

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

IMPLEMENTACIÓN DE LA TRANSFORMADA WAVELET PARA LA MEDICIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE PERTURBACIONES EN EL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
ELÉCTRICO**

DIEGO EDUARDO ANDRADE CARRERA

diegoandrade3055@gmail.com

DIRECTOR: MSC. ING. LUIS ELÍAS TAPIA CALVOPIÑA

luis.tapia@epn.edu.ec

Quito, Febrero 2014

DECLARACIÓN

Yo, DIEGO EDUARDO ANDRADE CARRERA, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Diego Eduardo Andrade Carrera

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por DIEGO EDUARDO ANDRADE CARRERA, bajo mi supervisión.

MSC. ING. LUIS TAPIA

DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A Dios por haberme bendecido y guiado por el camino del bien a lo largo de mi carrera, a mis padres por su esfuerzo diario y apoyo incondicional para que salga adelante en la vida, y a todos los profesores que han intervenido en mi formación académica, sobre todo a mi director de tesis MSC. ING. LUIS TAPIA, quien con sus conocimientos y acertadas sugerencias ha logrado que pueda terminar mis estudios universitarios.

DIEGO ANDRADE CARRERA

DEDICATORIA

En especial a Dios por haberme dado la suficiente sabiduría para terminar el proyecto de titulación.

A toda mi familia porque gracias a los sabios consejos que me han dado, he podido pasar los momentos más difíciles de mi carrera, y alcanzar uno de los varios objetivos trazados en mi vida. Gracias a todos por haber fomentado en mí, el deseo de superación y anhelo de triunfo en la vida.

DIEGO ANDRADE CARRERA

CONTENIDO

DECLARACIÓN	i
CERTIFICACIÓN	ii
AGRADECIMIENTO	iii
DEDICATORIA.....	iv
CONTENIDO	v
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABLAS	xv
RESUMEN.....	xvii
PRESENTACIÓN.....	xix
OBJETIVOS.....	xxi
OBJETIVO GENERAL.....	xxi
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	xxi
ALCANCE.....	xxi
JUSTIFICACIÓN	xxii

CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN	1
1.1 IMPORTANCIA DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA	1
1.1.1 PROBLEMAS TÍPICOS.....	5
1.2 ORGANISMOS INTERNACIONALES ENCARGADOS DE IMPLEMENTAR NORMAS RELACIONADAS CON LOS FENÓMENOS PERTURBADORES	6
1.2.1 INSTITUTO DE INGENIEROS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS (IEEE)	6
1.2.1.1 ESTÁNDAR IEEE 519 – (1992).....	7
1.2.2 COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL (IEC).....	10
1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS FENÓMENOS PERTURBADORES	12
1.3.1 ESTÁNDAR IEEE 1159 - (1995).....	13
1.3.2 ESTÁNDAR IEC 1000-2-5 - (1995)	15
1.4 FENÓMENOS PERTURBADORES EN REDES ELÉCTRICAS	16
1.4.1 TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS	16
1.4.1.1 TRANSITORIOS IMPULSIVOS	16
1.4.1.2 TRANSITORIOS OSCILATORIOS	17
1.4.2 VARIACIONES DE VOLTAJE DE CORTA DURACIÓN	19

1.4.2.2	SUBIDA DE VOLTAJE	19
1.4.2.3	INTERRUPCIONES BREVES	20
1.4.3	VARIACIONES DE VOLTAJE DE LARGA DURACIÓN	21
1.4.3.1	SOBREVOLTAJE	21
1.4.3.2	BAJO VOLTAJE	22
1.4.3.3	INTERRUPCIONES SOSTENIDAS.....	23
1.4.4	DESBALANCE DE VOLTAJE	23
1.4.5	DISTORSIÓN DE LA FORMA DE ONDA.....	25
1.4.5.1	DC OFFSET	25
1.4.5.2	MUESCAS DE VOLTAJE (NOTCHES)	26
1.4.5.3	RUIDO	27
1.4.5.4	ARMÓNICOS	27
1.4.5.4.1	CARACTERIZACIÓN	28
1.4.5.4.2	CONDICIONES DE MEDIDA	30
1.4.5.4.2.1	IEEE 519- (1992).....	30
1.4.5.4.2.2	IEC 61000- 4-7.....	31
1.4.5.4.3	LÍMITES PERMITIDOS.....	34
1.4.5.4.3.1	IEEE 519- (1992).....	34
1.4.5.4.3.2	IEC 61000-3-2.....	35
1.4.5.4.4	FUENTES DE GENERACIÓN	36
1.4.5.4.5	EFFECTOS.....	42
1.4.5.5	INTERARMÓNICOS.....	43
1.4.5.5.1	ÍNDICES	44
1.4.5.5.2	CONDICIONES DE MEDIDA	45
1.4.5.5.2.1	IEEE.....	45
1.4.5.5.2.2	IEC 61000-4-7.....	45
1.4.5.5.3	LÍMITES PERMITIDOS.....	45
1.4.5.5.3.1	IEEE.....	45
1.4.5.5.3.2	IEC 61000-3-6.....	46
1.4.5.5.4	FUENTES DE GENERACIÓN	46
1.4.5.5.5	EFFECTOS.....	47
1.4.6	FLUCTUACIONES DE VOLTAJE.....	47
1.4.7	VARIACIONES EN LA FRECUENCIA	48
1.4.8	RESUMEN DE LAS PERTURBACIONES	50

1.5	REGULACIÓN EN EL ECUADOR PARA LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA	52
1.5.1	NIVEL DE VOLTAJE	52
1.5.1.1	MEDICIONES.....	53
1.5.1.1.1	LÍMITES	53
1.5.2	ARMÓNICOS	54
1.5.2.1	MEDICIONES.....	55
1.5.2.1.1	LÍMITES	55
CAPÍTULO 2.- ANÁLISIS DE FOURIER.....		57
2.1	INTRODUCCIÓN.....	57
2.2	BREVE RESEÑA HISTÓRIA DE LAS TRANSFORMADAS.....	57
2.3	CLASIFICACIÓN DE LAS SEÑALES.....	58
2.4	ANÁLISIS ESPECTRAL DE SEÑALES DE TIEMPO CONTINUO	60
2.4.1	SERIES DE FOURIER.....	60
2.4.1.1	FENÓMENO DE GIBBS.....	64
2.4.1.2	PROPIEDADES	65
2.4.2	TRANSFORMADA DE FOURIER.....	66
2.4.2.1	PROPIEDADES	72
2.4.3	TRANSFORMADA CORTA DE FOURIER	75
2.4.3.1	PROBLEMA	81
2.5	ANÁLISIS ESPECTRAL DE SEÑALES DE TIEMPO DISCRETO	82
2.5.1	TRANSFORMADA DE FOURIER EN TIEMPO DISCRETO	82
2.5.1.1	INCONVENIENTE	84
2.5.1.2	PROPIEDADES	84
2.5.2	TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER.....	85
2.5.2.1	PROPIEDADES	86
2.5.3	TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER	87
2.6	RESUMEN DE EXPRESIONES DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER	88
CAPÍTULO 3.- TEORÍA DE WAVELET		89
3.1	INTRODUCCIÓN.....	89
3.2	WAVELETS	93
3.3	TRANSFORMADA WAVELET.....	94
3.3.1	FAMILIAS DE FUNCIONES.....	96

3.3.1.1	HAAR	97
3.3.1.2	DAUBECHIES	97
3.3.1.3	SYMMLETS	99
3.3.1.4	SOMBRERO MEXICANO.....	99
3.3.1.5	COIFLETS	100
3.3.1.6	BIORTOGONALES	101
3.3.1.7	MORLET.....	104
3.3.1.8	MEYER.....	104
3.4	CLASIFICACIÓN DE LA TRANSFORMADA WAVELET.....	105
3.4.1	TRANSFORMADA WAVELET CONTINUA	105
3.4.1.1	PASOS A SEGUIR PARA DETERMINAR LA TRANSFORMADA WAVELET CONTINUA.....	106
3.4.1.2	EJERCICIO DE APLICACIÓN	108
3.4.2	TRANSFORMADA WAVELET SEMIDISCRETA	109
3.4.3	TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA	110
3.5	APLICACIONES DE LA TRANSFORMADA WAVELET	111
3.5.1	SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA.....	112
3.5.1.1	PROTECCIONES ELÉCTRICAS.....	112
3.5.1.2	CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA	115
3.5.1.3	TRANSITORIOS.....	115
3.5.1.4	ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA	116
3.5.1.5	DESCARGAS PARCIALES	116
3.5.1.6	MEDIDA DE POTENCIA	117
3.5.2	MEDICINA	117
3.5.3	DISMUNUCIÓN DEL RUIDO.....	118
3.6	FOURIER VERSUS WAVELET	119

CAPÍTULO 4.- MÉTODO DE WAVELET PACKET PARA DETERMINAR LA MEDIDA DE LAS PERTURBACIONES..... 122

4.1	ANÁLISIS MULTIRESOLUCIÓN (MRA).....	122
4.1.1	RECONSTRUCCIÓN DE LA SEÑAL	127
4.2	WAVELET PACKET.....	128
4.2.1	DETERMINACIÓN DEL NÚMERO ÓPTIMO DE DESCOMPOSICIÓN DE NIVELES	133
4.2.2	SEÑALES ESTACIONARIAS	133

4.3	PAQUETE COMPUTACIONAL MATLAB Y WAVELET PACKET	135
4.3.1	FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA.....	136
4.4	AGRUPACIÓN DE LAS LÍNEAS ESPECTRALES DE 5 HZ SEGÚN LA NORMA IEC 61000-4-7	143
4.5	MEDIDA DE ARMÓNICOS.....	146
4.5.1	INSTRUMENTOS DE MEDIDA	146
4.5.2	ANALIZADOR DE EVENTOS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA “FLUKE 1735”	147
4.5.3	WAVELET PACKET Y VALORES EFICACES DE VOLTAJE Y CORRIENTE	152
4.5.4	ÁRBOL COMPLETO DE DESCOMPOSICIÓN	153
4.5.5	EJEMPLO DE APLICACIÓN	160
4.6	MEDIDA DE INTERARMÓNICOS	186
4.7	MEDIDA DE SUBARMÓNICOS	192
4.8	MEDIDA DEL VOLTAJE FLICKER.....	195
4.9	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	196
 CAPÍTULO 5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		198
5.1	CONCLUSIONES.....	198
5.2	RECOMENDACIONES.....	201
 CAPÍTULO 6.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		202

ANEXOS

ANEXO 1.....	209
1.1. Atenuación mínima requerida por los equipos de medida	209
1.2. Clase A (Testing State).....	209
1.3. Límites permitidos de distorsión armónica de corriente y voltaje según el estándar IEEE 519- (1992).....	210
1.4. Distorsión interarmónica total de voltaje	211
ANEXO 2.....	212
ANEXO 3.....	214
ANEXO 4.....	215
ANEXO 5.....	222

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1.1: Armónicos de Voltaje generados por cargas no lineales en una red eléctrica.....	2
FIGURA 1.1.2: Forma de onda de corriente de una carga no lineal	3
FIGURA 1.1.3: Forma de onda de corriente de una carga lineal	3
FIGURA 1.1.4: Forma de onda de voltaje y corriente de una red trifásica	4
FIGURA 1.3.2.1: Clasificación de los fenómenos perturbadores – IEC 1000-2-5	15
FIGURA 1.4.1.1.1: Transitorio Impulsivo	17
FIGURA 1.4.1.2.1: Transitorio Oscilatorio	18
FIGURA 1.4.2.1.1: Sag, Dip o Disminución de Voltaje.....	19
FIGURA 1.4.2.2.1: Subida de Voltaje o Swell	20
FIGURA 1.4.2.3.1: Interrupción breve.....	20
FIGURA 1.4.2.3.2: Perturbaciones de corta duración	21
FIGURA 1.4.3.1.1: Sobrevoltaje de larga duración.....	22
FIGURA 1.4.3.2.1: Bajo voltaje de larga duración	23
FIGURA 1.4.3.3.1: Interrupción sostenida.....	23
FIGURA 1.4.4.1: Desbalance de voltaje	25
FIGURA 1.4.5.1.1: Corrimiento DC	26
FIGURA 1.4.5.2.1: Muesca de Voltaje o Notches.....	26
FIGURA 1.4.5.3.1: Ruido presente en una señal.....	27
FIGURA 1.4.5.4.1: Señal de voltaje con distorsión armónica	27
FIGURA 1.4.5.4.2: Representación gráfica de la Serie de Fourier.....	28
FIGURA 1.4.5.4.4.1: Forma de onda de la corriente y espectro típico de las lámparas fluorescentes	37
FIGURA 1.4.5.4.4.2: Horno de arco eléctrico.....	38
FIGURA 1.4.5.4.4.3: Convertidor de potencia HVDC.....	39
FIGURA 1.4.5.4.4.4: Capacitor conmutado por tiristor monofásico	39
FIGURA 1.4.5.4.4.5: Comportamiento de la corriente de una computadora, espectro armónico	40
FIGURA 1.4.5.4.4.6: Voltaje en la carga de los terminales de salida de un rectificador de onda completa.....	41
FIGURA 1.4.5.5.1: Señal de voltaje con frecuencia no múltiplo entero de la fundamental	43
FIGURA 1.4.5.5.2: Frecuencias discretas (forma de bastones)	43
FIGURA 1.4.6.1: Fluctuaciones de voltaje.....	48
FIGURA 1.4.7.1: Variación de frecuencia.....	49
FIGURA 2.3.1: Diferentes formas de onda representadas en el Dominio del Tiempo	59
FIGURA 2.3.2: Señal expresada en el Dominio de la Frecuencia.....	59
FIGURA 2.4.1.1: Serie de Fourier de una señal no sinusoidal	61
FIGURA 2.4.1.2: Condición número uno de Dirichlet	62
FIGURA 2.4.1.3: Condición número dos de Dirichlet	62
FIGURA 2.4.1.4: Condición número tres de Dirichlet	63
FIGURA 2.4.1.5: Contenido espectral de tres típicas ondas	63
FIGURA 2.4.1.1.1: Señal discontinua con Fenómeno de Gibbs.....	64

FIGURA 2.4.2.1: Señal no periódica de tiempo continuo.....	67
FIGURA 2.4.2.2: Espectro de frecuencias de una señal estacionaria	67
FIGURA 2.4.2.3: Espectro de frecuencias de una señal no estacionaria	67
FIGURA 2.4.2.4: Tren de pulsos de amplitud 1, ancho p y período T	68
FIGURA 2.4.2.5: Espectro de frecuencias y tren de pulsos para diferentes períodos	69
FIGURA 2.4.2.6: Espectro continuo para un período infinito	69
FIGURA 2.4.2.7: Transformada de Fourier aplicada a una señal aperiódica	71
FIGURA 2.4.2.1.1: Señal resultante de la suma de una función par e impar	72
FIGURA 2.4.2.1.2: Propiedad de homogeneidad.....	73
FIGURA 2.4.2.1.3: Propiedad de aditividad.....	73
FIGURA 2.4.2.1.4: Desplazamiento en el tiempo de una onda hacia la derecha e izquierda.....	74
FIGURA 2.4.3.1: Función ventana Gauss aplicada señal no estacionaria	75
FIGURA 2.4.3.2: Función Ventana Rectangular	76
FIGURA 2.4.3.3: Función Ventana Gauss.....	77
FIGURA 2.4.3.4: Función Ventana Triangular.....	77
FIGURA 2.4.3.5: Función Ventana Hann.....	78
FIGURA 2.4.3.6: Función Ventana Hamming	78
FIGURA 2.4.3.7: Función Ventana Blackman	79
FIGURA 2.4.3.8: Función Ventana Flat top	79
FIGURA 2.4.3.9: Efecto del Enventanado	80
FIGURA 2.4.3.1.1: Ancho de ventana con resolución de tiempo alta y frecuencia baja	81
FIGURA 2.4.3.1.2: Ancho de ventana con resolución de tiempo baja y frecuencia alta	81
FIGURA 2.5.1.1: Señal no periódica de Tiempo Discreto	82
FIGURA 2.5.1.2: Señal de Tiempo Discreto a partir de muestras de una señal de Tiempo Continuo.....	83
FIGURA 2.5.1.3: Espectro de frecuencia de una señal Discreta.....	84
FIGURA 2.5.2.1: Muestreo de la transformada de Fourier	85
FIGURA 3.1.1: Análisis espectral de una señal no estacionaria utilizando la Transformada Corta de Fourier	91
FIGURA 3.1.2: Señal no estacionaria compuesta de varias frecuencias que presenta una singularidad.....	91
FIGURA 3.1.3: Esquema de la resolución fija en tiempo y frecuencia de la Transformada Corta de Fourier	92
FIGURA 3.1.4: Esquema de la Transformada Wavelet.....	92
FIGURA 3.1.5: Ventanas con regiones de tamaño variable	93
FIGURA 3.3.1: Traslación de una wavelet madre.....	94
FIGURA 3.3.2: Función seno a diferentes escalas	95
FIGURA 3.3.3: Diferencia en implementar una escala grande y una escala pequeña en una señal	95
FIGURA 3.3.1.1.1: Familia Haar.....	97
FIGURA 3.3.1.2.1: Familia Daubechies de orden 5 (db5).....	98
FIGURA 3.3.1.2.2: Wavelet Daubechies de orden 2 (db2)	98
FIGURA 3.3.1.2.3: Familia Daubechies de orden 2 al 10	98

FIGURA 3.3.1.3.1: Wavelet Symmlet de orden 2 al 8	99
FIGURA 3.3.1.4.1: Wavelet Sombrero Mexicano.....	100
FIGURA 3.3.1.5.1: Familia Coiflet de orden 1 (coif1)	100
FIGURA 3.3.1.5.2: Wavelet Coiflet de orden 1 al 5	101
FIGURA 3.3.1.6.1: Familia biortogonal de orden 3.9 (Nr. Nd)	102
FIGURA 3.3.1.6.2: Familias Biortogonales utilizados en el paquete computacional (MATLAB)	103
FIGURA 3.3.1.7.1: Wavelet Morlet.....	104
FIGURA 3.3.1.8.1: Función Meyer	104
FIGURA 3.4.1.1: Explicación gráfica de la Transformada Wavelet Continua.....	106
FIGURA 3.4.1.1.1: Paso número 3 para calcular la Transformada Wavelet Continua.....	106
FIGURA 3.4.1.1.2: Paso número 4 para calcular la Transformada Wavelet Continua.....	107
FIGURA 3.4.1.1.3: Plano tridimensional de las variables escala, tiempo y coeficientes..	107
FIGURA 3.4.1.2.1: Señal no estacionaria de frecuencias 5 y 100 Hz.....	108
FIGURA 3.4.1.2.2: Transformada wavelet continua de la Figura 3.4.1.2.1 vista en diferentes ángulos.....	109
FIGURA 3.5.1: Evolución del número de publicaciones a través de los años referentes a las Wavelets	111
FIGURA 3.5.1.1: Publicaciones de las Wavelets aplicados a los Sistemas Eléctricos de Potencia	112
FIGURA 3.5.1.1.1: Pasos a seguir para determinar el algoritmo de un relé diferencial...113	
FIGURA 3.5.1.1.2: Publicaciones utilizando las Wavelets en los Sistemas de Protección	113
FIGURA 3.5.1.1.3: Análisis de una señal de voltaje aplicando la transformada de Fourier y Wavelet en los Sistemas de Protección.....	115
FIGURA 3.5.2.1: Análisis espectral de una persona con Alzheimer	117
FIGURA 3.5.3.1: Señal de campo de eléctrico con alto contenido de ruido.....	118
FIGURA 3.5.3.2: Comparación entre la Transformada de Fourier y Wavelet para el filtrado de imágenes	119
FIGURA 3.6.1: Descomposición de una señal aplicando la Transformada de Fourier	120
FIGURA 3.6.2: Coeficientes de Fourier y Wavelet frente a una discontinuidad de una señal.....	120
FIGURA 4.1.1: Descomposición de una señal a través de un banco de filtros pasa bajos y pasa altos.....	122
FIGURA 4.1.2: Componente de alta y baja frecuencia con muestreo completo	123
FIGURA 4.1.3: Solución al problema del doble número de muestras.....	124
FIGURA 4.1.4: Análisis multiresolución con varios niveles de descomposición	125
FIGURA 4.1.5: Esquema general del Análisis Multiresolución de tres niveles	126
FIGURA 4.1.1.1: Reconstrucción de la señal original a partir de los coeficientes de aproximación y detalle	127
FIGURA 4.1.1.2: Sobremuestreo de una señal en tiempo discreto	127
FIGURA 4.2.1: Esquema gráfica de la Transformada Wavelet Packet.....	129
FIGURA 4.2.2: Coeficientes Wavelet Packet representados hasta el nivel 4	132
FIGURA 4.2.2.1: Suma de varias funciones senos de diferentes frecuencias.....	134
FIGURA 4.2.2.2: Descomposición de la Figura 4.2.2.1 en 5 niveles	134

FIGURA 4.2.2.3: Coeficientes de detalle en los 5 niveles de descomposición de la Figura 4.2.2.1	135
FIGURA 4.3.1.1: Descripción del paso 1 del funcionamiento del programa	136
FIGURA 4.3.1.2: Wavelet Toolbox	137
FIGURA 4.3.1.3: Descripción del paso 4	138
FIGURA 4.3.1.4: Ventana final que se obtiene al cargar la señal	138
FIGURA 4.3.1.5: Diferentes opciones que presenta la Wavelet Toolbox antes de realizar un análisis	139
FIGURA 4.3.1.6: Formas de onda en diferentes niveles del árbol de descomposición ...	142
FIGURA 4.4.1: Líneas espectrales de un grupo armónico para 50 Hz	143
FIGURA 4.4.2: Líneas espectrales de un subgrupo armónico	144
FIGURA 4.4.3: Líneas espectrales de un subgrupo interarmónico centrado para 50 Hz	145
FIGURA 4.4.4: Líneas espectrales de un grupo interarmónico	146
FIGURA 4.5.2.1: Analizador de red marca FLUKE 1735	147
FIGURA 4.5.4.1: Características no lineales de los filtros pasa bajos y pasa altos utilizando la wavelet madre Daubechies de orden 10, 20 y 40	155
FIGURA 4.5.4.2: Árbol completo de descomposición de 6 niveles	156
FIGURA 4.5.5.1: Conexión del equipo de medida en el Tablero de Control del Laboratorio de Máquinas Eléctricas	161
FIGURA 4.5.5.2: Analizador de red FLUKE 1735	162
FIGURA 4.5.5.3: Formas de onda de voltaje y corriente en las fases AB, BC y AC	162
FIGURA 4.5.5.4: Ondas de voltaje y corriente	164
FIGURA 4.5.5.5: Valores eficaces de los armónicos de la onda de voltaje AB de orden 1, 3, 5, y 7	166
FIGURA 4.5.5.6: Valores eficaces de los armónicos de la onda de corriente fase A de orden 1, 3, 4, 5, y 6	168
FIGURA 4.5.5.7: Onda de voltaje AB simulado en el programa MATLAB	169
FIGURA 4.5.5.8: Árbol completo de descomposición de 6 niveles	170
FIGURA 4.5.5.9: Primer nivel de descomposición onda de voltaje función Daubechies correspondiente al coeficiente (cD_1)	170
FIGURA 4.5.5.10: Segundo nivel de descomposición onda de voltaje función Daubechies correspondiente al coeficiente (cAA_2)	171
FIGURA 4.5.5.11: Tercer nivel de descomposición onda de voltaje función Daubechies correspondiente al coeficiente ($cDDD_3$)	171
FIGURA 4.5.5.12: Cuarto nivel de descomposición onda de voltaje función Daubechies correspondiente al coeficiente ($cAADA_4$)	171
FIGURA 4.5.5.13: Quinto nivel de descomposición onda de voltaje función Daubechies correspondiente al coeficiente ($cDADAD_5$)	172
FIGURA 4.5.5.14: Sexto nivel de descomposición onda de voltaje función Daubechies correspondiente al coeficiente ($cDAADAD_6$)	172
FIGURA 4.5.5.15: Primer nivel de descomposición onda de voltaje función Coiflets correspondiente al coeficiente (cD_1)	173
FIGURA 4.5.5.16: Segundo nivel de descomposición onda de voltaje función Coiflets correspondiente al coeficiente (cAA_2)	173

FIGURA 4.5.5.17: Tercer nivel de descomposición onda de voltaje función Coiflets correspondiente al coeficiente (cDDD ₃).....	173
FIGURA 4.5.5.18: Cuarto nivel de descomposición onda de voltaje función Coiflets correspondiente al coeficiente (cAADA ₄).....	174
FIGURA 4.5.5.19: Quinto nivel de descomposición onda de voltaje función Coiflets correspondiente al coeficiente (cDADAD ₅).....	174
FIGURA 4.5.5.20: Sexto nivel de descomposición onda de voltaje función Coiflets correspondiente al coeficiente (cDAADAD ₆).....	174
FIGURA 4.5.5.21: Onda de corriente de la fase A simulado en el programa MATLAB ...	179
FIGURA 4.5.5.22: Árbol completo de descomposición de 6 niveles para la onda de corriente	180
FIGURA 4.5.5.23: Primer nivel de descomposición onda de corriente función Daubechies correspondiente al coeficiente (cA ₁).....	180
FIGURA 4.5.5.24: Segundo nivel de descomposición onda de corriente función Daubechies correspondiente al coeficiente (cDD ₂).....	181
FIGURA 4.5.5.25: Tercer nivel de descomposición onda de corriente función Daubechies correspondiente al coeficiente (cADA ₃).....	181
FIGURA 4.5.5.26: Cuarto nivel de descomposición onda de corriente función Daubechies correspondiente al coeficiente (cDDAD ₄).....	181
FIGURA 4.5.5.27: Quinto nivel de descomposición onda de corriente función Daubechies correspondiente al coeficiente (cAADDA ₅)	182
FIGURA 4.5.5.28: Sexto nivel de descomposición onda de corriente función Daubechies correspondiente al coeficiente (cADAADA ₆).....	182
FIGURA 4.5.5.29: Primer nivel de descomposición onda de corriente función Coiflets correspondiente al coeficiente (cA ₁).....	183
FIGURA 4.5.5.30: Segundo nivel de descomposición onda de corriente función Coiflets correspondiente al coeficiente (cDD ₂).....	183
FIGURA 4.5.5.31: Tercer nivel de descomposición onda de corriente función Coiflets correspondiente al coeficiente (cADA ₃).....	183
FIGURA 4.5.5.32: Cuarto nivel de descomposición onda de corriente función Coiflets correspondiente al coeficiente (cDDAD ₄).....	184
FIGURA 4.5.5.33: Quinto nivel de descomposición onda de corriente función Coiflets correspondiente al coeficiente (cAADDA ₅)	184
FIGURA 4.5.5.34: Sexto nivel de descomposición onda de corriente función Coiflets correspondiente al coeficiente (cADAADA ₆).....	184
FIGURA 4.6.1: Voltaje de línea AB y Corriente fase A.....	187
FIGURA 4.6.2: Onda de voltaje AB para el análisis de interarmónicos simulado en el programa MATLAB	187
FIGURA 4.6.3: Onda de voltaje AB dibujado en EXCEL.....	188
FIGURA 4.6.4: Transformada Rápida de Fourier de la Figura 4.6.2.....	188
FIGURA 4.6.5: Árbol completo de descomposición de 5 niveles para el análisis de interarmónicos	189
FIGURA 4.6.6: Primer nivel de descomposición para el análisis de interarmónicos correspondiente al coeficiente (cA ₁).....	189
FIGURA 4.6.7: Segundo nivel de descomposición para el análisis de interarmónicos	

correspondiente al coeficiente (cDD_2).....	190
FIGURA 4.6.8: Tercer nivel de descomposición para el análisis de interarmónicos correspondiente al coeficiente ($cAAD_3$).....	190
FIGURA 4.6.9: Cuarto nivel de descomposición para el análisis de interarmónicos correspondiente al coeficiente ($cDDAD_4$).....	190
FIGURA 4.6.10: Quinto nivel de descomposición para el análisis de interarmónicos correspondiente al coeficiente ($cAAADD_5$).....	191
FIGURA 4.7.1: Ilustración del Grupo Subarmónico para un sistema de 50 Hz.....	193
FIGURA 4.7.2: Wavelet Packet de cinco niveles de descomposición para la medida de subarmónicos	194
FIGURA 4.7.3: Onda de voltaje AB para el análisis de subarmónicos.....	194
FIGURA 4.8.1: Fluctuaciones en el valor eficaz de la onda de voltaje.....	195
FIGURA 4.8.2: Forma de onda de voltaje con cambios en su amplitud.....	196

LISTA DE TABLAS

TABLA 1.3.1.1: Características de los fenómenos perturbadores– IEEE 1159	14
TABLA 1.3.2.1: Estándares IEC e IEEE para las Variaciones de voltaje de corta, larga duración y transitorios.....	16
TABLA 1.4.5.4.2.2.1: Requerimientos básicos de medida para los diferentes tipos de armónicos	33
TABLA 1.4.5.4.3.2.1: Límites máximos de distorsión armónica de corriente	36
TABLA 1.4.5.4.3.2.2: Límites máximos de distorsión armónica de voltaje	36
TABLA 1.4.5.4.4.1: Características del horno de arco eléctrico en diferentes procesos de funcionamiento	37
TABLA 1.5.1.1.1.1: Límites establecidos por el CONELEC para diferentes niveles de voltaje	54
TABLA 1.5.2.1.1.1: Límites de armónicos establecidos por el CONELEC	56
TABLA 2.6.1: Resumen de las expresiones matemáticas más importantes de la Transformada de Fourier.....	88
TABLA 3.5.1.1.1: Técnicas y criterios de discriminación con Wavelets.....	114
TABLA 4.5.2.1: Características generales FLUKE 1735.....	148
TABLA 4.5.2.2: Condiciones de ambiente FLUKE 1735	149
TABLA 4.5.2.3: Compatibilidad electromagnética analizador de red FLUKE 1735	149
TABLA 4.5.2.4: Valores V_{rms} en estrella FLUKE 1735	149
TABLA 4.5.2.5: Valores V_{rms} en delta FLUKE 1735.....	149
TABLA 4.5.2.6: Valores eficaces en la medida de corriente FLUKE 1735	150
TABLA 4.5.2.7: Medidas de potencia FLUKE 1735.....	151
TABLA 4.5.2.8: Medida de energía FLUKE 1735	151
TABLA 4.5.2.9: Rangos de medida del factor de potencia FLUKE 1735.....	151
TABLA 4.5.2.10: Medida de frecuencia FLUKE 1735.....	151
TABLA 4.5.2.11: Rango de medida de armónicos FLUKE 1735	151
TABLA 4.5.2.12: Precisión en la medida de voltaje, corriente y distorsión armónica del FLUKE 1735	152

TABLA 4.5.4.1: Resultado de las 64 bandas uniformes ordenados de abajo hacia arriba	158
TABLA 4.5.4.2: Agrupación de las bandas restantes	159
TABLA 4.5.5.1: Comandos utilizados en MATLAB para definir una familia Wavelet	175
TABLA 4.5.5.2: Resultados finales aplicando las funciones Daubechies y Coiflets para la onda de voltaje en la medida de armónicos	178
TABLA 4.5.5.3: Resultados finales aplicando las funciones Daubechies y Coiflets para la onda de corriente en la medida de armónicos	186
TABLA 4.6.1: Resultado final aplicando la wavelet madre Daubechies para la onda de voltaje en la medida de interarmónicos.....	192
TABLA 4.7.1: Medida del grupo subarmónico de la Figura 4.7.3.....	195
TABLA 4.8.1: Resultados de los cambios de amplitud de la forma de onda de voltaje de la Figura 4.8.2 mediante la Transformada Wavelet Packet	196

RESUMEN

La Transformada Rápida de Fourier al ser un método tradicional utilizado en la medida de las perturbaciones, solamente presenta un análisis espectral completo cuando la onda es de carácter estacionario, ya que una de las características de esas ondas, es que el espectro se mantiene presente en cualquier instante de tiempo; en cambio para señales no estacionarias aparte de tener un correcto dominio de la frecuencia, no brinda la información del tiempo que ocurren los espectros. Además otra deficiencia que muestra esta transformada es que únicamente sirve para aquellas señales que son periódicas, caso contrario se mostrarán resultados erróneos.

Es por esa razón, que el presente proyecto de titulación tiene como objetivo implementar un método alternativo que elimine los problemas de esa transformada y así poder medir las diferentes perturbaciones como armónicos, interarmónicos, subarmónicos y flicker.

La transformada que elimina esos problemas se denomina Transformada Wavelet, sin embargo, la transformada que más se ajusta para el tema de las perturbaciones es la Wavelet Packet porque es un método que se basa en la descomposición de la señal en diferentes resoluciones de tiempo y en varias bandas uniformes de frecuencia mediante el uso de bancos de filtros pasa bajos y pasa altos.

Para representar una señal la Transformada Wavelet se basa en el mismo principio de superposición de ondas que la Transformada de Fourier, con la diferencia que la primera de ellas utilizada wavelets básicas o wavelets madres, y la segunda una suma infinita de funciones senoidales y cosenoidales. En la elección de la wavelet madre, no existe un criterio específico que permita seleccionar la wavelet adecuada por lo tanto, la elección se lo realiza mediante dos criterios: la primera en base a las propiedades, y la segunda en determinar visualmente la semejanza que tiene la forma de la wavelet madre y la señal a ser analizada.

La falta de especificaciones en las condiciones de medida por parte de la norma norteamericana, se toma como referencia la establecida en la norma IEC-61000-4-7 que define la ventana de observación de 12 ciclos para un sistema de 60 Hz con una resolución de la frecuencia de 5 Hz entre los componentes consecutivos de la frecuencia.

La determinación del nivel óptimo de descomposición se logra mediante un análisis de las líneas espectrales de 5 Hz que rodean a las componentes armónicas como también del orden que se desee calcular que en este caso de estudio es de orden 32, estableciendo así, que para la medida de armónicos se necesita una descomposición de seis niveles, en cambio para los interarmónicos y subarmónicos se requiere cinco niveles.

Para demostrar su efectividad, se desarrolla una comparación en la medida de armónicos de la onda de voltaje AB y corriente fase A entre el método convencional y el propuesto con los datos obtenidos en el laboratorio de máquinas eléctricas mediante el analizador de red FLUKE 1735, determinando que el método propuesto además de proporcionar resultados similares, se logra obtener el dominio del tiempo de los espectros. En cambio para el análisis de interarmónicos y subarmónicos se utilizó otro analizador de la calidad de la energía más avanzado denominado POWER XPLOER PX5 debido a las limitaciones que presenta el equipo FLUKE 1735 en la medida de interarmónicos y subarmónicos, comprobando así que la transformada Wavelet Packet muestra resultados semejantes a los medidos con ligeras variaciones.

Finalmente con el uso del programa MATLAB, se puede observar de una manera adecuada los diferentes niveles de descomposición de las señales analizadas.

PRESENTACIÓN

El presente proyecto de titulación, está organizado en seis capítulos cuyo contenido se especifica a continuación:

En el primer capítulo se presenta una breve introducción acerca de la calidad de la energía antes y después de la aparición de la Electrónica de Potencia y los problemas más comunes que producen las perturbaciones electromagnéticas en los equipos. También se realiza la clasificación de las perturbaciones según la norma norteamericana y europea, estableciendo así, las condiciones de medida, efectos y límites de las perturbaciones más principales. Finalmente se definió al organismo ecuatoriano encargado de establecer los estándares mínimos de calidad, procedimientos técnicos de medición y evaluación que deben someterse las Empresas Distribuidoras del Servicio Eléctrico en nivel de voltaje, flicker, armónicos y duración de las interrupciones para garantizar un buen servicio a los usuarios.

En el segundo capítulo se presenta una breve reseña histórica de la aparición de las diferentes transformadas y una explicación de todas las Transformadas de Fourier con sus respectivas propiedades, además se indica las condiciones que debe cumplir una determinada señal para poder aplicar la transformada más idónea.

El tercer capítulo se explica las características generales de las wavelets, las variables que diferencian de la Transformada de Fourier, sus distintas transformadas y las propiedades que poseen las familias de funciones usadas como wavelets madres. También se expone las distintas aplicaciones de la transformada Wavelet en otros campos, y principalmente se realiza una comparación entre la Transformada de Fourier y la Transformada Wavelet estableciendo sus ventajas, desventajas, así como también las diferencias y semejanzas.

En el cuarto capítulo se define la Transformada Wavelet por Paquetes o el árbol completo de descomposición que permite separar cualquier señal en diferentes niveles de resolución, se explica la agrupación de las líneas espectrales de 5 Hz

que establece la norma IEC 61000-4-7 para un sistema de 60 Hz y así determinar la medida de las perturbaciones, posteriormente se realiza un análisis para establecer el nivel óptimo de descomposición en la medida de armónicos, interarmónicos y subarmónicos. Además se desarrolla un ejemplo numérico para compararlo con el método tradicional y por último se expone la medida del voltaje flicker.

En el quinto capítulo se muestra las conclusiones que se obtuvieron a lo largo del trabajo y se plantea algunas recomendaciones, especialmente en aquellos casos cuando se desee aumentar la medida del orden de los armónicos, interarmónicos y subarmónicos o cuando se utilice el método para un sistema de 50 Hz.

El sexto capítulo indica las referencias bibliográficas de las cuales se tomaron en cuenta para desarrollar el presente trabajo.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Proponer un método alternativo para el análisis del contenido espectral de una señal, que cumpla con los estándares Internacionales.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los efectos que producen las perturbaciones en los equipos.
- Usar la Transformada de Wavelet Packet para dividir la señal en múltiples niveles mediante el árbol de descomposición, con el propósito de determinar las medidas de las perturbaciones de la señal.
- Utilizar el analizador de la calidad de energía de la serie 1735 POWER LOGGER de la marca “FLUKE” en el laboratorio de Máquinas Eléctricas para medir los diferentes tipos de perturbaciones y realizar un análisis comparativo entre la Norma IEEE 519-1992 (Transformada de Fourier) y la Transformada de Wavelet Packet.

ALCANCE

El método propuesto que se empleará y analizará en la investigación se basará en las normas IEEE 519-1992 y la IEC 61000-4-7, con lo cual se pretende medir y analizar los resultados de las diferentes perturbaciones existentes en una red.

Para ello se empleará la Transformada de Wavelet Packet mediante la descomposición de la señal en varios niveles con el objetivo de conseguir el total de ancho de banda de la muestra repartido en un número mayor de coeficientes. La banda de anchura espectral dependerá de la perturbación a medir.

Posteriormente se realizará un análisis comparativo entre el método propuesto y el utilizado por las normas, determinando de esta manera cuál de ellas es la más óptima.

JUSTIFICACIÓN

La utilización de la Transformada de Fourier como una herramienta fundamental para el análisis de las perturbaciones establecida por la norma IEEE 519-1992, presenta limitaciones que lo hacen poco efectivo, ya que detecta la presencia de una determinada frecuencia pero no nos brinda la información acerca de la evolución en el tiempo de las características espectrales de la señal. Es por eso que la Transformada Wavelet nos otorga la posibilidad de representar señales en diferentes niveles de resolución, señales con variaciones de picos abruptos y lo más importante, es que presenta un análisis tiempo-frecuencia de la señal.

CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN

1.1 IMPORTANCIA DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Las diferentes perturbaciones han existido desde que se implementaron los sistemas eléctricos de potencia, siendo los más importantes los armónicos, teniendo como principales fuentes de generación el balasto de las lámparas fluorescentes, las máquinas eléctricas y los transformadores, estas dos últimas cuando operaban en estado transitorio o fuera de su zona normal de operación.

El ejemplo más claro, en cuanto a la generación de perturbaciones es la energización del transformador, proceso en el cual una corriente de magnetización transitoria “Inrush” que puede llegar a ser de 100 veces la corriente de vacío de régimen permanente del transformador y que además presenta un gran contenido de segunda armónica, de aproximadamente del 30% con respecto a la onda fundamental.

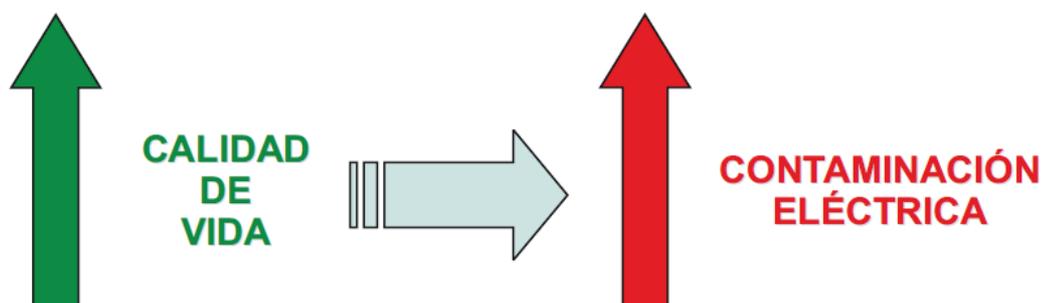
Hoy en día y con la evolución de la tecnología, la electrónica de potencia se ha convertido en una herramienta indispensable para el funcionamiento de diferentes equipos eléctricos con la finalidad de obtener equipos de alta capacidad, alto rendimiento y bajo costo tanto para la industria, uso doméstico o comercial.

“La Electrónica de Potencia está presente en los convertidores CA/CC (rectificadores), CC/CC (choppers), CC/CA (inversores) y CA/CA (convertidores directos de frecuencia). Como ejemplo de esto, se puede citar las fuentes renovables, bancos de baterías y la transmisión de energía eléctrica en corriente continua (CC), que ponen a disposición la tensión de la red en niveles y formas diferentes de los de la red eléctrica original”.¹

La aparición de la electrónica de potencia, a pesar de mejorar los equipos, ha disminuido la calidad de la energía eléctrica (deterioro de la señal de voltaje y corriente), teniendo como consecuencias el calentamiento de los conductores y lo

¹ El informativo energético de Chile. “La importancia de la Electrónica de Potencia”. Consultado: http://www.revistaei.cl/revistas/imprimir_noticia_neo.php?id=824

más importante, la caída de voltaje a lo largo de la red hasta llegar a los usuarios, si éstas son originadas en el sistema de generación, transmisión o distribución, produciendo un mal funcionamiento de los equipos conectados a la red eléctrica.



Si las perturbaciones son originadas por el usuario al conectar cargas no lineales, contamina la red inyectando corrientes armónicas que provocan la distorsión en la forma de onda de voltaje, siendo este voltaje aplicado para las otras cargas, como se puede apreciar en la Figura 1.1.1, siendo los más afectados los otros usuarios que solamente posean cargas lineales.

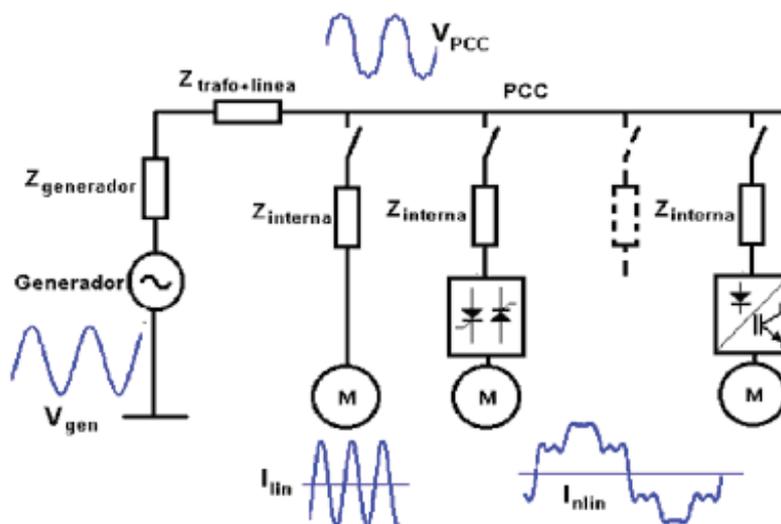


FIGURA 1.1.1: Armónicos de Voltaje generados por cargas no lineales en una red eléctrica

Por lo tanto, los equipos que generan corrientes no sinusoidales se llaman cargas no lineales o deformantes, es decir, que además de su componente fundamental posee otras de múltiplos enteros de la fundamental.

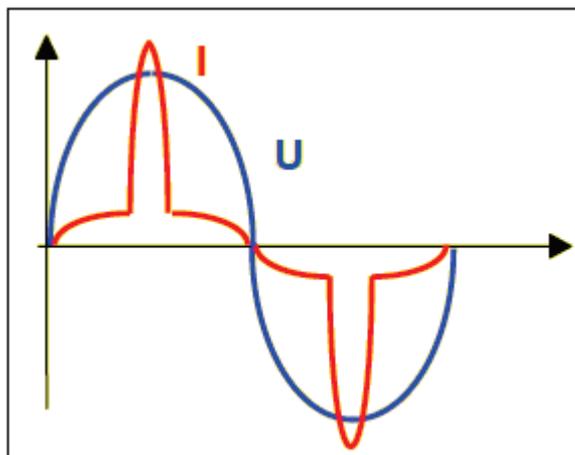


FIGURA 1.1.2: Forma de onda de corriente de una carga no lineal

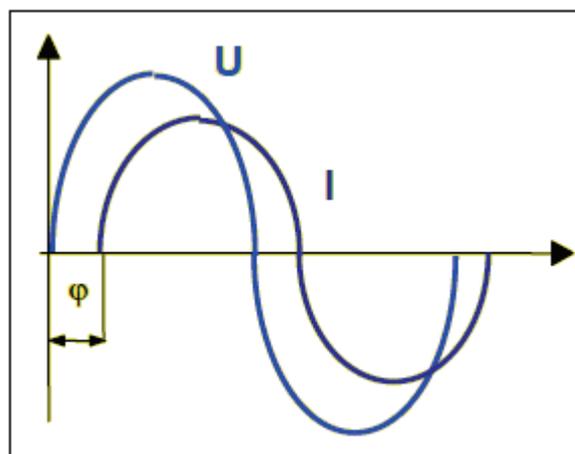


FIGURA 1.1.3: Forma de onda de corriente de una carga lineal

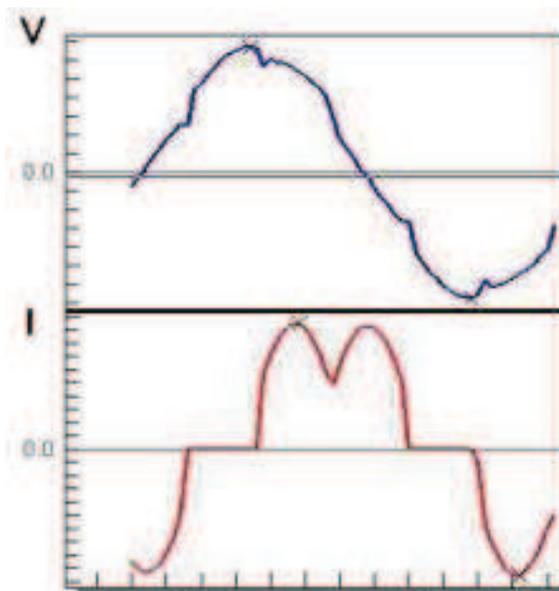


FIGURA 1.1.4: Forma de onda de voltaje y corriente de una red trifásica

La calidad de la energía eléctrica, tiene relación con los siguientes tres agentes importantes:

1. **Empresas Distribuidoras:** Responsables de distribuir el suministro de energía hasta los usuarios garantizando un suministro de calidad.
2. **Usuarios:** Encargados de exigir a las empresas distribuidoras, un suministro eléctrico de calidad, así mismo de controlar las emisiones de las perturbaciones de los diferentes equipos conectados a la red eléctrica.
3. **Fabricantes de equipos:** Encargados de fabricar equipos con un mínimo grado de emisión de perturbaciones.

“Para que un equipo o sistema funcione satisfactoriamente en un ambiente electromagnético sin introducir perturbaciones intolerables en ese ambiente, debe satisfacer dos requerimientos:

- **“Funcionar satisfactoriamente”**, significa que el equipo o sistema es tolerante a otros.
Esto implica que el equipo o sistema no es susceptible (es inmune) a las perturbaciones presentes en ese ambiente.

