	2,2559	5	0,3615	3,339980148	16-32 (Hz)
6	32,539	6	0,4245	56,62045632	8-16 (Hz)
7	10,4752	7	0,3544	17,84378752	4-8 (Hz)

En la figura 3.16 ocurre un evento transitorio a baja frecuencia, ya que el mayor nivel de desviación de energía ocurre en el detalle seis a baja frecuencia, dado que la frecuencia fundamental de la señal transitoria está contenida entre los 4-8 (Hz). En el nivel de detalle cuatro ocurre una brusca disminución en la desviación de energía, esto se debe a que en la señal analizada se produce una perturbación del orden de los milisegundos, que provoca una variación en la tensión y la frecuencia.

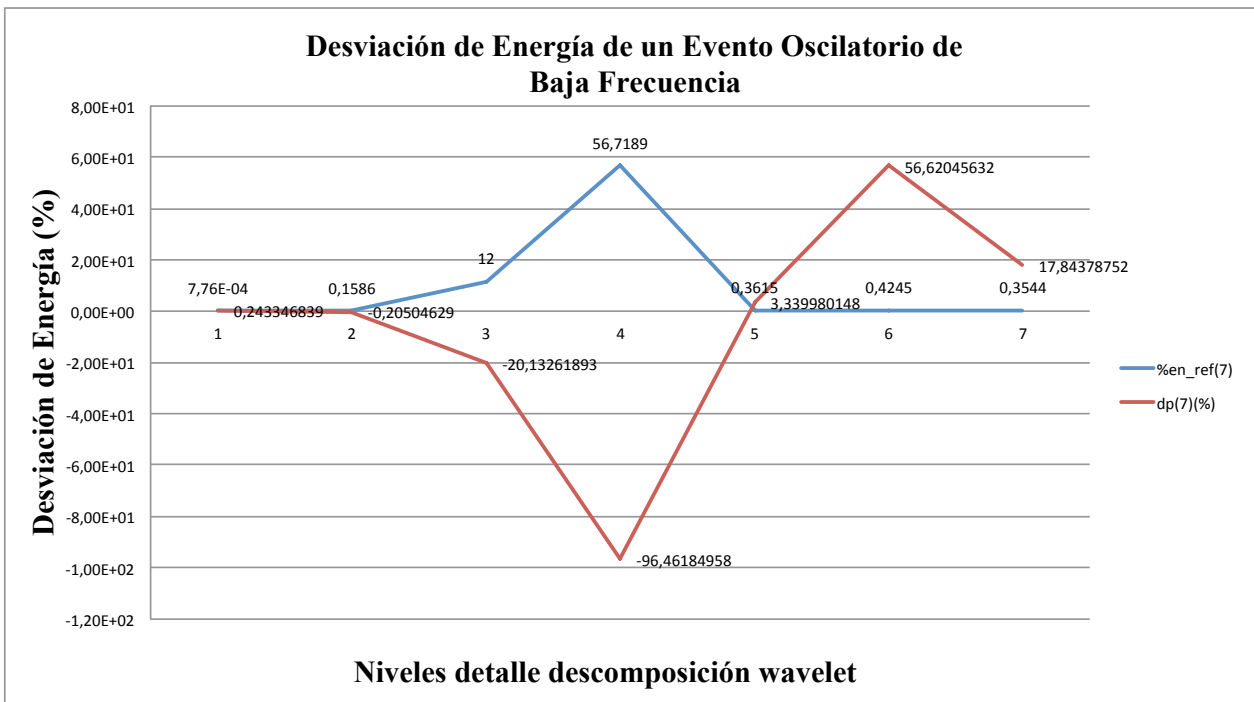


Figura 3.16: Cálculo de la desviación de energía por cada nivel de detalle de un evento Oscilatorio de Baja Frecuencia.

Tabla 3.6: Cálculo de la desviación de energía de un evento armónico.

Nivel	% en_dist(7)	Nivel	%en_ref(7)	dp(7)(%)	Ancho de banda
1	7,8368	1	6,81E-04	16,32800393	256-500 (Hz)
2	18,7879	2	0,1476	38,84051267	128-256 (Hz)
3	9,3442	3	10	-1,366480594	64-128 (Hz)
4	26,2022	4	47,9919	-45,40287007	32-64 (Hz)
5	3,3692	5	0,6605	5,644077438	16-32 (Hz)
6	2,5599	6	1,4609	2,289969766	8-16 (Hz)
7	0,7989	7	0,6616	0,286089944	4-8 (Hz)

De la figura 3.17 se observa una señal real de corriente característica de una carga monofásica no lineal, en la que se infiere claramente que es un evento armónico debido a que en el detalle de nivel dos se produce una alta frecuencia correspondiente al noveno armónico de la señal de corriente de la carga no lineal múltiplo entero de la frecuencia fundamental, con un aumento en la desviación de energía. Luego en el detalle cuatro se produce una disminución en la desviación de energía producto que en cuyo nivel está contenida la frecuencia fundamental de la señal de corriente en un ancho de banda de 32-64 (Hz).

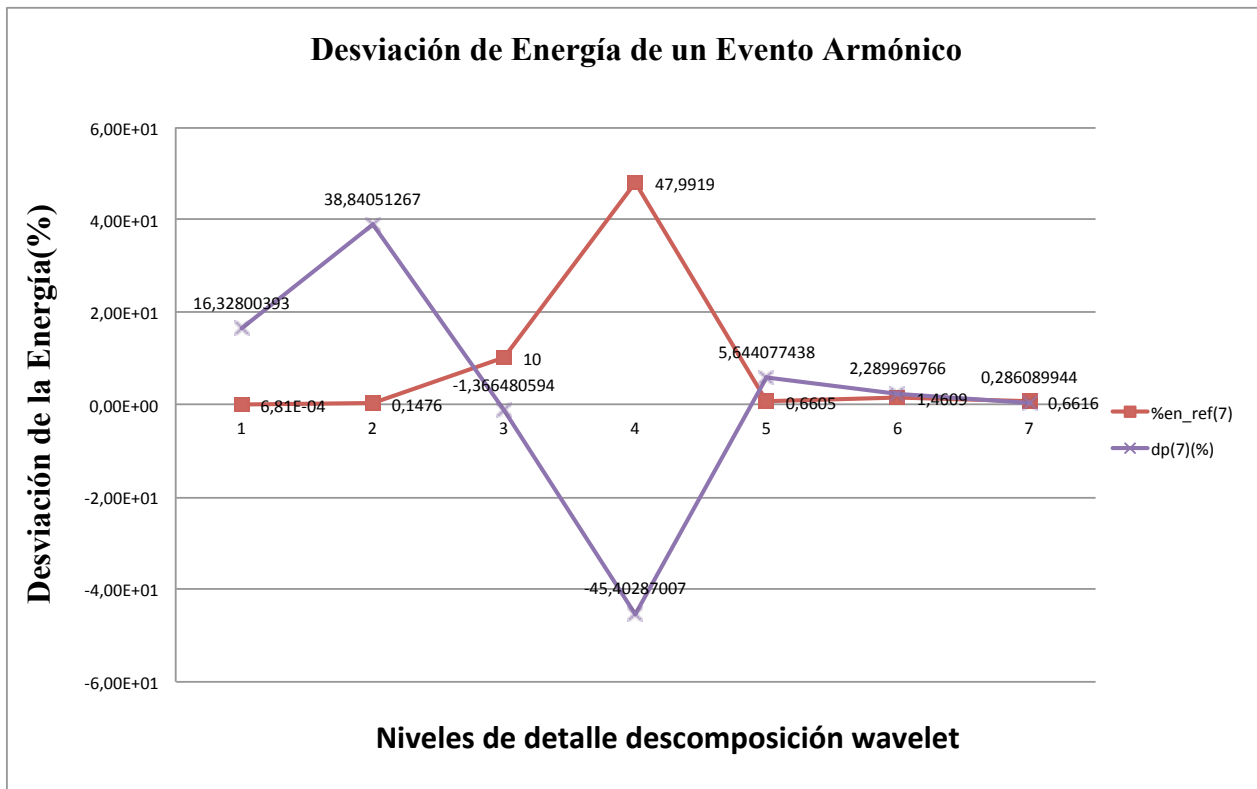


Figura 3.17: Cálculo de la desviación de energía por cada nivel de detalle de una señal de corriente característica monofásica no lineal .