- **“No introducir perturbaciones intolerables”**, significa que el dispositivo no genere emisión de perturbaciones que resulten en interferencia electromagnética en otros equipos presentes en ese ambiente.”²

Finalmente para evaluar la calidad del suministro eléctrico se debe tener en cuenta los siguientes tres aspectos:

- **Calidad del producto:** Se basa en todas las características referentes a la forma de onda, ya sea en nivel de voltaje, factor de potencia, y las perturbaciones existentes en el punto de suministro.
- **Calidad del servicio técnico:** “Se caracteriza por la determinación de índices globales de calidad que permiten evaluar la continuidad del servicio y cuantifican la ocurrencia de las interrupciones del suministro (frecuencia y duración de interrupciones)”³
- **Calidad del servicio comercial:** Comprende los diferentes reclamos y su respectivo tiempo de respuesta por parte de los usuarios hacia la empresa, como por ejemplo errores de medición y factura, atención de reclamos y atención de solicitudes.

1.1.1 PROBLEMAS TÍPICOS⁴

Los problemas más comunes que generalmente provocan las perturbaciones en el ámbito económico o propio de los equipos son:

- Reseteo de equipos de computación.
- Equipos quemados.
- Disminución de la vida útil esperada de los equipos.
- Parpadeo en el alumbrado.
- Corrientes por conductores de tierra.
- Reinicio inesperado de computadoras.
- Oscilaciones en las pantallas de las computadoras.

² Salazar, G. Compatibilidad Electromagnética. **“Calidad de Suministro Eléctrico”**

³ Salazar, G. Evaluación de Calidad de Suministro. **“Calidad de Suministro Eléctrico”**

⁴ Informática e Ingeniería Integral S.A. **“Introducción a la Calidad de la Energía Eléctrica”**. Consultado: <http://ininin.com.mx/servicios/capacitacion/cursos-y-temarios/introduccion-a-la-calidad-de-la-energia-electrica/>

- Sobrecalentamiento de transformadores, interruptores, motores, etc.
- Sobrecarga de conductores de neutro.
- Operación no deseada de protecciones.
- Ruidos audibles en interruptores.
- Pérdidas de producción para las Empresas.
- Envejecimiento prematuro de los aparatos o equipos.
- Mal funcionamiento de los equipos conectados a la red eléctrica.
- Fallas en los equipos.

1.2 ORGANISMOS INTERNACIONALES ENCARGADOS DE IMPLEMENTAR NORMAS RELACIONADAS CON LOS FENÓMENOS PERTURBADORES

El aumento de equipos causantes de emisión de perturbaciones en la red ya sea por parte de los implementos utilizados en el sistema eléctrico de potencia, o provocados por los usuarios, ha determinado que Organismos Internacionales estudien los problemas asociados a las distintas perturbaciones, y sugieran normas referentes a la calidad de la energía eléctrica.

Entre los Organismos Internacionales que se han preocupado de temas relacionados con el estudio y análisis de perturbaciones eléctricas, se pueden mencionar a los siguientes:

1.2.1 INSTITUTO DE INGENIEROS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS (IEEE)

Se crea en el año de 1884 con el fin de apoyar a profesionales en el campo naciente y aplicar todos los conocimientos y descubrimientos para el beneficio de la humanidad.

En 1963, se empezó a llamar Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, tras la fusión de diferentes de asociaciones como AIEE (Instituto Americano de Ingenieros Eléctricos) y IRE (Instituto de Radio Ingenieros).

Actualmente es la asociación internacional más grande del mundo sin fines de lucro y cuenta con aproximadamente 360000 miembros y voluntarios en 175 países.

Esta asociación es una autoridad líder en la rama de ingeniería eléctrica y sus derivados como ingeniería computacional, tecnología biomédica, entre otras.

Actualmente su trabajo es promover la creatividad, el desarrollo y la integración, compartir y aplicar los avances en las tecnologías de la información, electrónica y ciencias para beneficio de la humanidad.

En cuanto a la calidad de la energía eléctrica el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos utiliza el término “Power Quality” para referirse “a un conjunto de límites eléctricos que permiten a un equipo funcionar adecuadamente sin pérdida significativa de su performance o de su vida útil. Estos límites están relacionados con desviaciones del voltaje y/o de la corriente de la forma ideal (en un tiempo dado y ubicación en el sistema).”⁵

Existen varias publicaciones para la calidad de la energía como la 1453 (Medición, límites de las fluctuaciones de voltaje y flicker), 1366 (Índices de confiabilidad), 1346 (Compatibilidad del sistema en ambientes industriales), entre otros, pero la más importante es la IEEE 519.

1.2.1.1 Estándar IEEE 519 – (1992)

La norma que establece este organismo para el análisis de armónicos es la IEEE 1159 - (1992) denominada como “Recomendaciones prácticas y requerimientos para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia.”

El estándar abarca diferentes temas en relación a los armónicos como:

➤ Generación de armónicos

Explica los diferentes equipos que se utiliza en la actualidad y que crean problemas a la red eléctrica, así mismo las diferentes fórmulas que se aplica para determinar los armónicos y compararlas con límites establecidos.

⁵ Salazar, G. Compatibilidad Electromagnética. “**Perturbaciones en Redes Eléctricas**”

➤ **Característica de respuesta del sistema**

Los efectos de los armónicos dependerán de las características de respuesta de frecuencia del sistema, pero a su vez estas características se ven afectadas por una serie de factores que deben ser considerados para realizar un análisis completo de un sistema.

➤ **Efectos de los armónicos**

El grado de tolerancia ante los armónicos se determina por la susceptibilidad de la carga.

El equipo menos susceptible es aquel cuya función principal es un calentador como por ejemplo un horno, donde la energía que contiene armónicos generalmente se utiliza y por lo tanto es tolerable, sin embargo los equipos más susceptibles ante esta perturbación generalmente son los de comunicación y procesamiento de datos, ya que el diseño asume una onda sinusoidal casi perfecta. Un tipo de carga que normalmente cae entre estos dos extremos de la susceptibilidad es la carga del motor, las cargas de los motores son relativamente tolerantes a los armónicos.

➤ **Compensación de potencia reactiva y control de armónicos**

El artículo trata sobre los diferentes métodos para compensar la potencia reactiva como el uso de banco de condensadores, máquinas rotativas entre otras.

Para el control de armónicos propone tres diferentes métodos:

1) Filtros Pasivos (Serie o Shunt resonante o antiresonante)

Consiste en uno o más circuitos que utilizan elementos pasivos como capacitancia e inductancia en serie para atenuar el flujo de armónicos.

2) Multiplicación de fases

En los equipos convertidores de n pulsos se puede aplicar la multiplicación de fases para anular diferentes componentes armónicas. De acuerdo a la siguiente ecuación se puede apreciar que para un número mayor de pulsos el orden de armónicos decrece.

$$h = k \cdot p \pm 1$$

Donde:

h : orden del armónico

k : número entero (1, 2, 3, 4,...)

p : número de pulsos del convertidor

Ejemplo:

Para un convertidor de 6 pulsos las componentes armónicas que existen son: 5, 7, 11, 13, 17, 19,....

Y para uno de 12 pulsos tenemos: 11, 13, 23, 25, 35, 37,....

Un rectificador de 12 pulsos como no posee componentes de armónicos de orden 5 y 7, disminuye su contenido armónico a comparación de un rectificador de 6 pulsos.

∴ Las armónicas presentes en un convertidor serán menores a mayor número de pulsos.

3) Inyección o compensación armónica

Las corrientes armónicas pueden ser eliminadas por la inducción de un flujo armónico en el núcleo de un transformador con un desfase de 180° respecto a los armónicos inducidos por el flujo de corriente en el secundario. Esto se logra mediante filtros activos que monitorean constantemente la corriente de carga e inyectan una corriente igual en magnitud pero opuesta en fase a la componente distorsionada y de esta manera anularla.

➤ Métodos de análisis

Para el cálculo de los niveles de armónicos se necesita un conocimiento de las características de las fuentes de armónicos y la respuesta en frecuencia del sistema, por lo que el artículo nos expone una breve explicación acerca de los cálculos necesarios para determinar dichos niveles mediante un circuito básico; si

el problema es simple o complejo mediante un programa, además de los factores importantes que se deben incluir en el circuito para el modelado de máquinas, líneas largas y cargas.

➤ **Mediciones**

La medición de corriente y voltaje de armónicos son fundamentales para una segura distribución de energía eléctrica, por lo tanto para obtener mediciones exactas, la norma explica los diferentes requerimientos que debe tener los instrumentos de medida como exactitud, selectividad, etc.

➤ **Prácticas recomendadas para consumidores individuales**

Esta sección describe los límites actuales de la distorsión que se aplican a los consumidores individuales de energía eléctrica.

1.2.2 COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL (IEC)

La Comisión Electrotécnica Internacional entró en vigencia el 26 de junio de 1906 en Londres, siendo el primer presidente Lord Kelvin, hasta que en 1948 se trasladó a Ginebra.

Es una organización mundial de normalización, cuyo objetivo es promover la cooperación internacional en todas las cuestiones relativas a la normalización en los campos eléctricos y electrónicos. Más de 60 países en el año 2003 pertenecían a esta comisión.

La IEC trabaja en conjunto con la Organización Internacional de Normalización (ISO) según condiciones determinadas por ambas organizaciones.

Para referirse a la calidad de la energía eléctrica, utilizan el término “Compatibilidad Electromagnética (CEM)” que estudia las diferentes maneras de eliminar o prevenir los efectos de acoplamiento entre los aparatos o equipos y el ambiente electromagnético al que está sometido.

Las normas acerca de la Compatibilidad Electromagnética, se encuentran dentro de la serie 61000 separadas en varias partes según la siguiente estructura:

- **Parte 1: General**

Consideraciones generales, introducción.

- **Parte 2: Ambiente electromagnético**

Descripción, clasificación y niveles de compatibilidad.

- **Parte 3: Límites**

Límites de emisión e inmunidad.

- **Parte 4: Técnicas de medición y evaluación**

Técnicas de prueba y medición para determinar la capacidad de un equipo de operar en presencia de una perturbación (nivel de inmunidad).

- **Parte 5: Guías de instalación y mitigación**

Instalación de dispositivos o equipos y diversos métodos para evitar las diferentes perturbaciones.

- **Parte 6: Misceláneos**

“Normas genéricas de definición de inmunidad y niveles de emisiones requeridas para equipos en categorías generales o para tipos de equipos específicos.”⁶

Cada una de las seis partes puede ser dividida en otras secciones, para identificarlas se utiliza un guión después del número que define la parte, seguido por un segundo número que identifica la subdivisión, como por ejemplo: IEC 61000-6-1.

Entre las principales normas para valorar la calidad de la energía eléctrica de la serie 61000 son:

- IEC 61000-2-1 “Compatibilidad Electromagnética – Parte 2-1: Ambiente electromagnético – Entorno electromagnético de baja frecuencia de las perturbaciones en redes eléctricas”

⁶ Universidad Politécnica Salesiana. “**Armónicos en Redes Eléctricas**”. Consultado: <https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/2/EL5203/1/.../384495>

- IEC 61000-2-8 “Compatibilidad Electromagnética – Parte 2-8: Ambiente electromagnético – Huecos de voltaje e interrupciones breves en las redes eléctricas, con inclusión de resultados de medidas estadísticas”
- IEC 61000-3-2 “Compatibilidad Electromagnética – Parte 3-2: Límites para las emisiones de corriente armónica (≤ 16 A por fase)”
- IEC 61000-3-3 “Compatibilidad Electromagnética – Parte 3-3: Límites para las fluctuaciones de voltaje y flicker en redes de bajo voltaje (≤ 16 A por fase) ”
- IEC 61000-3-6 “Compatibilidad Electromagnética – Parte 3-6: Evaluación de los límites de emisión de las instalaciones de medio, alto y extra alto voltaje de un sistema eléctrico de potencia”
- IEC 61000-3-7 “Compatibilidad Electromagnética – Parte 3-7: Evaluación de los límites de emisión para cargas fluctuantes en sistemas de potencia de medio y alto voltaje”
- IEC 61000-4-7 “Compatibilidad Electromagnética – Parte 4-7: Técnicas de control y evaluación – Guía general de medida de armónicos e interarmónicos para sistemas de alimentación y el equipo conectado al mismo”
- IEC 61000-4-13 “Compatibilidad Electromagnética – Parte 4-13: Técnicas de prueba y medición – Armónicos e Interarmónicos, incluyendo la señal principal AC en el puerto de alimentación, ensayos de inmunidad de baja frecuencia”
- IEC 61000-4-30 “Compatibilidad Electromagnética – Parte 4-30: Técnicas de prueba y medición – Métodos de medición para la calidad de la energía eléctrica”

1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS FENÓMENOS PERTURBADORES

Las principales características de la onda de voltaje (amplitud, forma, frecuencia) producida por las centrales de generación, pueden ser alteradas o modificadas por diferentes causas, motivo por el cual los organismos internacionales explicados anteriormente, realizaron la clasificación de las diferentes perturbaciones que pueden existir en una red eléctrica.

1.3.1 ESTÁNDAR IEEE 1159 – (1995)

El estándar IEEE 1159 – (1995), definida como la práctica recomendada para el control de calidad de energía eléctrica, abarca la descripción de los diferentes fenómenos perturbadores, técnicas e instrumentos de medición y la interpretación de los resultados.

El estándar clasifica a las perturbaciones electromagnéticas en siete categorías:

- 1) Transitorios electromagnéticos.
- 2) Variaciones de voltaje de corta duración.
- 3) Variaciones de voltaje de larga duración.
- 4) Desbalance o desequilibrio de voltaje.
- 5) Distorsión de la forma de onda.
- 6) Fluctuación de voltaje.
- 7) Variaciones de frecuencia.

Cada perturbación se clasifica de acuerdo a los criterios de duración, espectro de frecuencia y forma de la perturbación, como se detalla en la Tabla 1.3.1.1:

CONTENIDO	ESPECTRO TÍPICO	DURACIÓN TÍPICA	MAGNITUD TÍPICA DEL VOLTAJE
1. Transitorios 1.1. Impulsivos 1.1.1. Nanosegundos 1.1.2. Microsegundos 1.1.3. Milisegundos 1.2. Oscilatorios 1.2.1. Baja frecuencia 1.2.2. Media frecuencia 1.2.3. Alta frecuencia	5 ns de elevación 1 μ s de elevación 0.1ms de eleva. < 5 kHz 5 – 500 kHz 0.5 – 5 MHz	< 50 ns 50 ns- 1 ms > 1ms 0.3 – 50 ms 20 μ s 5 μ s	 0 – 4 pu 0 – 8 pu 0 – 4 pu
2. Variaciones de corta duración			

2.1. Instantáneas 2.1.1. Sag 2.1.2. Swell 2.2. Momentáneas 2.2.1. Interrupción 2.2.2. Sag 2.2.3. Swell 2.3. Temporal o Temporarias 2.3.1. Interrupción 2.3.2. Sag 2.3.3. Swell		0.5– 30 ciclos 0.5– 30 ciclos 0.5– 3 s 30 ciclos- 3 s 30 ciclos- 3 s 0 s – 1 min 0 s – 1 min 3 s – 1 min	0.1- 0.9 pu 1.1- 1.8 pu < 0.1 pu 0.1- 0.9 pu 1.1- 1.4 pu < 0.1 pu 0.1- 0.9 pu 1.1- 1.2 pu
3. Variaciones de larga duración 3.1. Interrupción sostenida 3.2. Bajo voltaje 3.3. Sobrevoltaje		> 1 min > 1 min > 1 min	0.0 pu 0.8– 0.9 pu 1.1– 1.2 pu
4. Desbalance de voltaje		E. Estable	0.5 – 2%
5. Distorsión de forma de onda 5.1. DC offset 5.2. Contenido armónico 5.3. Interarmónicos 5.4. Muecas de voltaje 5.5. Ruido	0 – Cientos de Hz 0 – 6 kHz Banda ancha	E. Estable E. Estable E. Estable E. Estable E. Estable	0 – 0.1% 0 – 20% 0 – 2% 0 – 1%
6. Fluctuaciones de voltaje	< 25 Hz	Intermitente	0.1 – 7%
7. Variaciones en la frecuencia		< 10 s	

TABLA 1.3.1.1: Características de los fenómenos perturbadores– IEEE 1159⁷

⁷ Estándar IEEE 1159- (1995). “Práctica Recomendada para el Control de Calidad de Energía Eléctrica”

1.3.2 ESTÁNDAR IEC 1000-2-5 – (1995)

El estándar especifica tres categorías, donde cada fenómeno perturbador es clasificado en perturbaciones radiadas o conducidas dependiendo del medio en el cual ocurren:

- 1) Fenómenos de baja frecuencia.
- 2) Fenómenos de alta frecuencia.
- 3) Fenómenos de descargas electrostáticas.

Se consideran fenómenos de baja frecuencia a aquellos que presentan una frecuencia menor a 9kHz, caso contrario se denominan fenómenos de alta frecuencia.

Las perturbaciones de tipo conducidas y radiadas, son aquellas que están relacionadas con los fenómenos que existen en un suministro eléctrico y a los campos magnéticos y eléctricos respectivamente.

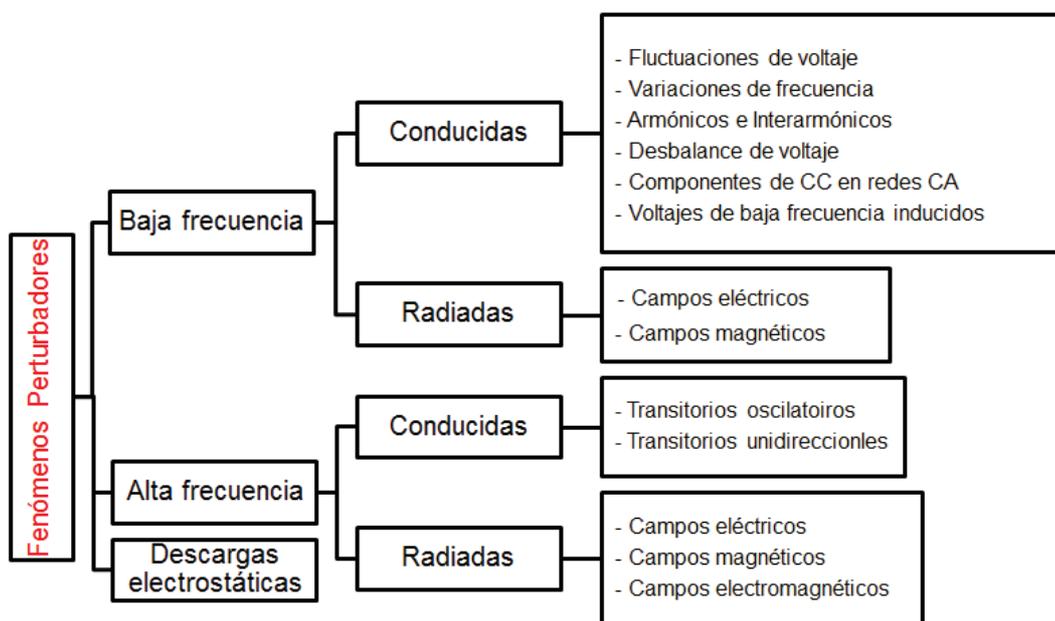


FIGURA 1.3.2.1: Clasificación de los fenómenos perturbadores IEC 1000-2-5

Perturbación	Categoría de normalización	Estándares IEEE	Estándares IEC
Huecos de tensión	Ambiente/compatibilidad	IEEE 1250	IEC 61000-2-4
	Emisión/Límites de inmunidad	IEEE P 1346	IEC 61000-3-3/5 (555)
	Pruebas y Medidas	Ninguna	IEC 61000-4-1/11
	Instalación/Mitigación	IEEE 446,1100, 1159	IEC 61000-5-X
	Apertura del fusible	IEEE 242(Protección)	IEC 364
Transitorios y sobretensiones	Ambiente/Compatibilidad	IEEE/ANSI C62.41	IEC 61000-2-5
	Emisión/Límites de inmunidad	Ninguna	IEC 61000-3-X
	Pruebas y Medidas	IEEE/ANSI C62.45	IEC 61000-4-1/2/4/5/12
	Instalación/Mitigación	C62 series, 1100	IEC 61000-5-X
	Ruptura de aislamiento	Ninguna	IEC 664

TABLA 1.3.2.1: Estándares IEC e IEEE para las Variaciones de voltaje de corta, larga duración y transitorios

1.4 FENÓMENOS PERTURBADORES EN REDES ELÉCTRICAS

1.4.1 TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS

Los transitorios electromagnéticos son fenómenos indeseados con un comportamiento momentáneo.

Pueden ser provocados por la conexión o desconexión de grandes cargas, descargas atmosféricas, o la operación de los sistemas de protección.

Se clasifican en transitorios y oscilatorios.

1.4.1.1 Transitorios Impulsivos

Es un cambio repentino de la condición en estado estable de la forma de onda de corriente o voltaje con una frecuencia diferente a la originada en el sistema eléctrico de potencia.

Además de ser unidireccional, esta onda se caracteriza por poseer un tiempo de subida y de bajada de $1.2/50 \mu\text{s}$.

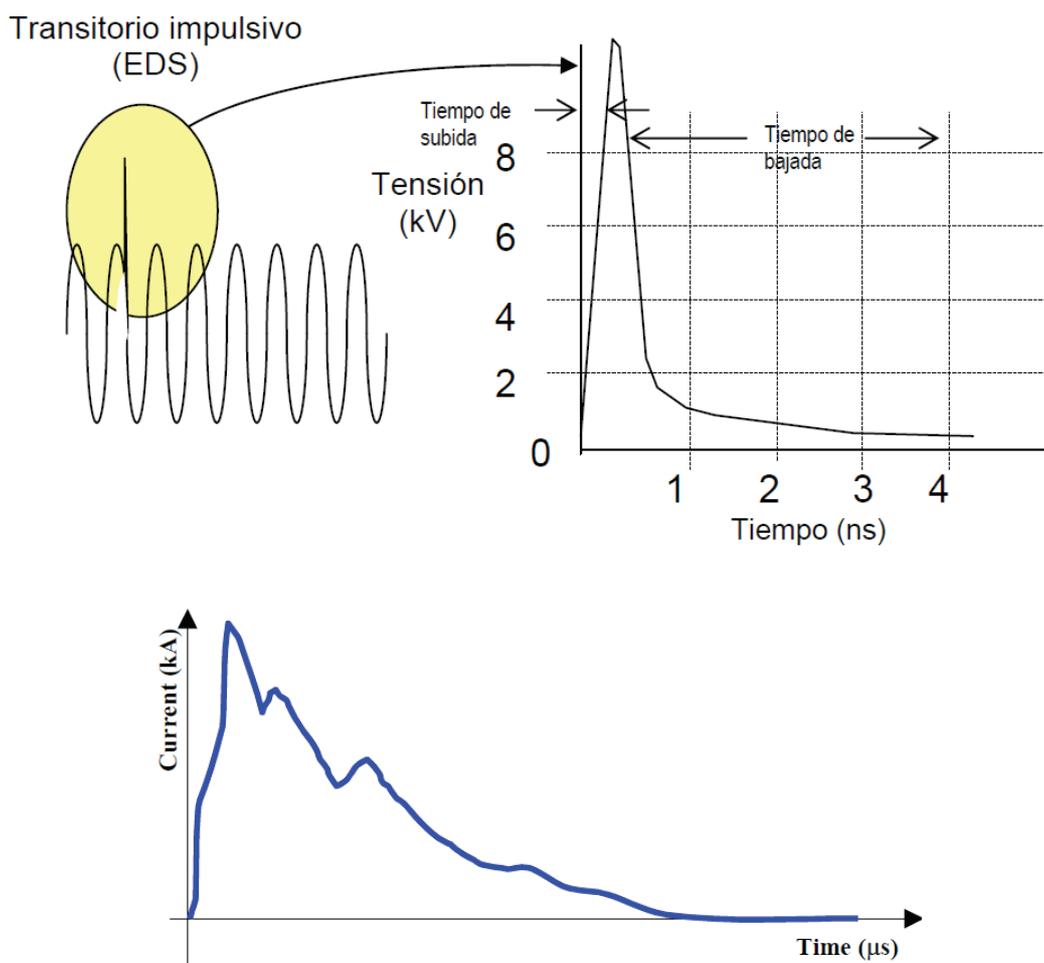


FIGURA 1.4.1.1.1: Transitorio Impulsivo

1.4.1.2 Transitorios Oscilatorios

“Son señales de corriente o voltaje cuyos valores instantáneos cambian de polaridad rápidamente.”⁸

Los transitorios oscilatorios se clasifican en baja, media y alta frecuencia, cada una de ellas se caracteriza por tener un espectro, duración y magnitud típica diferente:

- Transitorios oscilatorios de alta frecuencia:

Espectro típico: 0.5 – 5 MHz

⁸ Mora, J. “Perturbaciones en la onda de tensión: Huecos [sag] y Sobretensiones [swell]”. Consultado: http://eia.udg.es/~secse/curso_calidad/curso4-huecosdetension.pdf

Duración típica: 5 μ s

Magnitud típica del voltaje: 0 – 4 pu

- Transitorios oscilatorios de media frecuencia:

Espectro típico: 5 – 500 kHz

Duración típica: 20 μ s

Magnitud típica del voltaje: 0 – 8 pu

- Transitorios oscilatorios de baja frecuencia:

Espectro típico: Menores a 5 kHz

Duración típica: 0.3 – 50 ms

Magnitud típica del voltaje: 0 – 4 pu

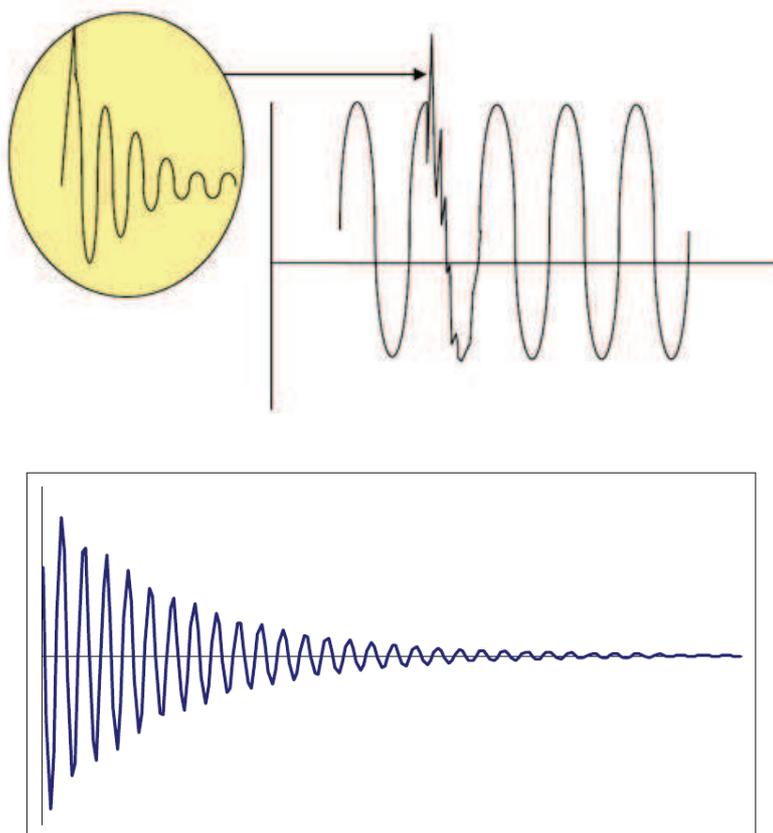


FIGURA 1.4.1.2.1: Transitorio Oscilatorio

1.4.2 VARIACIONES DE VOLTAJE DE CORTA DURACIÓN

1.4.2.1 Disminución de Voltaje

También llamada Sag para los Estados Unidos o Dip para la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), es una disminución del valor de la magnitud del voltaje entre el 10 y 90% con una duración de medio ciclo a 1 minuto.

Estas perturbaciones pueden ser provocadas por la conexión y desconexión de cargas, sobrecargas, cortocircuitos, teniendo como consecuencias el flicker o parpadeo en la iluminación, el reinicio de las computadoras, entre otras.

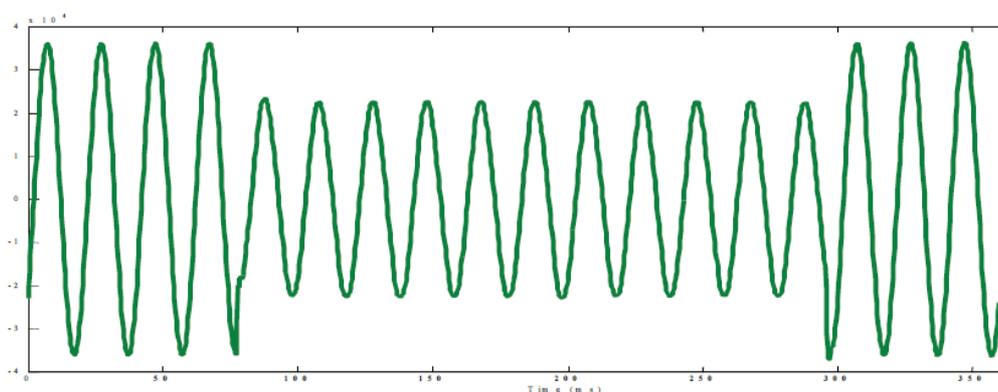


FIGURA 1.4.2.1.1: Sag, Dip o Disminución de Voltaje

1.4.2.2 Subida de Voltaje

También llamado Swell o cresta, es un aumento del valor de la magnitud de voltaje entre el 110 y 180% con una duración de $\frac{1}{2}$ ciclo a 1 minuto.

Los Swells pueden ser el resultado de la conexión de grandes bancos de condensadores, cortocircuitos (las fases no falladas aumentan de magnitud), desconexión de cargas, produciendo un mal funcionamiento de los equipos.

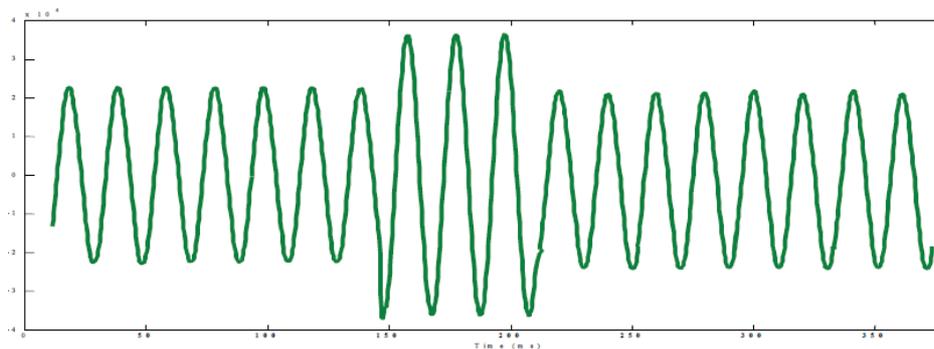


FIGURA 1.4.2.2.1: Subida de Voltaje o Swell

1.4.2.3 Interrupciones Breves

“Una interrupción ocurre cuando el voltaje o la corriente de la carga disminuyen a menos de 0,1 p.u. por un período de tiempo que no excede un minuto.

Las interrupciones pueden ser el resultado de fallas en el sistema, equipos averiados o debidas al mal funcionamiento de los sistemas de control. Las interrupciones se caracterizan por su duración ya que la magnitud del voltaje es siempre inferior al 10% de su valor nominal.”⁹

En cuanto se refiere a los efectos de las interrupciones, tenemos la detención de las maquinarias en una industria produciendo pérdidas para la empresa.

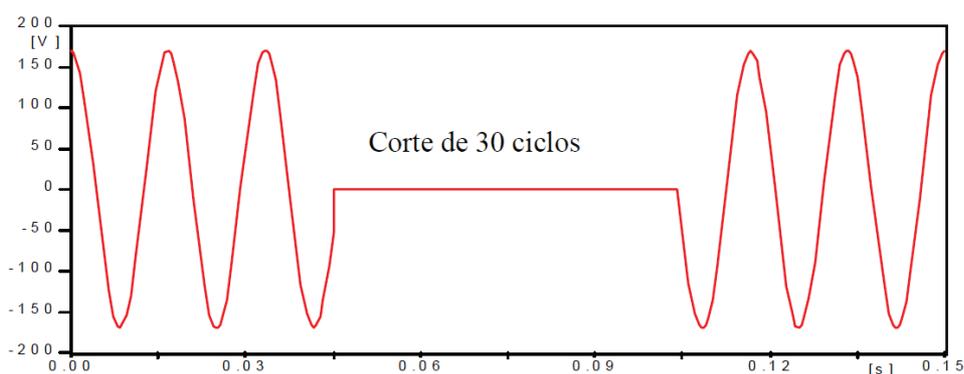


FIGURA 1.4.2.3.1: Interrupción breve

⁹ Universidad Autónoma de Occidente. “Calidad de la Energía Eléctrica”. Consultado: <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Docs/calidad.pdf>

En la Figura 1.4.2.3.2 se puede apreciar una señal de voltaje con todas las variaciones de corta duración:

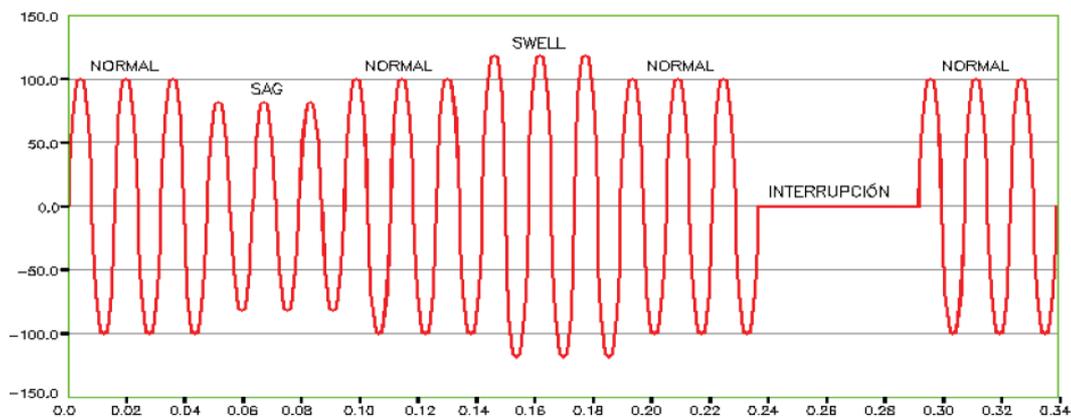


FIGURA 1.4.2.3.2: Perturbaciones de corta duración

1.4.3 VARIACIONES DE VOLTAJE DE LARGA DURACIÓN

Como su nombre lo indica, son aquellas ondas de voltaje cuyo valor eficaz cambia respecto al valor nominal con una duración mayor a 1 minuto.

Las variaciones de voltaje de larga duración se clasifican en:

1.4.3.1 Sobrevoltaje

Aumento del valor de la magnitud del voltaje entre el 110 y 120% con una duración mayor a 1 minuto.

Pueden ser provocados por las variaciones de compensación de potencia reactiva a causa de la conexión de grandes bancos de condensadores, desconexión de grandes cargas, incorrecta selección del TAP de los transformadores.

El efecto principal a causa de los sobrevoltajes es la disminución de la vida útil en transformadores, máquinas eléctricas, etc.

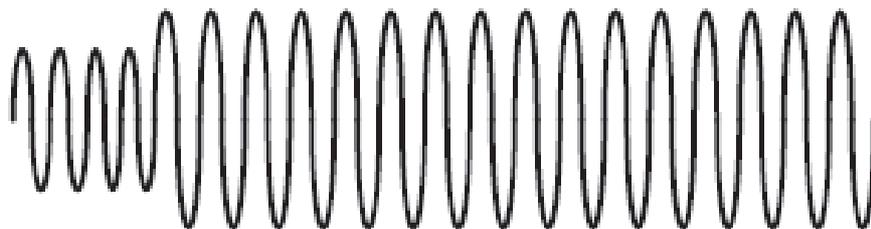


FIGURA 1.4.3.1.1: Sobrevoltaje de larga duración

1.4.3.2 Bajo Voltaje

Este fenómeno es un caso contrario al de sobrevoltaje, es decir, es una disminución del valor de la magnitud del voltaje entre el 80 y 90% con una duración mayor a 1 minuto.

El bajo voltaje puede ser el resultado de la desconexión de grandes bancos de capacitores, sobrecarga en los circuitos primarios de distribución, desconexión de cargas.

“En general puede traer efectos adversos para el funcionamiento de los equipos.

- Salida de operación de los controladores de motores, PCs, PLCs.
- Calentamiento y pérdidas en los devanados de los motores debido al aumento de las corrientes.
- Cambios de velocidad en máquinas de inducción.
- Mal funcionamiento de bancos de condensadores pues la salida de potencia reactiva es función de la tensión aplicada.
- Disminución de los niveles de iluminación en lámparas.”¹⁰

¹⁰ López, H. “**Perturbaciones de calidad de potencia**”. Consultado: www.chec.com.co/.../PERTURBACIONES%20CP-...

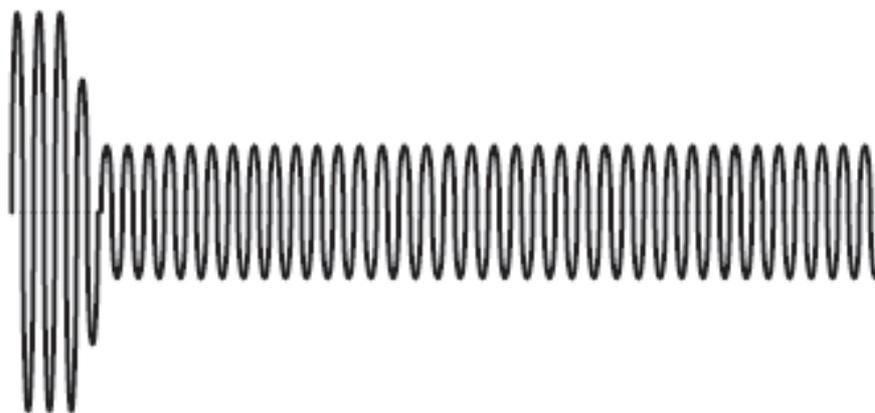


FIGURA 1.4.3.2.1: Bajo voltaje de larga duración

1.4.3.3 Interrupciones Sostenidas

Perturbación que produce la pérdida total de la onda de voltaje por un tiempo mayor a un minuto y necesita de una intervención de una persona u operador para restablecer el servicio eléctrico. En la Figura 1.4.3.3.1 se puede apreciar desde que se produce la interrupción sostenida hasta que se restituye el servicio.

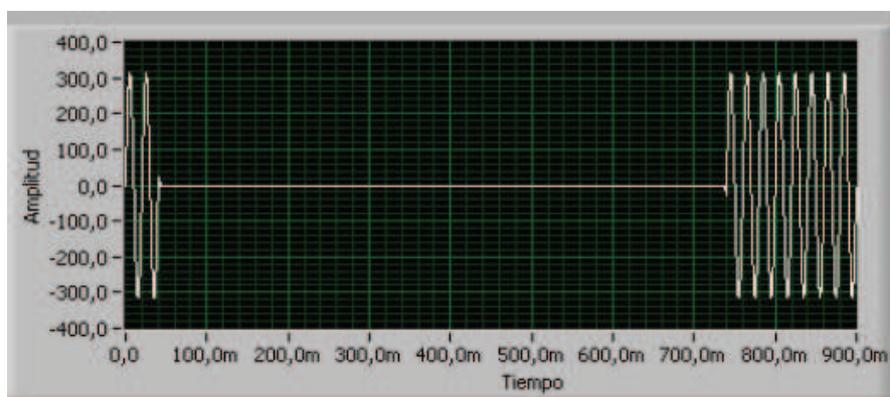


FIGURA 1.4.3.3.1: Interrupción sostenida

1.4.4 DESBALANCE DE VOLTAJE

Se considera desbalance de voltaje cuando la amplitud de las tres fases no son las mismas, o las ondas no están desplazadas 120 grados eléctricos entre sí.

Para caracterizarlo, se utiliza dos métodos:

1. Método de las componentes simétricas establece la relación entre la componente de secuencia negativa o secuencia cero y la componente de secuencia positiva.

$$\% \Delta V = \frac{V^{(-)}}{V^{(+)}} \quad [1-1]$$

Donde:

ΔV : Máximo desbalance de las tres fases, expresada en porcentaje.

$V^{(-)}$: Componente de secuencia negativa de la onda de voltaje.

$V^{(+)}$: Componente de secuencia positiva de la onda de voltaje.

2. Método aproximado define una relación entre la máxima desviación de cualquiera de las tres fases de voltaje de fase respecto del valor promedio de voltaje de fase y el valor promedio de voltaje de fase.

Se considerará un desbalance de voltaje normal si se encuentra dentro del rango de 0.5 – 2%, sin embargo para el Ecuador se estableció un valor menor o igual a 1.5%.

Las principales fuentes de generación son:

- Cargas monofásicas debido a la incorrecta distribución entre las tres fases.
- Fusible quemado en una fase.
- Componente continua de rectificadores de media onda.

Así mismo los efectos de un desbalance de voltaje podemos destacar los siguientes:

- Elevación de temperatura en máquinas de inducción a causa de las elevadas corrientes desequilibradas.
- Mayores pérdidas en la red eléctrica.

- Accionamiento de los elementos de protección como por ejemplo los fusibles.

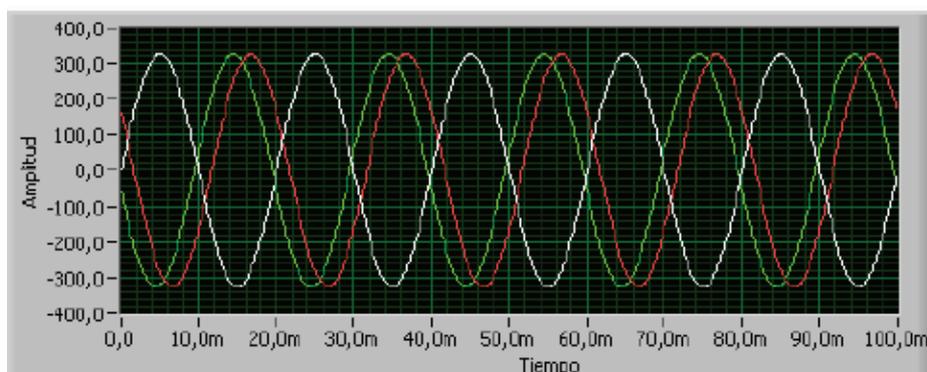


FIGURA 1.4.4.1: Desbalance de voltaje

1.4.5 DISTORSIÓN DE LA FORMA DE ONDA

La distorsión de la forma de onda, es la deformación de la onda sinusoidal pura de la onda de voltaje o corriente en régimen permanente, proveniente de un sistema eléctrico de potencia.

Según el estándar IEEE 1159 – (1995) se divide en:

- DC offset
- Muecas de Voltaje (Notches)
- Ruido
- Armónicos
- Interarmónicos

1.4.5.1 DC offset

“La presencia de un voltaje o corriente directa (DC) en un sistema de corriente alterna (AC) de potencia se denomina corrimiento DC (DC offset).

Esto puede ocurrir debido al efecto de la rectificación de media onda, extensores de vida o controladores de luces incandescentes. Este tipo de controlador, por

ejemplo, puede consistir en diodos que reducen el valor R.M.S. del voltaje de alimentación por rectificación de media onda.”¹¹

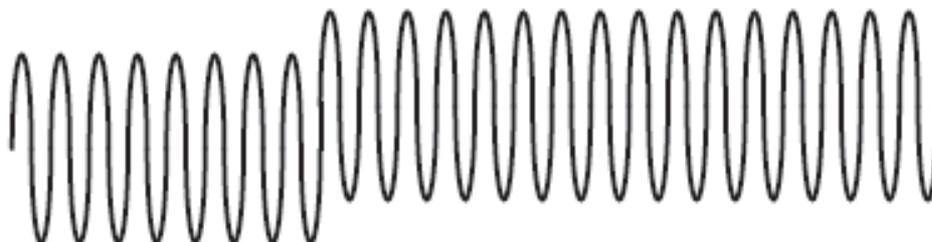


FIGURA 1.4.5.1.1: Corrimiento DC

1.4.5.2 Muecas de Voltaje (Notches)

Son perturbaciones periódicas en forma de hendiduras en una señal de voltaje que ocurren en cada ciclo, con polaridad opuesta a la forma de onda de voltaje, con una duración menor a medio ciclo.

Las muescas de voltaje son provocadas por un cortocircuito momentáneo entre fases durante el proceso de conmutación de la corriente en los convertidores trifásicos que utilizan dispositivos de electrónica de potencia.

“La mayor parte de las muescas son filtradas por transformadores y no se propagan en líneas de medio voltaje. Gran parte de los problemas causados por los huecos están confinados en la propia instalación de los usuarios.”¹²

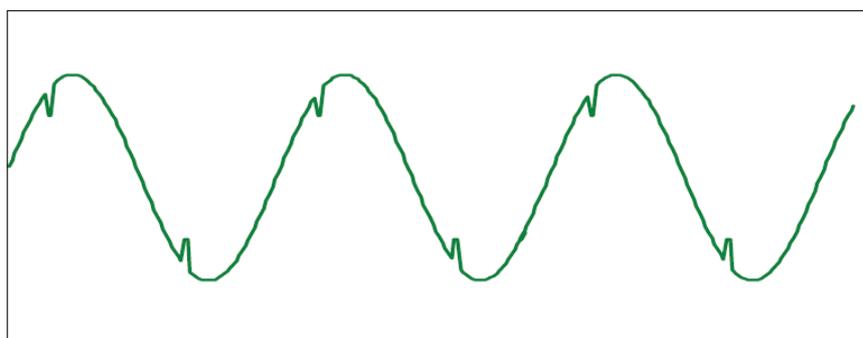


FIGURA 1.4.5.2.1: Muesca de Voltaje o Notches

¹¹ Universidad Autónoma de Occidente. “Calidad de la Energía Eléctrica”. Consultado: <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Docs/calidad.pdf>

¹² Salazar, G. Perturbaciones en Redes Eléctricas. “Calidad de Suministro Eléctrico”

1.4.5.3 Ruido

Son perturbaciones de una señal eléctrica que tiene lugar en los conductores de fase, con un ancho de banda menor a 200 kHz y una magnitud de decenas de voltios o menos.

El ruido se presenta principalmente por equipos de arco como por ejemplo las máquinas de soldar, rectificadores de estado sólido y fuentes conmutadas, circuitos de control, equipos que usan electrónica de potencia, banco de capacitores, etc.

Entre los principales efectos que produce la perturbación es el incorrecto funcionamiento de diferentes equipos electrónicos como los microprocesadores, controladores programables, computadoras, etc.

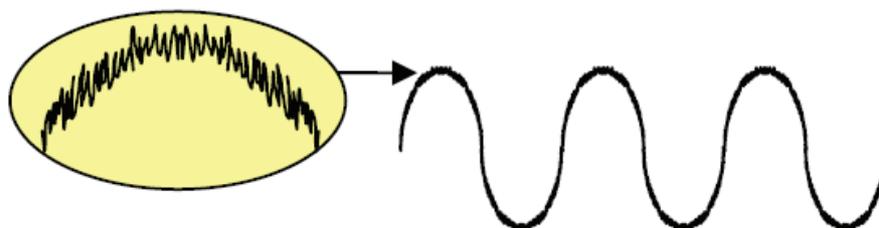


FIGURA 1.4.5.3.1: Ruido presente en una señal

1.4.5.4 Armónicos

Los armónicos son señales de voltaje o corriente, cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental (50 ó 60Hz).

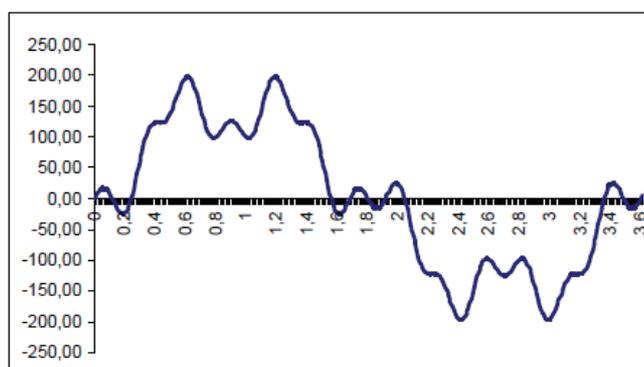


FIGURA 1.4.5.4.1: Señal de voltaje con distorsión armónica

Debido al grado de complejidad que existe al realizar los cálculos, se utiliza las series de Fourier descubiertas por el matemático francés Jean Baptiste Fourier que determinó que cualquier forma de onda periódica no sinusoidal puede ser representada como la suma infinita de ondas sinusoidales de frecuencias múltiplos enteros de la fundamental.