A continuación se estudia la forma de onda de corriente y voltaje de una fuente switching para determinar los parámetros de calidad en el monitoreo de la energía eléctrica. Se utilizan los programas puestos a prueba en el capítulo 3 para detectar, localizar, y clasificar el tipo de eventos eléctricos de la red de energía.

Para crear la señal de corriente y voltaje se tomaron 1024 muestras con un DAC, creando una señal de corriente contaminada, no contaminada o una señal de tensión de línea en un circuito no lineal.

Se destaca que no se puede comparar los resultados reales de las simulaciones que se realizan, debido a que no se cuenta con un medidor electrónico inteligente, en que se pueda corroborar si efectivamente los resultados arrojados por los programas propuestos en el capítulo 3 son correctos. Para tener una correcta medición se debe medir durante 7 días consecutivos en intervalos de 10 minutos como lo indica la norma IEEE.

Descomposición, energía de los coeficientes wavelet y cálculo de la desviación de los niveles de detalle de una FTE SWITCHING

A continuación se analizan las señales muestreadas a 1 (Khz). Se asume que la señal de corriente y voltaje están en fase con la señal sinusoidal a frecuencia fundamental.

En la figura 3.18 se observa que ocurre una perturbación en el dominio del tiempo, aproximadamente a los 50, 300, 550 y 800 (ms) en un ancho de banda de 32-64 (Hz), ya que en el nivel de detalle 4 esta contenida la frecuencia fundamental de la red eléctrica. En el primer nivel de detalle se muestra que la señal se confunde con ruido, por lo tanto es más complejo detectar y localizar donde ocurre el tipo de perturbación. A medida que aumenta el nivel de detalle disminuye la resolución de tiempo y aumenta la resolución de la frecuencia. En este caso el AMR elimina el ruido permitiendo detectar y localizar de forma aproximada donde ocurren las perturbaciones de la señal eléctrica.

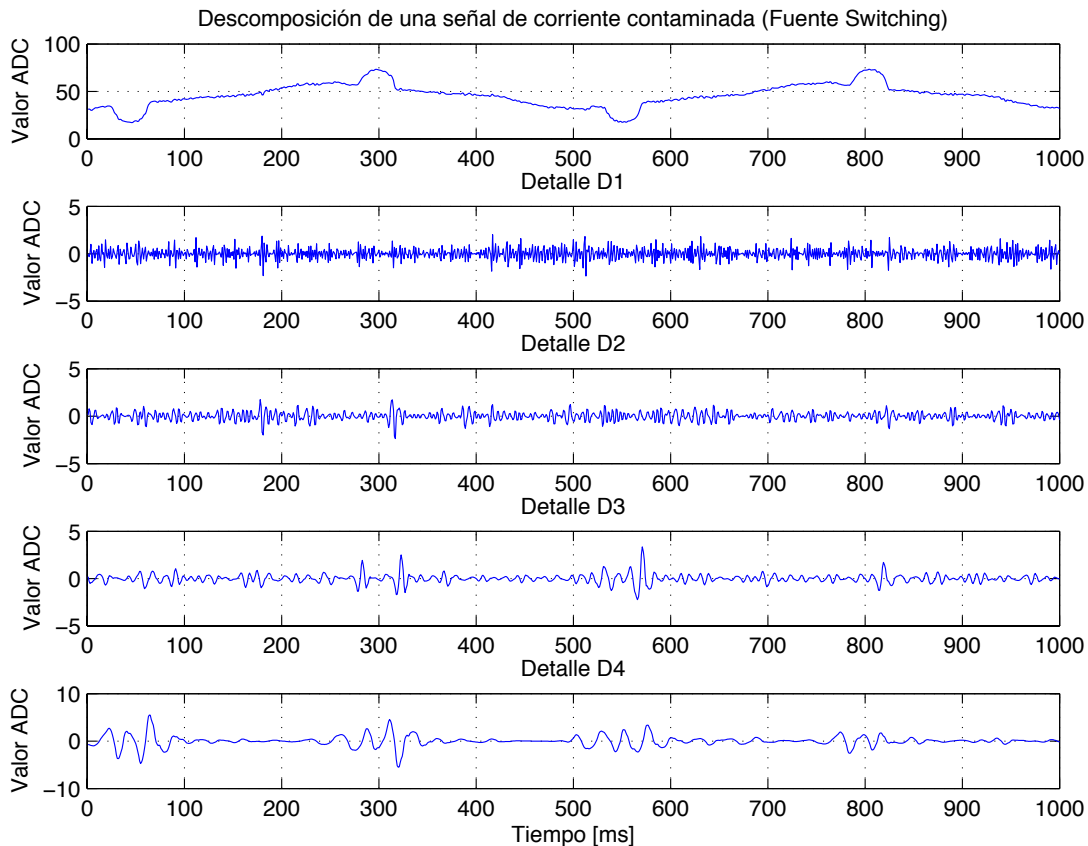


Figura 3.18: Descomposición a nivel de detalle 4 de una señal de corriente contaminada utilizando la función Db4.

Se observa que en la figura 3.19 el nivel de detalle seis concentra la mayor cantidad de energía a una baja frecuencia en un ancho de banda entre los 8-16 (Hz). Analizando el vector característico se puede deducir que el nivel de energía de los coeficientes wavelet no es el adecuado para poder inferir datos correctos en este estudio. Además los niveles de energía por nivel de detalle por si solos carecen de información para realizar un análisis del evento eléctrico. Esta señal necesita ser comparada con una señal sinusoidal a frecuencia fundamental o de referencia con la misma frecuencia de muestreo e igual fase.

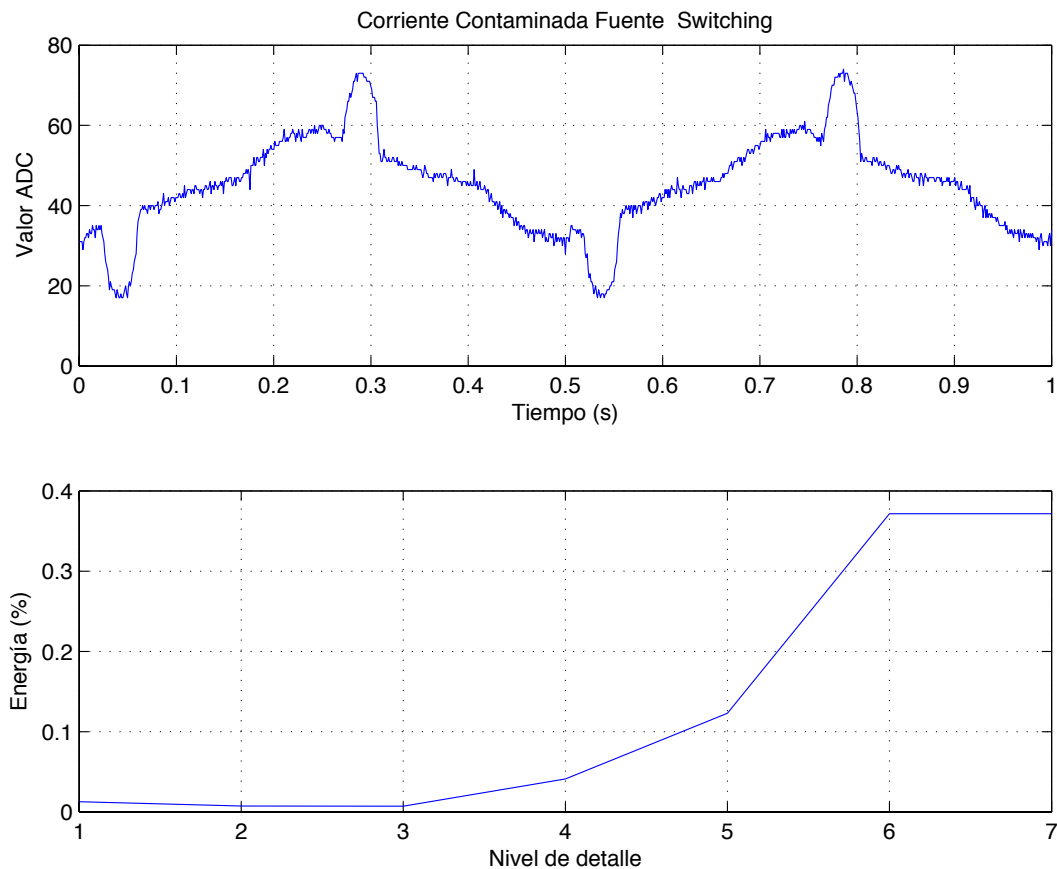


Figura 3.19: Energía de cada nivel de detalle de una corriente Fuente SWITCHING.

Tabla 3.7: Cálculo de la desviación de energía de una corriente contaminada Fuente Switching.

Nivel	% en_dist(7)	Nivel	%en_ref(7)	dp(7)(%)	Ancho de banda
1	0,0128	1	6,81E-04	0,025252845	256-500 (Hz)
2	0,0073	2	0,1476	-0,292340999	128-256 (Hz)
3	0,0071	3	10	-20,82205539	64-128 (Hz)
4	0,0411	4	47,9919	-99,91436055	32-64 (Hz)
5	0,1229	5	0,6605	-1,120189032	16-32 (Hz)
6	0,3715	6	1,4609	-2,26996639	8-16 (Hz)
7	0,3715	7	0,6616	-0,604477005	4-8 (Hz)

Al observar la figura 3.20 se infiere que una señal de corriente contaminada FTE SWITCHING podría ser un evento Sag porque se producen hundimientos en la señal de corriente, ya que en el 4 nivel de detalle ocurre la menor desviación de energía en un ancho de banda entre los 32-64 (Hz), en el que se encuentra contenida la frecuencia fundamental de la red de energía. Además la señal de corriente esta muestreada a la misma frecuencia de muestreo e igual fase que la señal sinusoidal pura. Sin embargo para determinar si efectivamente es un evento Sag se necesitan tomar muestras cada 10 minutos durante 7 días consecutivos, en este caso, es solo una muestra de la señal de corriente, por lo tanto carece de credibilidad para afirmar que dicho evento Sag ha ocurrido.

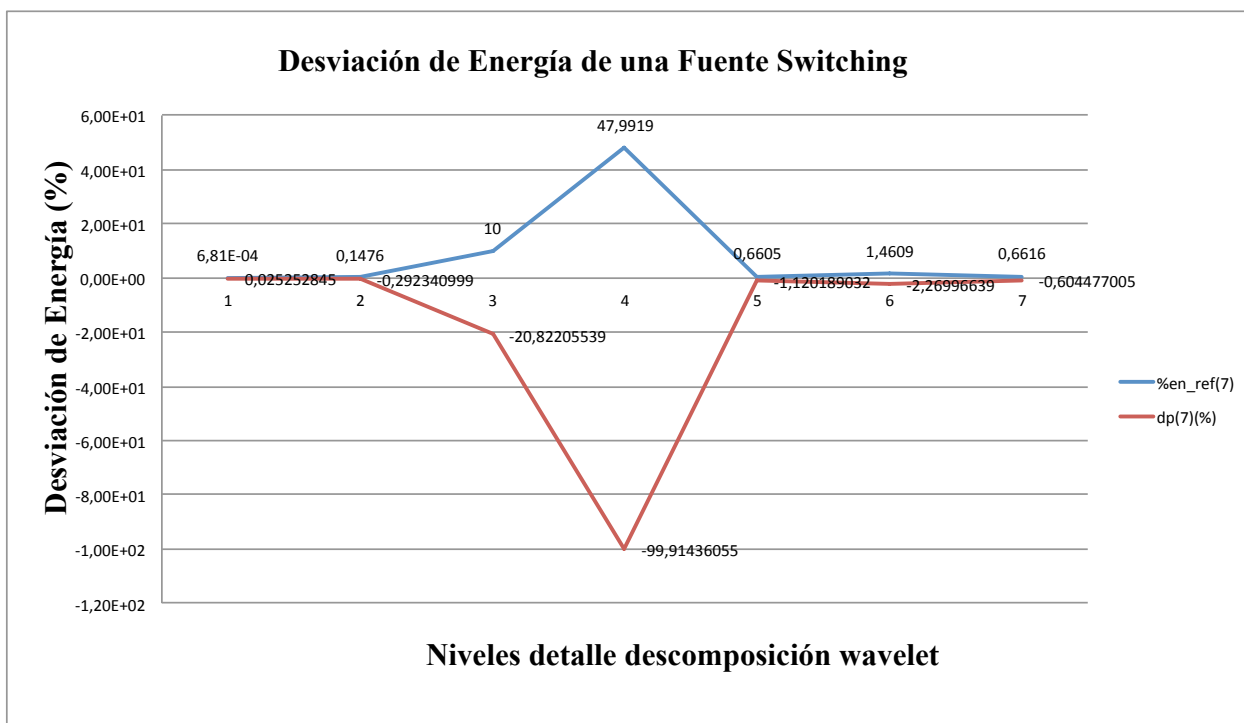


Figura 3.20: Cálculo de la desviación de energía de una señal de corriente contaminada de una FTE SWITCHING.

En la figura 3.22 se observa que el 1 nivel de detalle presenta un pequeño aumento en la frecuencia disminuyendo en el 4 nivel de detalle. En el nivel 7 se produce un aumento en el coeficiente de energía en un ancho de banda entre los 4-8 (Hz) donde podría haber una perturbación a baja frecuencia.