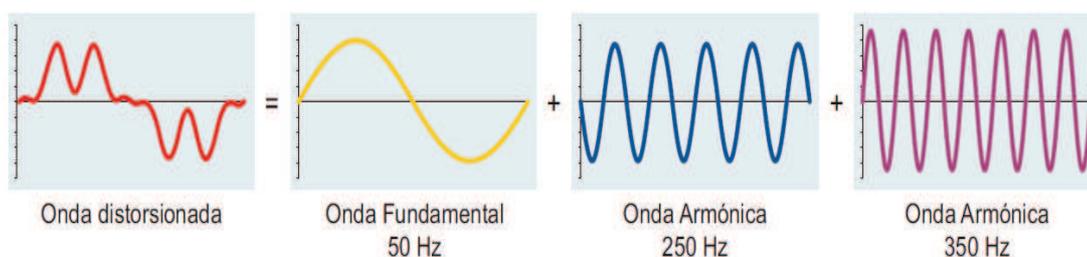


FIGURA 1.4.5.4.2: Representación gráfica de la Serie de Fourier

Generalmente se expresa como un porcentaje respecto del voltaje o corriente fundamental.

Los armónicos pares generalmente no existen, porque si la forma de onda es igual en el semiciclo positivo y negativo los armónicos pares se anulan entre sí.

“Cuando se hacen mediciones de las ondas de corriente o voltaje utilizando analizadores de armónicas, el equipo efectúa integraciones mediante la técnica de la transformada rápida de Fourier, dando como resultado la serie de coeficientes A_n que expresadas con relación a la amplitud A_1 de la fundamental, constituye el espectro de corrientes armónicas relativo a la onda medida.”¹³

1.4.5.4.1 Caracterización

- **Valor eficaz (rms)**

“Cuando se suman señales de voltaje o corriente de diferentes frecuencias para obtener su resultante.”¹⁴

¹³ Téllez, E. “Distorsión Armónica”. Consultado: <http://www.waterymex.org/contenidos/rtecnicos/Optimizando%20la%20Operacion%20y%20el%20Mantenimiento/Distorsion%20Armonica.pdf>

¹⁴ Téllez, E. “Distorsión Armónica”. Consultado:

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} V_i^2} \quad [1-2]$$

- **Factor pico o de cresta**

Relación entre el valor pico y el valor eficaz.

$$CF = \frac{V_{pico}}{V_{rms}} \quad [1-3]$$

- **Cofactor de distorsión**

Es la relación entre el contenido armónico y su valor eficaz.

$$Cd = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} V_i^2}}{V_{rms}} \quad [1-4]$$

- **Distorsión armónica total**

Medida porcentual del contenido armónico respecto del valor fundamental.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} V_i^2}}{V_1} \times 100 \quad [1-5]$$

- **Distorsión de demanda total**

Es la relación entre la corriente armónica y la corriente de demanda máxima.

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100 \quad [1-6]$$

Donde:

I_L : Demanda máxima de la corriente fundamental de carga, se determina mediante un valor promedio o valor máximo de la demanda en los últimos 12 meses.

h : Orden del armónico

I_h : Magnitud de los componentes armónicos individuales

Cabe señalar, que el valor eficaz, factor pico, cofactor de distorsión y la distorsión armónica total puede calcularse también para la corriente.

1.4.5.4.2 *Condiciones de medida*

Las condiciones de medida establecidas para este tipo de perturbación, se detallan a continuación con las dos normas más reconocidas a nivel mundial:

1.4.5.4.2.1 IEEE 519- (1992)

El estándar define los requerimientos más importantes que deben poseer los equipos de medición para obtener una mayor precisión a la hora de medir armónicos.

- **Exactitud:** El equipo debe presentar un resultado que se encuentre dentro de los límites permisibles en cuanto a la medida del componente armónico, se recomienda el uso de equipos con una incertidumbre no mayor al 5% del límite permisible.
- **Selectividad¹⁵:** La selectividad del instrumento, indica su capacidad para separar componentes armónicos de frecuencias diferentes. Una forma práctica asegurar buena selectividad es definir una atenuación mínima de una frecuencia inyectada, mientras que el instrumento se encuentra (ajustado) en una frecuencia $f = 60$ Hz.

El Anexo 1.1, indica la mínima atenuación requerida por los equipos de medición.

¹⁵ Estándar IEEE 519 – (1992), “Recomendaciones Prácticas y Requerimientos para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia ”

- **Promedio:** Suavizar los armónicos fluctuantes, en caso de que varias medidas cambien con respecto al tiempo. Dos factores se convierten importantes en este caso:

- **Respuesta dinámica:**

Si el promedio durante un período de 3 segundos es deseable, entonces la respuesta del equipo de medida debe ser idéntica a un filtro pasa bajo de primer orden con una constante de tiempo de 1.5 ± 0.15 s.

- **Ancho de banda:**

Este parámetro es importante ya que afecta a la lectura final del instrumento, especialmente en armónicos fluctuantes. Se recomienda un ancho de banda constante para un rango completo de frecuencias.

1.4.5.4.2.2 IEC 61000- 4-7¹⁶

“La ventana temporal no se encuentra asignada por un determinado tiempo, sino identificada con 10 y 12 ciclos de la componente fundamental, para 50 Hz y 60 Hz nominales respectivamente.”¹⁷

Además, en el estándar IEC 61000-4-30 define la precisión de medida en dos clases: Clase A y Clase B; la primera clase se usa donde las medidas exactas son necesarias como por ejemplo verificar el cumplimiento de las normas, y la segunda clase se aplica para estudios estadísticos, solución de problemas de aplicaciones.

Como es necesario resultados precisos, la norma IEC 61000-4-7 utiliza las condiciones de medida con los equipos de clase A. En el Anexo 1.2, se indica las técnicas de prueba y medición para los equipos de clase A.

Según el tipo de armónico se detalla el ancho de banda o ventana de observación y el tiempo de medición para cada uno de ellos:

¹⁶ IEC 61000-4-30. “Técnicas de Prueba y Medición”

¹⁷ IEC 61000-4-7. “Técnicas de Control y Evaluación”

- **Armónicos que varían lentamente**

También llamados como armónicos casi- estacionarios. Para su medición no es necesario realizarlos de manera continua, por lo que se permite establecer intervalos de 10 minutos entre las sucesivas medidas. Generalmente estos armónicos son producidos por los rectificadores no controlados.

- **Armónicos fluctuantes**

Es necesario realizar medidas prácticamente de forma continua en tiempo real, este tipo de perturbación son provocados por reguladores de velocidad, electrodomésticos con control de fase y regulación electrónica.

- **Armónicos que varían rápidamente**

Conocidas como armónicos de ráfagas muy cortas, donde si es necesario una continua medición en tiempo real, originados por los receptores de telemando en la red.

“La norma sugiere un número de muestras $M = 2^i$, siendo i típicamente 7 u 8, distribuidas sobre un tiempo T_w múltiplo entero N del período fundamental T_1 del voltaje de red, $T_w = N \cdot T_1$. Siendo, por lo tanto, la frecuencia de muestreo:

$$f_s = \frac{2^i}{N \cdot T_1}$$

Previamente a obtener las componentes armónicas mediante la transformada rápida de Fourier, las N muestras de la ventana temporal T_w se deben ponderar mediante una función ventana.

La norma aconseja la utilización de la ventana rectangular que pondere todas las muestras de la misma forma, aunque también se puede utilizar la ventana de Hanning (corresponde a la función sen^2x). Para utilizar la ventana rectangular se precisa una perfecta sincronización de su duración con el período básico de la

señal, lo cual es especialmente importante para obtener la fase de las componentes armónicas.¹⁸

Tipo de armónico	Anchura de banda recomendada	Ancho de banda	Requisitos adicionales
Casi-estacionarios	$T_w = 0.1 - 0.3 s$	Rectangular	Puede haber intervalos entre ventanas
	$T_w = 0.15 - 0.05 s$	Hanning	
Fluctuantes	$T_w = 0.32 s$	Rectangular	Sin intervalo
	$T_w = 0.4 - 0.5 s$	Hanning	Solapamiento mitad a mitad
Rápidamente variables	$T_w = 0.08 - 0.16 s$	Rectangular	Sin intervalo

TABLA 1.4.5.4.2.2.1: Requerimientos de precisión para la medida de los diferentes tipos de armónicos¹⁹

El procedimiento para realizar el cálculo de los armónicos, la norma establece tres modos distintos de operación:

- 1) **Modo de disparo:** Los resultados se almacenan internamente en una memoria, y la transformada rápida de Fourier se calcula mediante muestras que se obtienen a través de una señal de disparo externa o trigger.
- 2) **Operación continua:** Consta de un intervalo de repetición entre 1 minuto y la operación en tiempo real con un almacenamiento interno de 5000 ventanas.

¹⁸ "Condiciones de Medida". Consultado: www.donsion.org/calidad/cc9/C9-5.pdf

¹⁹ IEC 61000-4-7. "Técnicas de Control y Evaluación"

- 3) Operación continua y almacenamiento de resultados que excedan cierto umbral:** Solo los resultados que sobrepasen cierto límite preseleccionado son almacenados.

Además los circuitos de voltaje o corriente utilizados en los equipos para la medida de los armónicos deben cumplir ciertos criterios como:

Para el circuito de voltaje:

- Consumo de energía menor a 3 VA.
- Precisión de hasta 1.2 veces el valor nominal con indicación de sobrecarga.
- Voltaje nominales de 115, 230 y 400 V.
- Soportar un voltaje de 4 veces el voltaje nominal.

Para el circuito de corriente:

- Consumo de energía menor a 3 VA.
- Soportar una corriente de 1.2 veces la corriente nominal.
- Corrientes nominales de 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10 y 16 A.
- Medida indirecta de corriente a través de transductores que proporcionen valores de voltaje entre 0.1 y 1 V.

1.4.5.4.3 Límites permitidos

1.4.5.4.3.1 IEEE 519- (1992)²⁰

Los límites máximos de distorsión armónica de corriente se clasifican según el nivel de voltaje, y la relación que existe entre las variables de corriente de cortocircuito disponible en el punto de acoplamiento común y la máxima corriente fundamental demandada.

Las relaciones de corriente que establece la norma:

- Menor a 20.

²⁰ Estándar IEEE 519 – (1992), “Recomendaciones Prácticas y Requerimientos para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia ”

- 20-50.
- 50-100.
- 100-1000.
- Mayor a 1000

Y los niveles de voltaje son:

- 120-69000 V (Sistemas de distribución)
- 69001- 161000 V (Sistemas de Subtransmisión)
- Mayor a 161000 V (Sistemas de Transmisión).

En cuanto a los límites establecidos para la distorsión armónica de voltaje, se definen los mismos niveles de voltaje para la distorsión armónica de corriente.

Para mayor información acerca de los límites de la distorsión armónica tanto para una señal de corriente o voltaje establecidos en la norma, revisar el Anexo 1.3.

1.4.5.4.3.2 IEC 61000-3-2²¹

A diferencia del estándar norteamericano, la Comisión Electrotécnica Internacional, define los límites de distorsión armónica de corriente y voltaje según el orden del armónico independientemente del nivel del voltaje.

- **Distorsión armónica de corriente**

Orden de armónicos impares (n)	Tasa máxima de armónicos de corriente (%)
3	2.30
5	1.14
7	0.77
9	0.40
11	0.33
13	0.21
15-39	0.15 (15/n)

²¹ IEC 61000-3-2. "Límites para las Emisiones de Corriente Armónica"

Orden de armónicos pares (n)	Tasa máxima de armónicos de corriente (%)
2	1.08
4	0.43
6	0.30
$8 \leq n \leq 40$	0.23 (8/n)

TABLA 1.4.5.4.3.2.1: Límites máximos de distorsión armónica de corriente

- **Distorsión armónica de voltaje**

Orden de armónicos impares (n)	Tasa máxima de armónicos de voltaje (%)
3	0.85
5	0.65
7	0.60
9	0.40
11	0.40
13	0.30
15-39	0.25

Orden de armónicos pares (n)	Tasa máxima de armónicos de voltaje (%)
2	0.30
4-40	0.20

TABLA 1.4.5.4.3.2.2: Límites máximos de distorsión armónica de voltaje

1.4.5.4.4 Fuentes de generación

Las principales fuentes de generación de esta perturbación son:

- **Máquinas Eléctricas**

Cuando operan fuera del rango normal de operación y durante disturbios transitorios.

- **Transformadores**

Generados por la corriente de magnetización al momento de energizarlo.

- **Lámparas Fluorescentes (Balasto convencional electromagnético)**

Producen armónicos impares de gran magnitud, por el comportamiento no lineal del arco y la inductancia que se conecta en serie para limitar la corriente, en la Figura 1.4.5.4.4.1 se puede observar la corriente típica de entrada con su espectro armónico.

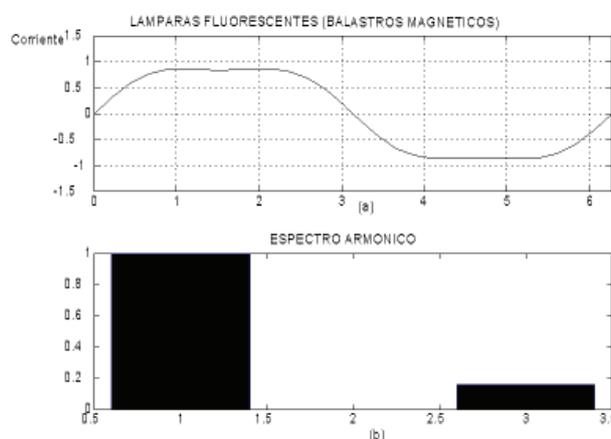


FIGURA 1.4.5.4.4.1: Forma de onda de la corriente y espectro típico de las lámparas fluorescentes

- **Hornos de arco**

Introducen armónicos a la red eléctrica, debido a la combinación de las características no lineales de la curva voltaje del arco versus corriente y el retraso que existe al momento de encenderse el arco en el instante de la fundición.

Proceso	Porcentaje de la corriente fundamental				
	2	3	4	5	7
Al inicio de la fundición (arco activo)	7.7	5.8	2.5	4.2	3.1
Refinamiento (arco estable)	0.0	2.0	0.0	2.1	0.0

TABLA 1.4.5.4.4.1: Características del horno de arco eléctrico²²

²² Fuentes Principales de Armónicos. "Hornos de Arco". Consultado:

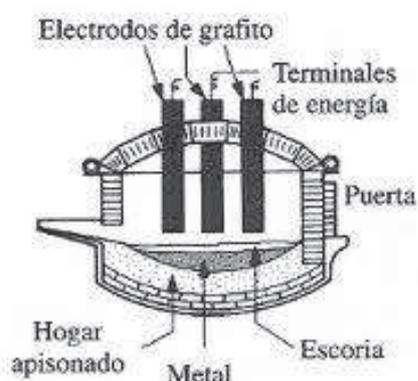


FIGURA 1.4.5.4.4.2: Horno de arco eléctrico

En la actualidad con el uso de la electrónica de potencia, los equipos que crean problemas a la red eléctrica son los rectificadores con control del ángulo de fase y los inversores.

- **Grandes convertidores de potencia**

“Las fuentes más grandes de armónicas son los convertidores como los utilizados en la industria metálica y transmisión en HVDC. Su potencia nominal se especifica en MW y generalmente tiene mucha más inductancia en el lado de C.D. que en el lado de C.A., por lo que la corriente directa es prácticamente constante y el convertidor actúa como una fuente de voltaje armónico en el lado de C.D. y como una fuente de corriente armónica en el lado de C.A.; Más aún, con un sistema perfectamente simétrico, las corrientes resultantes son iguales en todas las fases.”²³

<http://www.ingeborda.com.ar/biblioteca/Biblioteca%20Internet/Articulos%20Tecnicos%20de%20Consulta/Calidad%20de%20Energia%20y%20Armonicos/Armonicas/Causas%20de%20Armonicas.pdf>

²³ Fuentes Principales de Armónicos. “**Grandes Convertidores de Potencia**”. Consultado:

<http://www.ingeborda.com.ar/biblioteca/Biblioteca%20Internet/Articulos%20Tecnicos%20de%20Consulta/Calidad%20de%20Energia%20y%20Armonicos/Armonicas/Causas%20de%20Armonicas.pdf>

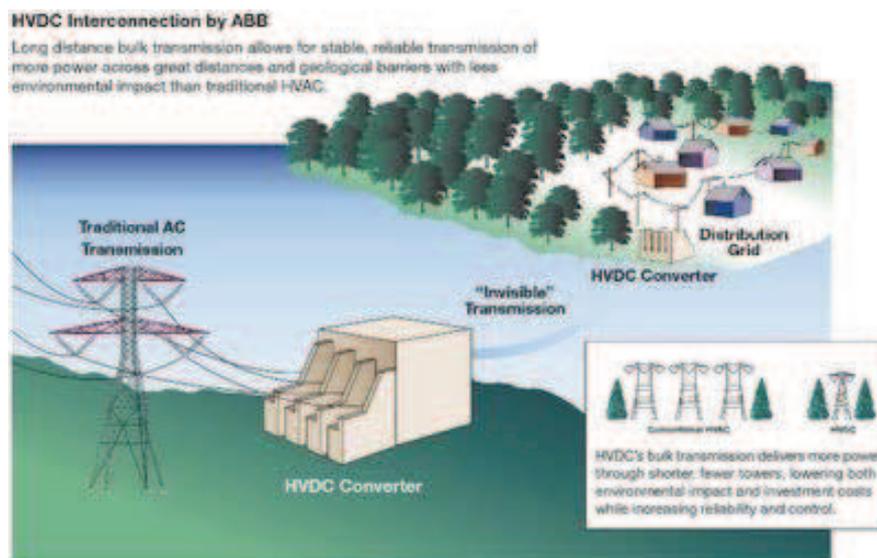


FIGURA 1.4.5.4.4.3: Convertidor de potencia HVDC

- **Compensador estático de potencia reactiva**

Utilizados para maximizar la capacidad de transmisión de potencia y controlar la magnitud del voltaje en una barra de un sistema eléctrico de potencia.

Antiguamente se ocupaban los capacitores e inductores mecánicamente saturados para realizar dicha función, con la evolución de la tecnología actualmente se utiliza los capacitores conmutados por tiristor. Dichos elementos generan armónicos dependiendo del ángulo de disparo.

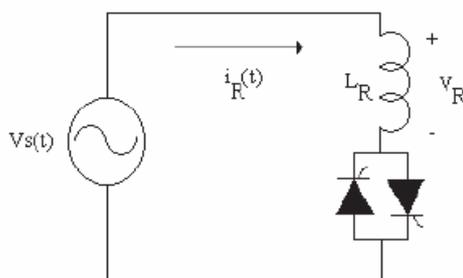


FIGURA 1.4.5.4.4.4: Capacitor conmutado por tiristor monofásico

➤ **Fuentes conmutadas (Computadoras, copiadoras, etc)**

“La mayoría de los equipos electrónicos tales como computadores personales, máquinas copiadoras y fax, cuentan con una fuente regulada por conmutación (switch-mode power supply). Estas fuentes demandan corriente en un pulso corto de cada medio ciclo.

Cuando el voltaje se encuentra cerca de su valor máximo. La corriente demandada por estas fuentes tienen una alta distorsión armónica total y un alto contenido de tercera armónica. La Figura 1.4.5.4.4.5 muestra las formas de onda de corriente de una fuente en modo de conmutación empleada en computadoras, así como su espectro típico.

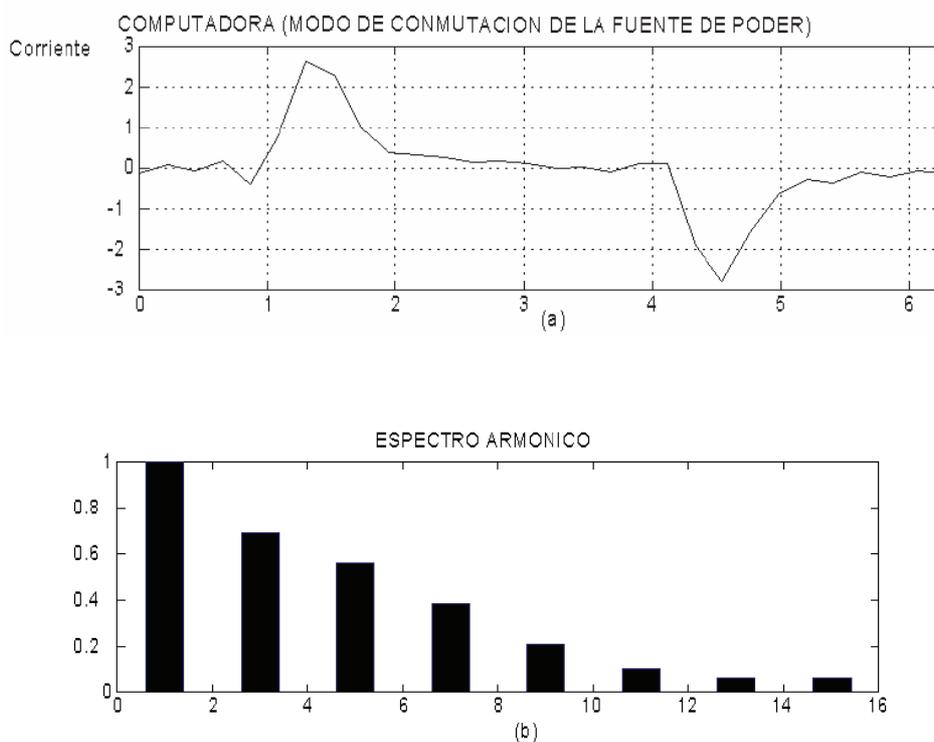


FIGURA 1.4.5.4.4.5: Comportamiento de la corriente de una computadora, espectro armónico

➤ Televisores

Generalmente se alimentan por un rectificador y una alta capacitancia suavizante. Algunos receptores de generaciones anteriores utilizan rectificación de media onda y por lo tanto producen niveles considerables de corriente directa y armónicas de orden par.

Los receptores modernos utilizan rectificación de media onda y más recientemente se ha añadido el tiristor, el cual dispara en los picos de voltaje, a manera de proteger los circuitos electrónicos. Sin embargo, esto resulta en altas corrientes pico, con un mayor contenido armónico.

Los receptores a color demanda una corriente pico de dos a tres veces mayor que la de un receptor monocromático. La tendencia en los receptores a color es hacia reguladores a base de transistores e inversores con protección para sobretensiones y sobrecorrientes, y mejora en la eficiencia en los circuitos. Sin embargo, la tendencia hacia cada vez mayor número de TV's en el hogar compensa la reducción de corriente que demanda cada unidad. Por otro lado no es probable que se reduzca la componente de 3^a. armónica, excepto a un gran costo para el consumidor.”²⁴

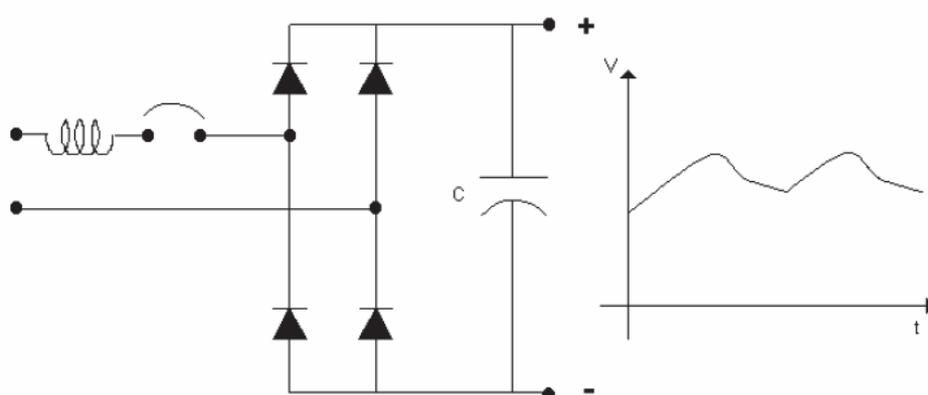


FIGURA 1.4.5.4.4.6: Voltaje en la carga de los terminales de salida de un rectificador de onda completa

²⁴ Fuentes Principales de Armónicos. “Grandes Convertidores de Potencia”. Consultado: <http://www.ingeborda.com.ar/biblioteca/Biblioteca%20Internet/Articulos%20Tecnicos%20de%20Consulta/Calidad%20de%20Energia%20y%20Armonicos/Armonicas/Causas%20de%20Armonicas.pdf>

1.4.5.4.5 Efectos

Se estudiarán los efectos de los armónicos en los diferentes equipos y en un sistema eléctrico de potencia.

Para un sistema eléctrico de potencia son:

- Mal funcionamiento de los diferentes equipos conectados como por ejemplo los relés de protección.
- Disminución del aislamiento de los equipos o componentes de la red.
- Bajo rendimiento de los generadores, líneas de transmisión y por ende los sistemas de distribución.

Y para los equipos:

- **Transformadores:**
 - Bajo rendimiento
 - Saturación
 - Aumento de pérdidas en el hierro
 - Sobrecalentamiento en los devanados por efecto joule
- **Conductores:**
 - Aumento de temperatura
 - Disparo inoportuno de las protecciones
 - Incremento en la magnitud de la corriente (armónicos múltiplos de tres) en el conductor del neutro.
- **Motores:**
 - Disminución del torque
 - Bajo rendimiento
 - Aumento de temperatura en los devanados
 - Vibraciones en el eje
 - Desgaste en los rodamientos
- **Capacitores:**
 - Posibilidad de la amplificación de los armónicos
 - Aumento de temperatura
 - Envejecimiento prematuro

- Destrucción de los mismos como caso crítico

1.4.5.5 Interarmónicos

Los interarmónicos son señales de voltaje o corriente, cuya frecuencia es un múltiplo no entero de la frecuencia fundamental (50 ó 60Hz).

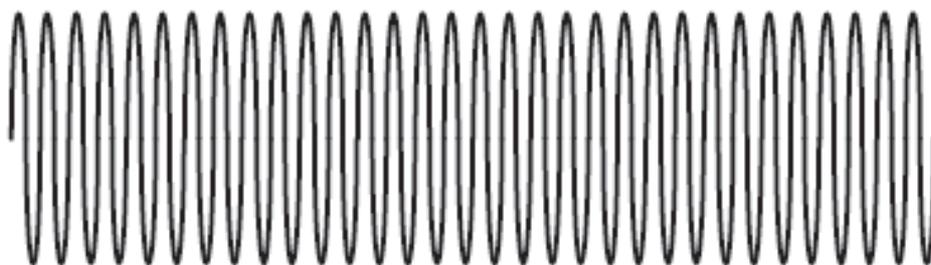


FIGURA 1.4.5.5.1: Señal de voltaje con frecuencia no múltiplo entero de la fundamental

Este fenómeno ha adquirido mayor importancia en los últimos años debido a la amplia utilización de los dispositivos electrónicos causantes de este problema.

El estándar IEC 61000-2-1, define que los interarmónicos pueden manifestarse como frecuencias discretas o como un espectro de banda ancha. Para frecuencias discretas se utiliza el diagrama de barras, en cambio para un espectro de banda ancha se representa como se observa en la Figura 1.4.5.5.1

En condiciones de resonancia los interarmónicos presentan valores de magnitud mucho más alto.

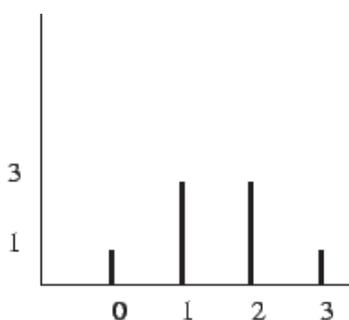


FIGURA 1.4.5.5.2: Frecuencias discretas (forma de bastones)

1.4.5.5.1 Índices

Los interarmónicos pueden ser caracterizados mediante los siguientes factores:

- **Interarmónico relativo:**

Magnitud del interarmónico con respecto a la componente fundamental (voltaje o corriente).

$$\frac{Q_i}{Q_1} \quad [1-7]$$

- **Contenido de distorsión total:**

$$TDC = \sqrt{Q^2 - Q_1^2} \quad [1-8]$$

- **Relación de distorsión total:**

$$TDR = \frac{TDC}{Q_1} = \frac{\sqrt{Q^2 - Q_1^2}}{Q_1} \quad [1-9]$$

- **Factor de distorsión interarmónica total:**

$$TIHD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n Q_i^2}}{Q_1} \quad [1-10]$$

Donde:

Q : Valor total rms que representa la corriente o voltaje.

Q_1 : Valor rms de la componente fundamental de voltaje o corriente.

Q_i : Valor rms del interarmónico.

i : Número variable del interarmónico.

n : Número total de interarmónicos considerados.

1.4.5.5.2 Condiciones de medida

1.4.5.5.2.1 IEEE

El parámetro fundamental para la medida de armónicos e interarmónicos con el estándar IEC 61000-4-7 es la utilización de 10 (50 Hz) o 12 ciclos (60 Hz) para la ventana de observación, sobre la que se realizaría la transformada de Fourier dando como resultado un espectro de 5 Hz para los sistemas de 50 o 60 Hz. El estándar define distintas formas de agrupar los espectros de 5 Hz para determinar la medida de las perturbaciones.

1.4.5.5.2.2 IEC 61000-4-7

Se puede aplicar los mismos requisitos que se utiliza para la medida de armónicos casi estacionarios, siempre que se disponga de una resolución espectral de 5 Hz.

Sin embargo el estándar no proporciona la información necesaria para identificar la distorsión interarmónica en los niveles de 0.2% de las frecuencias cercanas a la fundamental, debido al uso del contenido espectral de 5 Hz.

1.4.5.5.3 Límites permitidos

1.4.5.5.3.1 IEEE²⁵

El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, no incluye directivas especiales sobre dicha perturbación, pero durante los últimos años se han realizado estudios y como resultado se ha escrito un artículo que hace recomendaciones para la inclusión en la próxima revisión del estándar IEEE 519.

Puesto que las corrientes interarmónicas producen el mismo efecto que las armónicas como por ejemplo el calentamiento, interferencias, etc., se recomienda que las corrientes interarmónicas estén limitadas de la misma manera que las armónicas como se detalla en la IEEE 519 – (1992).

El estándar establece tres sistemas para la distorsión armónica total de voltaje:

²⁵ Estándar IEEE 519 – (1992), “Recomendaciones Prácticas y Requerimientos para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia ”

1. Sistemas especiales (hospitales y aeropuertos) con un límite del 3%.
2. Sistemas generales con un límite del 5%.
3. Sistemas específicos con un límite del 10%.

En el Anexo 1.4, se puede encontrar la Tabla que detalla la distorsión interarmónica total.

Sin embargo los límites de distorsión interarmónica deben ser menor del 1, 2 o 3% dependiendo del nivel de voltaje, por encima de los 90 Hz hasta los 3 kHz.

1.4.5.5.3.2 IEC 61000-3-6

Establece que el nivel de los voltajes interarmónicos está limitado a 0.2% para el rango de frecuencias entre la componente continua (DC) y 2 kHz, con lo que se evita problemas con el efecto flicker, equipos de comunicación, etc.

1.4.5.5.4 Fuentes de generación

Existen principalmente dos mecanismos de generación de esta perturbación que son:

- “Conmutación asincrónica de los dispositivos semiconductores de los convertidores estáticos. Ejemplos típicos de ello son los ciclo-convertidores y los convertidores de modulación de anchura de impulso (PWM).
- Generación de componentes en las bandas laterales de la frecuencia del voltaje de suministro y de sus armónicos debido a cambios en sus magnitudes y/o ángulos de fase. Estas variaciones están provocadas por cambios bruscos de corriente en el equipo y en las instalaciones, que también pueden originar fluctuaciones de voltaje. Las perturbaciones generan las cargas que operan en un régimen transitorio, de manera continua o temporalmente, o, más frecuentemente, cuando se produce una modulación de amplitud de corriente o voltaje. Estas perturbaciones

generalmente son de carácter aleatorio, y dependen de las variaciones de carga inherentes a los procesos y equipos utilizados.”²⁶

Otras fuentes de generación:

➤ **Máquinas de soldadura**

“Generan un espectro continuo asociado con su proceso particular. La duración de cada una de las operaciones individuales de soldadura varía entre uno y diez segundos, dependiendo del tipo de máquina de soldar.”²⁷

➤ **Hornos de arco**

Se forman al momento de iniciar la fundición.

➤ **Motores de inducción**

Producen interarmónicos en la fase de arranque del motor, o cuando se asocia la saturación del circuito magnético y las ranuras del hierro del rotor y el estator.

1.4.5.5.5 *Efectos*

- ✓ Saturación de transformadores de corriente.
- ✓ Producen interferencias con las señales de telecomunicaciones.
- ✓ Fluctuaciones de voltaje.
- ✓ Oscilaciones de baja frecuencia en sistemas mecánicos.

1.4.6 FLUCTUACIONES DE VOLTAJE

Serie de cambios fortuitos de voltaje o variaciones cíclicas de la onda de voltaje, cuya magnitud de cambios son de pequeñas dimensiones que no sobrepasan el rango de 95 y 105% del valor nominal, con una frecuencia generalmente menor a 25 Hz.

²⁶ Leonardo Power Quality Initiative. “**Guía de Calidad de la Energía Eléctrica (Armónicos, Interarmónicos)**”. Consultado: <http://impic.files.wordpress.com/2008/05/311-armonicos-interarmonicos.pdf>

²⁷ Leonardo Power Quality Initiative. “**Guía de Calidad de la Energía Eléctrica (Armónicos, Interarmónicos)**”. Consultado: <http://impic.files.wordpress.com/2008/05/311-armonicos-interarmonicos.pdf>

Las fuentes de generación de esta perturbación son:

- Hornos de arco
- Plantas de soldar por arco
- Operación de máquinas eléctricas con carga variable
- Energización de transformadores y banco de condensadores
- Arranque de máquinas eléctricas

El principal efecto es el denominado “flicker” que es una molestia visual debido al parpadeo de las lámparas fluorescentes, en cuanto a los equipos electrónicos se refiere, produce una inestabilidad de voltaje y corriente.

Sin embargo no existe ningún problema con los equipos, si las fluctuaciones de voltaje no sobrepasan el 10%.

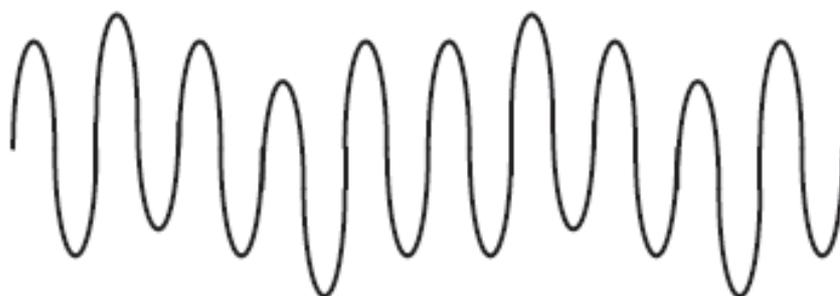


FIGURA 1.4.6.1: Fluctuaciones de voltaje

1.4.7 VARIACIONES EN LA FRECUENCIA

Es la variación de la frecuencia con respecto a la onda fundamental de 60 Hz producida en un sistema eléctrico de potencia.

La frecuencia al estar directamente relacionada con grandes cargas o salida de grupos de generación, una variación de dichos elementos produciría una alteración de la frecuencia con respecto al valor nominal.

“Las variaciones de frecuencia pueden lograr que un motor funcione más rápido o más lento para equiparar la frecuencia de la alimentación de entrada. Esto haría que el motor funcionara ineficazmente y/o provocaría más calor y degradación del

motor a través de una mayor velocidad del motor y/o consumo adicional de corriente.”²⁸

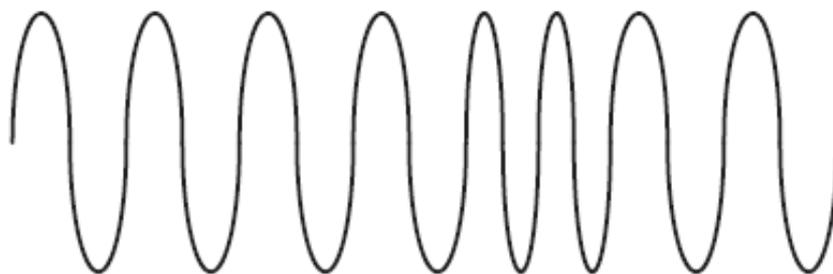


FIGURA 1.4.7.1: Variación de frecuencia

²⁸ Seymour, J. , y Horsley , T. **“Los siete tipos de problemas en el suministro eléctrico”**. Consultado: http://www.apcmedia.com/salestools/VAVR-5WKLPK_R0_LS.pdf

1.4.8 RESUMEN DE LAS PERTURBACIONES

Categoría de la perturbación	Forma de la onda	Efectos	Posibles causas	Posibles soluciones
1. Transitorios				
Impulsiva		Pérdida de datos, posibles daños, paro del sistema	Rayos, ESD, impulsos de conexión, liberación de fallas de la red	TVSS, mantener humedad entre 35-50%
Oscilatoria		Pérdida de datos, posibles daños	Desconexión de cargas inductivas / capacitivas	TVSS, UPS, reactores bobinas de choque, interruptor de cruce por cero
2. Interrupciones				
Inverter		Pérdida de datos, posibles daños, cierre	Comutación, fallas de la red, disparo de disyuntores, fallas de componentes	UPS
3. Bajada de tensión / subtensión				
Bajada de tensión		Paro del sistema, pérdida de datos, cierre	Cargas de arranque, fallas	Acondicionador de energía, UPS
Subtensión		Paro del sistema, pérdida de datos, cierre	Fallas de la red, cambios de carga	Acondicionador de energía, UPS
4. Aumento de tensión / sobretensión				
Aumento de tensión		Disparo por interferencia, daños al equipolvida reducida	Cambios de carga, fallas de la red	Acondicionador de energía, UPS, transformadores de "control" ferromesonante
Sobretensión		Daños al equipolvida reducida	Cambios de carga, falla de la red	Acondicionador de energía, UPS, transformadores de "control" ferromesonante

5. Distorsión de la forma de onda					
Desplazamiento por CC		Transformadores calentados, corriente por falla de masa, disparo por interferencia	Rectificadores, fuentes de alimentación defectuosas	Encontrar el problema y reemplazar el equipo defectuoso	
Armónicas		Transformadores calentados, paro del sistema	Cargas electrónicas (cargas no lineales)	Reconfigurar la distribución, instalar transformadores de factor k, usar fuentes conmutadas con PFC	
Interarmónicas		Parpadeo de la luz, calentamiento, interferencia de la comunicación	Señales de control, equipos defectuosos, cicloconvertidores, convertidores de frecuencia, motores de inducción, dispositivos de generación de arco	Acondicionador de energía, filtros, UPS	
Corte intermitente		Paro del sistema, pérdida de datos	Mecanismos de velocidad variable, soldadores con arco, atenuadores de luz	Reconfigurar la distribución, trasladar las cargas sensibles, instalar filtros, UPS	
Ruido		Detención del sistema, pérdida de datos	Transmisores (radio), equipos defectuosos, masa ineficiente, proximidad a fuente EM/IRFI	Quitar transmisores, reconfigurar puesta a tierra, alejarse de la fuente EM/IRFI, aumentar el blindaje, filtros, transformador de aislamiento	
6. Fluctuaciones de tensión		Paro del sistema, parpadeo de luces	Funcionamiento intermitente de los equipos de carga	Reconfigurar la distribución, trasladar las cargas sensibles, acondicionador de energía, UPS	
7. Variaciones de la frecuencia eléctrica		Falla del equipo sincrónico. Sin efecto sobre los equipos informáticos	Generadores de reserva regulados en forma ineficiente	Actualizar el regulador del generador	

1.5 REGULACIÓN EN EL ECUADOR PARA LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Para garantizar a los usuarios un suministro eléctrico seguro y confiable, el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC), mediante la regulación (No - 004/01), estableció los estándares mínimos de calidad y procedimientos técnicos de medición y evaluación a los que deben someterse las Empresas Distribuidoras del Servicio Eléctrico en nivel de voltaje, flicker, armónicos y duración de las interrupciones.

Esta regulación recopila información de otros países, por ende tiene sus ventajas a causa de las experiencias que ellos han vivido. Está estructurada por etapas, niveles de tolerancia para los niveles y rangos de voltaje, ya sea en zona urbana o rural.

Los índices de armónicos y flicker establecidos en esta regulación, se basa exactamente lo que indica la norma EN 50160 (Estándar Europeo desarrollado por el Comité Europeo de Normalización "CEN").

Como desventaja tenemos que no define los límites permitidos para otro tipo de perturbaciones como los desbalances de voltajes y la precisión que deben tener los aparatos de medición para los diferentes equipos como los transformadores de corriente y potencial.

1.5.1 NIVEL DE VOLTAJE

“La calidad de voltaje se determina con las variaciones de los valores eficaces (rms) medidos cada 10 minutos, con relación al voltaje nominal en los diferentes niveles.

$$\Delta V_k(\%) = \frac{V_k - V_n}{V_n} \times 100$$

Donde:

ΔV_k : variación de voltaje, en el punto de medición, en el intervalo k de 10 minutos.

V_k : voltaje eficaz (rms) medido en cada intervalo de medición k de 10 minutos.

V_n : voltaje nominal en el punto de medición.”²⁹

1.5.1.1 Mediciones

Las empresas distribuidoras del suministro eléctrico, deben realizar mensualmente lo siguiente:

1. “Un registro de voltaje en cada uno de los siguientes puntos de medición:
 - 20% de las barras de salida de subestaciones de distribución AV/MV, no menos de 3.
 - 0,15% de los transformadores de distribución, no menos de 5.
 - 0,01 % de los Consumidores de Bajo Voltaje del área de concesión, no menos de 10.
2. Para la selección de los puntos se considerarán los niveles de voltaje, el tipo de zona (urbana, rural), y la topología de la red, a fin de que las mediciones sean representativas de todo el sistema. Una vez realizada la selección de los puntos, la Empresa Distribuidora debe notificar al CONELEC, por lo menos 2 meses antes de efectuar las mediciones.
3. Simultáneamente con el registro del voltaje se deberá medir la energía entregada a efectos de conocer la que resulta suministrada en malas condiciones de calidad.
4. Para cada mes, el registro en cada punto de medición se efectuará durante un período no inferior a 7 días continuos, en intervalos de medición de 10 minutos.”³⁰

1.5.1.1.1 Límites³¹

Los límites permitidos por el CONELEC por medio de su regulación (No-004/01), establece que las variaciones de los valores eficaces con relación al voltaje nominal son los siguientes:

²⁹ CONELEC-004/01. Calidad del Producto. “Calidad del Servicio Eléctrico de Distribución”

³⁰ CONELEC-004/01. Calidad del Producto. “Calidad del Servicio Eléctrico de Distribución”

³¹ CONELEC-004/01. Calidad del Producto. “Calidad del Servicio Eléctrico de Distribución”

	Subetapa 1	Subetapa 2
Alto Voltaje	± 7,0 %	± 5,0 %
Medio Voltaje	± 10,0 %	± 8,0 %
Bajo Voltaje. Urbanas	± 10,0 %	± 8,0 %
Bajo Voltaje. Rurales	± 13,0 %	± 10,0 %

TABLA 1.5.1.1.1: Límites establecidos por el CONELEC para diferentes niveles de voltaje

1.5.2 ARMÓNICOS

Los límites de armónicos establecidos para las empresas distribuidoras se basan en dos parámetros: la distorsión armónica individual de voltaje (V_i') y la distorsión armónica total (THD).

$$V_i' = \left(\frac{V_i}{V_n} \right) * 100$$

$$THD = \left(\frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{40} (V_i)^2}}{V_n} \right) * 100$$

Donde:

V_i' : factor de distorsión armónica individual de voltaje.

THD : factor de distorsión total por armónicos, expresado en porcentaje.

V_i : valor eficaz (rms) del voltaje armónico "i" (para $i = 2 \dots 40$) expresado en voltios.

V_n : voltaje nominal del punto de medición expresado en voltios.

1.5.2.1 Mediciones

“El Distribuidor deberá realizar mensualmente lo siguiente:

1. Un registro en cada uno de los puntos de medición, en un número equivalente al 0,15% de los transformadores de distribución, en los bornes de bajo voltaje, no menos de 5.
2. Para la selección de los puntos se considerarán los niveles de voltaje, el tipo de zona (urbana, rural), y la topología de la red, a fin de que las mediciones sean representativas de todo el sistema. Una vez realizada la selección de los puntos, la Empresa Distribuidora debe notificar al CONELEC, por lo menos 2 meses antes de efectuar las mediciones.
3. Simultáneamente con este registro se deberá medir la energía entregada a efectos de conocer la que resulta suministrada en malas condiciones de calidad.
4. En cada punto de medición, para cada mes, el registro se efectuará durante un período no inferior a 7 días continuos, en intervalos de medición de 10 minutos.

1.5.2.1.1 Límites³²

Los valores eficaces (rms) de los voltajes armónicos individuales (V_i) y los THD, expresados como porcentaje del voltaje nominal del punto de medición respectivo, no deben superar los valores límite (V_i' y THD') señalados a continuación:

³² CONELEC-004/01. Calidad del Producto. “Calidad del Servicio Eléctrico de Distribución”

ORDEN (n) DE LA ARMONICA Y THD	TOLERANCIA $ V_i' $ o $ THD' $ (% respecto al voltaje nominal del punto de medición)	
	V > 40 kV (otros puntos)	V ≤ 40 kV (trafos de distribución)
Impares no múltiplos de 3		
5	2.0	6.0
7	2.0	5.0
11	1.5	3.5
13	1.5	3.0
17	1.0	2.0
19	1.0	1.5
23	0.7	1.5
25	0.7	1.5
> 25	$0.1 + 0.6*25/n$	$0.2 + 1.3*25/n$
Impares múltiplos de tres		
3	1.5	5.0
9	1.0	1.5
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
Mayores de 21	0.2	0.2
Pares		
2	1.5	2.0
4	1.0	1.0
6	0.5	0.5
8	0.2	0.5
10	0.2	0.5
12	0.2	0.2
Mayores a 12	0.2	0.5
THD	3	8

TABLA 1.5.2.1.1: Límites de armónicos establecidos por el CONELEC”

CAPÍTULO 2.- ANÁLISIS DE FOURIER

2.1 INTRODUCCIÓN

Dependiendo de las características de las señales (periódicas o aperiódicas) y espacio donde se analizan (tiempo y frecuencia discretos o continuos), se definen distintas formas para la transformada de Fourier como: la Transformada Discreta de Fourier, Transformada de Fourier en Tiempo Discreto, Transformada Rápida de Fourier, Transformada Corta de Fourier, entre otras.

2.2 BREVE RESEÑA HISTÓRICA DE LAS TRANSFORMADAS

1) 1807

Joseph Fourier demuestra que toda función periódica puede descomponerse como la suma infinita de senos y cosenos de diferentes frecuencias.

2) 1909

Alfred Haar descubre las ondas bases de corta duración, siendo éstas las primeras wavelets.

3) 1946

Dennis Gabor descompone una señal en el dominio tiempo-frecuencia denominada como la transformada corta de Fourier.

4) 1984

Jean Morlet desarrolló un nuevo método para descomponer una señal, de esta manera se introdujo por primera vez el concepto de wavelet.

5) 1985

Ives Meyer da origen a las wavelets ortogonales.

6) 1987

“Ingrid Daubechies construye el primer wavelet ortogonal con soporte compacto. Los wavelets pasan a ser una importante herramienta práctica de cálculo.”³³

7) 1989

Stéphane Mallat colaboró con Ives Meyer para desarrollar el análisis multiresolución (MRA).

8) 1990

David Donoho trabajó en el desarrollo de los wavelets para eliminar el ruido de una señal.

9) 1992

“El FBI usa los wavelets para comprimir su base de datos de huellas dactilares.