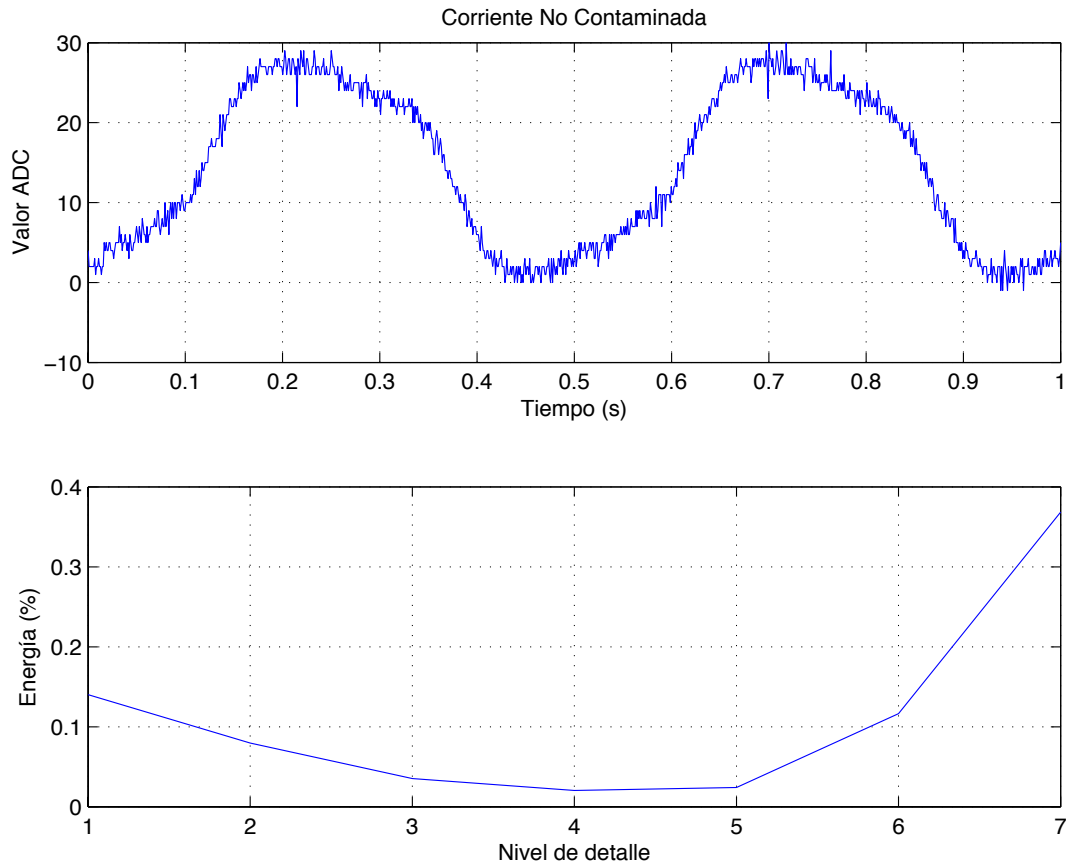


Figura 3.22: Coeficientes de 7 niveles de energía de una señal de corriente no contaminada.

Tabla 3.8: Cálculo de la desviación de energía de una corriente no contaminada.

Nivel	% en dist(7)	Nivel	%en_ref(7)	dp(7)(%)	Ancho de banda
1	0,1401	1	6,81E-04	0,29050594	256-500 (Hz)
2	0,0797	2	0,1476	-0,141482208	128-256 (Hz)
3	0,0353	3	10	-20,76329547	64-128 (Hz)
4	0,0204	4	47,9919	-99,95749283	32-64 (Hz)
5	0,024	5	0,6605	-1,326265474	16-32 (Hz)
6	0,1164	6	1,4609	-2,801514422	8-16 (Hz)
7	0,3686	7	0,6616	-0,610519692	4-8 (Hz)

Al analizar la figura 3.23, se sigue que el evento podría ser un hueco de tensión producido en un ancho de banda entre los 32-64 (Hz). Además, al igual que en la figura 3.20 la señal está muestreada a la misma frecuencia de muestreo e igual fase.

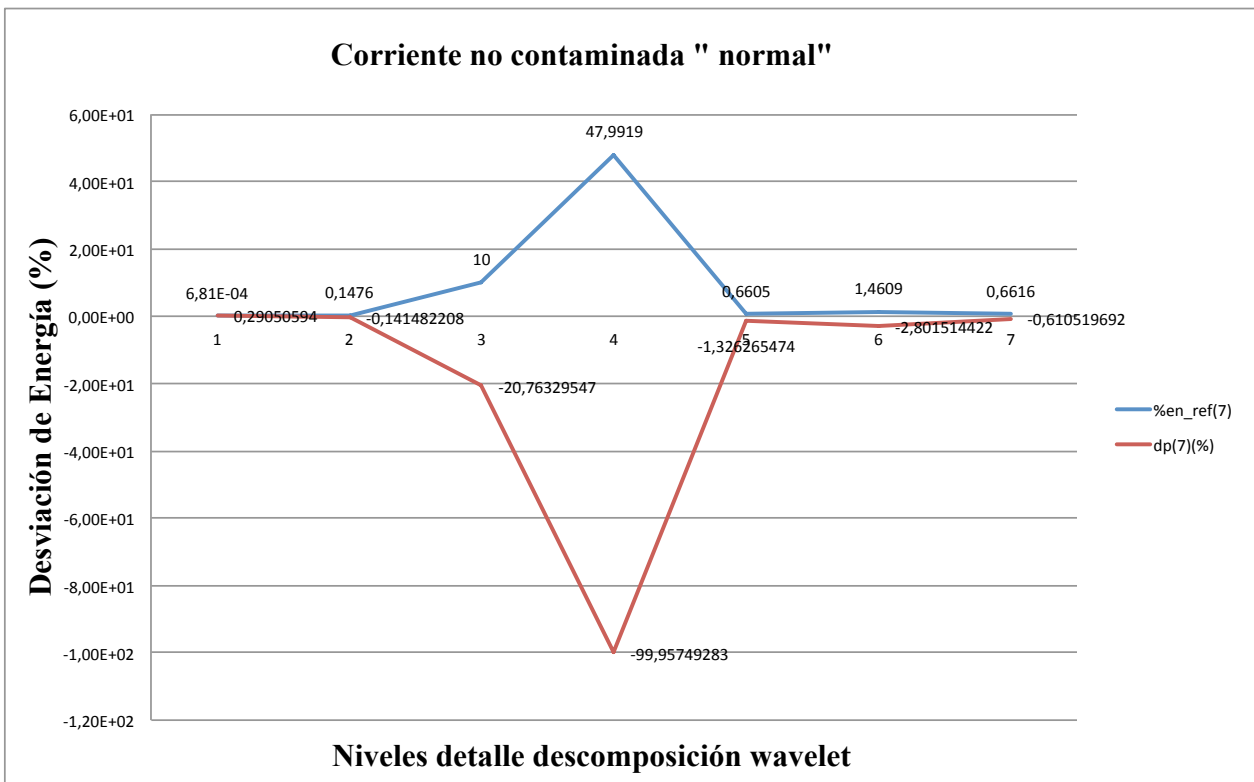


Figura 3.23: Cálculo de la desviación de 7 niveles de detalles de una señal de corriente no contaminada.

Al analizar la figura 3.24 se observa que hay un achatamiento de la señal en la tensión de línea de la fuente switching. No se observa ninguna perturbación evidente en la descomposición de los niveles de detalle.

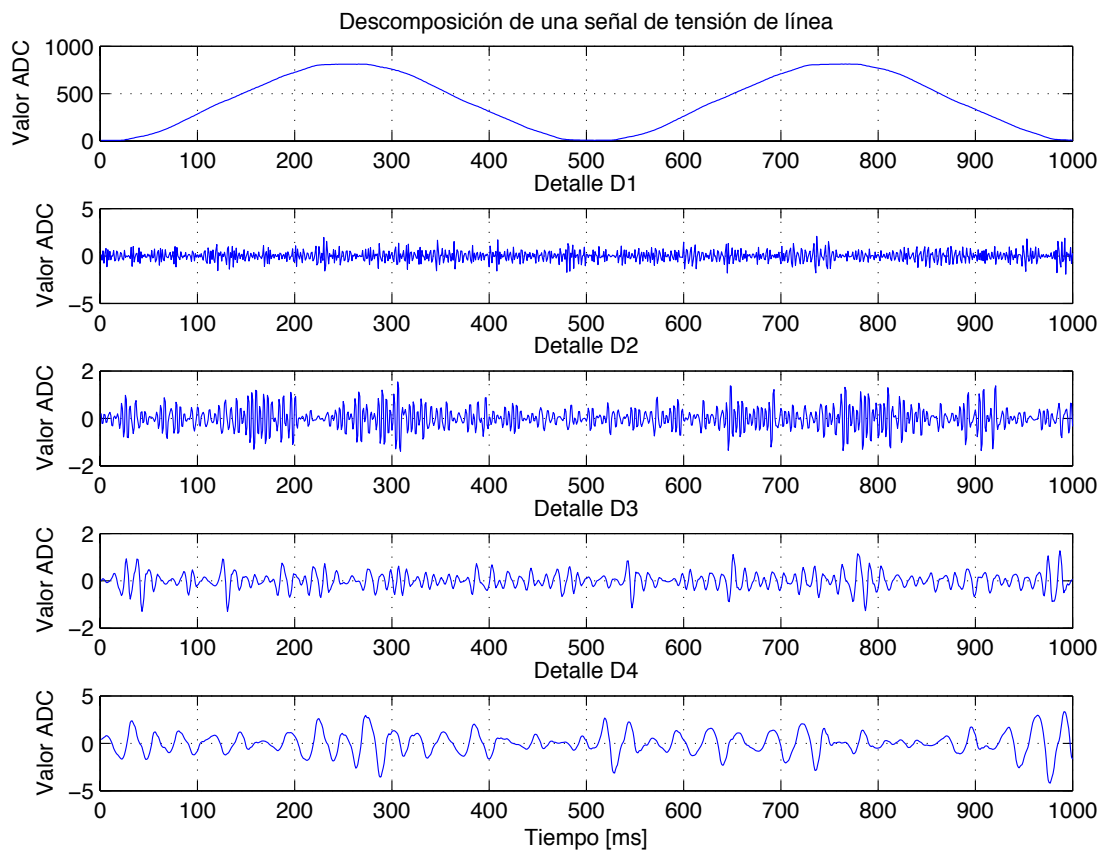


Figura 3.24: Descomposición de 4 niveles de detalle de una tensión de línea.

De la figura 3.25 se observa que en el 7 nivel de detalle se produce un aumento en el coeficiente de energía. Además se deduce que la elección de la función wavelet db4 es la adecuada para analizar la tensión de línea, ya que esta función es más rápida para detectar fenómenos en un período corto de tiempo del orden de los (ms). Para períodos más largos de tiempo (min) es necesario aumentar la función wavelet, dado que su respuesta es más lenta, podría detectar los fenómenos que ocurren en un período de tiempo más largo. En el caso de la tensión de línea de la Fuente SWITCHING es posible que la respuesta de la señal sea más lenta, por ende la función wavelet db4 solo alcanza a detectar una parte del aumento de energía a baja frecuencia.

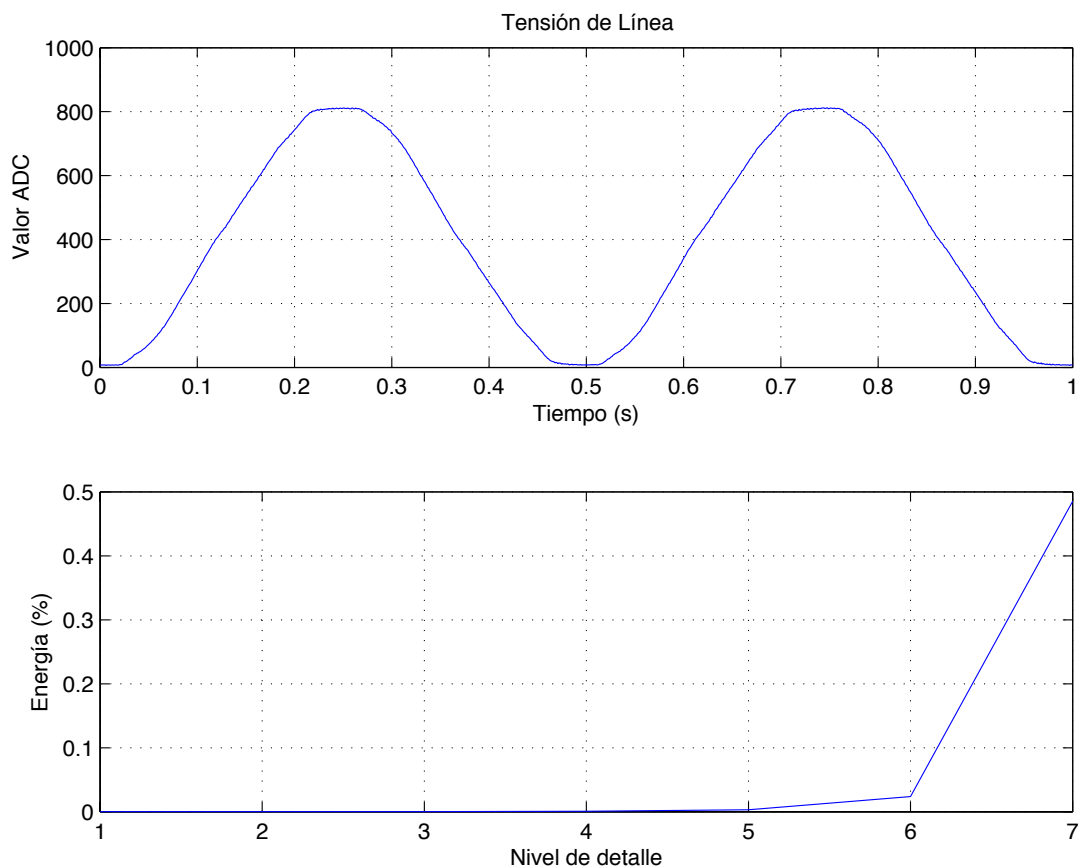


Figura 3.25: Coeficientes de energía de 7 niveles de detalle de una señal de una tensión de línea.

Tabla 3.9: Cálculo de la desviación de energía de una Tensión de Línea.

Nivel	% en_dist(7)	Nivel	%en_ref(7)	dp(7)(%)	Ancho de banda
1	1,36E-04	1	6,81E-04	-0,001135504	256-500 (Hz)
2	9,18E-05	2	0,1476	-0,307360613	128-256 (Hz)
3	4,63E-05	3	10	-20,83675309	64-128 (Hz)
4	6,02E-04	4	47,9919	-99,99874623	32-64 (Hz)
5	0,003	5	0,6605	-1,370022858	16-32 (Hz)
6	0,0237	6	1,4609	-2,994672018	8-16 (Hz)
7	0,4853	7	0,6616	-0,367353658	4-8 (Hz)

Al igual que en las figuras 3.20 y 3.23, se sugiere que en la figura 3.26, ocurre un hueco de tensión en el 4 nivel de detalle en un ancho de banda entre los 32-64 (Hz), en el que se encuentra la frecuencia fundamental de la red. Además se puede observar que en el nivel 6 de detalle se produce un pequeño hueco de tensión a una baja frecuencia.