10) 2004

Una vez superada la gran revolución de los años 90, se ve que no todo se puede hacer con wavelets, pero que sí suponen una nueva herramienta útil de cálculo y análisis.”³⁴

2.3 CLASIFICACIÓN DE LAS SEÑALES

Las señales pueden clasificarse en diferentes formas, ya sean analógicas y digitales, periódicas y aperiódicas, etc., sin embargo, para el desarrollo de este capítulo es necesario definir la siguiente clasificación:

➤ **Dominio del tiempo:**

Son señales, en donde el eje de las x o abscisas están representadas por la variable independiente tiempo, o aquellas que muestran los cambios de amplitud de la onda respecto al tiempo.

³³ López, J. “Concepto y Aplicaciones para el Análisis de Señales”. Consultado: nuclear.fis.ucm.es/webgrupo/archivos/WAVELETS.ppt

³⁴ López, J. “Concepto y Aplicaciones para el Análisis de Señales”. Consultado: nuclear.fis.ucm.es/webgrupo/archivos/WAVELETS.ppt

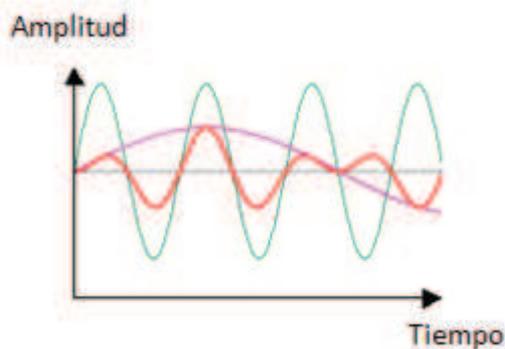


FIGURA 2.3.1: Diferentes formas de onda representadas en el Dominio del Tiempo

➤ **Dominio de la frecuencia:**

Ondas que utilizan en el eje de las abscisas la frecuencia, y de acuerdo a sus características de frecuencia se puede clasificar en:

- **Baja Frecuencia:**

El contenido espectral se agrupa cerca de la frecuencia cero.

- **Media Frecuencia:**

El contenido espectral se agrupa en las frecuencias altas.

- **Alta Frecuencia:**

El contenido espectral se agrupa en un lugar medio, es decir se encuentra dentro de los límites establecidos por las dos clasificaciones anteriores (frecuencia cero y frecuencias altas).

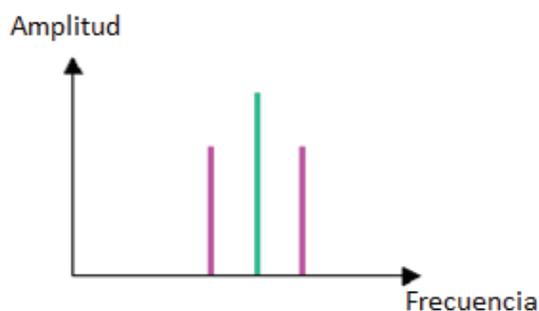


FIGURA 2.3.2: Señal expresada en el Dominio de la Frecuencia

2.4 ANÁLISIS ESPECTRAL DE SEÑALES DE TIEMPO CONTINUO

2.4.1 SERIES DE FOURIER

Es una secuencia de términos utilizada para representar señales no sinusoidales periódicas de tiempo continuo, mediante una suma infinita de funciones senoidales y cosenoidales de frecuencias enteras (frecuencia fundamental más frecuencias armónicas), como se observa en la Figura 2.4.1.1. Por tal motivo, las series de Fourier se han convertido en una herramienta fundamental para el análisis de ondas estacionarias en términos de su contenido espectral.

La serie de Fourier se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{A_o}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[A_n \cdot \cos\left(\frac{2n\pi}{T}t\right) + B_n \cdot \text{sen}\left(\frac{2n\pi}{T}t\right) \right] \quad [2-1]$$

Donde:

$$A_o = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cdot dt$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cdot \cos\left(\frac{2n\pi}{T}t\right) dt$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cdot \text{sen}\left(\frac{2n\pi}{T}t\right) dt$$

T: Período de la señal.

A_o : Componente continua de la señal de entrada.

A_n : Amplitudes de la serie coseno.

B_n : Amplitudes de la serie seno.

Además A_n y B_n son llamados los coeficientes de Fourier.

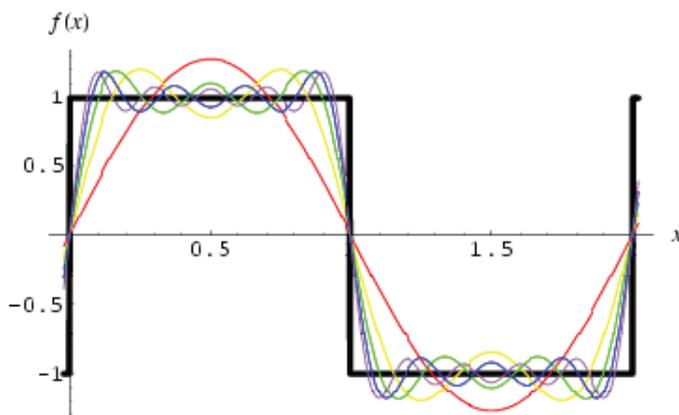


FIGURA 2.4.1.1: Serie de Fourier de una señal no sinusoidal

Como se puede apreciar en la ecuación [2-1], la serie de Fourier consta de tres partes:

- El primer término a_0 es la componente de continua, y es el valor medio de la onda de entrada en un ciclo completo.
- La segunda parte es una serie de cosenos, donde no existen prohibiciones respecto a los diferentes valores de las amplitudes que puede adquirir dicha serie.
- La última parte, es una serie de términos seno, al igual que en la segunda parte no existen restricciones en los valores de las amplitudes.

Para realizar el análisis de las perturbaciones, es necesario representar la serie de Fourier en términos de amplitud – fase:

$$f(t) = \frac{C_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \cos(\omega_n t + \theta_n)$$

$$f(t) = \frac{C_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \cos\left(\frac{2n\pi}{T}t + \theta_n\right) \quad [2-2]$$

Donde:

$$C_o = A_o$$

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$$

$$\theta_n = \tan^{-1}\left(\frac{-B_n}{A_n}\right)$$

Si bien, para poder aplicar la serie de Fourier, la función debe cumplir las siguientes condiciones (Dirichlet) además de ser periódica y continua en el tiempo.

- 1) Número finito de discontinuidades en cualquier período.

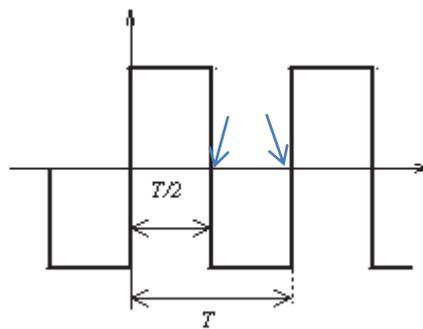


FIGURA 2.4.1.2: Condición número uno de Dirichlet

- 2) Número finito de máximos y mínimos durante cualquier período.

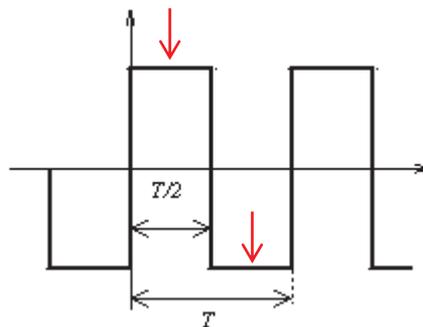


FIGURA 2.4.1.3: Condición número dos de Dirichlet

3) Absolutamente integrable en cualquier período, esto significa que:

$$\int |f(t)| \cdot dt < \infty$$

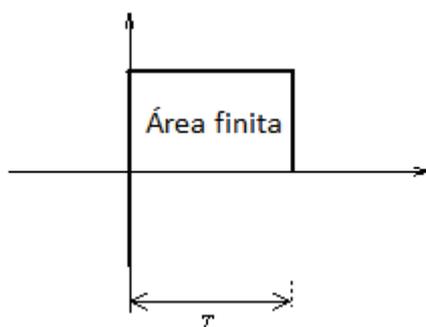


FIGURA 2.4.1.4: Condición número tres de Dirichlet

La Figura 2.4.1.5, muestra las tres señales más utilizadas en el dominio del tiempo, con su respectivo contenido espectral.

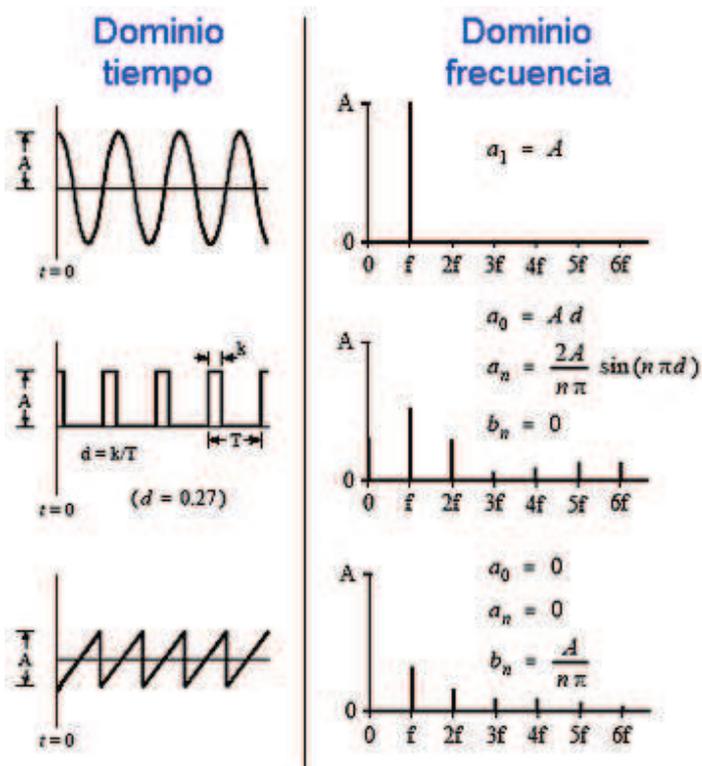


FIGURA 2.4.1.5: Contenido espectral de tres típicas ondas

2.4.1.1 Fenómeno de Gibbs

“Cuando una función discontinua se expande en series de Fourier, aparecen oscilaciones espurias en los puntos de discontinuidad introduciendo un error de 9% que no disminuye por más que se aumente el número de términos de la serie.”³⁵

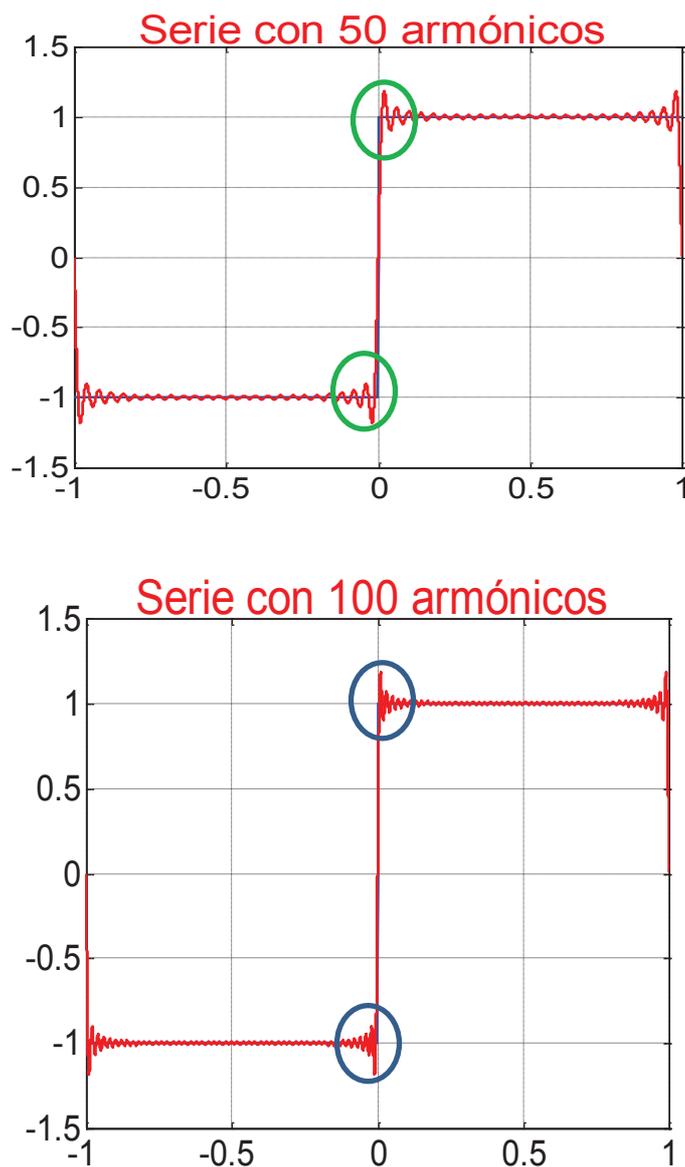


FIGURA 2.4.1.1.1: Señal discontinua con Fenómeno de Gibbs

³⁵ Chicurel, E. “UNA RAYITA PARA EVITAR UNA PESADILLA: EL FENÓMENO DE GIBBS”. Consultado: http://www.quimica.unam.mx/IMG/pdf/Gibbs_Quimica.pdf

2.4.1.2 Propiedades

Las propiedades más importantes, que permiten reducir el grado de complejidad para resolver las series de Fourier son:

1) Linealidad

Sean dos funciones periódicas en el tiempo; cualquier combinación lineal de dichas funciones, están dadas por la misma combinación lineal de la serie de Fourier, esto quiere decir que:

$$A \cdot f_1(t) + B \cdot f_2(t) \rightarrow A \cdot a_k + B \cdot b_k$$

Donde:

a_k : Coeficientes de Fourier de la función $f_1(t)$.

b_k : Coeficientes de Fourier de la función $f_2(t)$.

2) Desplazamiento en el Tiempo

Cualquier función, que cumpla con las condiciones de Dirichlet y se desplace en el tiempo, las magnitudes de los coeficientes de la serie de Fourier no cambian.

$$f(t - t_o) \rightarrow a_k e^{-jk\omega_o t_o}$$

3) Escalado Temporal

“El escalamiento de tiempo es una operación que, en general, cambia el período de la señal principal. En concreto, si $x(t)$ es periódica con período T y frecuencia fundamental $\omega_o = 2\pi/T$, entonces $x(\alpha t)$, donde α es un número real positivo, es periódica con período T/α y frecuencia fundamental $\alpha\omega_o$. Debido a que la operación de escalamiento de tiempo se aplica directamente a cada una de las componentes armónicas de $x(t)$, se puede concluir que los coeficientes de Fourier para cada una de esas componentes siguen siendo los mismos.”³⁶

³⁶ Oppenheim, A. V., y Willsky, A. S. “Señales y Sistemas”. Consultado: http://books.google.com.ec/books?id=g2750K3PxRYC&pg=PA202&lpg=PA202&dq=propiedades+serie+cont+inua+de+fourier&source=bl&ots=f_OHjhol1G&sig=4NUPpYAV2rQdgJpp22_kDHfb0U&hl=es-

$$f(\alpha t), \alpha > 0 \rightarrow a_k$$

4) Relación de Parseval

La relación de parseval establece que, “la potencia promedio total de una señal periódica es igual a la suma de las potencias promedio en todas sus componentes armónicas.”³⁷

Esto quiere decir que:

$$\frac{1}{T} \int_T |f(t)|^2 dt = \sum_{-\infty}^{\infty} |a_k|^2$$

Donde:

$|a_k|^2$ = Potencia promedio de las k -ésima componente armónica de la función original.

Revisar el Anexo 2 para conseguir información de las propiedades restantes.

2.4.2 TRANSFORMADA DE FOURIER

La transformada de Fourier es una operación matemática que permite representar una señal que originalmente está expresada en las bases de tiempo o espacio en una señal en las bases de Fourier (frecuencia), es decir pasar de una señal del dominio del tiempo a otra, en el dominio de frecuencia o viceversa.

Se utiliza para señales de tiempo continuo y aperiódicas. El análisis de esta transformada es óptima, únicamente para señales estacionarias debido a que el contenido espectral aparece en todo momento, caso contrario sus resultados serán erróneos.

419&sa=X&ei=1zeEUZPnKpW34APmnoHwAw&ved=0CCsQ6AEwAA#v=onepage&q=propiedades%20serie%20continua%20de%20fourier&f=false

³⁷ Oppenheim, A. V., y Willsky, A. S. “Señales y Sistemas”. Consultado:

http://books.google.com.ec/books?id=g2750K3PxRYC&pg=PA202&lpg=PA202&dq=propiedades+serie+continua+de+fourier&source=bl&ots=f_OHjhol1G&sig=4NUPpYAV2rQdgJpp22_kDHfb0U&hl=es-419&sa=X&ei=1zeEUZPnKpW34APmnoHwAw&ved=0CCsQ6AEwAA#v=onepage&q=propiedades%20serie%20continua%20de%20fourier&f=false



FIGURA 2.4.2.1: Señal no periódica de tiempo continuo

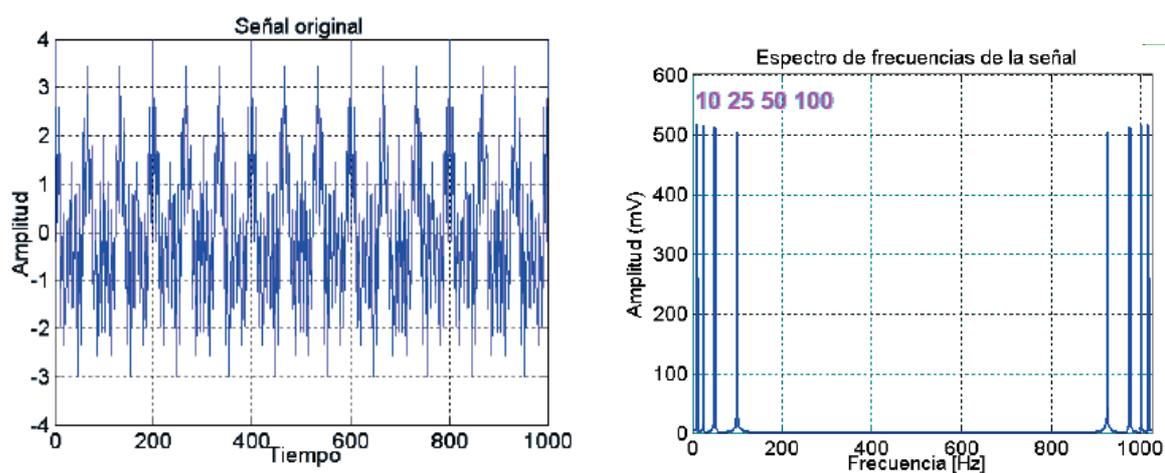


FIGURA 2.4.2.2: Espectro de frecuencias de una señal estacionaria

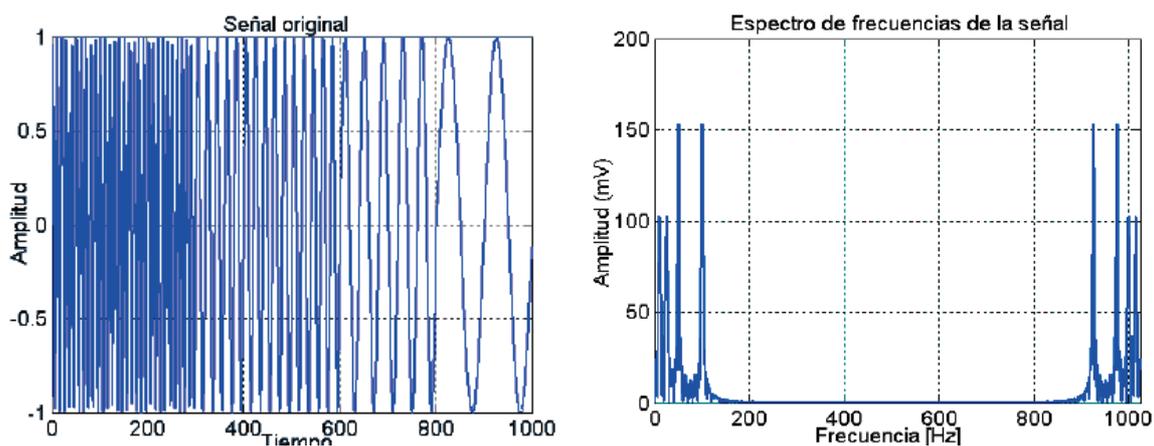


FIGURA 2.4.2.3: Espectro de frecuencias de una señal no estacionaria

Estas señales, se pueden interpretar como funciones periódicas con un período infinitamente largo como se puede apreciar en la Figura 2.4.2.4:

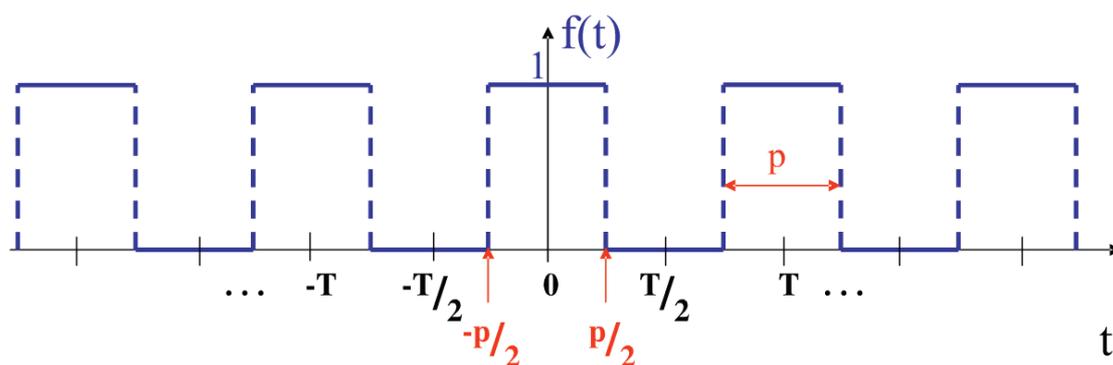
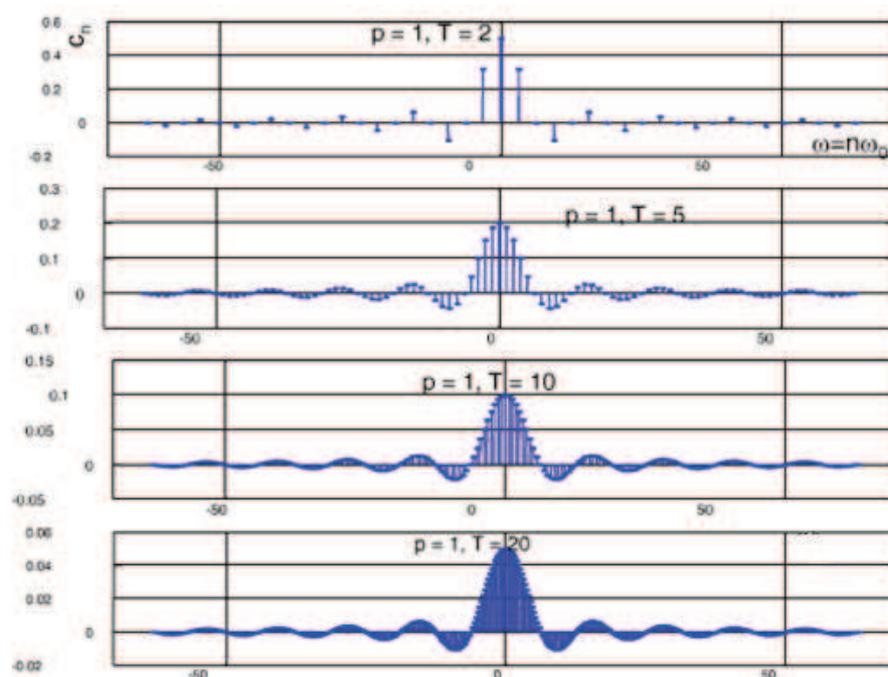


FIGURA 2.4.2.4: Tren de pulsos de amplitud 1, ancho p y período T

$$f(t) = \begin{cases} 0 & -\frac{T}{2} < t < -\frac{p}{2} \\ 1 & -\frac{p}{2} < t < \frac{p}{2} \\ 0 & \frac{p}{2} < t < \frac{T}{2} \end{cases}$$

Dibujando la amplitud de la forma compacta de la serie de Fourier (C_n) en función de $\omega = n\omega_0$ para diferentes períodos, se obtiene la gráfica del espectro de frecuencias que se muestra a continuación:



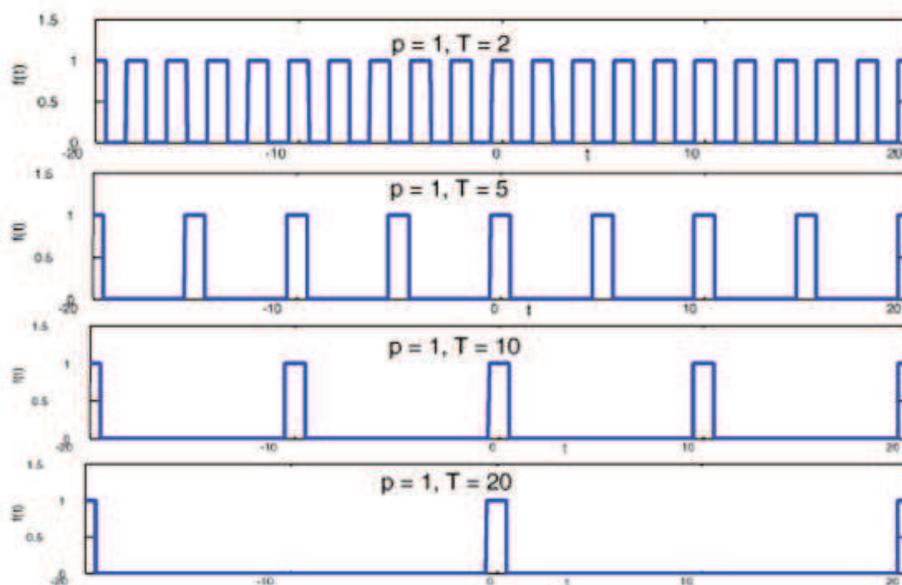


FIGURA 2.4.2.5: Espectro de frecuencias y tren de pulsos para diferentes períodos

A medida que el período aumenta, la función deja de ser periódica, y el espectro se vuelve continuo.

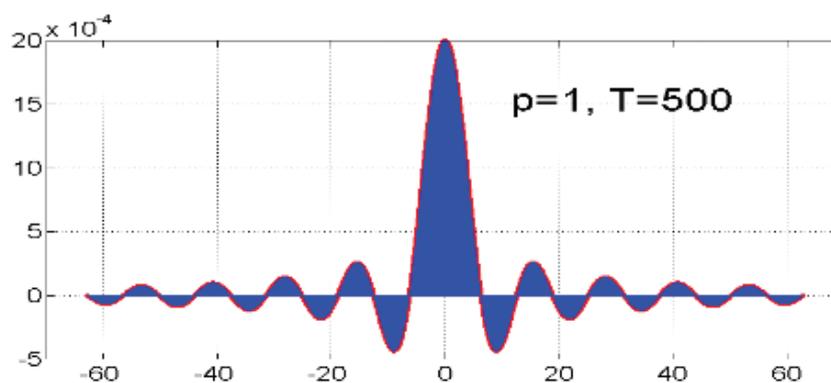


FIGURA 2.4.2.6: Espectro continuo para un período infinito

“El razonamiento anterior lleva a reconsiderar la expresión de una función $f(t)$ no periódica en el dominio de la frecuencia, no como una suma de armónicos de frecuencia $n\omega_0$, sino como una función continua de la frecuencia ω .

Así la serie en términos de funciones exponenciales complejas:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \cdot e^{jn\omega_o t}$$

Al cambiar la variable discreta $n\omega_o$ (cuando el período tiende al infinito) por la variable continua ω , se transforma en una integral partiendo de la siguiente ecuación:

$$C_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cdot e^{-jn\omega_o t} dt$$

Reemplazando la anterior ecuación en la serie se tiene:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cdot e^{-jn\omega_o t} dt \right] \cdot e^{jn\omega_o t}$$

Donde: $T = \frac{2\pi}{\omega_o}$

Escribiendo de otra forma:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cdot e^{-jn\omega_o t} dt \right] \cdot \omega_o e^{jn\omega_o t}$$

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores:

$$T \rightarrow \infty, n\omega_o \rightarrow \omega, \text{ y } \omega_o \rightarrow d\omega$$

El sumatorio se convierte en:³⁸

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \right] \cdot e^{j\omega t} d\omega \quad \text{[2-3]}$$

³⁸ Docstoc. "La transformada de Fourier". Consultado: <http://www.docstoc.com/docs/37066720/La-transformada-de-Fourier>

Por lo tanto:

$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt$ se le llama la transformada de Fourier y mediante esta

expresión se puede calcular en el dominio de la frecuencia $F(\omega)$ a partir del dominio del tiempo $f(t)$ o viceversa.

$F(\omega)$ al ser una función compleja que puede ser expresada mediante:

- Amplitud y ángulo de fase

$$F(\omega) = |F(\omega)| \cdot e^{j\theta(\omega)}$$

- Una parte real e imaginaria.

$$\text{Re}(F(\omega)) + j \text{Im}(F(\omega))$$

Las condiciones que debe cumplir la señal para calcular la transformada de Fourier son:

- La función debe ser no periódica.
- Cumplir con las condiciones de Dirichlet explicados anteriormente.

A continuación se muestra una señal aperiódica y continua en el tiempo con su respectivo transformada en el dominio de la frecuencia.

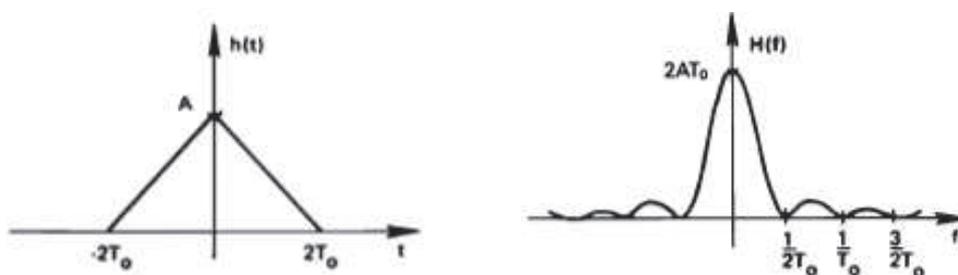


FIGURA 2.4.2.7: Transformada de Fourier aplicada a una señal aperiódica

2.4.2.1 Propiedades

Existen bastantes propiedades acerca de la transformada, sin embargo, las más importantes para el tratamiento de las señales son:

- 1) Una función arbitraria puede ser descompuesto en funciones pares e impares. La transformada de Fourier de una función contiene partes reales e imaginarias.

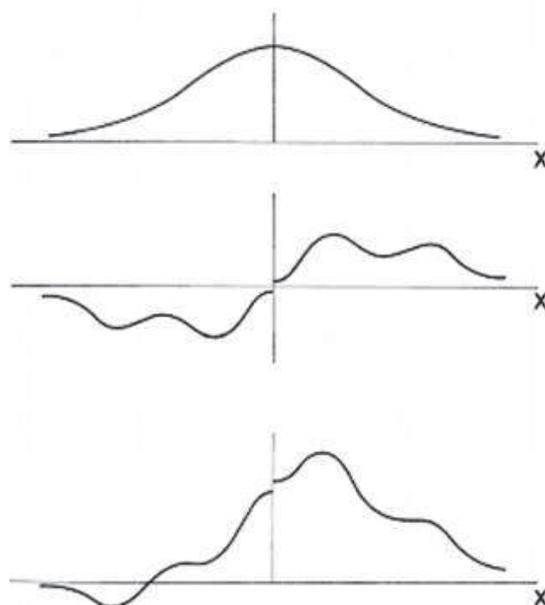


FIGURA 2.4.2.1.1: Señal resultante de la suma de una función par e impar

2) Linealidad

La transformada posee las propiedades de homogeneidad y aditividad, esto quiere decir que para cualquier cambio de amplitud en el dominio del tiempo resulta el mismo cambio de amplitud en el otro dominio, y que una suma de señales es transformada en una suma de la transformada de Fourier de estas señales:

$$a \cdot f_1(t) \rightarrow a \cdot F_1(\omega)$$

$$b \cdot f_2(t) \rightarrow b \cdot F_2(\omega)$$

$$a \cdot f_1(t) + b \cdot f_2(t) \rightarrow a \cdot F_1(\omega) + b \cdot F_2(\omega)$$

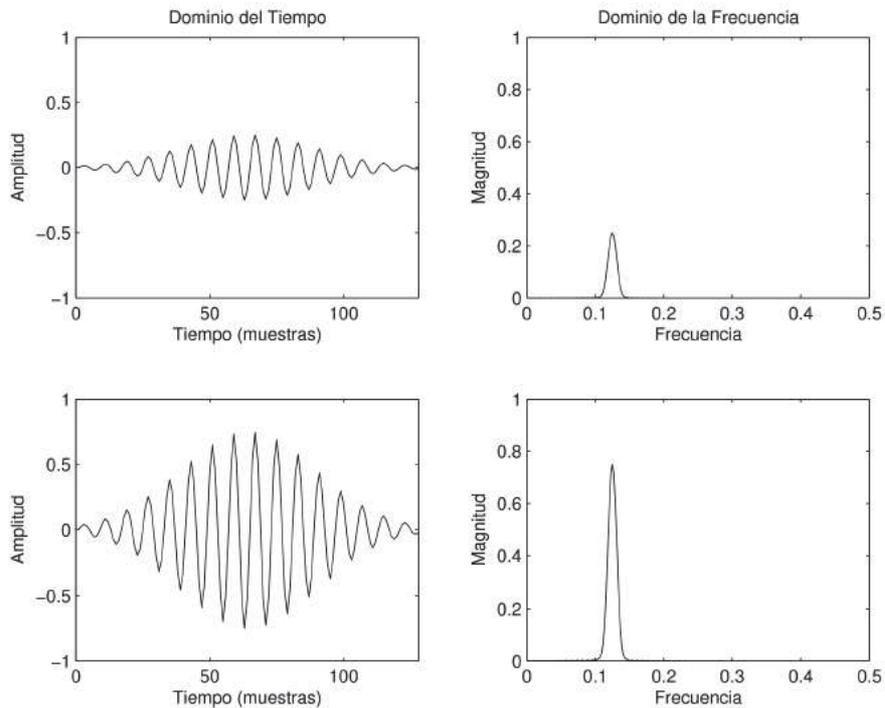


FIGURA 2.4.2.1.2: Propiedad de homogeneidad

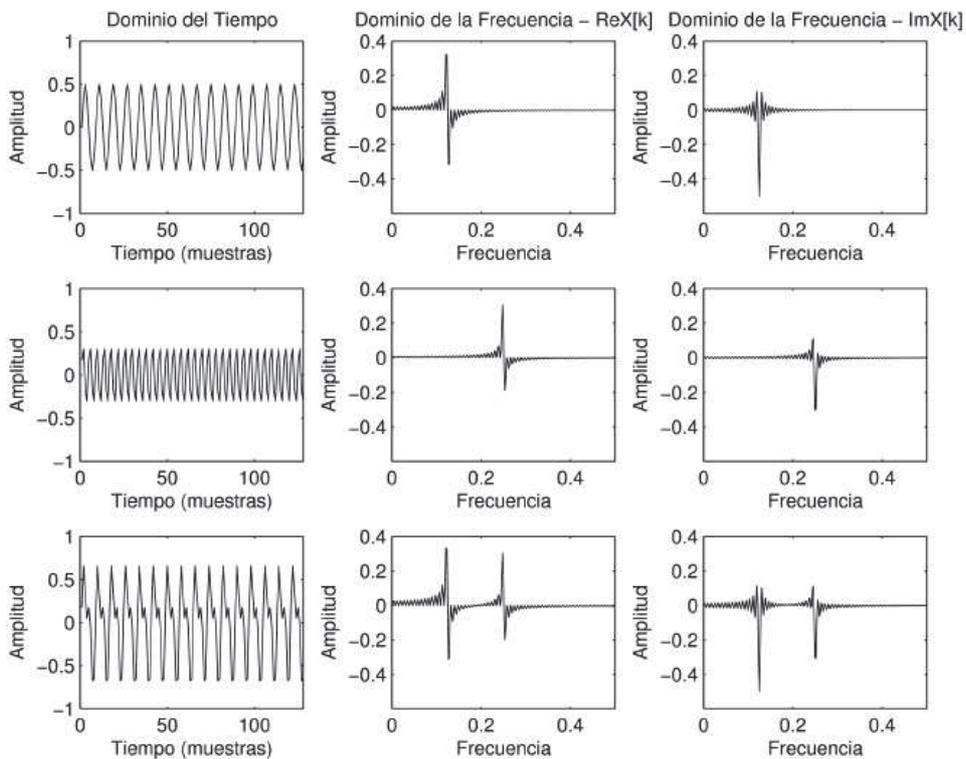


FIGURA 2.4.2.1.3: Propiedad de aditividad

3) Escalamiento:

La escala del tiempo afecta en la frecuencia y amplitud de la escala, esto quiere decir que si $F(\omega)$ es la transformada de $f(t)$, y $f(t)$ está escalada en el tiempo por un factor “a” diferente de cero, por lo tanto la transformada de $f(at)$ está dada por:

$$f(at) \rightarrow |a|^{-1} F\left(\frac{\omega}{a}\right)$$

4) Desplazamiento en el tiempo

Afecta solamente a la fase, esto quiere decir:

$$f(t) \rightarrow F(\omega)$$

$$f(t - T) \rightarrow F(\omega)e^{-j2\pi \cdot f \cdot T}$$

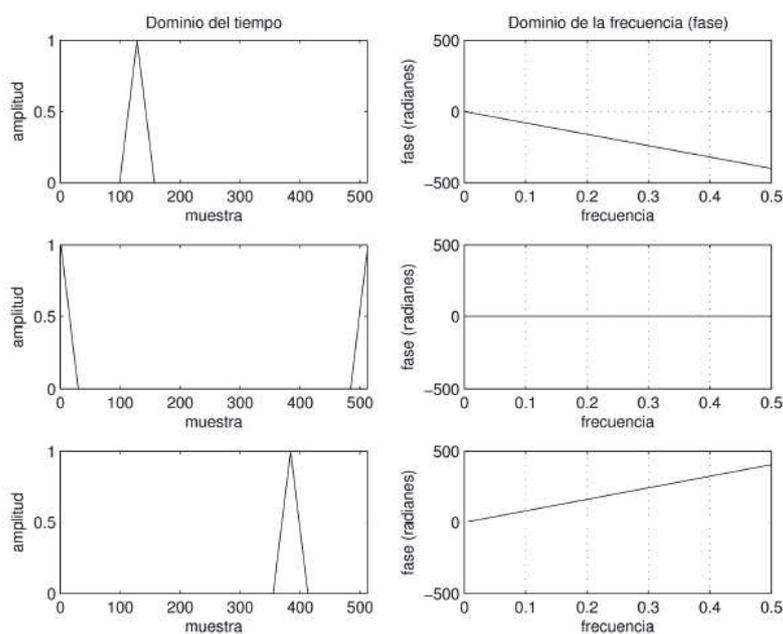


FIGURA 2.4.2.1.4: Desplazamiento en el tiempo de una onda hacia la derecha e izquierda

5) Desplazamiento en la frecuencia

$$F(\omega) \leftarrow f(t)$$

$$F(\omega - W) \leftarrow f(t) \cdot e^{j2\pi t \cdot W}$$

Revisar el Anexo 2 para conseguir información de las propiedades restantes.

2.4.3 TRANSFORMADA CORTA DE FOURIER

La transformada corta de Fourier, se utiliza para el análisis de señales no estacionarias. El método en que se basa la transformada es sencilla, esto quiere decir que se divide la señal de entrada en varias proporciones finitas asumiendo que todo lo que se encuentra dentro de esa proporción es una señal estacionaria, para luego aplicar la transformada de Fourier a cada una de las partes, y de esa manera obtener información acerca del contenido espectral y su momento de ocurrencia (tiempo).

Todo lo descrito anteriormente se puede apreciar en la Figura 2.4.3.1:

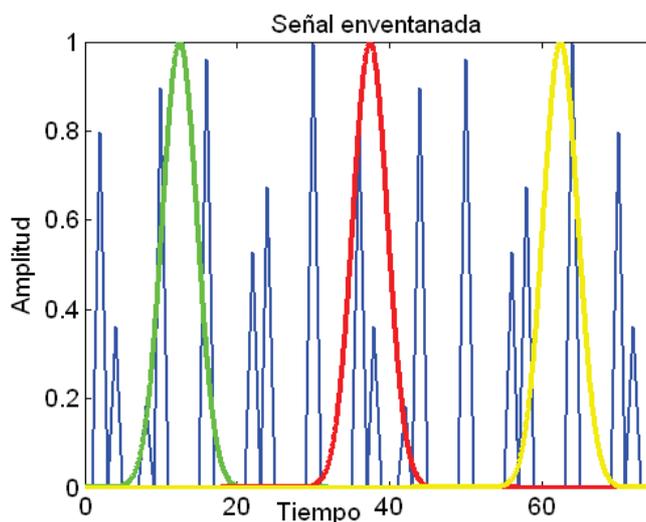


FIGURA 2.4.3.1: Función ventana Gauss aplicada señal no estacionaria

La función matemática que se encarga de dividir la señal en proporciones finitas, se llama ventana.

$$STFT(t_o, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} [f(t) \cdot w^*(t - t_o)] e^{-j2\pi ft} dt \quad [2-4]$$

Donde:

$f(t)$: Señal de entrada

w^* : Función matemática ventana conjugada

Existe una gran variedad de la función ventana aplicada a la Transformada Corta de Fourier, sin embargo, las más utilizadas son:

- **Rectangular**

$0 \leq n \leq N - 1$ (Forma discreta de tamaño N)

$$w(n) = 1$$

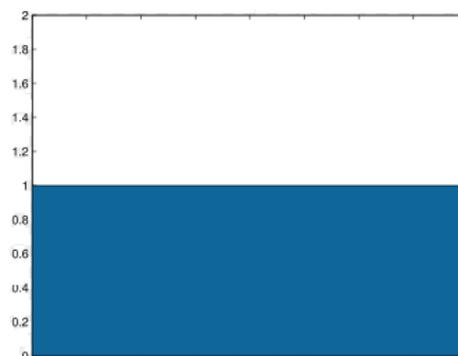


FIGURA 2.4.3.2: Función Ventana Rectangular

- **Gauss**

$0 \leq n \leq N - 1$ (Forma discreta de tamaño N)

$$w(n) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{n - (N-1)/2}{\sigma(N-1)/2} \right)^2}$$

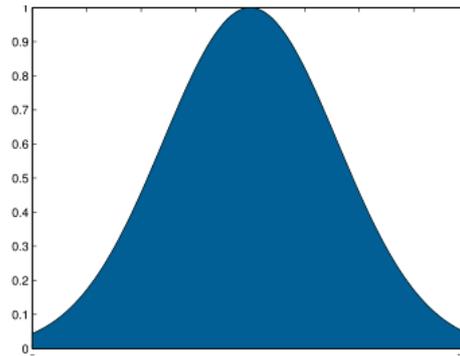


FIGURA 2.4.3.3: Función Ventana Gauss

Donde:

$$\sigma \leq 0.5$$

- **Triangular**

$0 \leq n \leq N - 1$ (Forma discreta de tamaño N)

$$w(n) = \frac{N}{2} - \left| n - \frac{N-1}{2} \right|$$

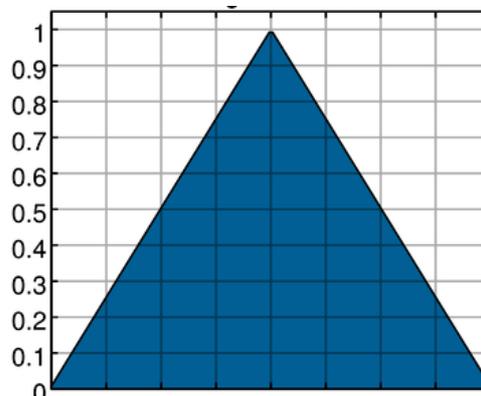


FIGURA 2.4.3.4: Función Ventana Triangular

- **Hann**

$0 \leq n \leq N - 1$ (Forma discreta de tamaño N)

$$w(n) = 0.5 - 0.5 \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot n}{N-1}\right)$$

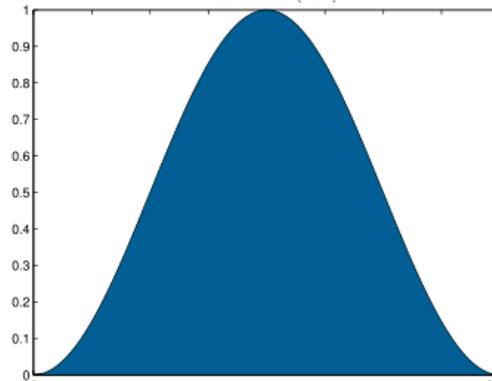


FIGURA 2.4.3.5: Función Ventana Hann

- **Hamming**

$0 \leq n \leq N-1$ (Forma discreta de tamaño N)

$$w(n) = 0.53836 - 0.46164 \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot n}{N-1}\right)$$

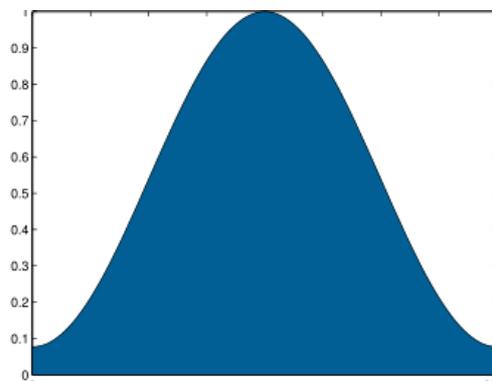


FIGURA 2.4.3.6: Función Ventana Hamming

- **Blackman**

$0 \leq n \leq N-1$ (Forma discreta de tamaño N)

$$w(n) = 0.42 - 0.5 \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot n}{N-1}\right) + 0.08 \cdot \cos\left(\frac{4\pi \cdot n}{N-1}\right)$$

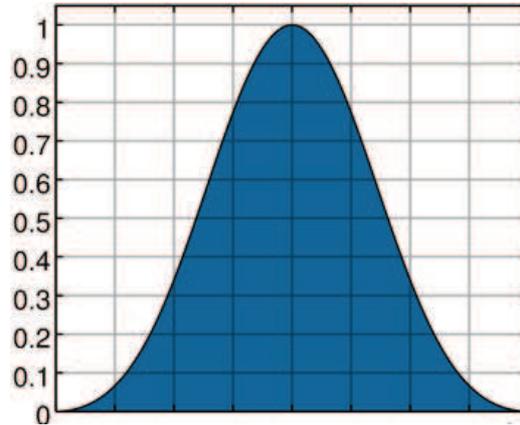


FIGURA 2.4.3.7: Función Ventana Blackman

- **Flat top**

$0 \leq n \leq N-1$ (Forma discreta de tamaño N)

$$w(n) = 1 - 1.93 \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot n}{N-1}\right) + 1.29 \cdot \cos\left(\frac{4\pi \cdot n}{N-1}\right) - 0.388 \cdot \cos\left(\frac{6\pi \cdot n}{N-1}\right) + 0.032 \cdot \cos\left(\frac{8\pi \cdot n}{N-1}\right)$$

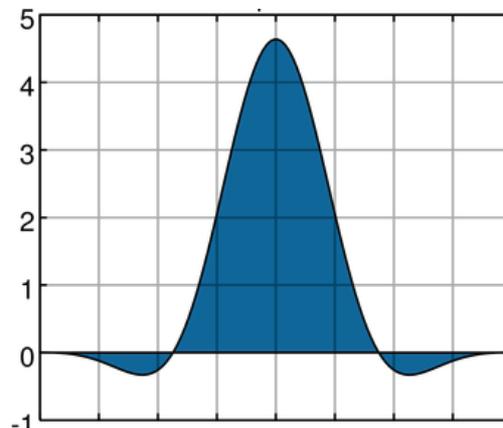


FIGURA 2.4.3.8: Función Ventana Flat top

La elección de las ventanas, dependerá del grado de desempeño que presenta cada una de ellas o aquellas que disminuyan los inconvenientes que se presentan como:

- “Al periodizar el bloque de análisis aparecen discontinuidades. Las discontinuidades producen componentes espectrales que no existen en la señal original.”³⁹
- La energía del contenido espectral que se esparce hacia los costados a causa del efecto del enventanado.

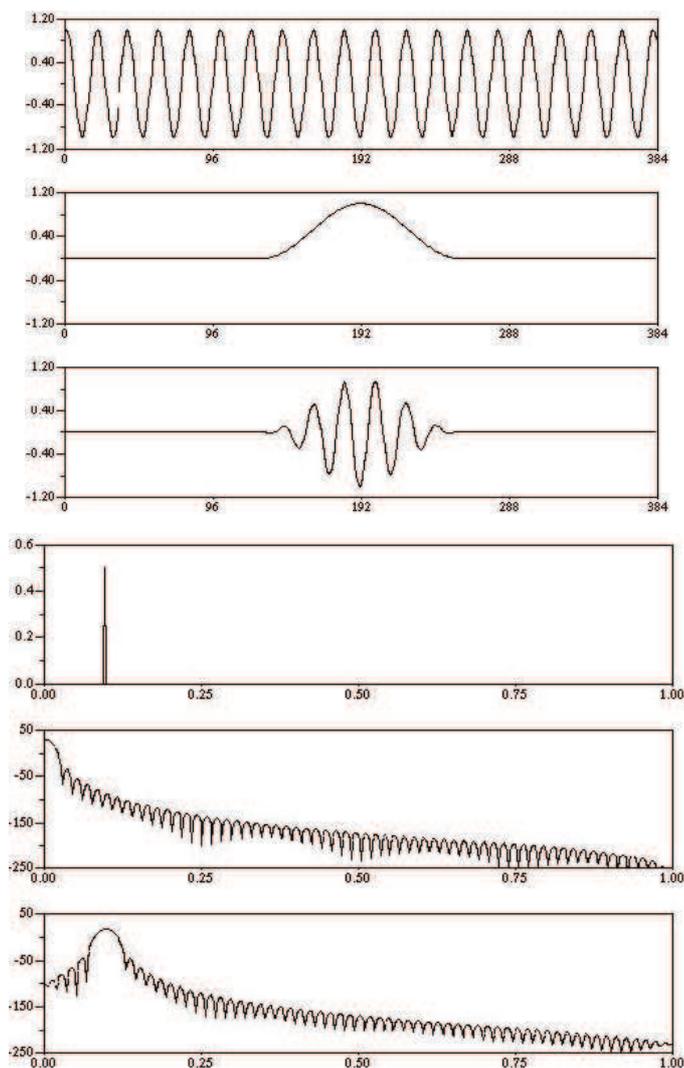


FIGURA 2.4.3.9: Efecto del Enventanado

³⁹ López, E., y Rocamora, M. “La transformada de Fourier: teoría y aplicaciones en audio”. Consultado: <http://iie.fing.edu.uy/investigacion/grupos/gmm/audio/seminario/seminariosviejos/2005/charlas2005/charla8.pdf>

2.4.3.1 Problema

La transformada corta de Fourier, presenta una resolución fija o un principio de incertidumbre (ventana).

El ancho de la ventana depende de la forma de la señal de entrada, por lo que esta determinará si existe una buena resolución en frecuencia (espectros cercanos se pueden separar) y tiempo (conocer el tiempo en donde las frecuencias cambian).

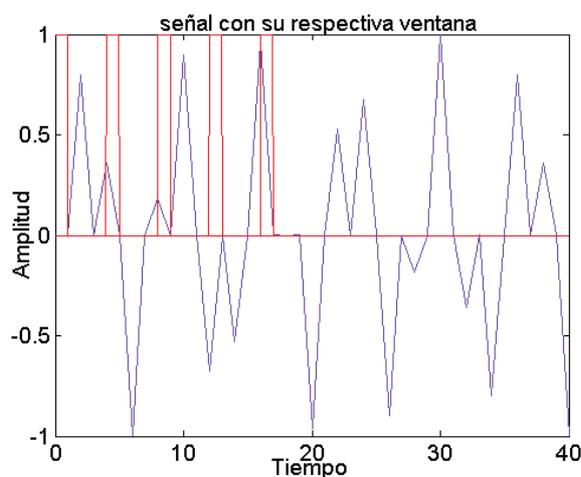


FIGURA 2.4.3.1.1: Ancho de ventana con resolución de tiempo alta y frecuencia baja

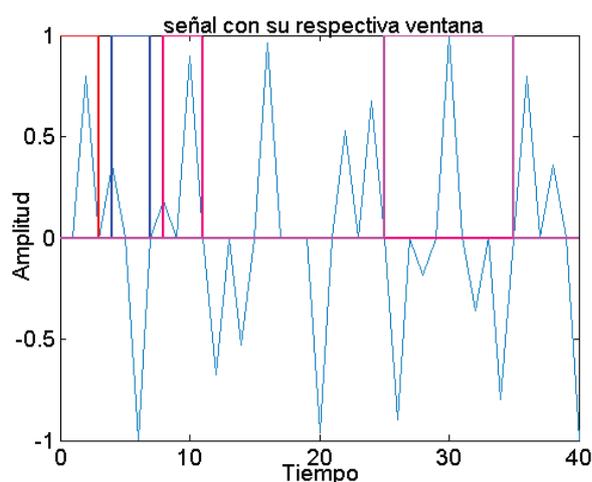


FIGURA 2.4.3.1.2: Ancho de ventana con resolución de tiempo baja y frecuencia alta

Por lo tanto:

- Ancho de ventana que tiendan al finito se obtiene una resolución baja en tiempo y alta en frecuencia.
- Ancho de ventana de baja longitud, se consigue una resolución alta en tiempo y baja en frecuencia.

2.5 ANÁLISIS ESPECTRAL DE SEÑALES DE TIEMPO DISCRETO

2.5.1 TRANSFORMADA DE FOURIER EN TIEMPO DISCRETO

De igual manera que la transformada de Fourier, se utiliza para señales no periódicas, con la diferencia que el dominio de tiempo ya no es continuo, sino discreto. El resultado de la transformada será un espectro de frecuencias periódica y continua.

Las muestras se denotan por $x(n)$, donde n es un número entero que se encuentra dentro del intervalo $-\infty < n < \infty$, por lo que es correcto decir que para cualquier valor no entero de n la función no está definida y no es cero.

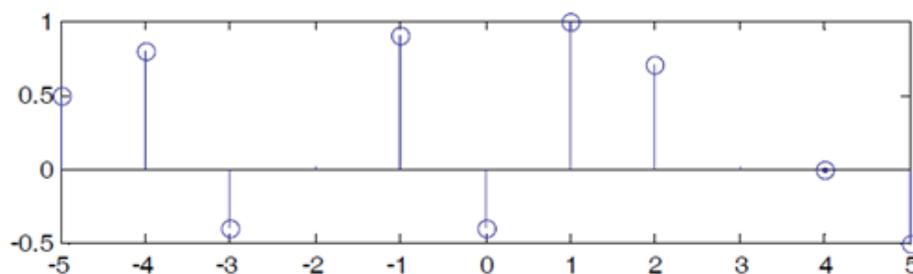
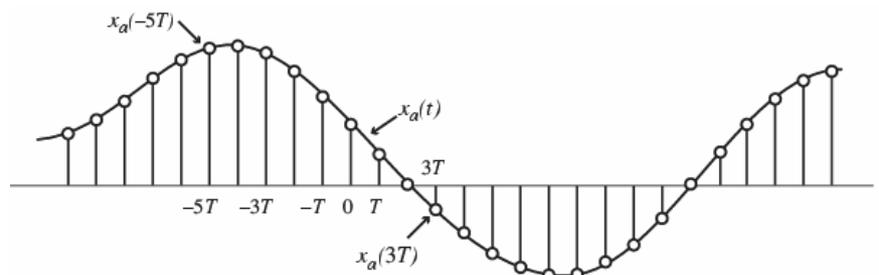


FIGURA 2.5.1.1: Señal no periódica de Tiempo Discreto



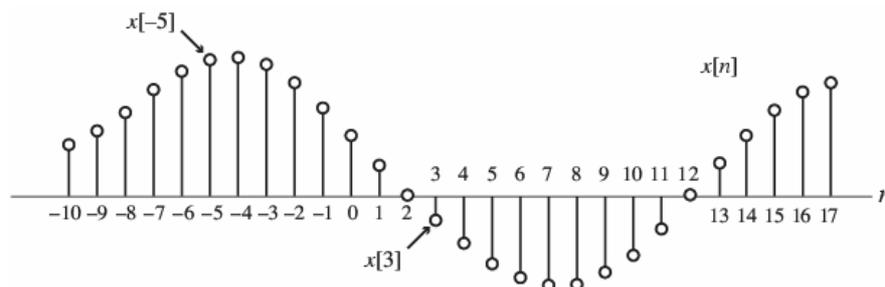


FIGURA 2.5.1.2: Señal de Tiempo Discreto a partir de muestras de una señal de Tiempo Continuo

Para definir la ecuación, es necesario realizar un pequeño cambio con respecto a la transformada de Fourier en tiempo continuo, esto es, que la variable de integración se convierte en un sumatorio, por tomar valores discretos.

$$X(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n) \cdot e^{-j\omega n} \quad [2-5]$$

Donde:

$x(n)$: Señal discreta no periódica.

ω : Frecuencia angular continua.

$X(\omega)$: Transformada en el dominio de la frecuencia.

“La transformada estará bien definida solamente si $x(n)$ es una secuencia absolutamente sumable, es decir, si satisface:

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} |x(n)| < \infty$$

La cual es la versión discreta de solamente la primera condición de Dirichlet, las otras dos no aplican por tratarse de una señal discreta.”⁴⁰

⁴⁰ Rincón, J. “Análisis en el dominio de la frecuencia”. Consultado: https://lc.fie.umich.mx/~jrincon/Apuntes%20PDS_cap_4-5.pdf

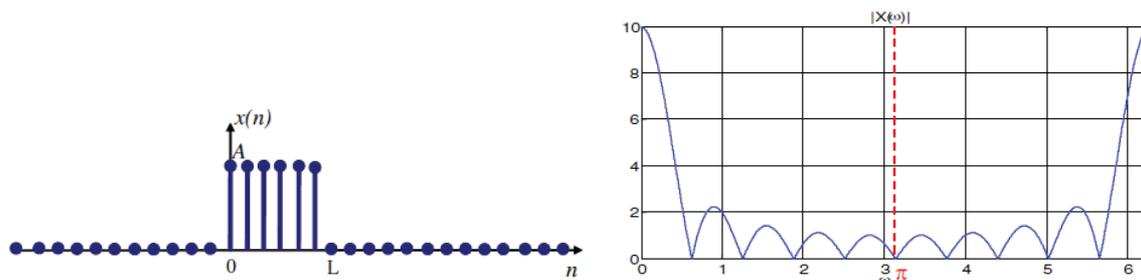


FIGURA 2.5.1.3: Espectro de frecuencia de una señal Discreta

Este tipo de señales, es el que se asemeja a la realidad, puesto que, para medir las perturbaciones de voltaje o corriente, los aparatos de medida reconstruyen la señal de entrada de tiempo continuo a partir de muestras, siempre y cuando se cumpla el teorema de muestreo también llamado el criterio de Shannon, que indica que la frecuencia de muestreo debe ser por lo menos el doble de la frecuencia máxima de la señal a ser muestreada, de lo contrario se obtendrá una visión errónea de la señal de entrada.

2.5.1.1 Inconveniente

Para tener un espectro de frecuencia periódico y continuo, se necesita infinitas muestras para representar la señal aperiódica, por tal motivo no es aplicable para realizar los cálculos en una computadora, ya que se necesitaría varias posiciones de memoria y realizar infinitas operaciones de productos y sumas.

2.5.1.2 Propiedades

Sean: $x(n)$ y $y(n)$ señales aperiódicas y espacio discreto

$X(e^{j\omega})$ y $Y(e^{j\omega})$ transformadas de Fourier periódicas con período 2π

1) Linealidad

$$a \cdot x(n) + b \cdot y(n) \rightarrow a \cdot X(e^{j\omega}) + b \cdot Y(e^{j\omega})$$

2) Desplazamiento de tiempo

$$x(n - n_o) \rightarrow e^{-j\omega n_o} X(e^{j\omega})$$

3) Desplazamiento de frecuencia

$$e^{j\omega_0 n} x(n) \rightarrow X(e^{j(\omega-\omega_0)})$$

4) Relación de Parseval

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} |x(n)|^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |X(e^{j\omega})|^2 d\omega$$

Revisar el Anexo 2 para conseguir información de las propiedades restantes.

2.5.2 TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER

Es una operación matemática ampliamente usada en el análisis espectral de una señal discreta y periódica.

“Utilizar la DFT implica que el segmento que se analiza es un único período de una señal periódica que se extiende de forma infinita; si esto no se cumple, se debe utilizar una ventana para reducir los espurios del espectro. Por la misma razón, la DFT inversa (IDFT) no puede reproducir el dominio del tiempo completo, a no ser que la entrada sea periódica indefinidamente.”⁴¹

“Se calculará $F(\omega)$ sólo sobre un conjunto de N valores de frecuencia (muestras de frecuencia) igualmente espaciados en el intervalo $[0, 2\pi]$, como se ilustra en la Figura 2.5.2.1.

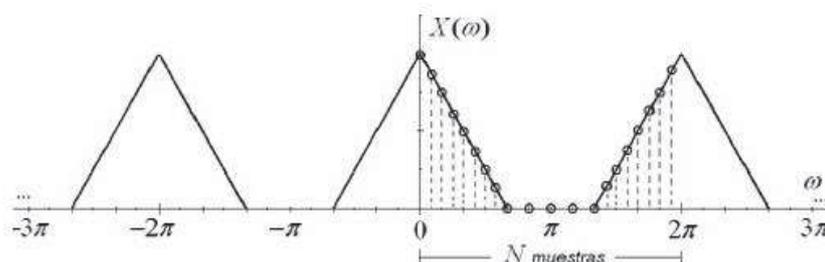


FIGURA 2.5.2.1: Muestreo de la transformada de Fourier

⁴¹ Wikipedia. “Transformada de Fourier Discreta”. Consultado: http://es.wikipedia.org/wiki/Transformada_de_Fourier_discreta

Las N muestras de frecuencia se toman igualmente espaciadas, en los valores

$$\left\{0, \frac{2\pi}{N}, \frac{2\pi(2)}{N}, \dots, \frac{2\pi(N-1)}{N}\right\}$$

De esta forma se puede calcular $F(\omega)$ sólo sobre las frecuencias $\omega_k = \frac{2\pi k}{N}$, con $k = \{0, 1, \dots, N-1\}$ de acuerdo a:

$$X(\omega_k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) \cdot e^{-j\omega_k n}$$

En la práctica todas las señales tienen longitud finita (soporte compacto), entonces la ecuación anterior puede escribirse para una señal casual de longitud L como:⁴²

$$X(\omega_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{L-1} x(n) \cdot e^{-j\omega_k n} \quad \text{para } k = \{0, 1, \dots, N-1\} \quad \mathbf{[2-6]}$$

2.5.2.1 Propiedades

Sean: $x(n)$ y $y(n)$ señales espacio discreto

X_k y Y_k transformadas de Fourier

1) Linealidad

$$ax[n] + by[n] \rightarrow a(X_k) + b(Y_k)$$

2) Desplazamiento en el tiempo

$$x[n - n_o] \rightarrow X_k e^{-j\omega_k n_o}$$

3) Desplazamiento en la frecuencia

$$x[n] \cdot e^{(j2\pi \cdot n \cdot m / N)} \rightarrow X[k - m]$$

⁴²Quiroga, J. "Análisis de Fourier". Consultado:

<http://es.scribd.com/doc/83359550/109/Transformada%20discreta%20de%20Fourier%20A0%20DFT>

4) Relación de Parseval

$$\bar{P} = \sum_{k=0}^{L-1} |X_k|^2$$

Revisar el Anexo 2 para conseguir información de las propiedades restantes.

2.5.3 TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

Es un algoritmo desarrollado para calcular la transformada discreta de Fourier de una manera eficiente.

El cálculo de X_k empleando el anterior método se puede observar que, se necesitan N multiplicaciones complejas para cada valor de k y $L-1$ sumas complejas, es decir, se requerirá N^2 multiplicaciones y N^2-N sumas para realizar el análisis sobre N puntos. En cambio este algoritmo el tiempo de procesamiento se puede considerar rápido, porque se introducen atajos matemáticos para reducir drásticamente el número de operaciones en $N \log_2 N$; este método fue desarrollado por Cooley y Tukey en 1965, y “consiste en subdividir la serie X_k en un conjunto de sucesiones de menor número de elementos. Una vez efectuada la subdivisión, se calcula la DFT a cada subconjunto y se combinan entre sí obteniendo finalmente la transformada de la serie original.”⁴³

⁴³ Moya, B. “Análisis tiempo-frecuencia de la señal de vibración de un cambiador de tomas en carga”. Consultado: <http://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/7888>

2.6 RESUMEN DE EXPRESIONES DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER

Dominio de tiempo	Periódica	No periódica	
Continua	Serie de Fourier $x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} X[k] e^{jk\omega_0 t}$ $X[k] = \frac{1}{T} \int_T x(t) e^{-jk\omega_0 t} dt$	Transformada de Fourier $x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega$ $X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt$	No periódica
Discreta	Serie de Fourier en tiempo discreto $x[n] = \sum_{k=-N}^N X[k] e^{jk\omega_0 n}$ $X[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=-N}^N x[n] e^{-jk\omega_0 n}$	Transformada de Fourier en tiempo discreto $x[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega$ $X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] e^{-j\omega n}$	Periódica
	Discreta	Continua	Dominio de la frecuencia

TABLA 2.6.1: Resumen de las expresiones matemáticas más importantes de la Transformada de Fourier

CAPÍTULO 3.- TEORÍA DE WAVELET

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo, se explica las características generales de las wavelets, sus diferentes transformadas y las propiedades que poseen las familias de funciones usadas como wavelets madres, además, se expone las distintas aplicaciones de la transformada Wavelet en otros campos, y principalmente se realiza una comparación entre la Transformada de Fourier y la Transformada Wavelet estableciendo sus ventajas y desventajas.

La transformada de Fourier es el método más utilizado para el análisis de señales unidimensionales, sin embargo presenta sus deficiencias como mostrar resultados satisfactorios solamente para señales periódicas y regulares a lo largo del tiempo (señales estacionarias).

“Siendo la función a descomponer una señal dependiente del tiempo, las funciones de la base de Fourier son de duración infinita en el tiempo, pero locales en frecuencia. De esta forma, la transformada de Fourier detecta la presencia de una determinada frecuencia pero no brinda información acerca de la evolución en el tiempo de las características espectrales de la señal. Muchos aspectos temporales de la señal, tales como el comienzo y el fin de una señal finita y el instante de aparición de una singularidad en una señal transitoria, no pueden ser analizados adecuadamente por el análisis de Fourier.”⁴⁴

Para solucionar la deficiencia que presenta la transformada de Fourier en cuanto a la resolución de tiempo para señales cuasi-estacionarias o no estacionarias, Dennis Gabor en el año de 1946, adaptó la transformada de Fourier para analizar un pequeño segmento de la señal en un determinado tiempo limitado por una operación matemática llamada ventana. Toda esta adaptación se lo conoce como la transformada corta de Fourier, y el resultado de analizar la señal será una representación tiempo – frecuencia que permite conocer la amplitud de las

⁴⁴ Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, “**Extracción de características de textura basada en la transformada Wavelet discreta**”. Consultado:
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11494/fichero/PROYECTO%252FCapitulo+4.pdf>

armónicas y el tiempo en que aparecen los espectros como se puede observar en la Figura 3.1.1.

La transformada corta de Fourier o la transformada de Fourier con ventana deslizante, a pesar de lograr el análisis espectral de señales no estacionarias y transitorias, presenta los siguientes problemas:

- Ante la aparición de una singularidad en una señal, se determinará el tiempo de ocurrencia si el ancho de la ventana abarca toda la singularidad (Figura 3.1.2).
- Si varias singularidades se encuentran muy cerca unas de otras, estos eventos no podrán ser analizados de una manera adecuada porque se encuentran dentro de un mismo ancho de ventana.
- No posee flexibilidad en la resolución de tiempo y frecuencia una vez escogido el ancho de la ventana. (Figura 3.1.3).
- “Cuanto más estrecha sea la ventana, mejor es la resolución de tiempo, pero peor en frecuencia. Además si la ventana es ancha ocurre lo contrario entre frecuencia y tiempo y con el peligro añadido de violar la condición de estacionariedad. Por tanto, si la ventana es estrecha se ciegan las bajas frecuencias, porque las frecuencias necesitan tiempo para oscilar y poder ser detectadas.”⁴⁵
- No permite reconstruir la señal original de entrada partiendo de su transformada.

⁴⁵ Martínez, J., y Castro R. M. “Análisis de la teoría de ondículas orientada a las aplicaciones en ingeniería eléctrica: Fundamentos”. Consultado: www.uta.cl/hdiaz/Documents/Fundamentos_Wavelets.pdf

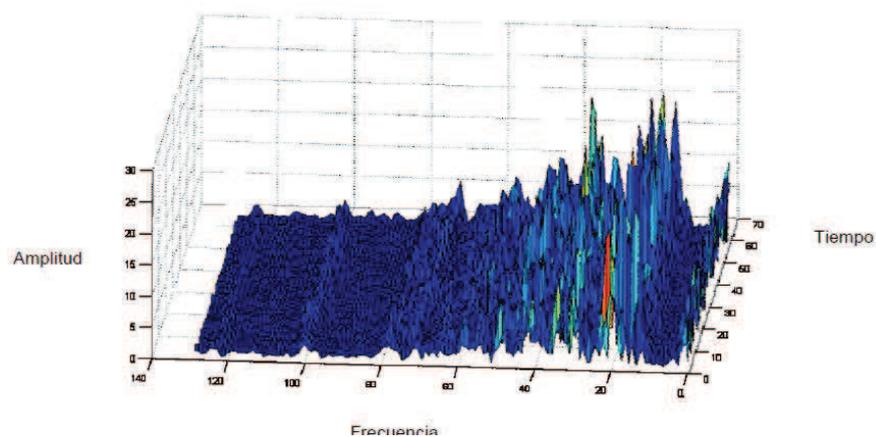
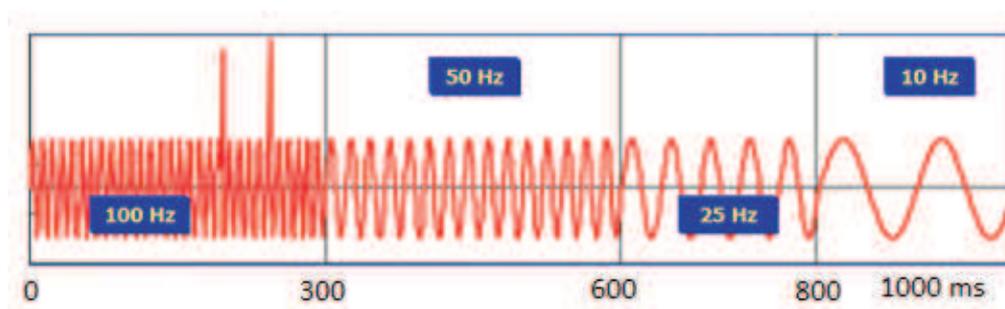


FIGURA 3.1.1: Análisis espectral de una señal no estacionaria utilizando la Transformada Corta de Fourier

(a)



(b)

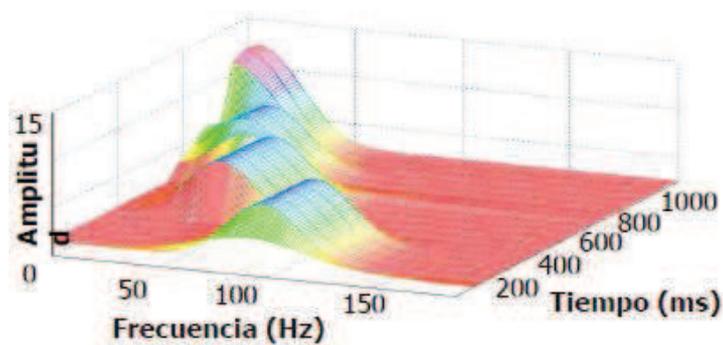


FIGURA 3.1.2: (a) Señal no estacionaria compuesta de varias frecuencias que presenta una singularidad.

(b) Transformada Corta de Fourier sin información del tiempo de ocurrencia de las singularidades



FIGURA 3.1.3: Esquema de la resolución fija en tiempo y frecuencia de la Transformada Corta de Fourier

Ante los defectos que presenta la transformada corta de Fourier, se desarrolló una nueva herramienta matemática para el análisis de señales llamada transformada Wavelet.

La transformada Wavelet permite analizar una gran cantidad de señales como por ejemplo ondas transitorias, variables en el tiempo, no estacionarias, obteniendo como resultado una excelente representación de la señal tanto en frecuencia como tiempo, porque utiliza diferentes ventanas con regiones de tamaño variables, es decir, que emplea ventanas estrechas para el análisis de frecuencias altas y ventanas de mayor longitud de tiempo para frecuencias bajas con el objetivo de envolver a todo el espectro de la señal a ser analizada.

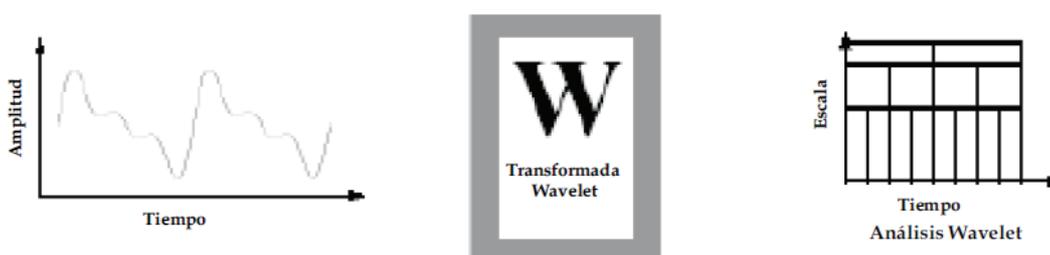


FIGURA 3.1.4: Esquema de la Transformada Wavelet

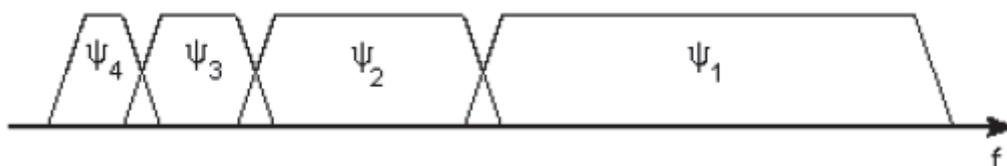


FIGURA 3.1.5: Ventanas con regiones de tamaño variable

3.2 WAVELETS

Una función wavelet es una pequeña onda (señal de naturaleza oscilatoria con una función ventana de longitud finita) irregular y asimétrica que se encuentra en el espacio, y su energía se concentra en el tiempo.

Para que una función sea considerada como una wavelet ($\psi(t)$), debe cumplir con los siguientes criterios:

1. Poseer energía infinita.

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

2. Cumplir con el criterio de la constante de admisibilidad (C_ψ).

$$C_\psi = \int_0^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(f)|^2}{f} df < \infty$$

“Donde f denota la frecuencia y la condición implica que la wavelet debe tener componente de frecuencia 0 ($\psi(0) = 0$), donde $\psi(f)$ es la transformada de Fourier de la wavelet. El valor de C_ψ dependerá de la wavelet seleccionada.”⁴⁶

3. La Transformada de Fourier debe ser real y desvanecida para frecuencias negativas en el caso de wavelets complejas.

⁴⁶González, R. A., “Algoritmo basado en Wavelets aplicado a la detección de incendios forestales”. Consultado: catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/mel/...g_ra/capitulo3.pdf

3.3 TRANSFORMADA WAVELET

“La transformada Wavelet genera bloques de información en escala y tiempo de una señal.”⁴⁷

Los bloques son generados a partir de una función llamada wavelet madre o wavelet básica $\psi(t)$, a través de las variables τ y s , parámetros de traslación y escala respectivamente.

$$\psi_{\tau,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right); \tau, s \in \mathbb{R}, s \neq 0 \quad [3-1]$$

➤ Traslación

El parámetro traslación se refiere a la orientación de la ventana a medida que la función matemática (wavelet madre) se mueve a través de la señal. Esta variable corresponde al tiempo en la transformada wavelet.

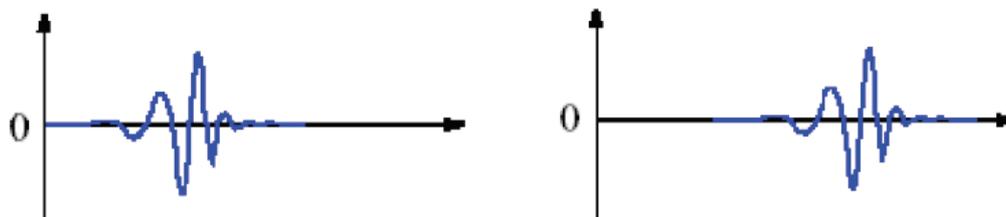


FIGURA 3.3.1: Traslación de una wavelet madre

➤ Escala

El término escala, se define de la misma manera a aquella que se utiliza en mapas. En otras palabras, una escala pequeña se emplea para obtener una visión detallada, en cambio una escala grande se aplica con el fin de realizar una visión global.

Por lo tanto, para el análisis de baja frecuencia, se requerirá una escala mayor y viceversa.

⁴⁷ González, R. A., “Algoritmo basado en Wavelets aplicado a la detección de incendios forestales”. Consultado: catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/mel/...g_ra/capitulo3.pdf

$$\text{Escala} = \frac{1}{\text{Frecuencia}}$$

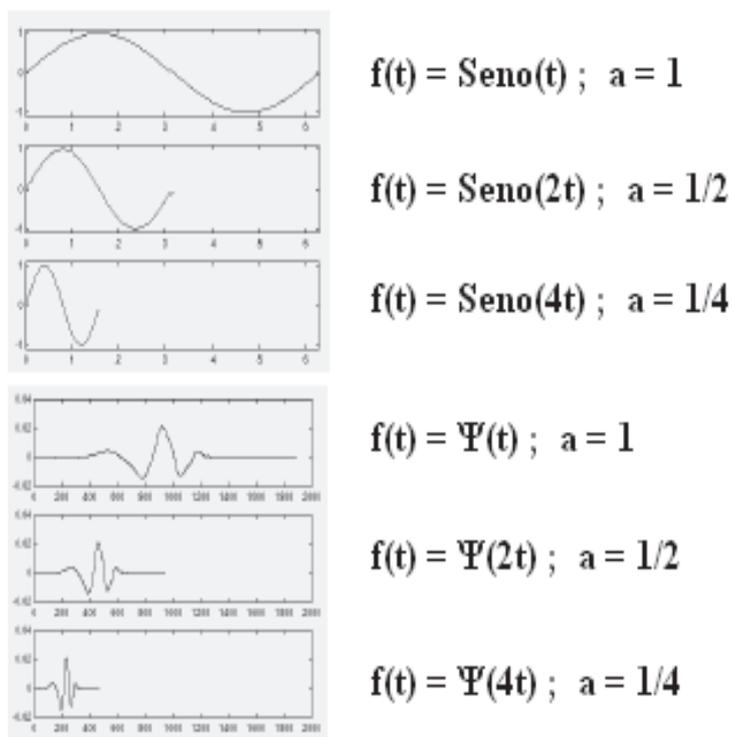


FIGURA 3.3.2: Función seno a diferentes escalas

En resumen se puede decir que:

- Escala pequeña => wavelet comprimida => capta los detalles que cambian rápidamente => altas frecuencias.
- Escalado grande => wavelet expandida => capta los detalles que cambian lentamente => bajas frecuencias.



FIGURA 3.3.3: Diferencia en implementar una escala grande y una escala pequeña en una señal

La palabra análisis, se le conoce como el proceso de transformada de una señal, mientras que síntesis se define como el procedimiento de reconstruir la señal a partir de la transformada Wavelet.

La transformada Wavelet al igual que la transformada de Fourier, manejan el método de superposición para realizar una aproximación de las señales no sinusoidales, con la única diferencia que la transformada de Fourier descompone la señal mediante ondas sinusoidales de diferentes frecuencias, mientras que el análisis Wavelet trocea la señal en versiones escaladas y desplazadas de una wavelet llamada wavelet madre.

3.3.1 FAMILIAS DE FUNCIONES

La transformada Wavelet depende de una función básica denominada Wavelet madre para descomponer la señal. Las funciones wavelets se distribuyen en familias y cada una de ellas tienen diferentes características como:

- **Momentos de desvanecimiento:** Es un parámetro que nos ayuda a determinar la forma de la wavelet y la habilidad de ésta para suprimir un polinomio dado.
- **Orden:** Variable dada por el número de desvanecimientos.
- **Soporte Compacto:** “Es la propiedad de que la wavelet sea de duración finita, lo que permite una menor complejidad en los cálculos, mejor resolución en tiempo y pobre resolución en frecuencia.”⁴⁸
- **Simetría:** Establece que los filtros sean de fase lineal.
- **Ortogonalidad:** Es una de las características más importante porque permite que los análisis sean estables. Matemáticamente es una propiedad que se obtiene cuando el producto punto de dos vectores es igual a cero.

Las familias de funciones existentes en la actualidad son numerosas, pero las más usadas son:

⁴⁸ González, R. A., “Algoritmo basado en Wavelets aplicado a la detección de incendios forestales”. Consultado: catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/mel/...g_ra/capitulo2.pdf

3.3.1.1 Haar

Es una de las primeras wavelets en aparecer y la más empleada para el análisis de señales usando transformadas continuas y discretas debido a su forma de onda sencilla (Función escalón). Posee un solo momento de desvanecimiento y la función que cumple la wavelet es:

$$\psi(t) = \begin{cases} 1; & 0 \leq t \leq \frac{1}{2} \\ -1; & \frac{1}{2} \leq t \leq 1 \\ 0; & \text{otro caso} \end{cases}$$

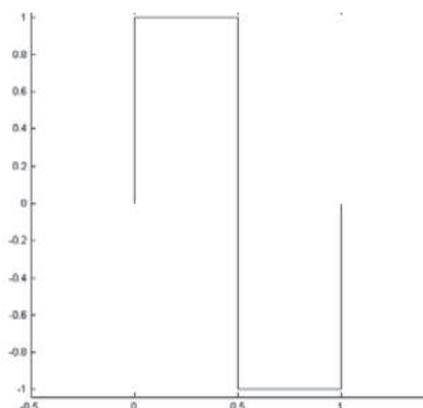


FIGURA 3.3.1.1.1: Familia Haar

3.3.1.2 Daubechies

Llamado como dbN, donde N es el orden que depende del número de momentos de desvanecimiento deseado. Esta wavelet tiene la propiedad de la ortogonalidad y se puede utilizar al igual que en el caso anterior para transformadas discretas y continuas. La wavelet Daubechies de orden 1 es igual a la wavelet Haar.

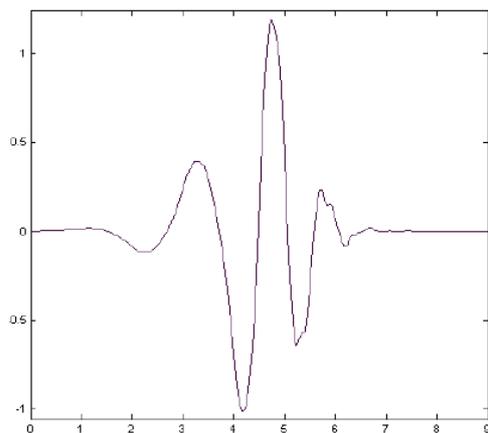


FIGURA 3.3.1.2.1: Familia Daubechies de orden 5 (db5)

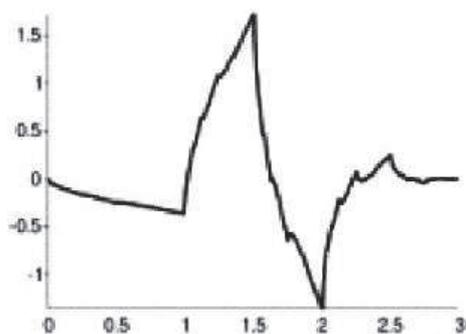


FIGURA 3.3.1.2.2: Wavelet Daubechies de orden 2 (db2)

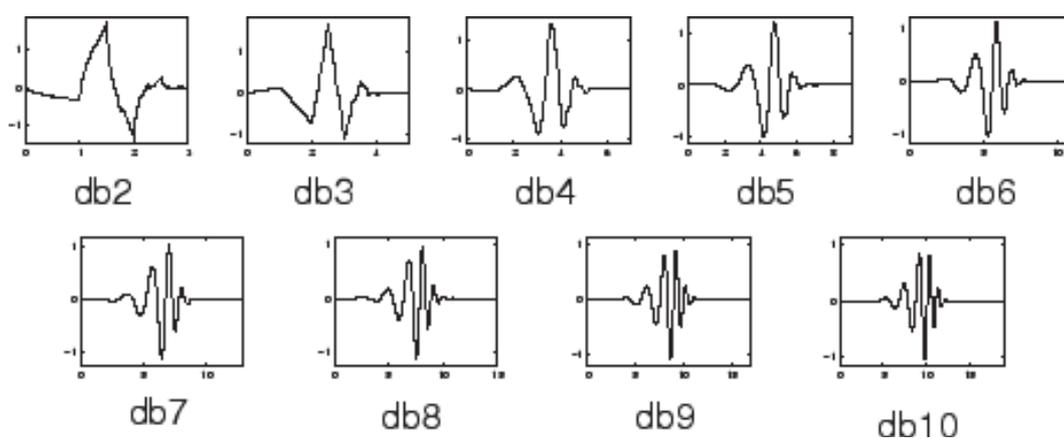


FIGURA 3.3.1.2.3: Familia Daubechies de orden 2 al 10

3.3.1.3 Symmlets

Aparecen con el objetivo de adicionar algo de simetría a la función Daubechies, se denota como symN, donde N es el orden que va desde 2 hasta 45 y cumple con la propiedad de ortogonalidad.

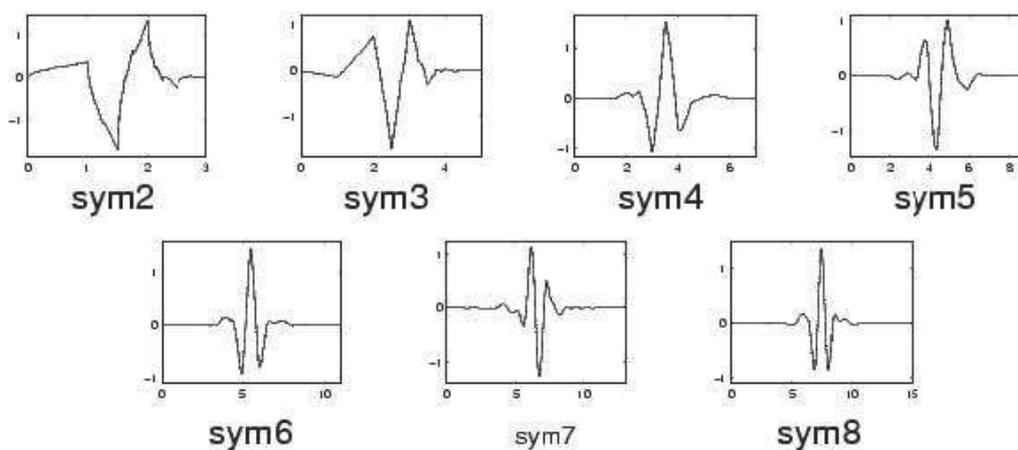


FIGURA 3.3.1.3.1: Wavelet Symmlet de orden 2 al 8

3.3.1.4 Sombrero Mexicano

La wavelet sombrero mexicano se define como la segunda derivada de la función de probabilidad Gaussiana (distribución normal).

Esta wavelet madre es simétrica al igual que la wavelet Haar, permitiendo así, el análisis de señales de un modo simétrico.

La función que define esta familia es:

$$\psi(t) = \text{mexh}(t) = \frac{2(1-t^2)e^{-\frac{t^2}{2}}}{\pi^{\frac{1}{4}}\sqrt{3}}$$

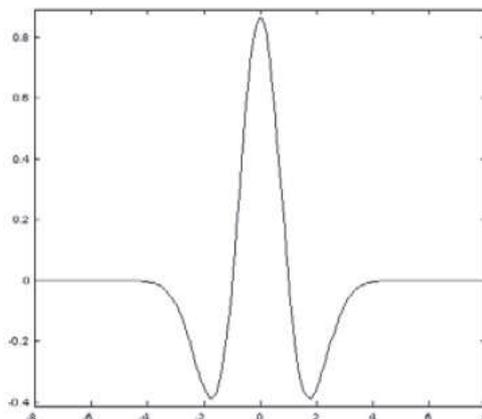


FIGURA 3.3.1.4.1: Wavelet Sombrero Mexicano

3.3.1.5 Coiflets

Denominado como coifN , esta wavelet puede ser simétrica o asimétrica dependiendo del orden N (1-5); tiene mayor número de momentos de desvanecimiento, porque para cada orden se tiene $2N$ de momentos de desvanecimiento.

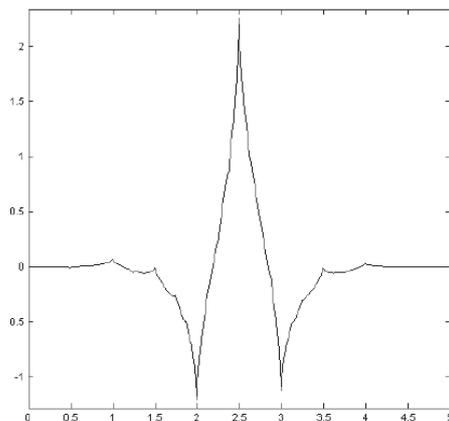


FIGURA 3.3.1.5.1: Familia Coiflet de orden 1 (coif1)

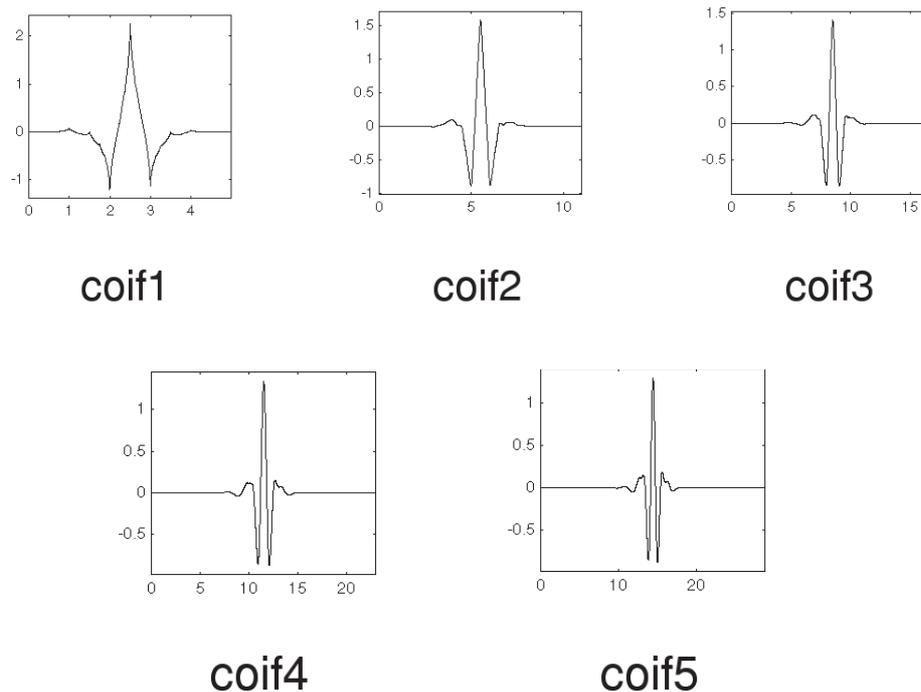


FIGURA 3.3.1.5.2: Wavelet Coiflet de orden 1 al 5

3.3.1.6 Biortogonales

“Se caracterizan por su fase lineal, lo cual es requisito fundamental de cara a la reconstrucción. A diferencia de las demás familias, provee una función para descomposición y otra para reconstrucción.”⁴⁹

No cumple la propiedad de ortogonalidad y la orden para la reconstrucción y descomposición se denota con Nr. y Nd respectivamente.

Todas las órdenes de las biortogonales son:

Nr.	Nd
1	1, 3, 5
2	2, 4, 6, 8
3	1, 3, 5, 7, 9
4	4

⁴⁹ Universidad de Sevilla, “La Transformada Wavelet”. Consultado: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11511/fichero/PFC+Silvia+Blasco+Vadillo%252FCap%C3%ADtulo+9+-+Anexo+2.pdf>

5	5
6	8

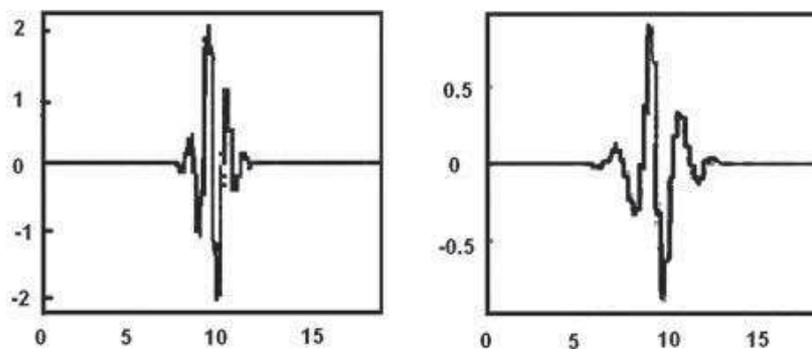
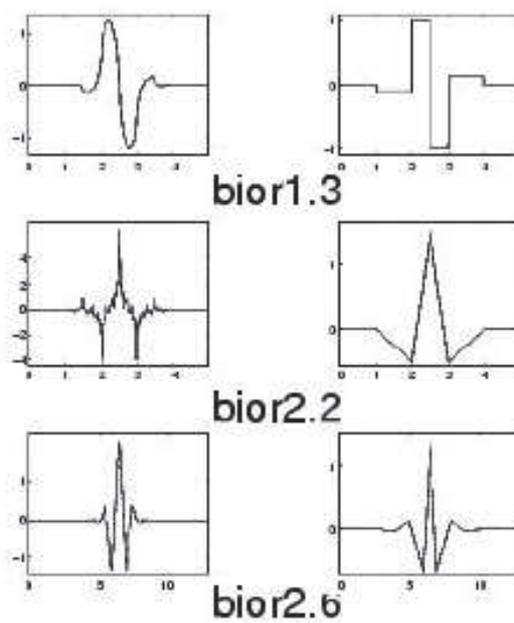


FIGURA 3.3.1.6.1: Familia Biortogonal de orden 3.9 (Nr. Nd)



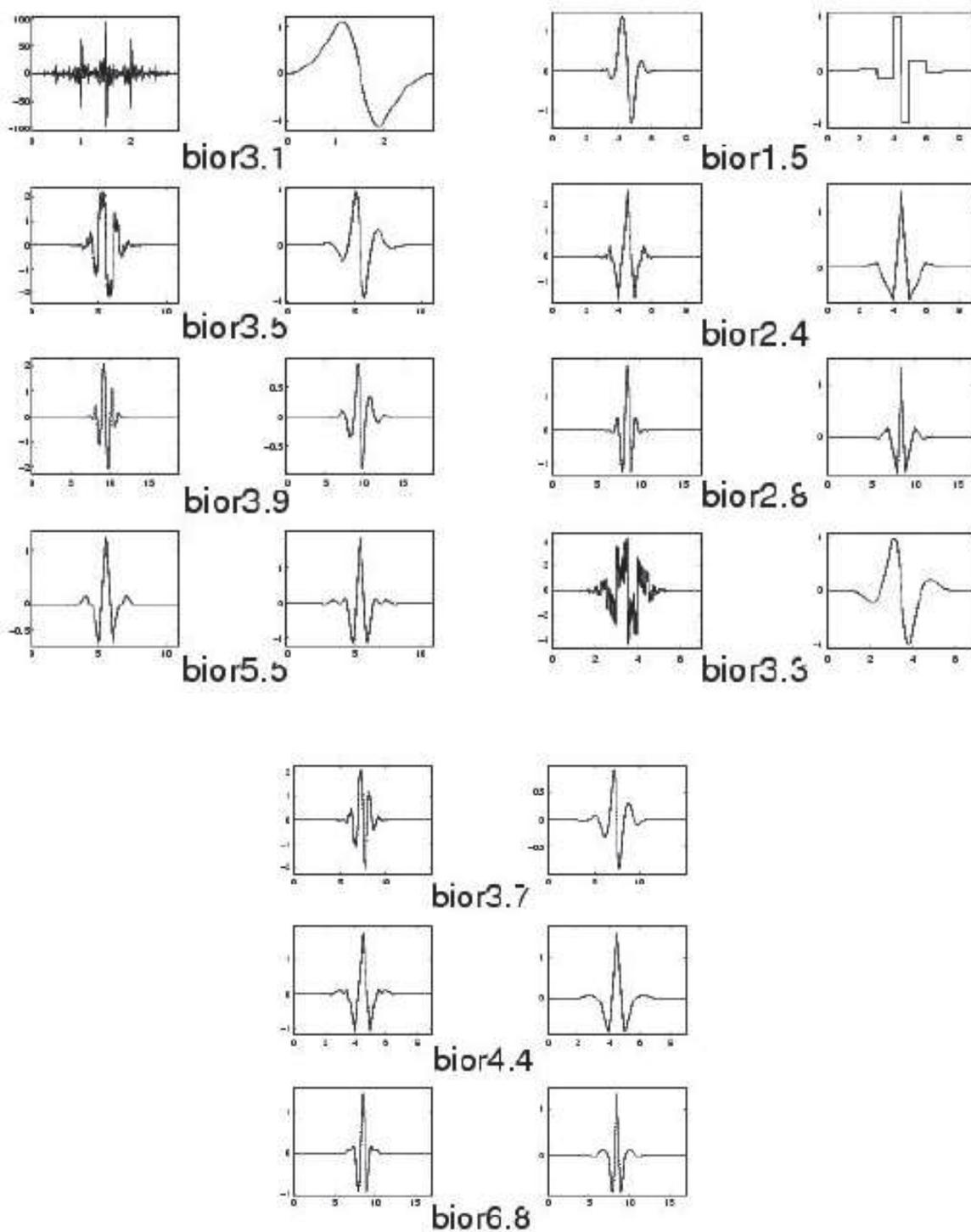


FIGURA 3.3.1.6.2: Familias Biortogonales utilizados en el paquete computacional (MATLAB)

3.3.1.7 Morlet

Carece de la propiedad de ortogonalidad, y se emplea solamente para realizar la transformada wavelet continua.