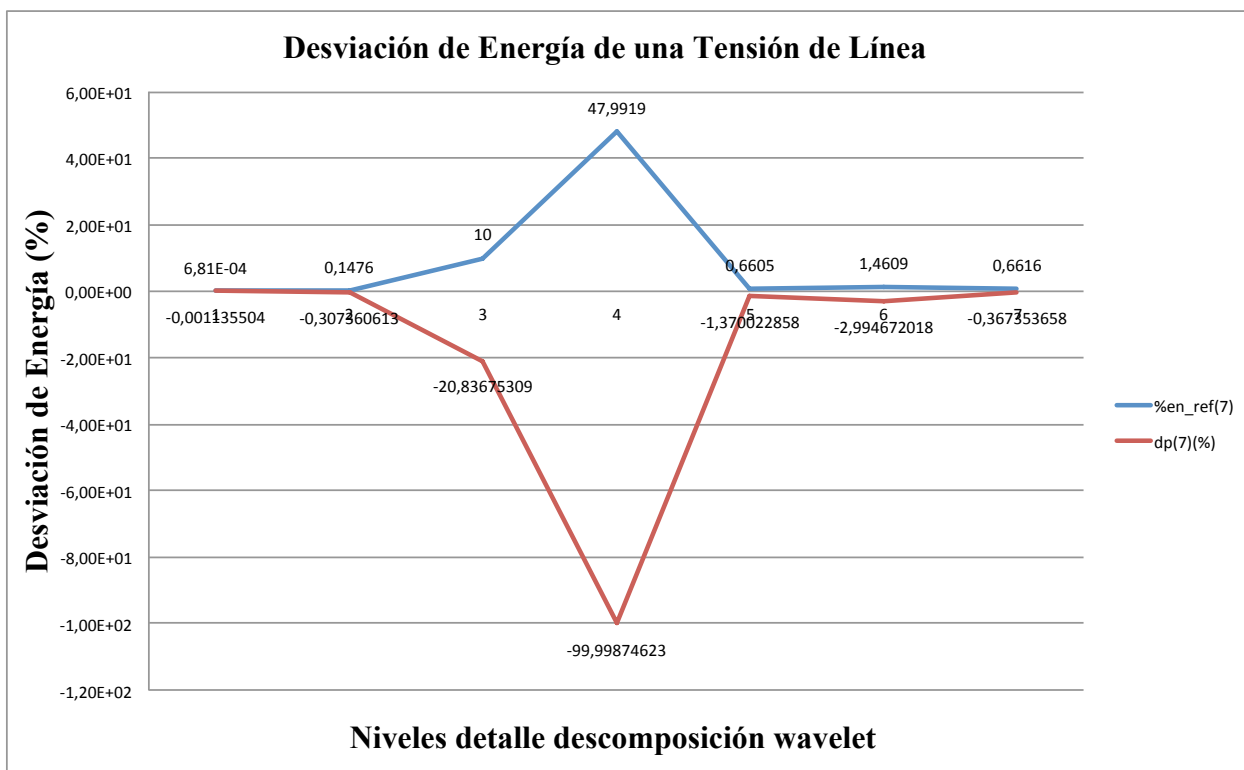


Figura 3.26: Cálculo de la desviación de energía de 7 niveles de detalle de una tensión de línea.

CONCLUSIONES

En la presente investigación de este seminario de título se ha presentado un nuevo método de estudio sobre la detección, localización y posterior clasificación de perturbaciones que ocurren en la red eléctrica utilizando como herramienta matemática la transformada wavelet.

Este seminario de título es el inicio de trabajos futuros en el desarrollo de un método que pretende servir como base para estudios que aumenten las posibilidades en el análisis de los eventos de calidad en los cuatro grandes segmentos, generación, transmisión, distribución y usuarios finales, dando origen al concepto de redes eléctricas inteligentes, generando un cambio de la visión de la red eléctrica, pasando de ser un medio pasivo unidireccional de energía a un medio bidireccional, con inteligencia propia capaz de automatizar la red de energía entre las empresas distribuidoras y sus clientes, promete mayor eficiencia, confiabilidad y seguridad que conduzca a un mayor uso de las fuentes de energía renovables, provocando un impacto social y económico en nuestro medio ambiente.

El estudio y análisis de la Norma técnica de seguridad y calidad de servicio de noviembre 2015, Chile, se basa en la Norma IEEE-519 1992 y la Norma estándar 1159 1995, la cual, establece las exigencias mínimas que se deben cumplir para la calidad y monitoreo de la energía eléctrica. Las simulaciones de eventos eléctricos estudiados en este seminario de título en cuanto a detección, localización y clasificación de eventos eléctricos cumplen las exigencias de las normas internacionales.

Para iniciar el estudio de los eventos de calidad de la energía eléctrica se presentó un análisis de la TF, STFT, CWT y DWT, demostrando las ventajas comparativas de cada una de ellas frente al análisis tiempo-frecuencia de señales estacionarias y no estacionarias, en la cual la TF solo entrega información de la señal en el dominio de la frecuencia y la STFT entrega una representación de tiempo vs frecuencia con una ventana fija posibilitando el análisis de señales no estacionarias. Resultando de gran utilidad para la detección de singularidades en los eventos de calidad de la red de energía.

Se simula, en programa Matlab, tres señales f_1 , f_2 y f_3 , y se evalúa la TF para cada una de ellas, posteriormente se grafica su espectro armónico para extraer la frecuencia fundamental tanto de una señal estacionaria y no estacionaria. Este tipo de análisis fue el adecuado para determinar el contenido armónico de las señales originales en el dominio de la frecuencia, sin embargo, carece de información en el dominio del tiempo, por lo tanto no es inútil cuando se desea saber el tiempo en que ocurre una perturbación que podría provocar una falla en el sistema eléctrico.

El análisis de la STFT supera a la clásica TF entregando a través de su espectrograma información tiempo-frecuencia, por lo tanto, mientras mayor es la resolución en el tiempo y menor la longitud de la ventana, peor es la resolución en frecuencia que se obtiene y viceversa. La STFT está relacionada con el principio de incertidumbre de Heisenberg, el cual, establece que no se puede determinar de manera simultánea y precisa ciertos tipos de variables físicas, siendo válido para el caso de frecuencia y tiempo, por lo tanto, al elegir la ventana STFT se debe considerar que tipo de señal se quiere muestrear, para así llegar a un equilibrio en la representación del espectrograma tiempo-frecuencia y tener una mejor claridad de las frecuencias y el tiempo en el que ocurran probables perturbaciones presentes en la señal original.

La CWT es una buena herramienta matemática para detectar las variaciones de frecuencias existentes en la señal, sin embargo, carece de información en el dominio del tiempo cuando la señal que se analiza es desconocida.

El análisis de la DWT utilizando el AMR creado en Matlab es el indicado para detectar y localizar los eventos de calidad en la red de energía. A medida que aumenta el nivel de descomposición carece de información en la detección de perturbaciones eléctricas aumentando la resolución de frecuencia y disminuyendo la resolución en el tiempo, además de disminuir el ancho de banda. Generalmente la detección y localización se produce en el cuarto nivel de detalle porque la frecuencia fundamental de las señales analizadas esta contenida en ese ancho de banda del cuarto nivel cuando la frecuencia de muestreo es [1Khz].

El análisis wavelet de los coeficientes de energía por si solo es insuficiente para inferir un resultado, necesita ser comparado con una señal a frecuencia fundamental o de referencia, por ende, el cálculo de la desviación de energía desarrollado en la planilla Excel es un buen método matemático donde se observa la comparación de los vectores característicos de energía, y así se puede clasificar a que tipo de evento corresponde dicha perturbación.

La medición de la señal a través del algoritmo en Matlab de la transformada wavelet se utiliza para detectar y localizar para luego clasificar en una planilla Excel el tipo de evento eléctrico. Para realizar un correcto análisis de la señal eléctrica es necesario tomar muestras constantemente como lo indica la NT SCyS, luego analizar los datos de las muestras para corroborar que tipo de perturbación real existe en la red de energía.

Para lograr una correcta medición de los eventos de calidad de la energía eléctrica, se recomienda un dispositivo electrónico inteligente de clase-A que sea capaz de cumplir las exigencias mínimas de la Norma estándar IEEE 519 1995.

Para futuros trabajos se propone crear un dispositivo electrónico que pueda detectar, localizar y clasificar de forma automática el tipo de evento que existe en la red eléctrica, para luego crear, a partir de un método estadístico, un sistema completo y autónomo que pudiese predecir el comportamiento de los eventos y parámetros de calidad, y así, reducir las fallas que ocurren en la red eléctrica. Además se recomienda mezclar la transformada wavelet con otros métodos matemáticos como por ejemplo las redes neuronales, ya que la TW por si sola es incapaz de identificar de manera exacta el tipo de evento real en la red eléctrica.

Del mismo modo se propone que el dispositivo electrónico inteligente sea capaz de adaptarse a los sistemas de comunicaciones lo más cercano posible para que tenga un impacto social y económico en el mercado eléctrico.