La función que define esta wavelet es:

$$\psi(t) = \text{morl}(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} \cos(5t)$$

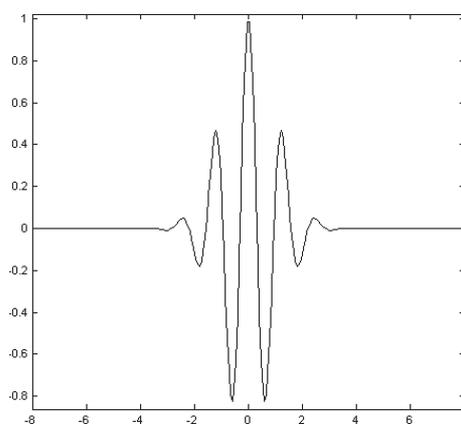


FIGURA 3.3.1.7.1: Wavelet Morlet

3.3.1.8 Meyer

Creada por Yves Meyer en el año 1985, con características de ortogonalidad y simetría.

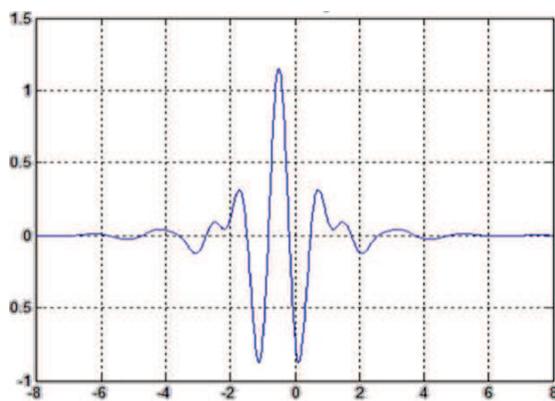


FIGURA 3.3.1.8.1: Función Meyer

Para más detalles de las propiedades de cada una de las familias antes explicadas, revisar el Anexo 3.

No existe un criterio definido para determinar la familia idónea para un caso específico, sin embargo su elección dependerá de su aplicación que se le vaya a dar; por lo tanto, la buena elección definirá si se obtienen resultados correctos o no.

3.4 CLASIFICACIÓN DE LA TRANSFORMADA WAVELET

La transformada Wavelet puede clasificarse en tres tipos: Continua, Semidiscreta y Discreta. La principal diferencia entre cada una de las transformadas, es la forma en que se representa los parámetros de escala y translación (continuas o discretas).

3.4.1 TRANSFORMADA WAVELET CONTINUA

“La expresión matemática de la Transformada Wavelet Continua (CWT) se define como la suma para todo instante de tiempo de la señal $f(t)$ multiplicada por versiones escaladas y desplazadas de una función wavelet base.”⁵⁰

$$Coef(escala, posición) = \frac{1}{\sqrt{escala}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \psi(escala, posición) dt \quad [3-2]$$

Como se observa en el párrafo anterior, la idea principal que maneja esta transformada para la descomposición de una señal es similar a la transformada de Fourier, puesto que el primer método lo realiza mediante una suma de ondas sinusoidales de diferentes frecuencias, y este método lo realiza a través de diferentes valores de escala y traslación en base a la wavelet madre seleccionada.

⁵⁰ Universidad de Sevilla, “La Transformada Wavelet”. Consultado: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11511/fichero/PFC+Silvia+Blasco+Vadillo%252FCap%C3%ADtulo+9+-+Anexo+2.pdf>

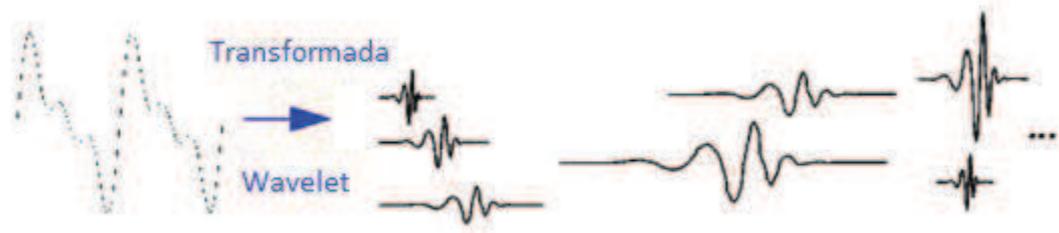


FIGURA 3.4.1.1: Explicación gráfica de la Transformada Wavelet Continua

3.4.1.1 Pasos a seguir para determinar la Transformada Wavelet Continua

- 1) Escoger la wavelet madre que tenga la propiedad de realizar esta transformada, y la que mejor se ajuste a la señal a ser analizada, para de esa manera obtener resultados óptimos.
- 2) Seleccionar el valor de la escala (s) a la wavelet madre, y situarla al comienzo de la señal ($t = 0$).
- 3) Multiplicar la señal $f(t)$ y la wavelet madre en la escala escogida y $t = 0$, y ese resultado se lo integra a través de todo el espacio de tiempo que cubre la wavelet y finalmente multiplicar por $1/\sqrt{s}$, “con el objetivo de normalizar la energía y de este modo obtener una función transformada con la misma energía a cualquier escala.”⁵¹

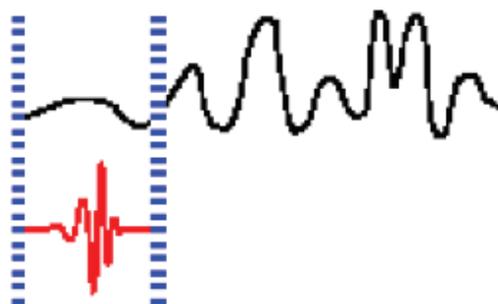


FIGURA 3.4.1.1.1: Paso número 3 para calcular la Transformada Wavelet Continua

⁵¹ Acevedo, L. “Computación Paralela de la Transformada Wavelet; Aplicaciones de la transformada Wavelet al álgebra lineal numérica”. Consultado: www.dsic.upv.es/docs/bib-dig/tesis/etd-05152009-123504/phd.pdf

- 4) Para el mismo valor de la escala s , se desplaza la wavelet madre hacia el sentido positivo del eje del tiempo en τ tiempo, y repetir el paso 3. Este procedimiento se lo realiza hasta que la wavelet cubra toda la señal.

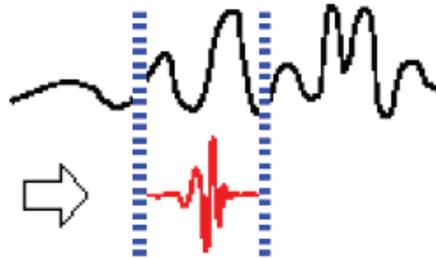


FIGURA 3.4.1.1.2: Paso número 4 para calcular la Transformada Wavelet Continua

- 5) Cambiar el valor de la escala y repetir los pasos 2 al 4.

Cabe señalar que a menor escala, mayor número de traslaciones se tendrá y se aumentará el número de operaciones.

Los valores de escala, tiempo y coeficientes (amplitud) se puede representar en un plano tridimensional como se aprecia en la Figura 3.4.1.1.3:

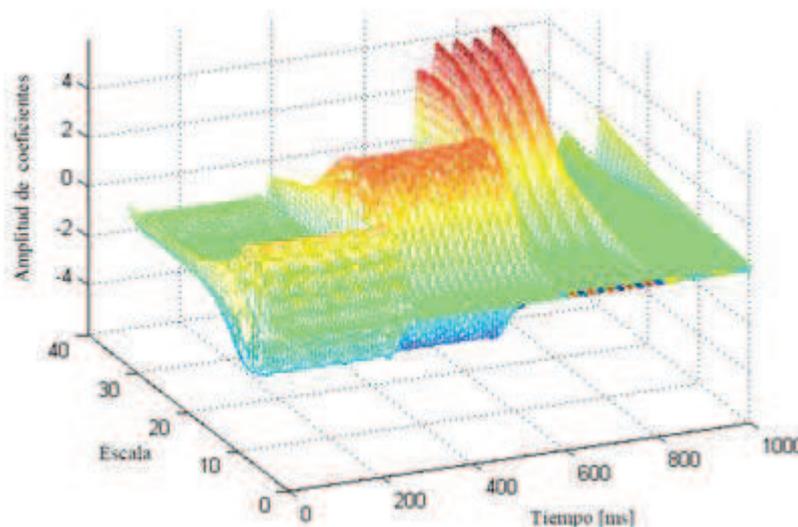


FIGURA 3.4.1.1.3: Plano tridimensional de las variables escala, tiempo y coeficientes

3.4.1.2 Ejercicio de aplicación

➤ Realizar el análisis espectral de la siguiente señal:

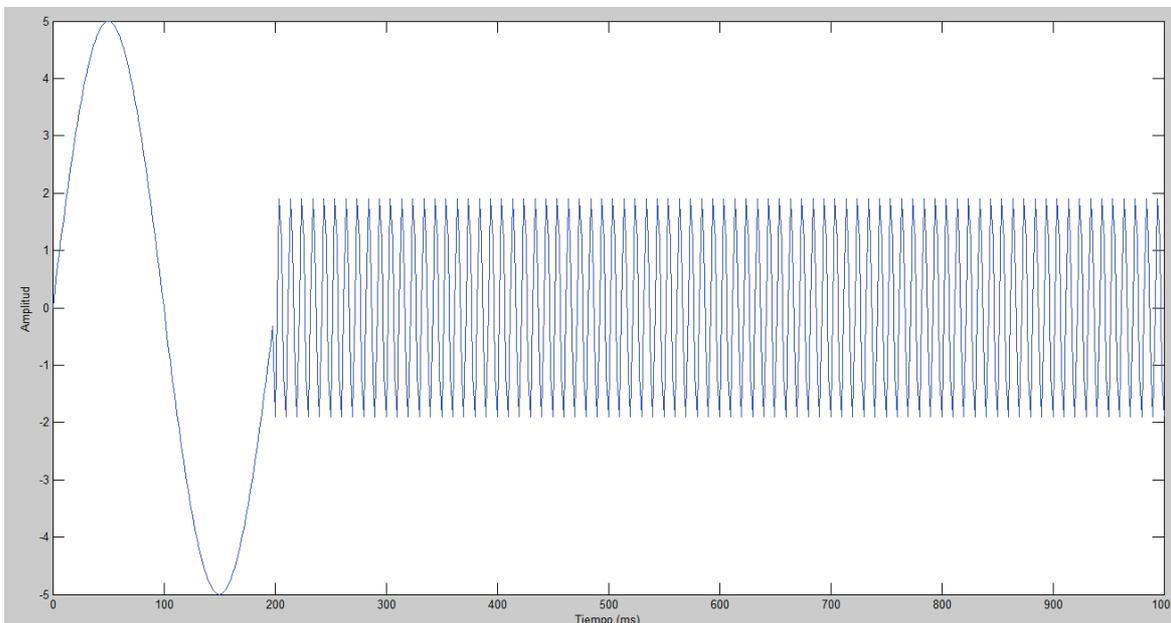
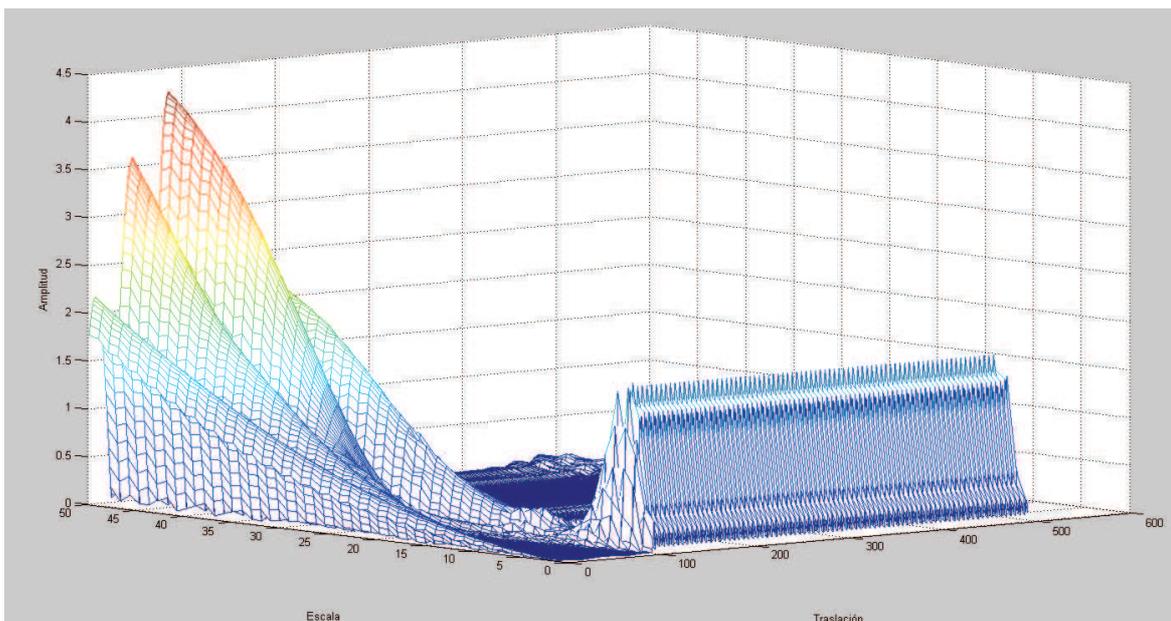


FIGURA 3.4.1.2.1: Señal no estacionaria de frecuencias 5 y 100 Hz.

Aplicando la ecuación [3-2] y escogiendo la wavelet madre Daubechies de orden 6 (db6), se obtiene la siguiente gráfica:



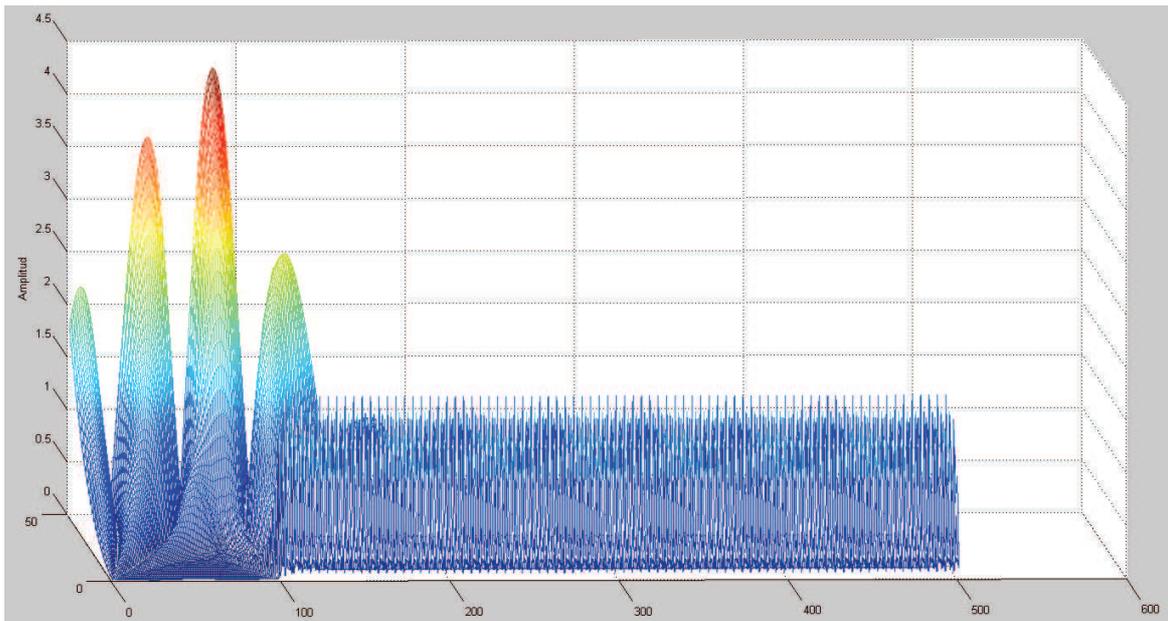


FIGURA 3.4.1.2.2: Transformada wavelet continua de la Figura 3.4.1.2.1 vista en diferentes ángulos

En la Figura 3.4.1.2.2, queda demostrado que la variable escala es inversamente proporcional a la frecuencia, puesto a que en la primera parte de la señal no estacionaria, el eje de la escala presenta valores altos a pesar de que la señal tiene una frecuencia de 5 Hz, en cambio el eje de la escala muestra valores bajos para la segunda parte de la señal que posee una frecuencia de 100 Hz.

Y la variable traslación como se explicó en el literal 3.3, corresponde al tiempo al igual que la transformada de Fourier, o también este parámetro se lo puede considerar el lugar en donde se encuentra la wavelet madre.

3.4.2 TRANSFORMADA WAVELET SEMIDISCRETA

Esta transformada, utiliza las variables de traslación y escala como valores discretos y no continuos como el caso de la Transformada Wavelet Continua.

“La forma más común de discretizar los valores de τ y s es utilizar una red diádica, es decir.”⁵²

$$s = 2^{-j} \quad [3-3]$$

$$\tau = k2^{-j} \quad [3-4]$$

Donde: $j, k \in Z$

La transformada inversa es posible si y solamente si, cumple la siguiente condición:

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

Donde A y B son dos constantes positivas, y $f(t)$ es una función continua en el tiempo. Si las constantes A y B son iguales a uno, la reconstrucción de la señal es posible mediante el análisis multiresolución, porque la transformada es ortogonal.

3.4.3 TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA

Para el cálculo computacional, es necesario que la señal a ser analizada esté representada en forma discreta, al igual que los parámetros de escala y traslación de la wavelet madre, utilizando las ecuaciones [3-3] y [3-4] respectivamente. El algoritmo fue desarrollada por Stéphane Mallat en el año de 1984, mediante el uso de filtros de nivel (pasa bajos y pasa altos), con el objetivo de dividir la señal en dos categorías y obtener los coeficientes de:

- 1) Aproximación mediante el uso de un filtro pasa bajos.
- 2) Detalle aplicando a la señal un filtro pasa altos.

Por lo tanto, si $f(n)$ es la función discreta; la transformada wavelet discreta será:

$$C[j, k] = \sum_{n \in Z} f(n) \cdot \psi_{j,k}(n) \quad [3-5]$$

⁵² Acevedo, L. “Computación Paralela de la Transformada Wavelet; Aplicaciones de la transformada Wavelet al álgebra lineal numérica”. Consultado: www.dsic.upv.es/docs/bib-dig/tesis/etd-05152009-123504/phd.pdf

Donde:

$$\psi_{j,k}(n) = 2^{-\frac{j}{2}} \cdot \psi(2^{-j}n - k) \quad [3-6]$$

Para reconstruir la señal a partir de la transformada wavelet discreta, se emplea la transformada inversa definida como:

$$f(n) = \sum_{j \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} C[j, k] \cdot \psi_{j,k}(n) \quad [3-7]$$

3.5 APLICACIONES DE LA TRANSFORMADA WAVELET

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

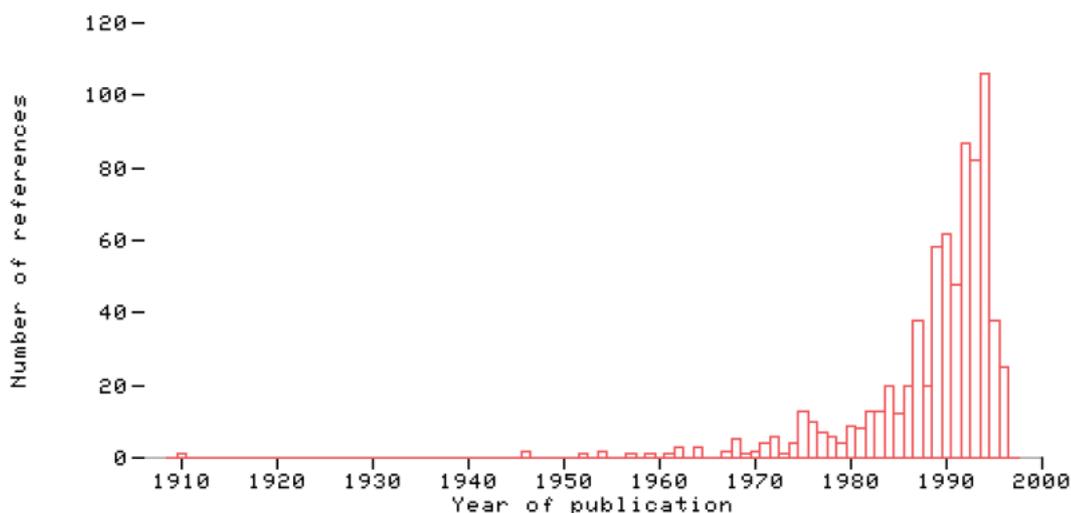


FIGURA 3.5.1: Evolución del número de publicaciones a través de los años referentes a las Wavelets

Las Wavelets tienen bastantes aplicaciones en el campo de la ingeniería y ciencia. Entre las más importantes se puede mencionar:

3.5.1 SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

La aplicación de la transformada Wavelet en este campo fue introducido por Robertson y Ribeiro en el año 1994; desde entonces las publicaciones se han incrementado por el hecho que permiten identificar fenómenos transitorios en el estudio de señales de voltaje o corriente de una manera eficiente.

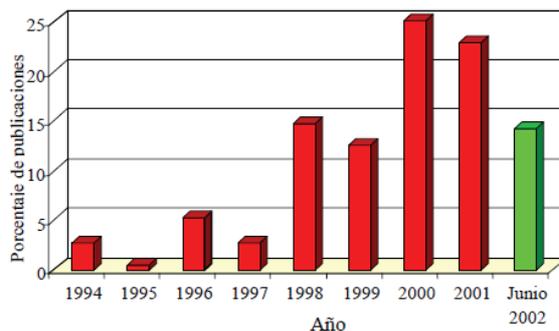


FIGURA 3.5.1.1: Publicaciones de las Wavelets aplicados a los Sistemas Eléctricos de Potencia

Los sectores más enfocados para la aplicación de la transformada Wavelet en los Sistemas Eléctricos de Potencia son:

3.5.1.1 Protecciones Eléctricas

En el campo de las protecciones eléctricas la implementación de las Wavelets pueden aplicarse en lo siguiente:

- Mejorar el funcionamiento de los relés, empleando la transformada Wavelet discreta.

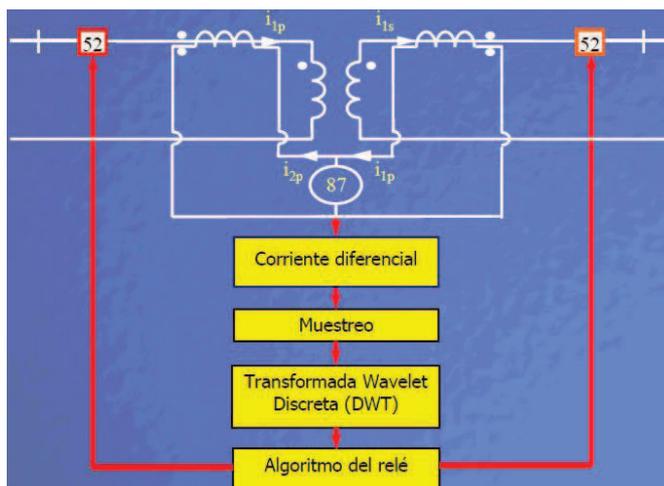


FIGURA 3.5.1.1.1: Pasos a seguir para determinar el algoritmo de un relé diferencial

- Los resultados obtenidos aplicando la transformada Wavelet en los transitorios provocados por fallas permanentes en un sistema de transmisión, permiten detectar de una manera eficiente las características relevantes de la falla.
- Desarrollar algoritmos mediante el análisis espectral de las señales de voltaje o corriente, para la protección de barras, generadores, etc.

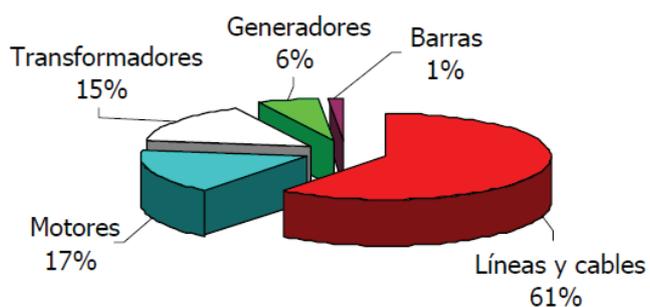
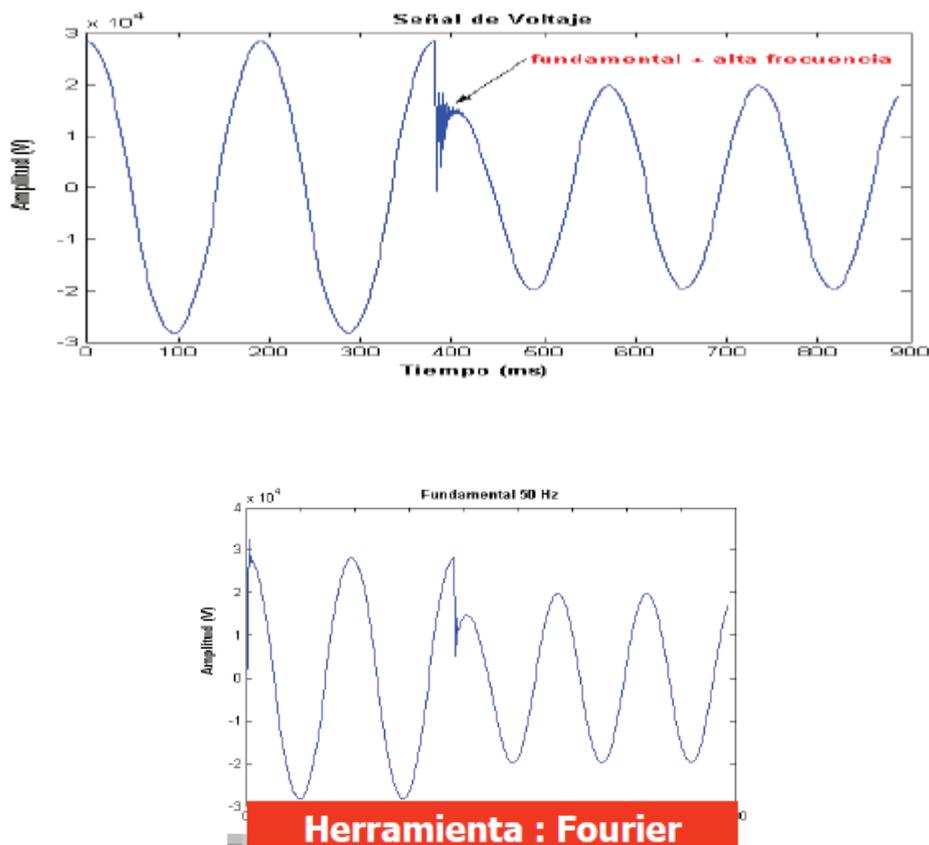


FIGURA 3.5.1.1.2: Publicaciones utilizando las Wavelets en los Sistemas de Protección

Técnica	Descripción	Aplicación
Norma del vector de coeficientes del detalle d_j	$\sqrt{\sum_k d_j^2(k)}$	Detección y localización de fallas
Combinación de información	$\text{Im}(CCWT) \cdot \text{atan}(\text{Im}(CCWT) / \text{Re}(CCWT))$	Localización de fallas
Valor efectivo (rms) del detalle d_j o de la aproximación a_j	$\sqrt{\sum_k d_j^2(k) / 2^j \cdot \text{long}(d_j)}$	Detección de fallas de alta impedancia (HIF)
Ponderación del detalle d_j	$\alpha \cdot \max(d_j(k)) / \sum_k d_j(k) $	Protección diferencial de transformador
Modulus Máxima	$\text{Max} WT(j, k) _{t=\varepsilon}^{t=\Delta t+\varepsilon}$	Protección direccional

TABLA 3.5.1.1.1: Técnicas y criterios de discriminación con Wavelets

En la Figura 3.5.1.1.3, se observa que la transformada Wavelet presenta un mejor análisis que la transformada de Fourier en los Sistemas de Protección.



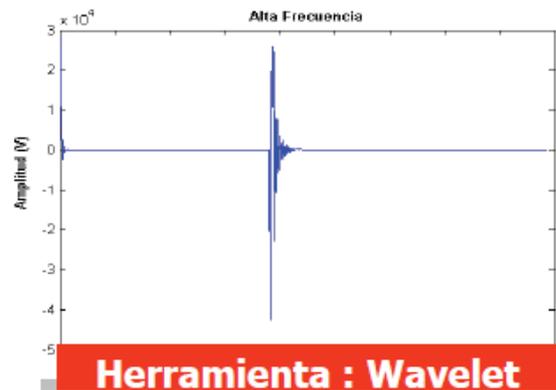


FIGURA 3.5.1.1.3: Análisis de una señal de voltaje aplicando la transformada de Fourier y Wavelet en los Sistemas de Protección

3.5.1.2 Calidad de la Energía Eléctrica

Análisis tiempo-frecuencia de las señales no estacionarias que provocan el deterioro de la energía eléctrica como por ejemplo armónicos, interarmónicos, flicker, interrupciones de larga y corta duración, etc.

La medición de armónicos e interarmónicos, se lo realiza mediante un análisis multiresolución; en cambio para la medición del flicker se utiliza la transformada Wavelet compleja.

No obstante, existen algunas publicaciones que determinan que no es conveniente utilizar las Wavelets en ciertas perturbaciones, como es el caso de los huecos de voltaje, debido “a que los filtros wavelets no son capaces de detectar la profundidad del hueco, parámetro de extremada importancia para el análisis completo de esta perturbación.”⁵³

3.5.1.3 Transitorios

Para los transitorios de un Sistema Eléctrico de Potencia, la transformada Wavelet puede usarse como:

⁵³ Díaz, H. N. y Castro, R. M. “**Aplicación de la Transformada Wavelet en los Sistemas Eléctricos de Potencia**”. Consultado: http://www.uta.cl/hdiaz/Papers/Aplicacion_de_la_transformada_wavelet_en_los_sistemas_de_potencia.pdf

- Clasificación según el espectro de la señal transitoria partiendo de la transformada Wavelet.
- Implementación de la wavelet madre “Morlet” para determinar los valores de voltaje y corriente que se generan a causa de una perturbación transitoria.
- “Identificación de la corriente de conexión (Inrush) basada en wavelet tiene la ventaja de que diferentes clases de corrientes de conexión en estos equipos pueden ser correctamente identificadas frente a fallas internas en el mismo; además, fallas externas en transformadores pueden distinguirse de las fallas internas.”⁵⁴

3.5.1.4 Estimación de la demanda

“La estimación de la demanda es clave para la eficiente gestión de los sistemas eléctricos de potencia. Los trabajos se han centrado en la predicción de la carga en el corto plazo empleando la transformada Wavelet en combinación con las redes neuronales.

Como la demanda eléctrica en cualquier instante se puede asumir como una combinación lineal de diferentes componentes, desde el punto de vista del análisis de la señal, la carga puede ser también considerada como una combinación lineal de diferentes frecuencias. Cada componente de la carga puede ser representado por tanto por una o diferentes frecuencias.”⁵⁵

3.5.1.5 Descargas parciales

Las descargas parciales al ser señales no estacionarias de corta duración y baja amplitud, son difíciles de analizar, pero la transformada Wavelet al poseer la capacidad de elegir el tamaño de las ventanas a través de diferentes valores de

⁵⁴ Díaz, H. N. y Castro, R. M. “**Aplicación de la Transformada Wavelet en los Sistemas Eléctricos de Potencia**”. Consultado:
http://www.uta.cl/hdiaz/Papers/Aplicacion_de_la_transformada_wavelet_en_los_sistemas_de_potencia.pdf

⁵⁵ Díaz, H. N. y Castro, R. M. “**Aplicación de la Transformada Wavelet en los Sistemas Eléctricos de Potencia**”. Consultado:
http://www.uta.cl/hdiaz/Papers/Aplicacion_de_la_transformada_wavelet_en_los_sistemas_de_potencia.pdf

las variables de escala y traslación es capaz de visualizar las discontinuidades, permitiendo así realizar una identificación de las variaciones presentes en la descarga, ya sea en transformadores, subestaciones, etc.

3.5.1.6 Medida de potencia

La transformada Wavelet Packet al dividir la frecuencia de la señal en varios niveles uniformes, es posible obtener las componentes individuales de los armónicos, además se puede calcular los valores eficaces de voltajes o corrientes y de esa forma obtener la potencia.

3.5.2 MEDICINA

En los últimos años, la transformada Wavelet está facilitando el diagnóstico de enfermedades como Alzheimer, por medio de análisis espectral de los electroencefalogramas. El método que se aplica es la comparación de los diferentes patrones que presentan los pacientes enfermos y las personas que no la padecen.

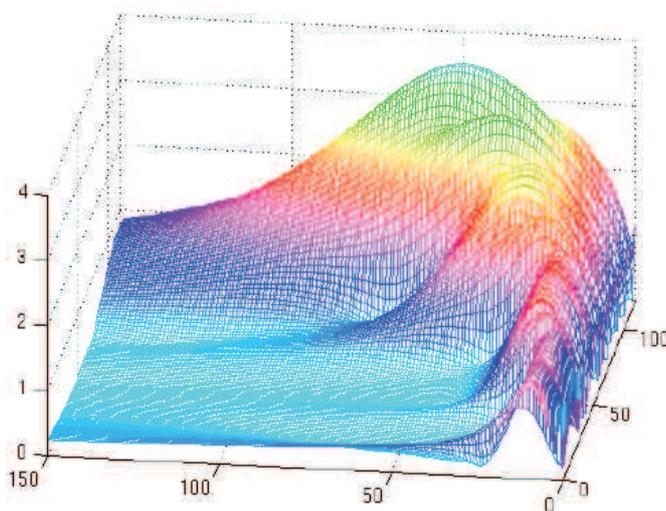


FIGURA 3.5.2.1: Análisis espectral de una persona con Alzheimer

3.5.3 DISMUNUCIÓN DEL RUIDO

Como el nombre lo indica, disminuye el ruido tanto en señales como también en imágenes bidimensionales.

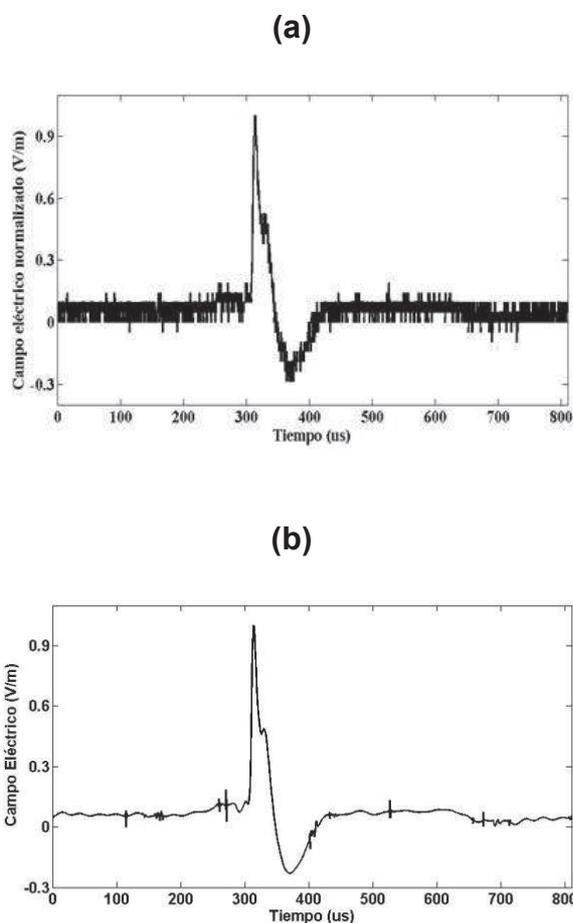


FIGURA 3.5.3.1: Señal de campo de eléctrico con:

(a) Alto contenido de ruido

(b) Resultado final luego de aplicar la transformada Wavelet para eliminar el ruido



FIGURA 3.5.3.2: Comparación entre la Transformada de Fourier y Wavelet para el filtrado de imágenes

3.6 FOURIER VERSUS WAVELET

➤ **Ventajas**

- La eliminación del ruido en base a las wavelets, hace que sea un método con mayor eficacia.
- No se pierde la información del tiempo aplicando la transformada Wavelet en las señales altamente no estacionarias.

➤ **Desventajas**

- No permite calcular la convolución de una señal.
- “Es una técnica reciente, aunque en los últimos años se ha hecho un gran esfuerzo por darle todo el rigor matemático que tiene la transformada de Fourier y unificar métodos y notaciones, el ritmo de aparición de publicaciones sobre el tema hace que no sea tarea fácil.”⁵⁶

⁵⁶ López, J. “Concepto y Aplicaciones para el análisis de señales”. Consultado: nuclear.fis.ucm.es/webgrupo/archivos/WAVELETS.ppt

➤ Diferencias

- La transformada de Fourier descompone una señal en un conjunto de ondas sinusoidales de diferentes frecuencias.

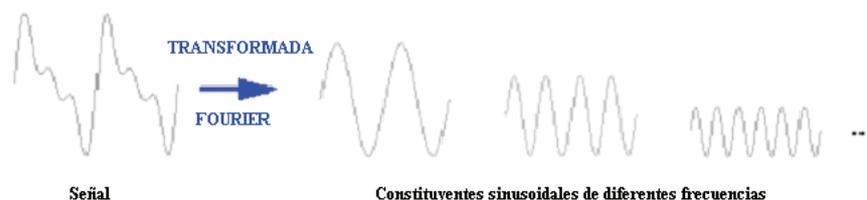


FIGURA 3.6.1: Descomposición de una señal aplicando la Transformada de Fourier

- “La transformada Wavelet divide la señal en un conjunto de ondas wavelets con distinta posición (adelantar o retrasar) y escala (estirar o encoger) del wavelet original.”⁵⁷
- Las wavelets indican de una manera la exacta las discontinuidades de una señal a través del tiempo.

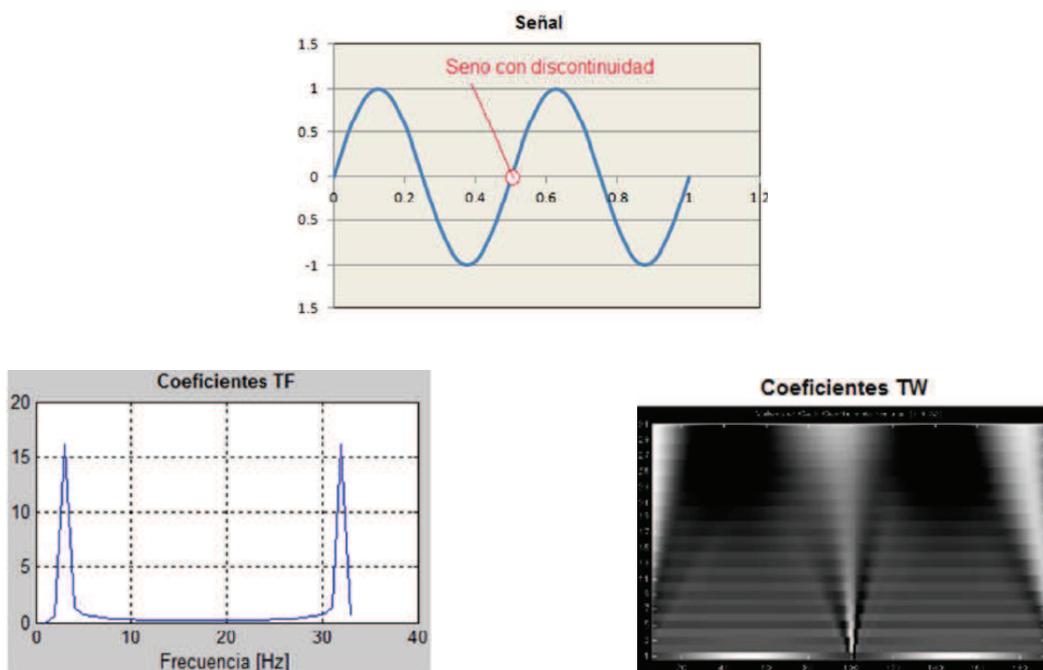


FIGURA 3.6.2: Coeficientes de Fourier y Wavelet frente a una discontinuidad de una señal

⁵⁷ Asaustre, O. y Gómez, C. “Compresión con Wavelet”. Consultado: www.sav.us.es/formaciononline/.../wavelet/wavelet-presentacin.ppt

- El tamaño de la ventana de la transformada Wavelet es variable dependiendo de las características de la señal, en cambio en la transformada corta de Fourier es fija.
- Las ondas sinusoidales son predecibles a diferencia de las wavelets que son irregulares.

➤ **Semejanza**

- Los dos métodos se basan en el mismo principio de superposición de señales.

CAPÍTULO 4.- MÉTODO DE WAVELET PACKET PARA DETERMINAR LA MEDIDA DE LAS PERTURBACIONES

4.1 ANÁLISIS MULTIRESOLUCIÓN (MRA)

El análisis multiresolución permite dividir la señal en diferentes resoluciones de tiempo y en varias bandas uniformes de frecuencia mediante el uso de bancos de filtros, los mismos que se crearon por Stéphane Mallat en la Transformada Wavelet Discreta para obtener los coeficientes de aproximación y detalle. Estos coeficientes nacen a raíz de que las señales se forman a partir de dos componentes, el primero es acerca de los elementos de baja frecuencia que otorgan la mayor información o identidad a la señal y el segundo son aquellos que reúnen las características más particulares llamados los elementos de alta frecuencia.

La idea de cómo los filtros actúan sobre la señal para determinar los coeficientes, se puede observar en la Figura 4.1.1:

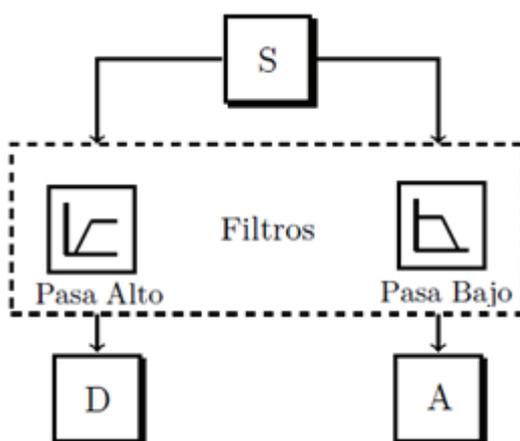


FIGURA 4.1.1: Descomposición de una señal a través de un banco de filtros pasa bajos y pasa altos

Donde:

A = Coeficientes de aproximación

D = Coeficientes de detalle

S = Señal a analizar

“Naturalmente, los filtros son diseñados de tal manera que sean complementarios, es decir, la suma de A y D debe ser S. Si se diseñaran los filtros en forma muy separada se perdería información, o en caso contrario se estaría amplificando la banda de entrecruzamiento.”⁵⁸

La desventaja que presenta esta técnica es que produce N muestras de la señal a cada salida de los coeficientes, generando un aumento de las operaciones matemáticas para el algoritmo computacional (Figura 4.1.2).

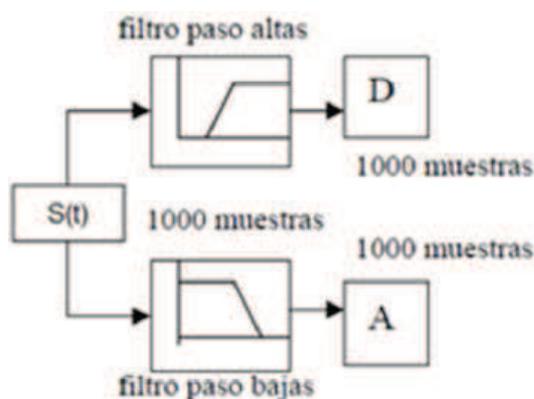


FIGURA 4.1.2: Componente de alta y baja frecuencia con muestreo completo

Sin embargo, para solucionar el problema de duplicar el número de muestras de la señal original, se realiza el procedimiento conocido como el submuestreo que inserta ceros intercalados entre las muestras.

⁵⁸ Acevedo, L. “Computación Paralela de la Transformada Wavelet; Aplicaciones de la transformada Wavelet al álgebra lineal numérica”. Consultado: www.dsic.upv.es/docs/bib-dig/tesis/etd-05152009-123504/phd.pdf

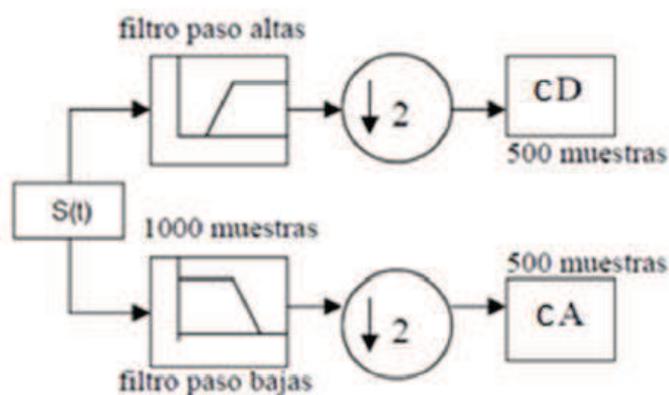


FIGURA 4.1.3: Solución al problema del doble número de muestras

En las Figuras 4.1.2 y 4.1.3, se puede apreciar, como la señal es descompuesta en aproximaciones y detalles (cD y cA) por efecto de los filtros, con la diferencia que en la Figura 4.1.3 aparece el $\downarrow 2$ símbolo que significa el proceso de decimación (downsampling), esto quiere decir, no permite obtener como resultado matrices del mismo tamaño a la original, esto se logra mediante la extracción de uno de cada dos muestras de la señal original.

No obstante, para las señales con un grado de dificultad superior como las de un electrocardiograma, es necesario realizar el análisis independiente de cada una de las características que posea la señal, y esto no se logra mediante la descomposición de un solo nivel sino a través de varios niveles conocido como el árbol de descomposición como se aprecia en la Figura 4.1.4. Este método no pierde la información tiempo – frecuencia a comparación de la Transformada de Fourier, y su metodología se basa en aplicar un segundo proceso de filtrado a la salida de los coeficientes de aproximación (cA1) obtenidos en el primer nivel, para de esa manera obtener los nuevos coeficientes de aproximación y detalle (cA2 y cD2) en un segundo nivel, y así sucesivamente hasta el nivel que se desee analizar.

El nombre análisis multiresolución aparece porque la onda al ser descompuesta en varios niveles, se consigue una información detallada de la señal, en especial de los coeficientes de detalle que se pueden generar en los coeficientes de aproximación, es decir, que a mayor número de niveles mayor será la resolución de análisis.

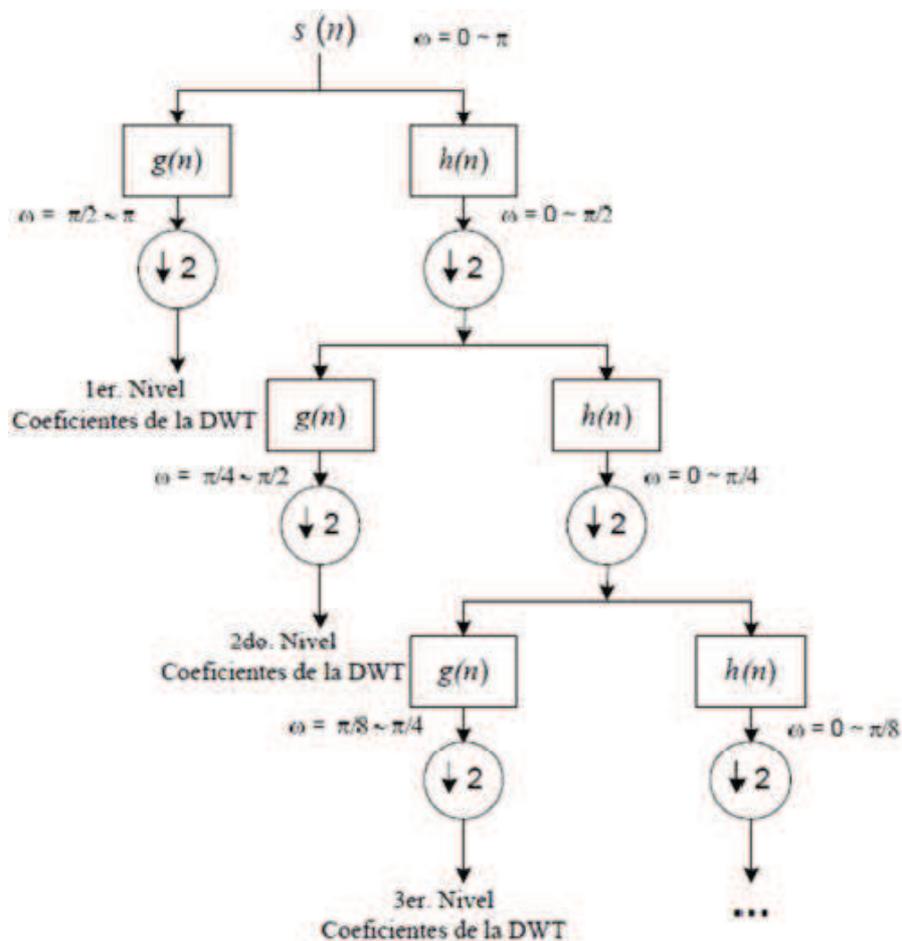


FIGURA 4.1.4: Análisis multiresolución con varios niveles de descomposición

Donde:

$s(n)$: Señal en tiempo discreto.

$g(n)$: Filtro pasa alto.

$h(n)$: Filtro pasa bajo.

$\downarrow 2$ = Proceso de Decimación

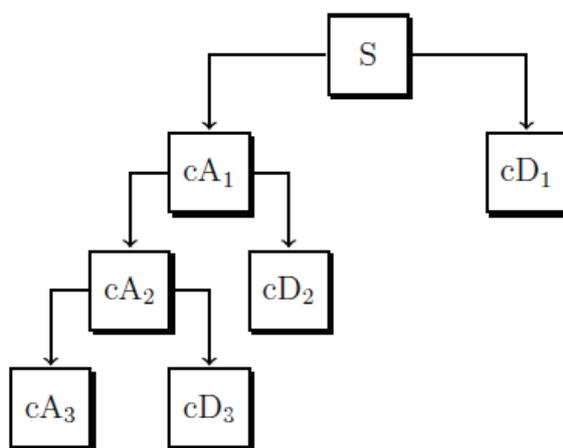


FIGURA 4.1.5: Esquema general del Análisis Multiresolución de tres niveles

Las expresiones matemáticas que permiten calcular los coeficientes de aproximación y detalle en el primer nivel de descomposición a partir de k muestras de una señal son:

$$cA[n] = \sum_{k=0}^{N-1} h(k-2n) \cdot x(k) \quad [4-1]$$

$$cD[n] = \sum_{k=0}^{N-1} g(k-2n) \cdot x(k) \quad [4-2]$$

Donde:

$cA[n]$: Coeficientes de aproximación.

$cD[n]$: Coeficientes de detalle.

$x(k)$: Señal discreta.

$h(k-2n)$: Filtros pasa bajos de la función Wavelet madre.

$g(k-2n)$: Filtros pasa altos de la función Wavelet madre.

El término $2n$, representa el proceso de decimación, lo que permite que la señal tenga la mitad de muestras para cada uno de los coeficientes.

4.1.1 RECONSTRUCCIÓN DE LA SEÑAL

El árbol de descomposición, tiene la capacidad de reconstruir la señal original a partir de los coeficientes de detalle y aproximación sin pérdida de información. El procedimiento que utiliza es similar a la descomposición, pero con la implementación de filtros de espejo de cuadratura.

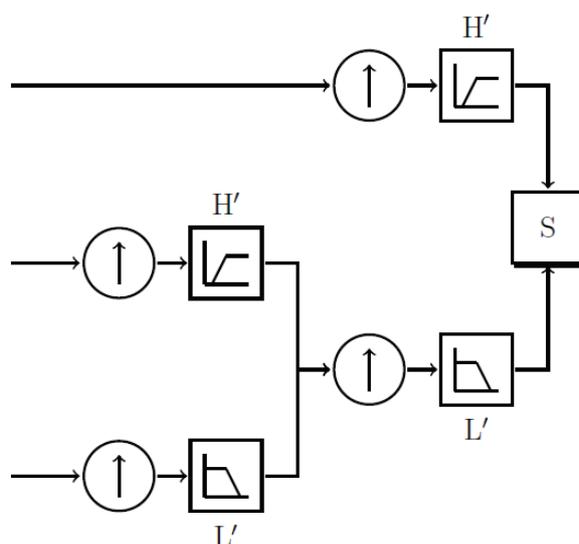


FIGURA 4.1.1.1: Reconstrucción de la señal original a partir de los coeficientes de aproximación y detalle

Para remediar el proceso de diezmado, se realiza un sobremuestreo, que inserta ceros intercalados entre las muestras, y así conseguir el doble de coeficientes que en la entrada.

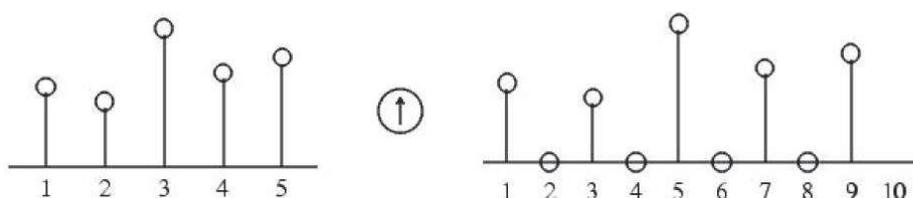


FIGURA 4.1.1.2: Sobremuestreo de una señal en tiempo discreto

La fase más difícil de este procedimiento, es la correcta elección de los filtros, ya que de esa variable depende mucho la calidad de la reconstrucción. Sin embargo, en la publicación ‘Orthonormal bases of compactly supported wavelets ii: variations on a theme’ de Ingrid Daubechies “se discute el diseño, introduciendo filtros de descomposición H y L (para pasa altos y pasa bajos respectivamente), y sus filtros de reconstrucción correspondientes H’ y L’, diseñados a partir de una teoría llamada Quadrature Mirrior Filters.”⁵⁹

La ecuación matemática [4-3] permite realizar el proceso inverso a lo explicado a la descomposición.

$$x(k) = \sum_{k=1}^{N-1} [cD[n] \cdot g(k - 2n)] + \boxed{cA[n] \cdot h(k - 2n)} \quad [4-3]$$



Coeficientes de aproximación del último nivel de descomposición

Donde:

$cA[n]$: Coeficientes de aproximación.

$cD[n]$: Coeficientes de detalle.

$x(k)$: Señal discreta.

4.2 WAVELET PACKET

La Transformada Wavelet Packet o wavelet por paquetes, surge debido a que el análisis multiresolución solo descompone los coeficientes de aproximación y no los coeficientes de detalle. Este problema puede producir la pérdida de información en aquellas ondas en donde se requiera un análisis a profundidad.

⁵⁹ Acevedo, L. “Computación Paralela de la Transformada Wavelet; Aplicaciones de la transformada Wavelet al álgebra lineal numérica”. Consultado: www.dsic.upv.es/docs/bib-dig/tesis/etd-05152009-123504/phd.pdf

El proceso de descomposición al igual que las ecuaciones para determinar los coeficientes son los mismos que presenta el análisis multiresolución, puesto que esta metodología es solo una evolución de su antecesora.

En forma gráfica, la transformada Wavelet Packet descompone una señal de la siguiente manera:

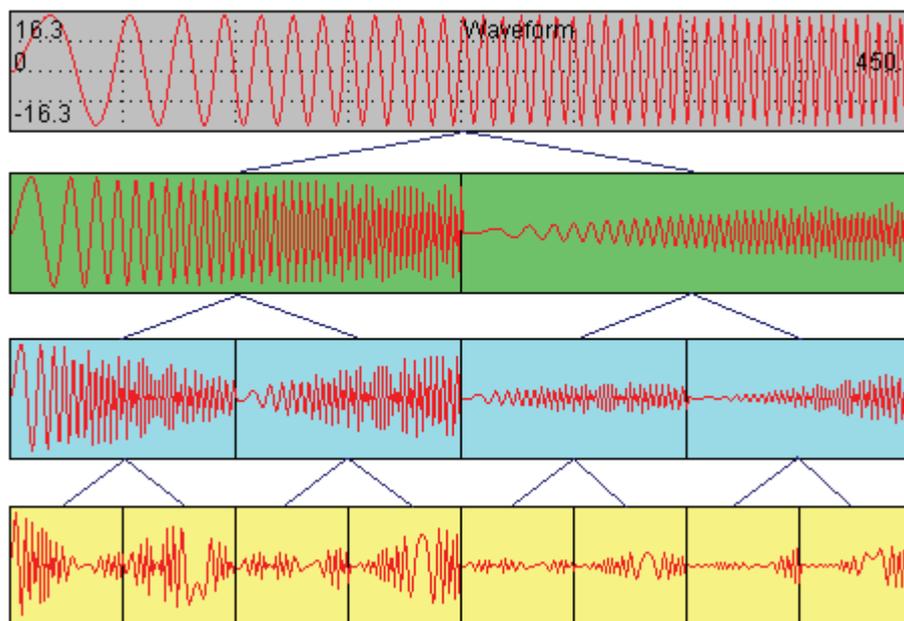


FIGURA 4.2.1: Esquema gráfica de la Transformada Wavelet Packet

“Se debe tener presente que ahora pueden existir distintos coeficientes de detalle y coeficientes de aproximación para un nivel determinado, por lo que la nomenclatura resulta más compleja”⁶⁰, como se puede apreciar en la Figura 4.2.2.

Donde:

cA_1 = coeficientes de aproximación pertenecientes al nivel 1.

cD_1 = coeficientes de detalle pertenecientes al nivel 1.

cAA_2 = coeficientes de aproximación de cA_1 pertenecientes al nivel 2.

cDA_2 = coeficientes de detalle de cA_1 pertenecientes al nivel 2.

⁶⁰ Martínez, I. “Detección de fallos en rodamientos mediante análisis de energía y lógica difusa”. Consultado: <http://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/8369>

cAD_2 = coeficientes de aproximación de cD_1 pertenecientes al nivel 2.

cDD_2 = coeficientes de detalle de cD_1 pertenecientes al nivel 2.

$cAAA_3$ = coeficientes de aproximación de cAA_2 pertenecientes al nivel 3.

$cDAA_3$ = coeficientes de detalle de cAA_2 pertenecientes al nivel 3.

$cADA_3$ = coeficientes de aproximación de cDA_2 pertenecientes al nivel 3.

$cDDA_3$ = coeficientes de detalle de cDA_2 pertenecientes al nivel 3.

$cAAD_3$ = coeficientes de aproximación de cAD_2 pertenecientes al nivel 3.

$cDAD_3$ = coeficientes de detalle de cAD_2 pertenecientes al nivel 3.

$cADD_3$ = coeficientes de aproximación de cDD_2 pertenecientes al nivel 3.

$cDDD_3$ = coeficientes de detalle de cDD_2 pertenecientes al nivel 3.

$cAAAA_4$ = coeficientes de aproximación de $cAAA_3$ pertenecientes al nivel 4.

$cDAAA_4$ = coeficientes de detalle de $cAAA_3$ pertenecientes al nivel 4.

$cADAA_4$ = coeficientes de aproximación de $cDAA_3$ pertenecientes al nivel 4.

$cDDAA_4$ = coeficientes de detalle de $cDAA_3$ pertenecientes al nivel 4.

$cAADA_4$ = coeficientes de aproximación de $cADA_3$ pertenecientes al nivel 4.

$cDADA_4$ = coeficientes de detalle de $cADA_3$ pertenecientes al nivel 4.

$cADDA_4$ = coeficientes de aproximación de $cDDA_3$ pertenecientes al nivel 4.

$cDDDA_4$ = coeficientes de detalle de $cDDA_3$ pertenecientes al nivel 4.

$cAAAD_4$ = coeficientes de aproximación de $cAAD_3$ pertenecientes al nivel 4.

$cDAAD_4$ = coeficientes de detalle de $cAAD_3$ pertenecientes al nivel 4.

$cADAD_4$ = coeficientes de aproximación de $cDAD_3$ pertenecientes al nivel 4.

$cDDAD_4$ = coeficientes de detalle de $cDAD_3$ pertenecientes al nivel 4.

$cAADD_4$ = coeficientes de aproximación de $cADD_3$ pertenecientes al nivel 4.

$cDADD_4$ = coeficientes de detalle de $cADD_3$ pertenecientes al nivel 4.

$cADDD_4$ = coeficientes de aproximación de $cDDD_3$ pertenecientes al nivel 4.

$cDDDD_4$ = coeficientes de detalle de $cDDD_3$ pertenecientes al nivel 4.

4.2.1 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO ÓPTIMO DE DESCOMPOSICIÓN DE NIVELES

“Podría pensarse en forma intuitiva que se obtienen resultados óptimos con un mayor número de niveles de descomposición, pero, esto no siempre es así.”⁶¹ Según el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, en uno de sus artículos llamado ‘Entropy – based algorithms for best basis selection’ realizado por Coifman y Wickerhauser, resalta la utilización de una librería de bases ortonormales, para que se adapten a un determinado tipo de señal o familias de señales. Las librerías predefinidas de formas de onda modulada incluyen wavelets packets ortogonales y funciones trigonométricas. Una de las más comunes de todas las familias, es la entropía de Shannon.

4.2.2 SEÑALES ESTACIONARIAS

Hasta ahora, la transformada Wavelet, se lo ha utilizado como un método que soluciona las dificultades que presenta la Transformada corta de Fourier para el análisis tiempo- frecuencia de señales no estacionarias, en cambio, para las señales estacionarias, no se ha demostrado el grado de confiabilidad que muestra este método para efectuar un análisis. Es por esa razón que a continuación se desarrolla un análisis completo de una señal estacionaria aplicando el árbol de descomposición.

Sea la siguiente señal estacionaria a ser analizada:

⁶¹ Acevedo, L. “**Computación Paralela de la Transformada Wavelet; Aplicaciones de la transformada Wavelet al álgebra lineal numérica**”. Consultado: www.dsic.upv.es/docs/bib-dig/tesis/etd-05152009-123504/phd.pdf

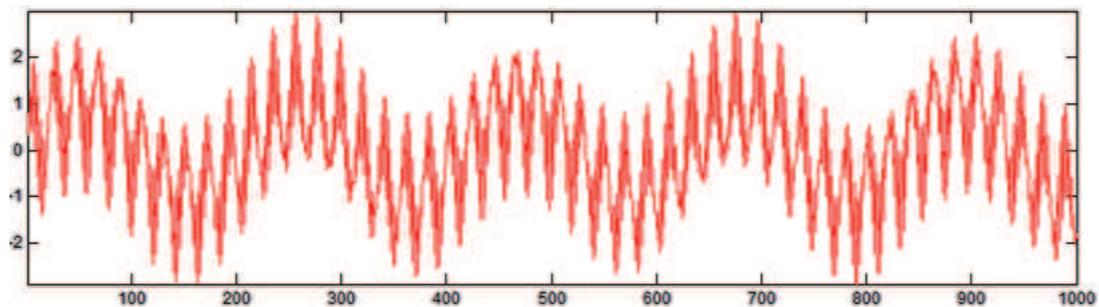


FIGURA 4.2.2.1: Suma de varias funciones senos de diferentes frecuencias

A continuación, se procede a descomponer la señal en 5 niveles mediante el análisis multiresolución obteniendo los siguientes resultados:

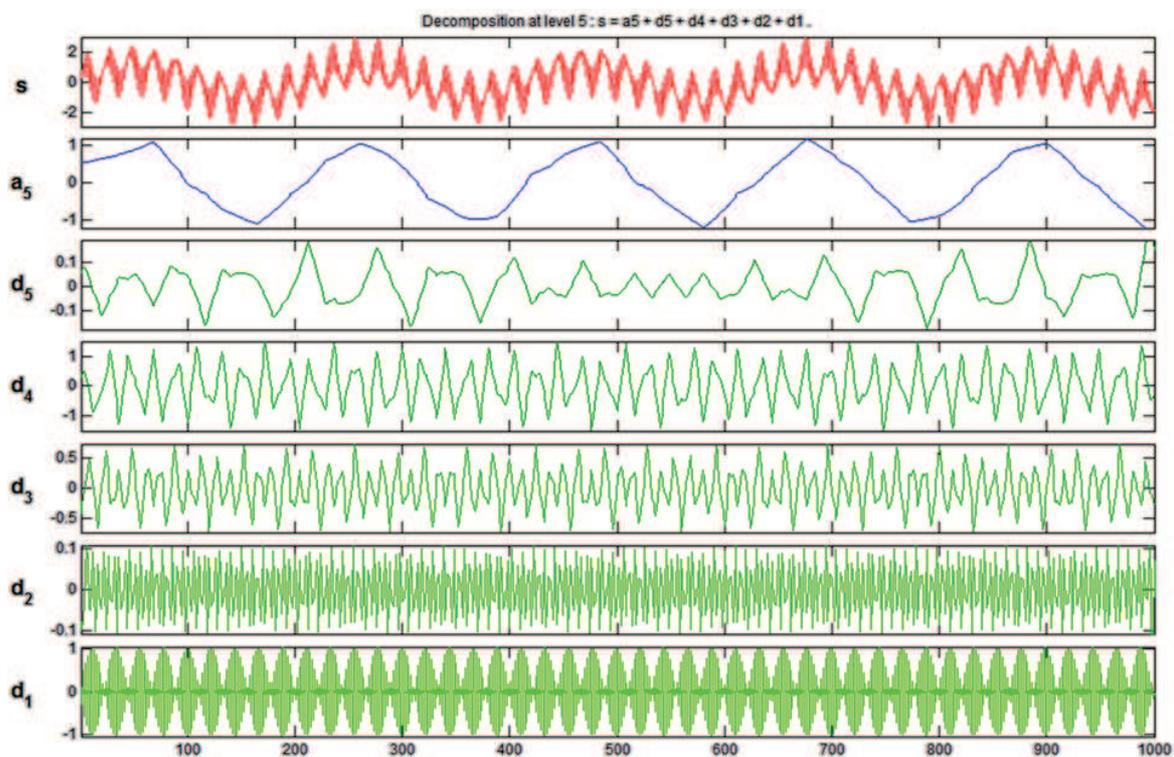


FIGURA 4.2.2.2: Descomposición de la Figura 4.2.2.1 en 5 niveles

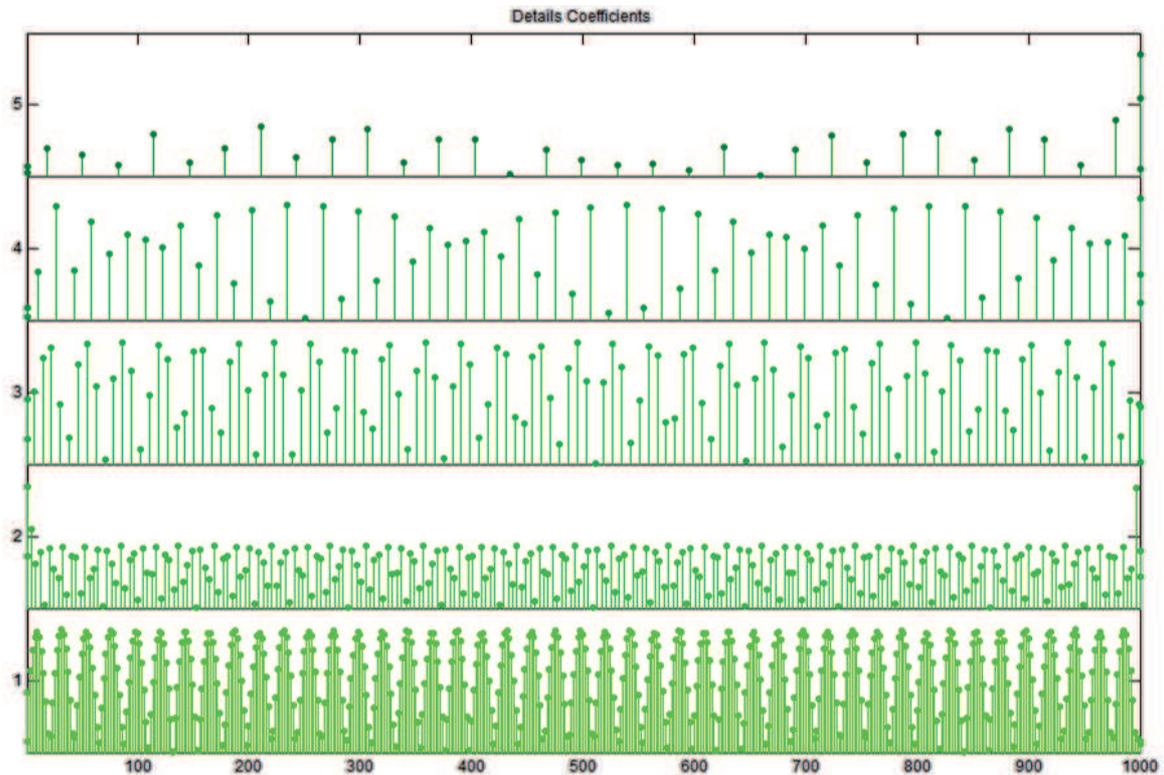


FIGURA 4.2.2.3: Coeficientes de detalle en los 5 niveles de descomposición de la Figura 4.2.2.1

Como se puede observar en las Figuras 4.2.2.2 y 4.2.2.3, los coeficientes de detalle aparecen en todos los instantes de tiempo, resultado coherente, puesto que se trata de una señal estacionaria. Por lo tanto el árbol de descomposición sirve también para realizar un análisis tiempo – frecuencia para cualquier tipo de señal.

4.3 PAQUETE COMPUTACIONAL MATLAB Y WAVELET PACKET

MATLAB al ser un programa orientado a proyectos, en los cuales se requiere cálculos matemáticos y visualización gráfica de los mismos, incluye una extensa variedad de programas de apoyo llamados Toolboxes que mejora de una manera significativa las funciones que se encuentran dentro de la ventana de trabajo.

Una de los paquetes de herramientas o programas de apoyo, es la Wavelet Toolbox, que proporciona diferentes aplicaciones en base a las funciones

wavelets para el análisis, síntesis, eliminación del ruido y compresión de señales e imágenes.

Es por esa razón, que el programa se implementará en el proyecto de titulación, para lograr una mejor visualización de los resultados que se obtendrán más adelante.

4.3.1 FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA

- 1) Una vez ejecutado el programa, escribir la palabra '**wavemenu**' en el 'Command Window', con lo cual se desplegará una ventana al igual que la Figura 4.3.1.2.

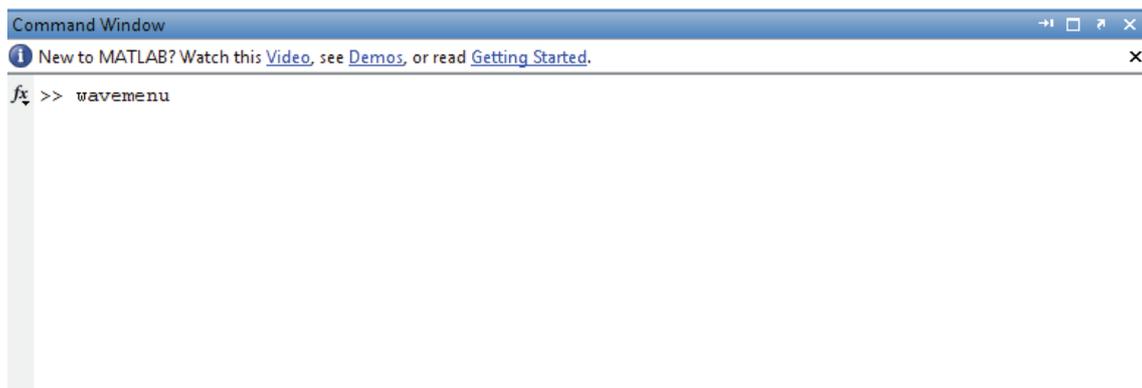


FIGURA 4.3.1.1: Descripción del paso 1 del funcionamiento del programa

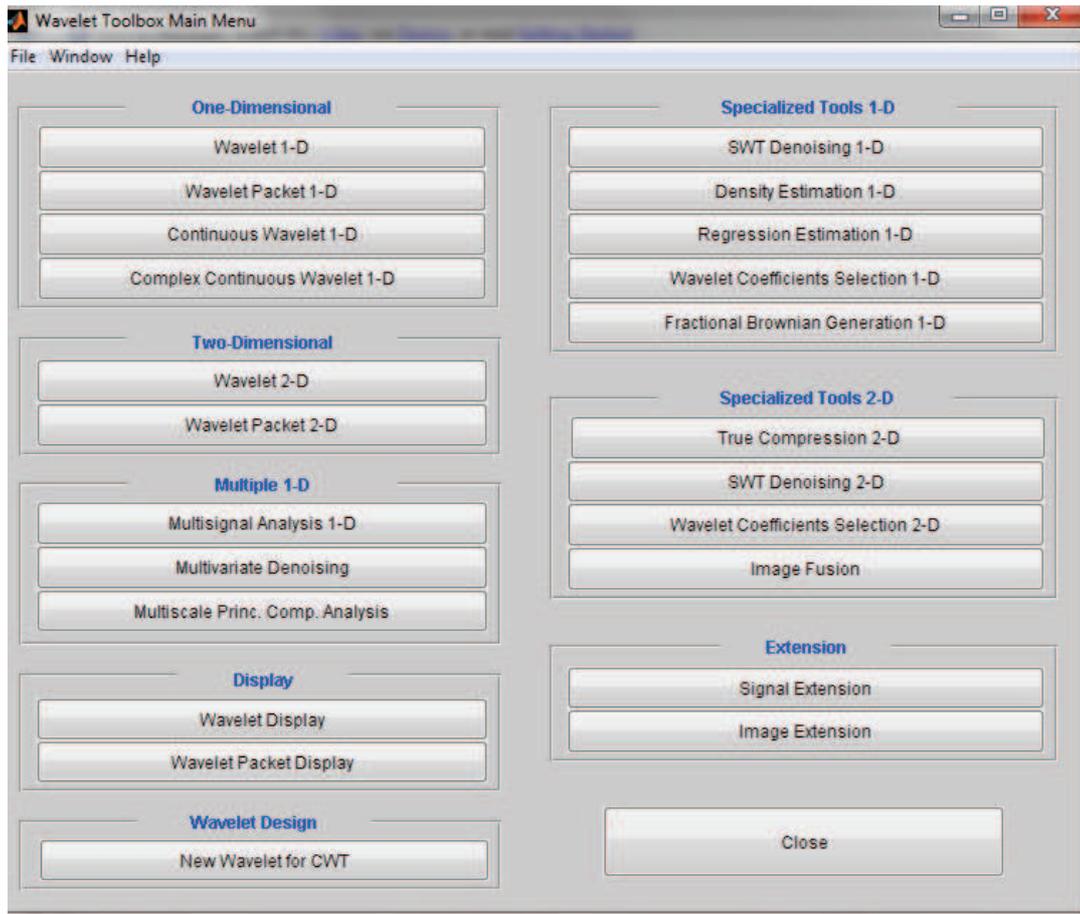


FIGURA 4.3.1.2: Wavelet Toolbox

- 2) Para el caso de análisis señales o imágenes, seleccionar una dimensión o dos dimensiones respectivamente.
- 3) Seleccionar el método de análisis (Wavelet Packet, Wavelet Continua, etc), en este caso de estudio Wavelet Packet.
- 4) Dibujar la señal que se desea analizar.

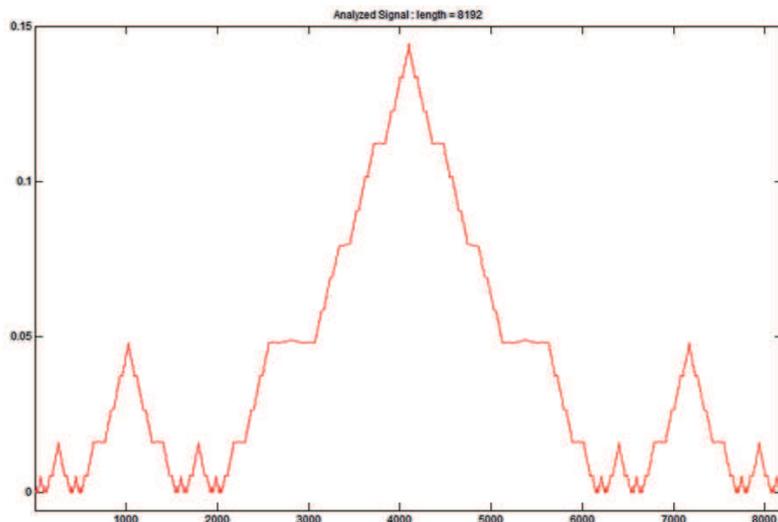


FIGURA 4.3.1.3: Descripción del paso 4

- 5) Cargar la señal a través de la pestaña 'file' opción 'load signal', con lo cual quedará una ventana como se muestra en la Figura 4.3.1.4.

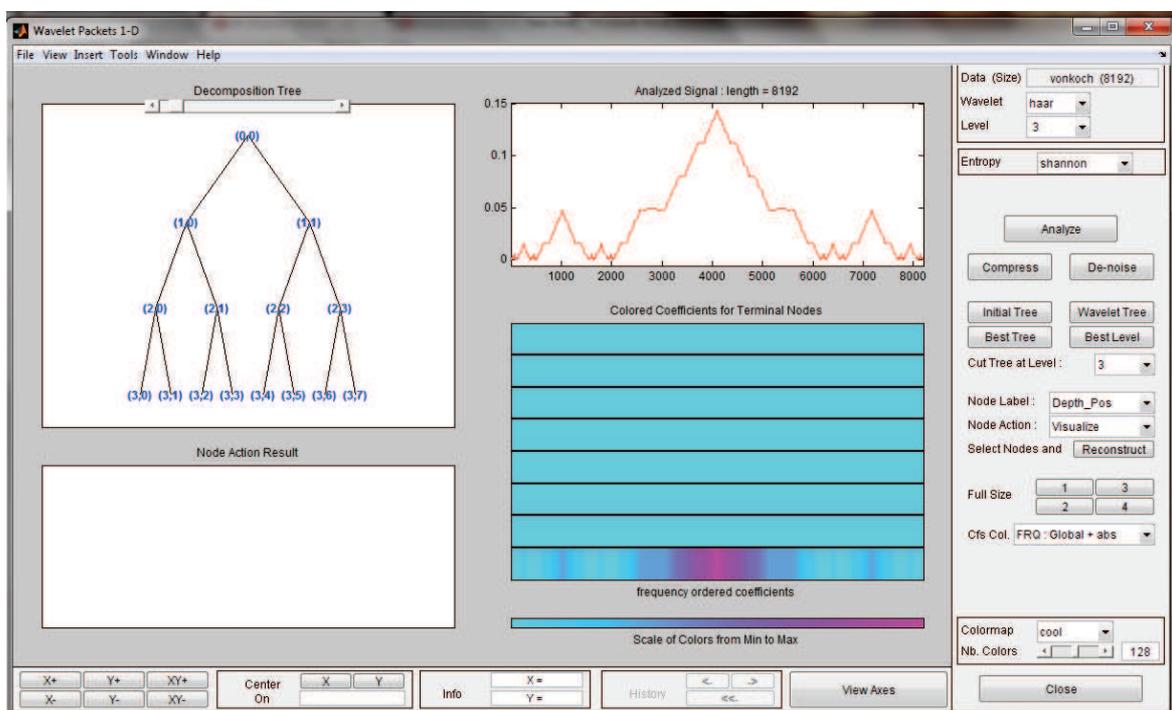


FIGURA 4.3.1.4: Ventana final que se obtiene al cargar la señal

- 6) Escoger la wavelet madre, nivel de descomposición, entropía y finalmente presionar el botón analizar.

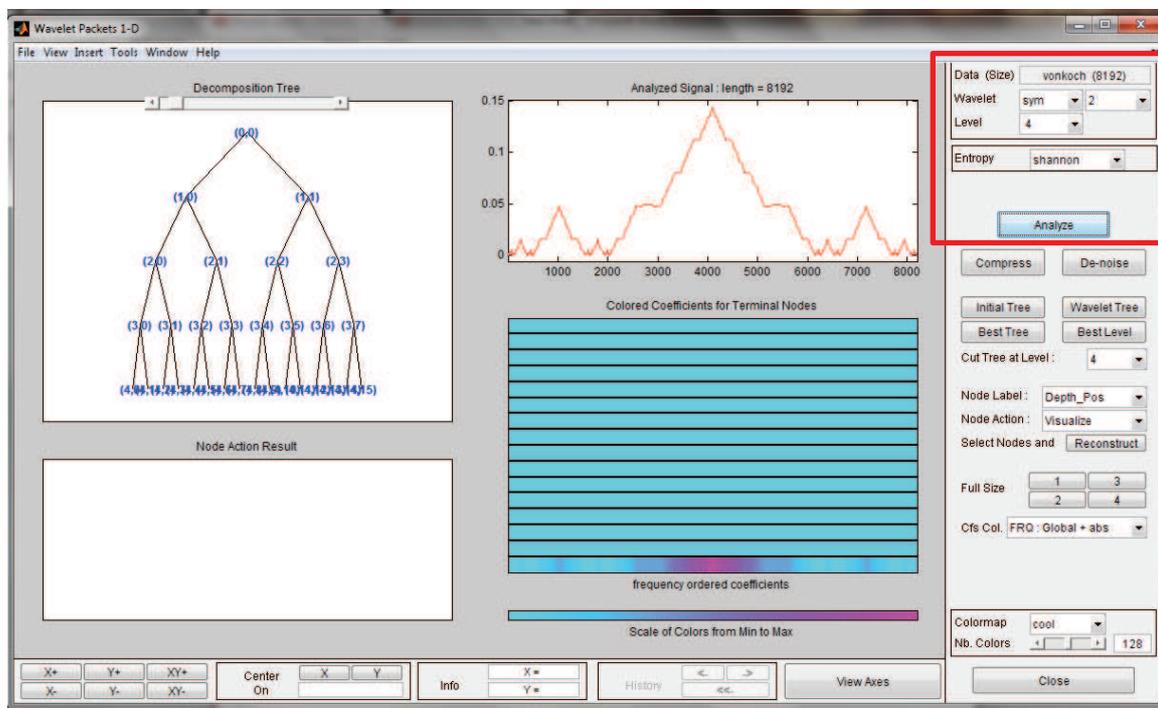
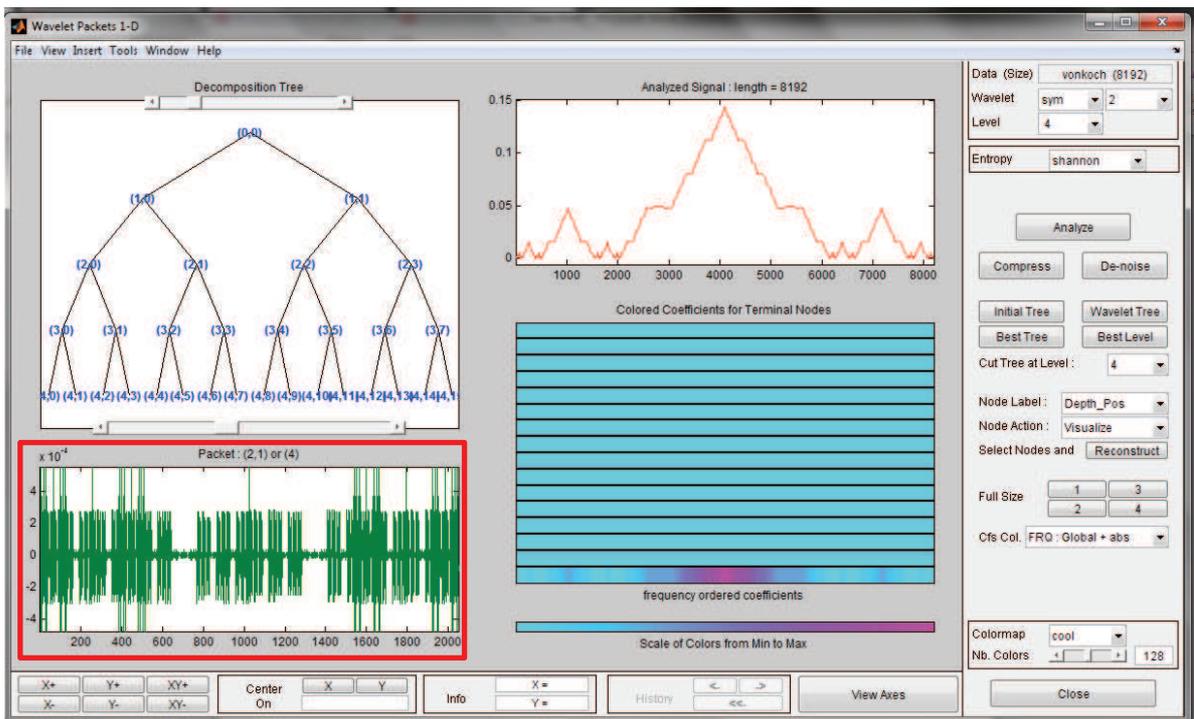
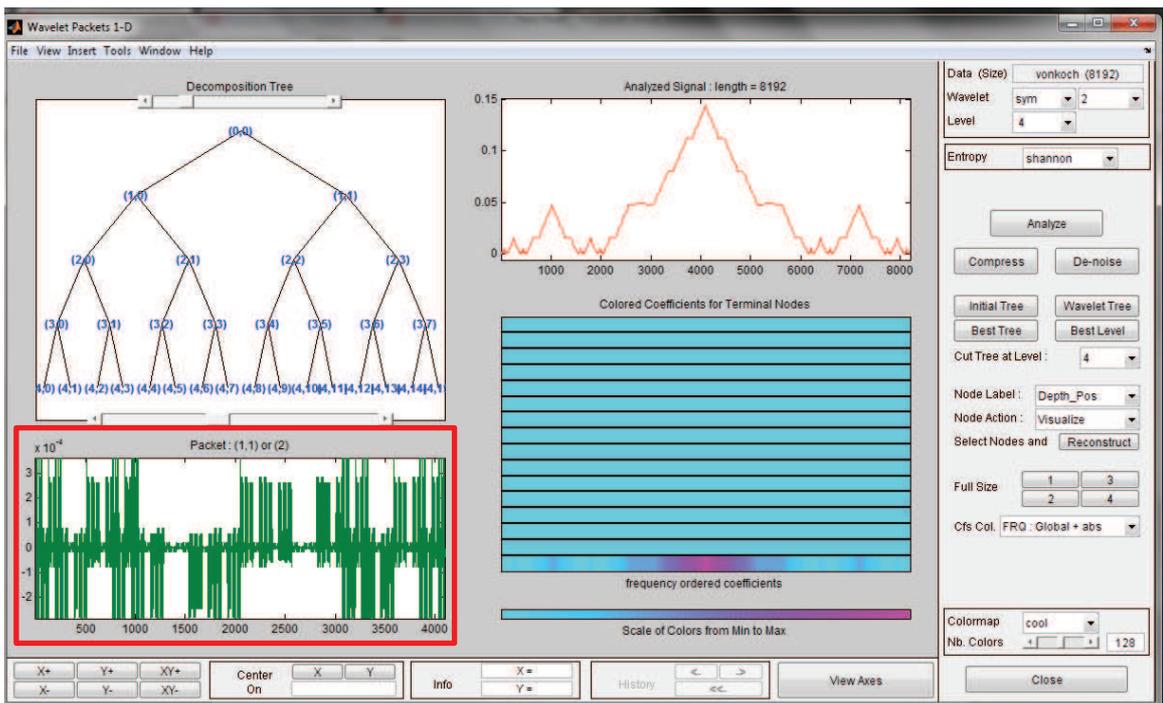
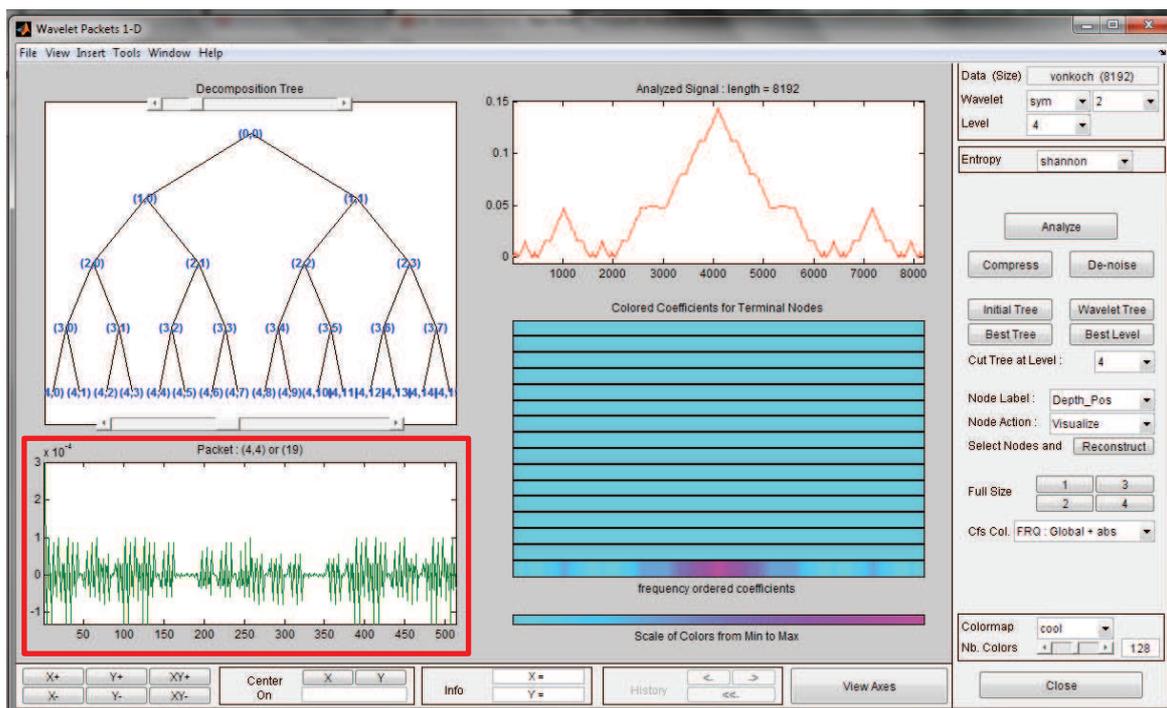
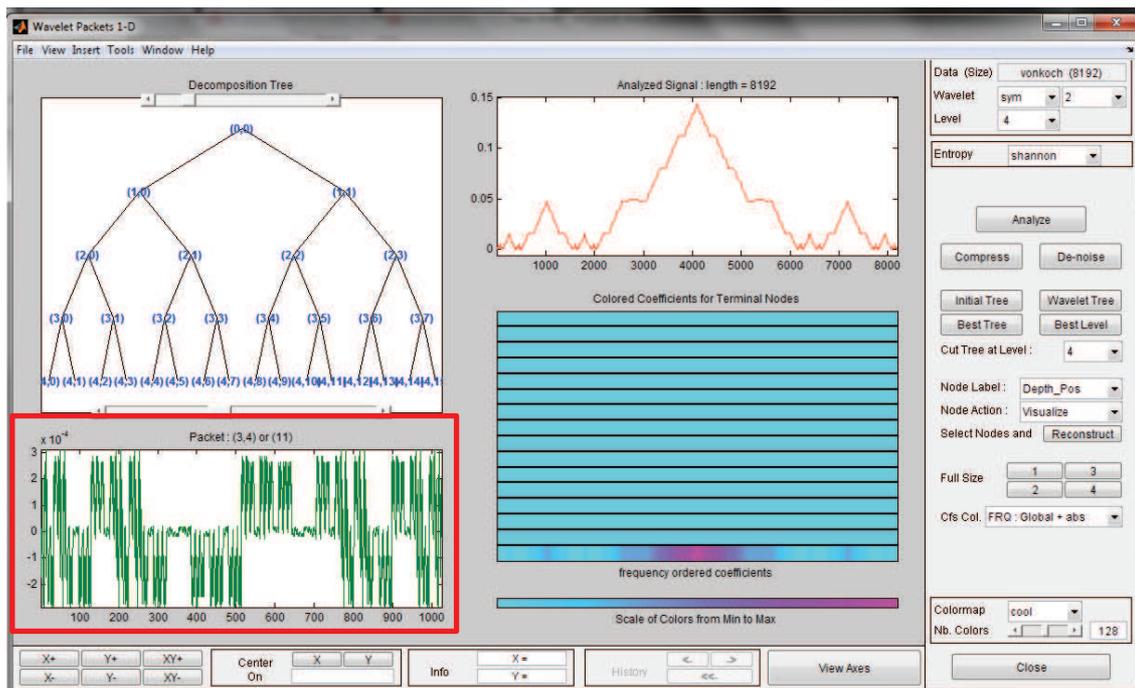


FIGURA 4.3.1.5: Diferentes opciones que presenta la Wavelet Toolbox antes de realizar un análisis

- 7) Para visualizar la forma de onda en los distintos niveles, dar un click en cada uno de los nodos del árbol de descomposición como se observa en la Figura 4.3.1.6.