Bibliografía

- [1] Introducción a la Transformada Wavelet para ingenieros: un enfoque didáctico.
- [2] Measurement of Voltage Fluctuation and Flicker in Electric Power System Based on Wavelet Transform.
- [3] Comisión Nacional de Energía (2015). Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio. Santiago, Chile.
- [4] Norma IEEE Estándar 1159 1995. Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.
- [5] Campos, J. C. Calidad de la Energía Eléctrica. Universidad del Atlántico y Universidad Autónoma de Occidente, Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia y el Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y Tecnología. Colombia: Colciencias.
- [6] Power Quality Detection and Classification Using Wavelet-Multiresolution Signal Decomposition.
- [7] Julio Cesar Nieto (2004). Análisis de Señal para Determinación de Calidad en los Sistemas Eléctricos.
- [8] Comparison of Wavelet and Fourier Analysis in Power Quality.

Anexos

Programas

```
%Programa principal.
%Transformada Wavelet.
%Alvaro Isaías Acuña Avila.
%Ingeniería (E) Electrónica
```

```
%-----
npuntos=1024;% Frecuencia de muestreo 1[Khz]
w=2*pi;
t=0:1/npuntos:1;
%t1=t(1:npuntos*0.3);
%t2=t(npuntos*0.3:npuntos*0.6);
%t3=t(npuntos*0.6:npuntos*0.8);
%t4=t(npuntos*0.8:npuntos);
tiempo=1*t;
%-----
```

```
%Evento Sag
```

```
%x1=0.9*sin(w*50*t1+90);
%x2=0.4*sin(w*50*t2+90);
%x3=0.4*sin(w*50*t3+90);
%x4=0.9*sin(w*50*t4+90);
%s=[x1 x2 x3 x4];
```

```
%-----
%Evento Swell
```

```
%x1=1.1*sin(w*50*t1+90);
%x2=1.8*sin(w*50*t2+90);
%x3=1.8*sin(w*50*t3+90);
%x4=1.1*sin(w*50*t4+90);
%s=[x1 x2 x3 x4];
```

```
%-----
%Flicker
```

```
%Basado en la figura 3.12
```

```
%x1=1.3*cos(w*150*t)+1.1*(cos(w*150*t)+cos(w*150*t))+0.9*sin(w*100*t).*((t<0.25)+(t>0.2
6))+sin(w*150*t).*(t>0.25).*(t<0.26);
%x2=cos(w*50*t);
%x3=cos(w*50*t);
%x4=cos(w*50*t);
%s=[x1 x2 x3 x4];
%-----
```

%Oscilatorio en baja frecuencia

```
%npuntos=1024;
%t=0:1/npuntos:1;
%w=2*pi;
%tiempo=1*t;
%s=1*sin(w*8*t+30).*((t<0.25)+(t>0.3))+1.5*sin(w*1000*t).*(t>0.25).*(t<0.3);%transitorio de
baja frecuencia
```

```
%-----
%Señal de corriente característica monofásica de una carga no lineal.
```

```
%s=(50*sqrt(2)*sin(w*50*t)-40*sqrt(2)*sin(w*150*t)+25*sqrt(2)*sin(w*250*t)-
15*sqrt(2)*sin(w*350*t)+10*sqrt(2)*sin(w*450*t)).*((t<0.25)+(t>0.28))+150*sin(w*1000*t).*(t
>0.25).*(t<0.28);
```

```
%-----
%Señal sinusoidal pura para compararla con un evento Sag con fase de 90°
```

```
%s=sin(w*50*t+90);
```

```
%-----
%Señal sinusoidal pura para compararla con un evento Swell con fase de 90°
```

```
%s=sin(w*50*t+90);
```

```
%-----
%Señal sinusoidal pura para compararla con un evento Flicker con fase de
%0°
```

```
%s=sin(w*50*t+0);
```

```
%-----
%Señal sinusoidal pura para compararla con un evento transitorio de baja
%frecuencia con fase de 30°
```

```
%s=sin(w*50*t+30);
```

```
%-----
%Corriente contaminada FTE Switching
```

```
%s=xlsread('MUESTREO2.xlsx','B4:B1028');
```

```
%-----
%Corriente no contaminada
```

```
%s=xlsread('MUESTREO2.xlsx','H4:H1028');
```

```
%-----
%Corriente tensión de línea
```

```
s=xlsread('MUESTREO2.xlsx','E4:E1028');
```

```
%-----
senal=s(1:1000);
```

```

longitud=length(senal);
% Realiza una descomposición wavelet en el cuarto nivel de una
%señal.
% Realiza una descomposición del cuatro nivel de detalle de la señal
%utilizando el wavelet db4.
[cA7,cD7] = dwt(senal,'db4');
A7 = idwt(cA7,[],'db4',longitud);
D7 = idwt([],cD7,'db4',longitud);
%subplot(3,1,1); plot(senal); title('Señal Original');grid on
%subplot(3,1,2); plot(A4); title('Aproximación A4');grid on
%subplot(3,1,3); plot(D4); title('Detalle D4');
%xlabel('Tiempo [ms]');grid on
[C,L] = wavedec(senal,7,'db4');
[Ea,Ed]=wenergy(C,L);
% Los coeficientes de todos los componentes de una descomposición
%de cuarto nivel (es decir, la aproximación del cuarto nivel y los
%cuatro primeros niveles de detalle) se concatenan en un
%vector, C. Vector L da las longitudes de cada componente.
% Aproximación para la extracción y detalle coeficientes.
% Para extraer los coeficientes nivel 4 de aproximación de C, Tipo
cA4 = appcoef(C,L,'db4',7);
% Para extraer los niveles 1,2,3 y 4 coeficientes de detalle de C, Tipo
[cD1,cD2,cD3,cD4,cD5,cD6,cD7] = detcoef(C,L,[1,2,3,4,5,6,7]);
% Reconstruir la aproximación Nivel 4 y el Nivel 1,2,3 y 4 detalles.
% Reconstrucción el nivel 4 aproximación de C, Tipo
A1 = wrcoef('a',C,L,'db4',1);
% Reconstrucción de los detalles en los niveles 1,2,3 y 4, de C, Tipo
D1 = wrcoef('d',C,L,'db4',1);
D2 = wrcoef('d',C,L,'db4',2);
D3 = wrcoef('d',C,L,'db4',3);
D4 = wrcoef('d',C,L,'db4',4);
D5 = wrcoef('d',C,L,'db4',5);
D6 = wrcoef('d',C,L,'db4',6);
D7 = wrcoef('d',C,L,'db4',7);

% Resultados de una descomposición multinivel.
% Para ver los resultados del nivel 4 de descomposición, se tiene:
%subplot(5,1,1); plot(A1);ylabel('Voltaje [p.u.]');grid on;
%subplot(5,1,1); plot(A1);ylabel('Corriente [A]');grid on;%Corriente monofásica
subplot(5,1,1); plot(A1);ylabel('Valor ADC');grid on;%Corriente monofásica
%-----
%title('Descomposición de una señal Sag en 4 niveles de detalle');grid on
%-----
%title('Descomposición de una señal Swell en 4 niveles de detalle');grid on
%-----
%title('Descomposición de una señal Flicker en 4 niveles de detalle');grid on
%-----

```

```

%title('Descomposición de una señal Oscilatoria de baja frecuencia en 4 niveles de detalle');grid
on
%-----
%title('Descomposición de una señal de corriente armónica monofásica en 4 niveles de
detalle');grid on
%-----
%title('Descomposición de una señal cosenoidal pura ');
%-----
%title('Descomposición de una señal de corriente contaminada (Fuente Switching)');
%-----
%title('Descomposición de una señal de corriente no contaminada');
%-----
title('Descomposición de una señal de tensión de línea');
%-----
subplot(5,1,2); plot(D1);
title('Detalle D1');grid on
%ylabel('Voltaje [p.u]');
%ylabel('Corriente [A]');%corriente monofásica
ylabel('Valor ADC');
subplot(5,1,3); plot(D2);
title('Detalle D2');grid on
%ylabel('Voltaje [p.u]');
%ylabel('Corriente [A]');%corriente monofásica
ylabel('Valor ADC');
subplot(5,1,4); plot(D3);
title('Detalle D3');grid on
%ylabel('Voltaje [p.u]');
%ylabel('Corriente [A]');%corriente monofásica
ylabel('Valor ADC');
subplot(5,1,5);plot(D4);
title('Detalle D4');grid on
%ylabel('Voltaje [p.u]');
%ylabel('Corriente [A]');%corriente monofásica
ylabel('Valor ADC');
%subplot(8,1,6);plot(D5);
%title('Detalle D5');grid on;
%subplot(8,1,7);plot(D6);
%title('Detalle D6');grid on
%subplot(8,1,8);plot(D7);
%title('Detalle D7');grid on
xlabel('Tiempo [ms]');

%-----
%Nivel de energía de un Sag
%subplot(2,1,1);plot(tiempo,s);grid on;
%title('Sag');
%xlabel('Tiempo (s)');

```

```

%ylabel('Voltaje [p.u]');
%subplot(2,1,2);
%xlabel('Nivel de detalle');
%ylabel('Nivel de energía (%)');
%-----
%Nivel de energía de un Swell
%subplot(2,1,1);plot(tiempo,s);grid on;
%title('Swell');
%xlabel('Tiempo (s)');
%ylabel('Voltaje [p.u]');
%subplot(2,1,2);
%xlabel('Nivel de detalle');
%ylabel('Nivel de energía (%)');
%-----
%Nivel de energía de un Flicker

%subplot(2,1,1);plot(senal);grid on;
%title('Flicker');
%xlabel('Tiempo (ms)');
%ylabel('Voltaje [p.u]');
%subplot(2,1,2);
%xlabel('Nivel de detalle');
%ylabel('Nivel de energía (%)');
%-----
%Nivel de energía de un Oscilatorio de baja frecuencia

%subplot(2,1,1);plot(tiempo,s);grid on;
%title('Oscilatorio baja frecuencia');
%xlabel('Tiempo (s)');
%ylabel('Voltaje [p.u]');
%subplot(2,1,2);
%xlabel('Nivel de detalle');
%ylabel('Nivel de energía (%)');

%-----
%Nivel de energía de una señal de corriente característica monofásica de una carga no lineal.

%subplot(2,1,1);plot(tiempo,s);grid on;
%title('Corriente monofásica de una carga no lineal');
%xlabel('Tiempo (s)');
%ylabel('Corriente [A]');
%subplot(2,1,2);
%xlabel('Nivel de detalle');
%ylabel('Nivel de energía (%)');

%-----
%Corriente contaminada Fuente Switching

```

```

%subplot(2,1,1);plot(tiempo,s);grid on;
%title('Corriente Contaminada Fuente Switching');
%xlabel('Tiempo (s)');
%ylabel('Valor ADC');
%subplot(2,1,2);
%xlabel('Nivel de detalle');
%ylabel('Nivel de energía (%)');

%-----
%Corriente no contaminada
%subplot(2,1,1);plot(tiempo,s);grid on;
%title('Corriente No Contaminada');
%xlabel('Tiempo (s)');
%ylabel('Valor ADC');
%subplot(2,1,2);
%xlabel('Nivel de detalle');
%ylabel('Nivel de energía (%)');
%-----
%Tensión de línea

%subplot(2,1,1);plot(tiempo,s);grid on;
%title('Tensión de Línea');
%xlabel('Tiempo (s)');
%ylabel('Valor ADC');
%subplot(2,1,2);
%xlabel('Nivel de detalle');
%ylabel('Nivel de energía (%)');
%-----
%[cA7,cD7] = dwt(senal,'db4');
%A7 = idwt(cA7,[],'db4',longitud);
%D7 = idwt([],cD7,'db4',longitud);
%[C,L] = wavedec(senal,7,'db4');
%[Ea,Ed]=wenergy(C,L);

%Energia= {'% en_dist(7)'; Ed(1,1);Ed(1,2);Ed(1,3);Ed(1,4);Ed(1,5);Ed(1,6);Ed(1,7)}
%plot(Ed);
%xlabel('Nivel de detalle');
%ylabel('Energía (%)');
%grid on;

%-----
%Subrutina para crear el tipo de señales con su respectivo espectro
npuntos=1024;
t=0:1/npuntos:1;
w=2*pi;
%-----

```

```

%Onda cuadrada
tiempo=0.03*t;
x=10.*(t<0.333);
%%%tiempo=1*t;
%T=0.03;
%Frecuencia=1/T
%-----
%x=20*cos(w*150*t)+10*(cos(w*150*t)+cos(w*150*t))+15*sin(w*100*t).*((t<0.25)+(t>0.26))
+sin(w*150*t).*(t>0.25).*(t<0.26);
%x=1*sin(w*8*t+30).*((t<0.25)+(t>0.3))+1.5*sin(w*1000*t).*(t>0.25).*(t<0.3);%transitorio de
baja frecuencia
%-----
%Señal de voltaje sinusoidal con perturbación
%tiempo=0.03*t;
%x=5*sin(w*8*t+30).*((t<0.25)+(t>0.26))+sin(w*100*t+30).*(t>0.25).*(t<0.26);
%-----
%Señal de corriente característica monofásica de una carga no lineal.
%tiempo=0.03*t;
%x=(50*sqrt(2)*sin(w*50*t)-40*sqrt(2)*sin(w*150*t)+25*sqrt(2)*sin(w*250*t)-
15*sqrt(2)*sin(w*350*t)+10*sqrt(2)*sin(w*450*t));
%-----

%x=1*sin(w*8*t+30).*((t<0.25)+(t>0.3))+1.5*sin(w*1000*t).*(t>0.25).*(t<0.3);%transitorio de
baja frecuencia
%x=xlsread('MUESTREO2.xlsx','B4:B1028');
%x=xlsread('MUESTREO2.xlsx','H4:H1028');
%x=xlsread('MUESTREO2.xlsx','E4:E1028');
%x=sin(w*50*t);
%Vrms=rms(x);
%Vmax=max(x);
%Vmin=min(x);
%subplot(2,1,1);
%-----
plot(tiempo,x);
title('Onda cuadrada');
xlabel('Tiempo [s]');
ylabel('Voltaje [V]');
grid on
%-----
%plot(tiempo,x);
%title('Señal de voltaje sinusoidal con perturbación');
%xlabel('Tiempo [s]');
%ylabel('Voltaje [V]');
%grid on
%-----
%Transformada de Fourier.
%L=length(x);

```



```

%NFFT = 2^nextpow2(L); % Siguiete potencia de 2 de longitud de x
%Y = fft(x,NFFT)/L;
%f = npuntos/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
%Espectro de Aplitud de una sola cara.
%plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)))
%grid on
%-----
%title('Espectro de la señal cuadrada en el dominio de la frecuencia')
%-----
%title('Espectro de la señal sinusoidal en el dominio de la Frecuencia')
%-----
%title('Espectro de la señal de corriente de una carga monofásica no lineal en el dominio de la
frecuencia');
%-----
%xlabel('Frecuencia (Hz)')
%%%ylabel('|Y(f)| (Potencia)')
%ylabel('Amplitud');

%ft=fft(x);
%figure (2);
%plot(abs(ft));
%xlabel('Fecuencia [Hz]');
%title('Dominio de frecuencia');
%axis([0,npuntos/4,0,270]);

%s = spectrogram(x);
%spectrogram(x,'yaxis')
%spectrogram(x,128,120,128,1e3);
%title('Espectrograma de la señal f2(t) de voltaje de 8(Hz) con perturbación');
%title('Espectrograma de la señal f1(t) de voltaje de 33.33(Hz)');
%title('Espectrograma 3D Señal No Estacionaria de f2(t) con contenido de 20, 60 y 100 Hz');
%spectrogram(x,100,80,100,npuntos,'yaxis')
%view(-77,72)
%shading interp
%colorbar off

% Fin...

```