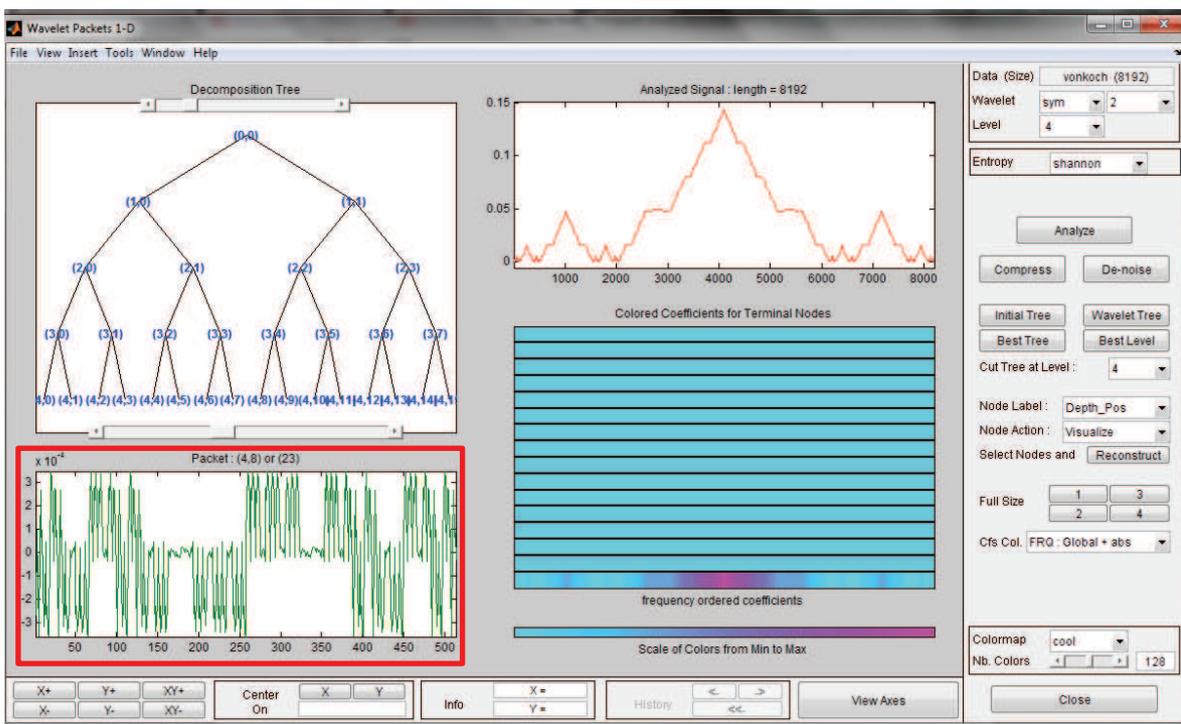
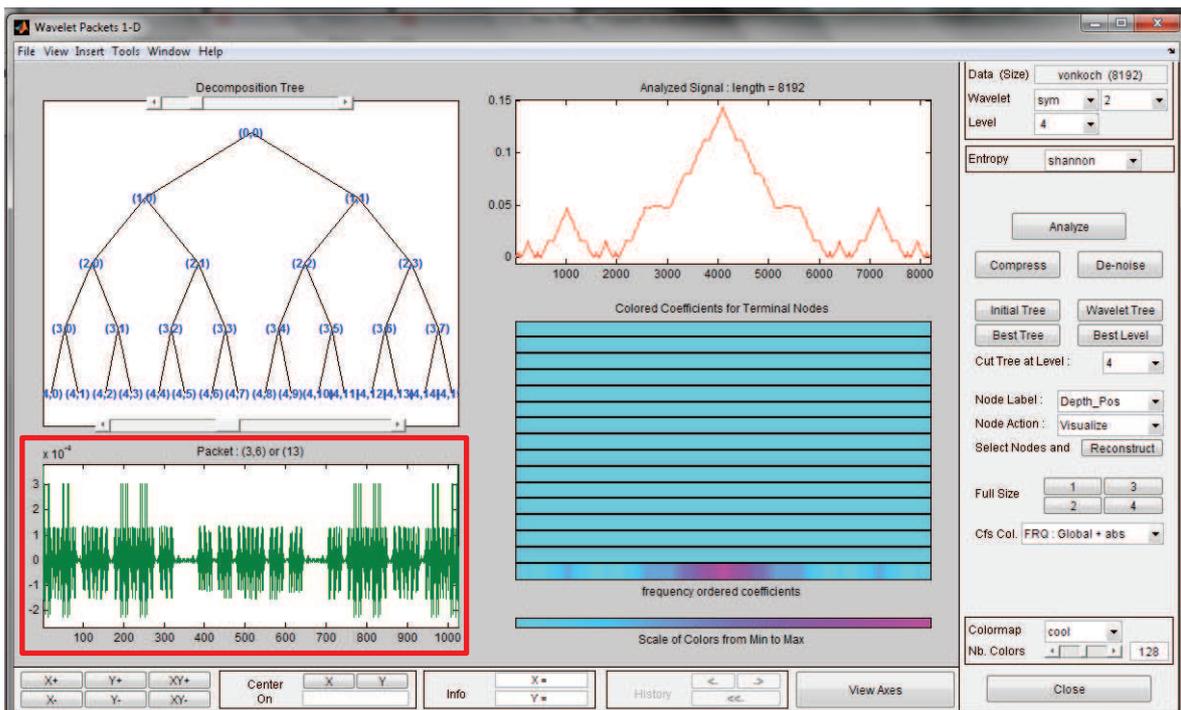


FIGURA 4.3.1.6: Formas de onda en diferentes niveles del árbol de descomposición

4.4 AGRUPACIÓN DE LAS LÍNEAS ESPECTRALES DE 5 HZ SEGÚN LA NORMA IEC 61000-4-7

El estándar define cuatro agrupaciones de líneas espectrales con el fin de mejorar la medida del espectro de la señal en una línea eléctrica. Las cuatro agrupaciones de líneas espectrales son:

- **Grupo armónico**

Es aquel valor, en el cual se considera el armónico y los componentes espectrales adjuntos a él dentro de la ventana temporal.

Matemáticamente, la fórmula que permite determinar el grupo de armónicos es:

$$50 \text{ Hz} \quad \Rightarrow \quad G_{g,n}^2 = \frac{C_{k-5}^2}{2} + \sum_{i=-4}^4 C_{k+i}^2 + \frac{C_{k+5}^2}{2} \quad [4-4]$$

$$60 \text{ Hz} \quad \Rightarrow \quad G_{g,n}^2 = \frac{C_{k-6}^2}{2} + \sum_{i=-5}^5 C_{k+i}^2 + \frac{C_{k+6}^2}{2} \quad [4-5]$$

Donde:

$G_{g,n}$ = Valor eficaz de un grupo armónico.

C_k = Valor eficaz de la componente espectral correspondiente a una línea espectral.

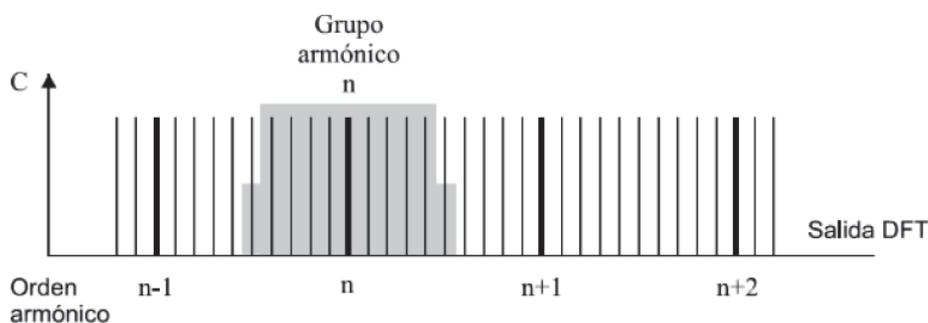


FIGURA 4.4.1: Líneas espectrales de un grupo armónico para 50 Hz

- **Subgrupo armónico**

Valor eficaz de un armónico y de las dos componentes espectrales adjuntas.

Matemáticamente, el subgrupo armónico se define como:

$$G_{sg,n}^2 = \sum_{i=-1}^1 C_{k+i}^2 \quad [4-6]$$

Donde:

$G_{sg,n}$ = Valor eficaz de un subgrupo armónico.

C_k = Valor eficaz de la componente espectral correspondiente a una línea espectral.

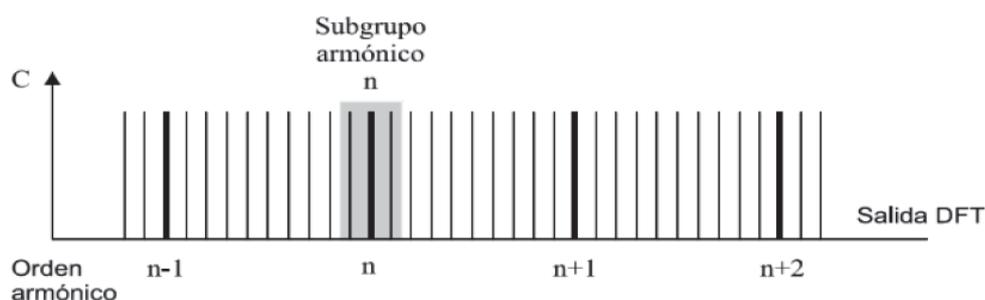


FIGURA 4.4.2: Líneas espectrales de un subgrupo armónico

- **Subgrupo interarmónico centrado**

Valor eficaz de todos los componentes interarmónicos entre dos armónicos consecutivos, excepto las componentes espectrales adjuntas a las frecuencias armónicas.

Matemáticamente, se define como:

$$50 \text{ Hz} \quad \Rightarrow \quad G_{isg,n}^2 = \sum_{i=2}^8 C_{k+i}^2 \quad [4-7]$$

$$60 \text{ Hz} \quad \Rightarrow \quad G_{isg,n}^2 = \sum_{i=2}^{10} C_{k+i}^2 \quad [4-8]$$

Donde:

$G_{ig,n}$ = Valor eficaz de un subgrupo interarmónico centrado.

C_k = Valor eficaz de la componente espectral correspondiente a una línea espectral.

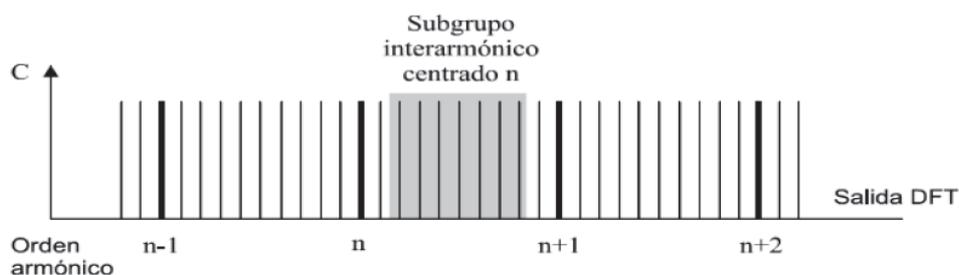


FIGURA 4.4.3: Líneas espectrales de un subgrupo interarmónico centrado para 50 Hz

- **Grupo interarmónico**

Valor eficaz de todos los componentes interarmónicos entre dos armónicos consecutivos.

La fórmula que permite calcular el grupo interarmónico es:

$$50 \text{ Hz} \quad \Rightarrow \quad G_{ig,n}^2 = \sum_{i=1}^9 C_{k+i}^2 \quad [4-9]$$

$$60 \text{ Hz} \quad \Rightarrow \quad G_{ig,n}^2 = \sum_{i=1}^{11} C_{k+i}^2 \quad [4-10]$$

Donde:

$G_{ig,n}$ = Valor eficaz de un grupo interarmónico.

C_k = Valor eficaz de la componente espectral correspondiente a una línea espectral.

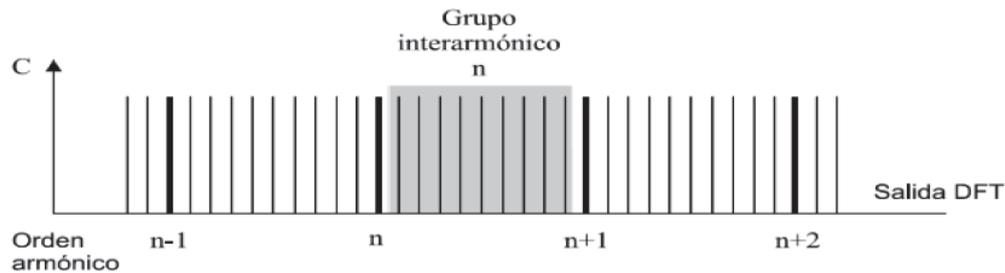


FIGURA 4.4.4: Líneas espectrales de un grupo interarmónico

4.5 MEDIDA DE ARMÓNICOS

4.5.1 INSTRUMENTOS DE MEDIDA

Los aparatos o equipos de medida, que se utilizan para la medición de armónicas son:

➤ **Analizadores de distorsión**

Son aquellos equipos que miden directamente la distorsión armónica total (THD).

➤ **Equipo digital de medición de armónicas**

Utilizan la Transformada Rápida de Fourier para calcular la amplitud de cada uno de los armónicos.

➤ **Analizadores de onda**

Proporcionan el valor eficaz del espectro de líneas de la señal.

➤ **Analizadores de espectros**

“Muestran la distribución de energía de una señal como función de la frecuencia.”⁶²

⁶² Reyes, G. “Armónicas en sistemas de distribución de energía eléctrica”. Consultado: <http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020115478.pdf>

4.5.2 ANALIZADOR DE EVENTOS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA “FLUKE 1735”

El analizador de red, que se utilizó para la medida de armónicos en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Escuela Politécnica Nacional fue el POWER LOGGER de la serie 1735 marca “FLUKE”, que posee las siguientes características:



FIGURA 4.5.2.1: Analizador de red marca FLUKE 1735

➤ Generales

Pantalla	Pantalla VGA transmisiva en color de 320 x 240 píxeles, retroiluminación adicional y contraste ajustable; texto y gráficos en color
Calidad	Desarrollado, diseñado y fabricado según la norma DIN ISO 9001
Memoria	Memoria Flash de 4 MB, 3,5 MB para medir datos
Interfaz	Conector RS-232 SUB-D; 115.200 baudios, 8 bits de datos, sin paridad, 1 bit de parada, actualizaciones de firmware posibles a través de la interfaz RS-232 (cable de extensión de 9 patillas)
Velocidad de muestreo	10,24 kHz

Frecuencia de línea	50 Hz o 60 Hz, seleccionable por el usuario, con sincronización automática
Alimentación eléctrica	Juego de baterías NiMH con adaptador de CA (de 15 V a 20 V/0,8 A)
Tiempo de funcionamiento con batería	Normalmente > 12 horas sin usar la retroiluminación y > 6 horas con uso elevado de la retroiluminación
Dimensiones	240 mm x 180 mm x 110 mm
Peso	1,7 kg, baterías incluidas

TABLA 4.5.2.1: Características generales FLUKE 1735

➤ **Condiciones de ambiente**

Rango de temperatura de funcionamiento	De -10 °C a +50 °C
Rango de temperaturas de almacenamiento	De -20 °C a +60 °C
Rango de temperaturas de trabajo	De 0 °C a +40 °C
Rango de temperatura de referencia	23 °C ± 2 °C
Nota	Los términos anteriores están definidos en las normas europeas. Para calcular la especificación en cualquier punto del rango de temperaturas, utilice el coeficiente térmico siguiente.
Coeficiente térmico	± 0,1% del valor medido por °C de la referencia
Error intrínseco	Se refiere a la temperatura de referencia, se garantiza una desviación máxima durante dos años
Error de funcionamiento	Se refiere al rango de temperatura de trabajo, se garantiza una desviación máxima durante dos años

Clase climática	C1 (IEC 654-1) de -5 °C a +45 °C, de 5% a 95% HR, sin condensación
Carcasa	Termoplástica de cyclopolo resistente a impactos y rayaduras, de tipo V0 (no inflamable) con funda protectora de goma

TABLA 4.5.2.2: Condiciones de ambiente FLUKE 1735

➤ **Compatibilidad electromagnética (EMC)**

Emisiones	IEC/EN 61326-1:1997 clase B
Inmunidad	IEC/EN 61326-1:1997

TABLA 4.5.2.3: Compatibilidad electromagnética analizador de red FLUKE 1735

➤ **Medida de Vrms en estrella**

Rango de medida	57 V/66 V/110 V/120 V/127 V/220 V/230 V/240 V/260 V/277 V/347 V/380 V/400 V/417 V/480 V CA
Error intrínseco	± (0,2% del valor medido + 5 dígitos)
Error de funcionamiento	± (0,5% del valor medido + 10 dígitos)
Resolución	0,1 V

TABLA 4.5.2.4: Valores Vrms en estrella FLUKE 1735

➤ **Medida de Vrms delta**

Rango de medida	100 V/115 V/190 V/208 V/220 V/380 V/400 V/415 V/450 V/480 V/600 V/660 V/690 V/720 V/830 V CA
Error intrínseco	± (0,2% del valor medido + 5 dígitos)
Error de funcionamiento	± (0,5% del valor medido + 10 dígitos)
Resolución	0,1 V

TABLA 4.5.2.5: Valores Vrms en delta FLUKE 1735

➤ **Medida de intensidad (valor eficaz)**

Rangos de FlexiSet I	15 A/150 A/3000 A (valor eficaz, sinusoidal)
Rangos de pinza amperimétrica	1 A/10 A
Resolución	0,01 A
Rangos	150 A/3000 A y 1 A/10 A
Error intrínseco	± (0,5% del valor medido + 10 dígitos)
Error de funcionamiento	± (1% del valor medido + 10 dígitos)
Rangos	15 A
Error intrínseco	± (0,5% del valor medido + 20 dígitos)
Error de funcionamiento	± (1% del valor medido + 20 dígitos)

TABLA 4.5.2.6: Valores eficaces en la medida de corriente FLUKE 1735

➤ **Medida de potencia (P- Activa, S- Aparente, Q- Reactiva, D- Distorsión)**

Rango de medida	<p>Consulte los rangos de medida de tensión e intensidad (valor eficaz)</p> <p>Los errores de alimentación se calculan añadiendo los errores de tensión y corriente</p> <p>Error adicional debido a factor de potencia (PF)</p> <p>Error especificado x (1-[PF])</p> <p>El rango máximo con una conexión en triángulo de rango de tensión de 830 V y un rango de corriente de 3000 A es de 2,490 MW, es posible que aparezcan valores superiores si se utilizan PT y CT con función de relación</p>
Error intrínseco	± (0,7% del valor mostrado + 15 dígitos)
Resolución	1 kW
Error de funcionamiento	<p>± (1,5% del valor medido + 20 dígitos)</p> <p>Rango habitual con conexión en estrella de 230 V de rango de tensión y rango de corriente de 34,50 KW.</p>
Error intrínseco	± (0,7% del valor mostrado + 15 dígitos)
Resolución	De 1 W a 10 W

Error de funcionamiento	$\pm (1,5\% \text{ del valor medido} + 20 \text{ dígitos})$
--------------------------------	-------------------------------------------------------------

TABLA 4.5.2.7: Medidas de potencia FLUKE 1735

➤ **Medida de energía (kWh, kVAh, kVARh)**

Error intrínseco	$\pm (0,7\% \text{ del valor medido} + \text{error de variación } F^* + 15 \text{ dígitos})$
Resolución	De 1 W a 10 W
Error de funcionamiento	$\pm (1,5\% \text{ del valor medido} + \text{error de variación } F^* + 20 \text{ dígitos})$

TABLA 4.5.2.8: Medida de energía FLUKE 1735

➤ **Factor de potencia**

Rango	De 0,000 a 1,000
Resolución	0,001
Precisión	$\pm 1\% \text{ del valor máximo de la escala}$

TABLA 4.5.2.9: Rangos de medida del factor de potencia FLUKE 1735

➤ **Medida de la frecuencia**

Rango de medida	De 46 Hz a 54 Hz y de 56 Hz a 64 Hz
Error intrínseco	$\pm (0,2\% \text{ del valor medido} + 5 \text{ dígitos})$
Error de funcionamiento	$\pm (0,5\% \text{ del valor medido} + 10 \text{ dígitos})$
Resolución	0,01 Hz

TABLA 4.5.2.10: Medida de frecuencia FLUKE 1735

➤ **Armónicos**

Rango de medida	Hasta el armónico 50°
------------------------	-----------------------

TABLA 4.5.2.11: Rango de medida de armónicos FLUKE 1735

➤ **Precisión**

V_m, I_m, THDV, THDI	IEC 61000-4-7:2002, Clase II
V_m ≥ 3% V_n	± 5% V _m
V_m < 3% V_{nom}	±0,15% V _{nom}
I_m ≥ 10% I_{nom}	± 5% I _m
I_m < 10% I_{nom}	± 0 5% I _{nom}
THDV	Para una distorsión armónica total (THD) < 3% ± 0,15% en V _{nom} para una THD ≥ 3% ± 5% en V _{nom}
Distorsión armónica total de corriente	Para un THD < 10% ± 0,5% en I _{nom} Para un THD ≥ 10% ± 5% en I _{nom}
Tensión nominal	Rango de tensión nominal
Corriente nominal	Rango de corriente nominal V _m e I _m son valores medidos de armónicos m

TABLA 4.5.2.12: Precisión en la medida de voltaje, corriente y distorsión armónica del FLUKE 1735

4.5.3 WAVELET PACKET Y VALORES EFICACES DE VOLTAJE Y CORRIENTE

Hasta ahora, se ha explicado acerca de los coeficientes de aproximación y detalle que se obtienen al realizar la descomposición de varios niveles de una señal, sin embargo para el cálculo de armónicos es necesario que dichos coeficientes sean expresados en valores eficaces, ya sea de voltaje o corriente, es por eso, que en uno de los artículos publicados por parte de la IEEE llamado 'The Design of Power Harmonic Measurement System Based on ARM and Wavelet Packet Transform' desarrollado por X. Weicheng, X. Yang y X. Yi, demuestran de una manera teórica y matemática, como conseguir los valores eficaces de voltaje y corriente partiendo de la transformada Wavelet Packet.

Además ellos resaltan la ventaja de implementar esta transformada, puesto que, provee la distribución de potencia y energía en cada uno de los niveles de descomposición.

Las ecuaciones para conseguir el valor eficaz de la onda de voltaje y corriente partiendo de los coeficientes son:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_t^2 dt} \approx \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j-1}} [c_j^i(k)]^2} \quad [4-11]$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_t^2 dt} \approx \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j-1}} [c_j^{*i}(k)]^2} \quad [4-12]$$

Donde:

V_{rms} = Voltaje eficaz.

I_{rms} = Corriente eficaz.

2^N = Número total de muestras de la señal.

c_j^i y c_j^{*i} = Coeficientes a la salida del árbol de descomposición para la onda de voltaje y corriente respectivamente.

i = Banda de salida frecuencial (nodo).

j = Nivel de descomposición.

4.5.4 ÁRBOL COMPLETO DE DESCOMPOSICIÓN

En el presente proyecto de titulación, se analizará hasta el armónico 32 ($f = 1920$ Hz), por lo tanto, la frecuencia de muestreo cumpliendo con el teorema de Shannon es de 3840 Hz.

La ventana de observación para la medida de las perturbaciones será de 12 ciclos o 200 ms para una frecuencia de 60 Hz como lo establece el estándar IEC 61000-

4-7, por lo tanto, la componente fundamental de la ventana y la resolución espectral de los datos que suministra será de 5 Hz.

Por consiguiente, para el cálculo de armónicos, se basará en la medida del grupo armónico mediante la ecuación [4-5].

Ahora, para conocer el nivel óptimo de descomposición, se efectuará el siguiente análisis:

1. Si se descompone en 4 niveles como en la Figura 4.2.2, el resultado a la salida de filtros será de 16 bandas uniformes de 120 Hz cada uno. Opción no válida, debido a que solo se calculará los armónicos impares y además las normas internacionales definen armónicos pares e impares.
2. Para 5 niveles de descomposición, el resultado final será de 32 bandas uniformes de 60 Hz cada uno, método no válido porque en la medida del grupo armónico se está considerando un número mayor de líneas espectrales alrededor del orden del armónico, y además como el orden del armónico se encuentra en los bordes de las bandas, la energía del contenido espectral se esparce a las otras bandas cercanas debido a la no linealidad de los filtros pasa bajos y pasa altos , este último estudio se lo puede encontrar de una manera detallada en una publicación de la Conferencia Internacional sobre Medio Ambiente e Ingeniería Eléctrica llamada 'Two modified method for Harmonic and Flicker measurement base on RWPC considering spectral leakage and edge effects' realizada por Saadati Marjan y Mortazavi Seyed.

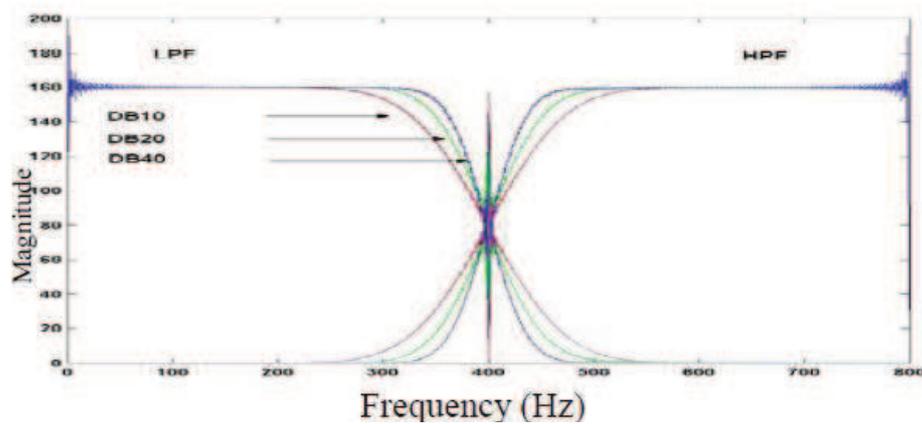


FIGURA 4.5.4.1: Características no lineales de los filtros pasa bajos y pasa altos utilizando la wavelet madre Daubechies de orden 10, 20 y 40.

3. En 6 niveles, se obtendrá 64 bandas uniformes de 30 Hz cada uno, alternativa que se puede considerar apropiada, ya que se puede calcular los armónicos pares e impares juntando dos bandas adyacentes, además se considera las líneas espectrales definidos en la norma y la dispersión de energía disminuirá porque el orden del armónico se encuentra en el centro de las dos bandas de salida.

En conclusión, la transformada Wavelet Packet aplicado a cualquier señal para medir armónicos de hasta el orden 32, constará de seis niveles de descomposición y una frecuencia de muestreo de 3840 Hz, es decir, 64 muestras por ciclo dando un total de 768 muestras en los 12 ciclos definidos en la norma.

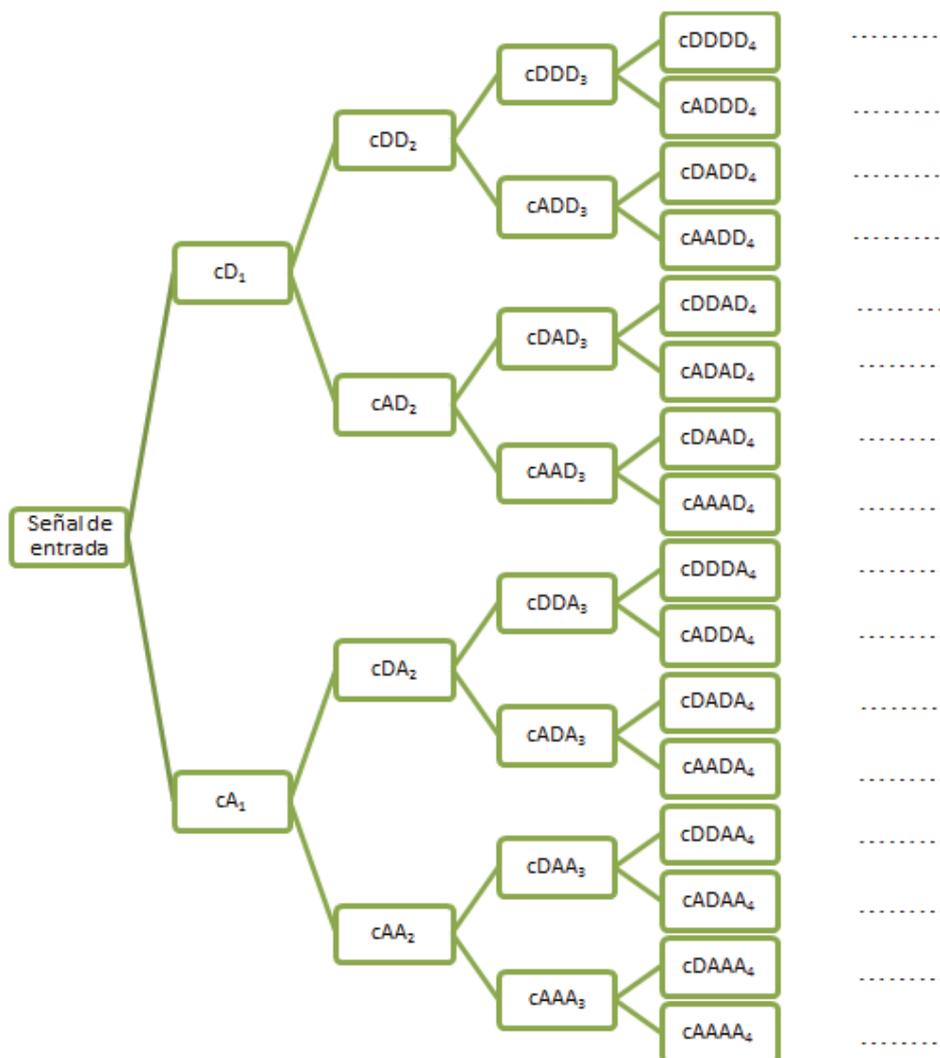


FIGURA 4.5.4.2: Árbol completo de descomposición de 6 niveles

La Tabla 4.5.4.1, indica las 64 bandas uniformes correspondiente a los 6 niveles de descomposición de la Figura 4.5.4.2:

$cAAAAA_6$	[0-30] Hz
$cDAAAA_6$	[30-60] Hz
$cADAAAA_6$	[60-90] Hz
$cDDAAAA_6$	[90-120] Hz
$cAADAAA_6$	[120-150] Hz
$cDADAAA_6$	[150-180] Hz
$cADDAAA_6$	[180-210] Hz

cDDDA ₆	[210-240] Hz
cAAADA ₆	[240-270] Hz
cDAADA ₆	[270-300] Hz
cADADA ₆	[300-330] Hz
cDDADA ₆	[330-360] Hz
cAADDAA ₆	[360-390] Hz
cDADDAA ₆	[390-420] Hz
cADDDA ₆	[420-450] Hz
cDDDDAA ₆	[450-480] Hz
cAAAADA ₆	[480-510] Hz
cDAAADA ₆	[510-540] Hz
cADAADA ₆	[540-570] Hz
cDDAADA ₆	[570-600] Hz
cAADADA ₆	[600-630] Hz
cDADADA ₆	[630-660] Hz
cADDADA ₆	[660-690] Hz
cDDDADA ₆	[690-720] Hz
cAAADDA ₆	[720-750] Hz
cDAADDA ₆	[750-780] Hz
cADADDA ₆	[780-810] Hz
cDDADDA ₆	[810-840] Hz
cAADDDA ₆	[840-870] Hz
cDADDDA ₆	[870-900] Hz
cADDDDA ₆	[900-930] Hz
cDDDDDA ₆	[930-960] Hz
cAAAAAD ₆	[960-990] Hz
cDAAAAAD ₆	[990-1020] Hz
cADAAAAAD ₆	[1020-1050] Hz
cDDAAAAAD ₆	[1050-1080] Hz
cAADAAD ₆	[1080-1110] Hz
cDADAAD ₆	[1110-1140] Hz
cADDAAD ₆	[1140-1170] Hz

cDDDAAD ₆	[1170-1200] Hz
cAAADAD ₆	[1200-1230] Hz
cDAADAD ₆	[1230-1260] Hz
cADADAD ₆	[1260-1290] Hz
cDDADAD ₆	[1290-1320] Hz
cAADDAD ₆	[1320-1350] Hz
cDADDAD ₆	[1350-1380] Hz
cADDDAD ₆	[1380-1410] Hz
cDDDDAD ₆	[1410-1440] Hz
cAAAADD ₆	[1440-1470] Hz
cDAAADD ₆	[1470-1500] Hz
cADAADD ₆	[1500-1530] Hz
cDDAADD ₆	[1530-1560] Hz
cAADADD ₆	[1560-1590] Hz
cDADADD ₆	[1590-1620] Hz
cADDADD ₆	[1620-1650] Hz
cDDDADD ₆	[1650-1680] Hz
cAAADDD ₆	[1680-1710] Hz
cDAADDD ₆	[1710-1740] Hz
cADADDD ₆	[1740-1770] Hz
cDDADDD ₆	[1770-1800] Hz
cAADDDD ₆	[1800-1830] Hz
cDADDDD ₆	[1830-1860] Hz
cADDDDD ₆	[1860-1890] Hz
cDDDDDD ₆	[1890-1920] Hz

TABLA 4.5.4.1: Resultado de las 64 bandas uniformes ordenados de abajo hacia arriba

Para que el componente armónico se encuentre en el centro de las bandas de salidas, se excluirá los coeficientes de aproximación y detalle correspondientes al nivel 6 (cAAAAA₆ y cDDDDDD₆).

Al descartar los dos coeficientes, solo se podrá medir hasta el armónico de orden 31 como se muestra en la Tabla 4.5.4.2:

C ₁	[30-90] Hz
C ₂	[90-150] Hz
C ₃	[150-210] Hz
C ₄	[210-270] Hz
C ₅	[270-330] Hz
C ₆	[330-390] Hz
C ₇	[390-450] Hz
C ₈	[450-510] Hz
C ₉	[510-570] Hz
C ₁₀	[570-630] Hz
C ₁₁	[630-690] Hz
C ₁₂	[690-750] Hz
C ₁₃	[750-810] Hz
C ₁₄	[810-870] Hz
C ₁₅	[870-930] Hz
C ₁₆	[930-990] Hz
C ₁₇	[990-1050] Hz
C ₁₈	[1050-1110] Hz
C ₁₉	[1110-1170] Hz
C ₂₀	[1170-1230] Hz
C ₂₁	[1230-1290] Hz
C ₂₂	[1290-1350] Hz
C ₂₃	[1350-1410] Hz
C ₂₄	[1410-1470] Hz
C ₂₅	[1470-1530] Hz
C ₂₆	[1530-1590] Hz
C ₂₇	[1590-1650] Hz
C ₂₈	[1650-1710] Hz
C ₂₉	[1710-1770] Hz
C ₃₀	[1770-1830] Hz
C ₃₁	[1830-1890] Hz

TABLA 4.5.4.2: Agrupación de las bandas restantes

Donde:

c_2 = Coeficientes resultante pertenecientes al primer armónico.

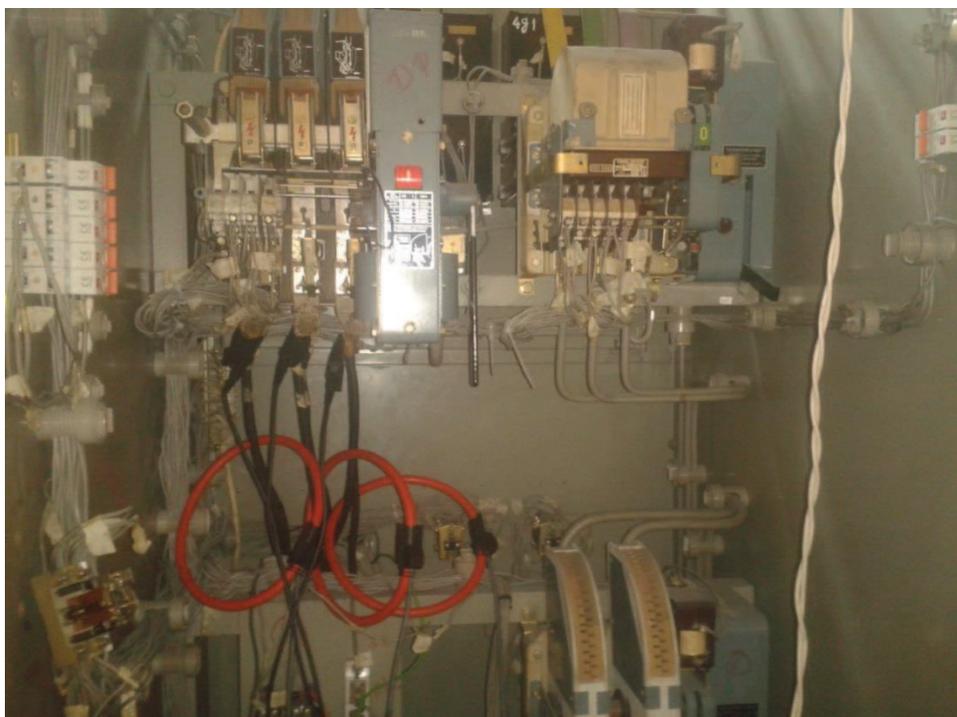
c_{31} = Coeficientes resultantes pertenecientes al trigésimo armónico.

La elección de wavelet madre, autores como S. Marjan y S. Seyed, en la misma publicación antes descrita, destacan la función Daubechies como la mejor de

todas, ya que ofrece resultados óptimos en análisis de armónicos. No obstante, otros autores como A. Domijan y A. Hari en su artículo 'On the Selection of Appropriate Filter Bank for Power Quality Monitoring', proponen además de la función Daubechies las wavelets madres Coiflets y Symmlets las apropiadas para el estudio de armónicos.

4.5.5 EJEMPLO DE APLICACIÓN

La medición de armónicos se realizó en el laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela Politécnica Nacional, específicamente en el Tablero de control del laboratorio una vez encendido: la máquina de inducción de la mesa N°15 y el cuarto de máquinas en lo que incluye los convertidores y los generadores de campo. Los convertidores y los generadores de campo, se prendieron con el objetivo de aumentar los componentes armónicos y la distorsión armónica total (THD) del laboratorio, puesto que, dichos valores eran muy bajos solo al energizar la máquina de la mesa N°15.



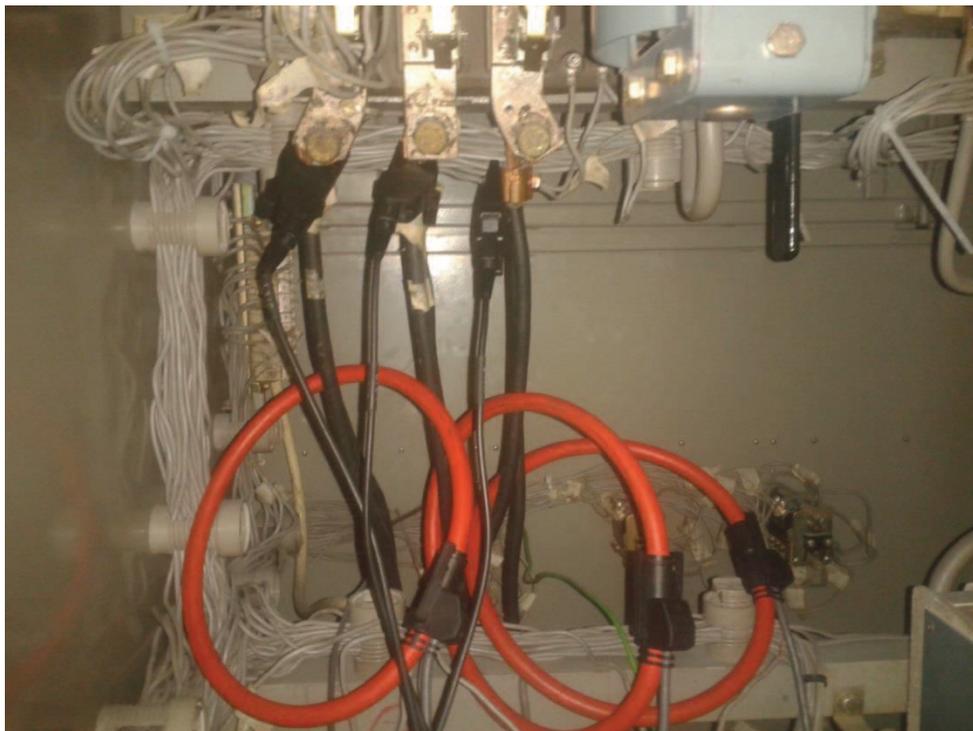


FIGURA 4.5.5.1: Conexión del equipo de medida en el Tablero de Control del Laboratorio de Máquinas Eléctricas



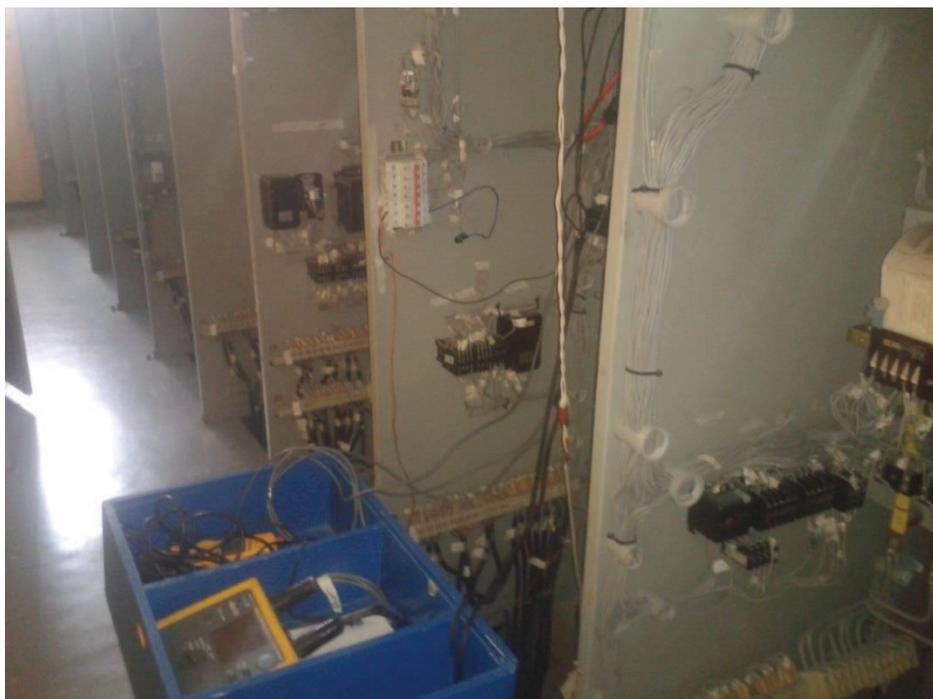


FIGURA 4.5.5.2: Analizador de red FLUKE 1735

Los resultados obtenidos con el analizador se presentan a continuación:

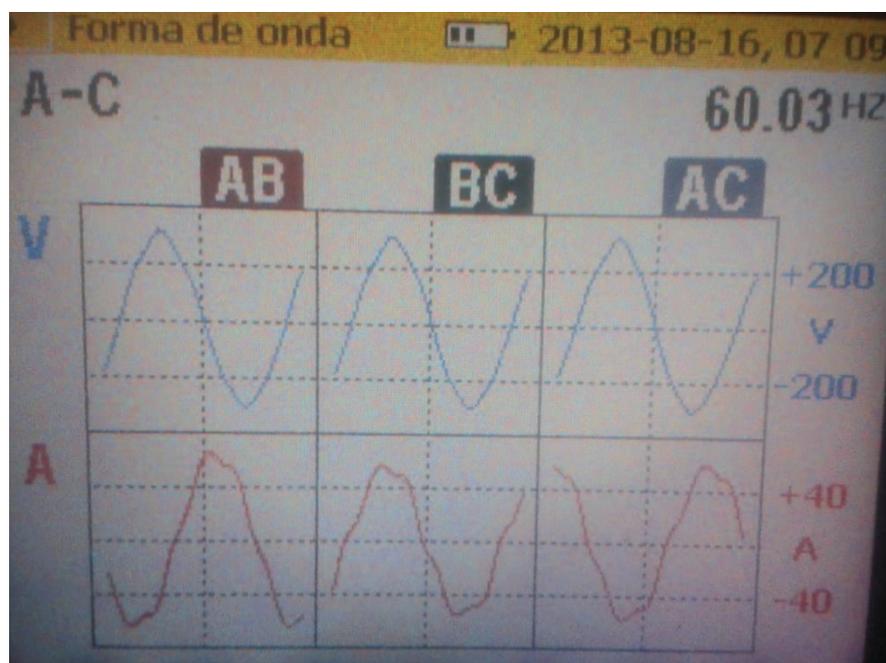


FIGURA 4.5.5.3: Formas de onda de voltaje y corriente en las fases AB, BC y AC

- Ondas de voltaje y corriente





FIGURA 4.5.5.4: Ondas de voltaje y corriente

- Armónicos de voltaje de la fase AB

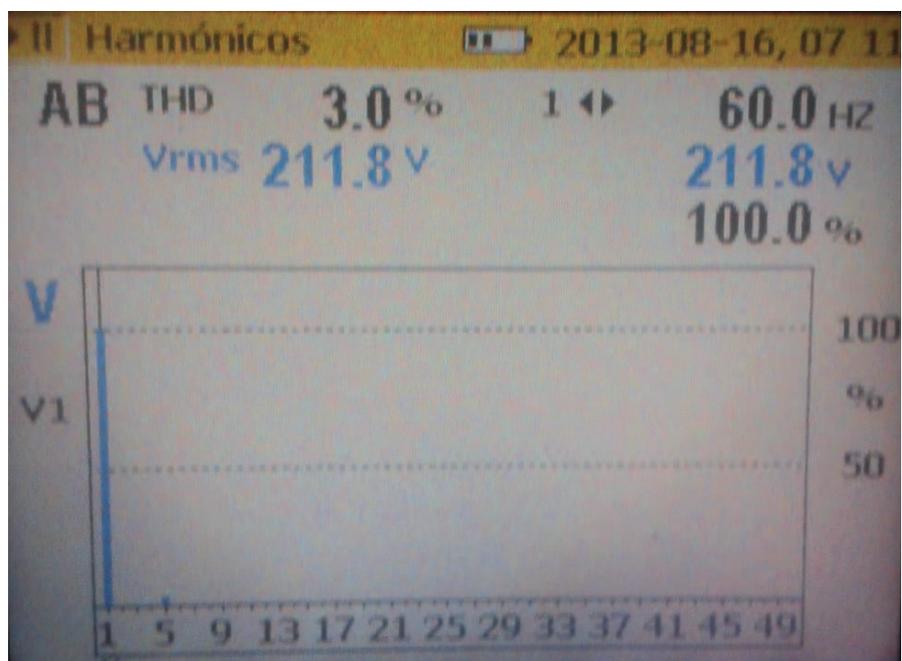
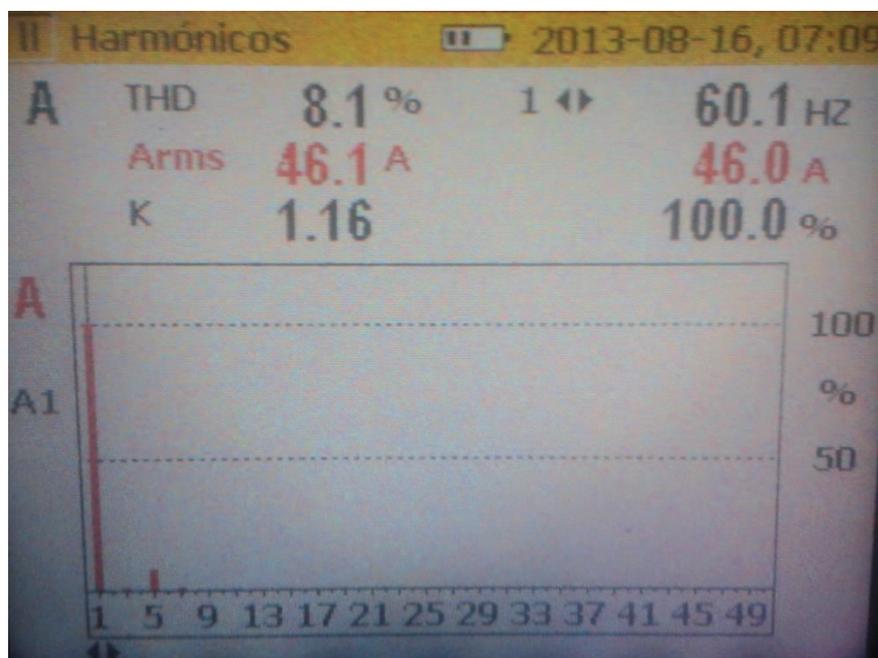






FIGURA 4.5.5.5: Valores eficaces de los armónicos de la onda de voltaje AB de orden 1, 3, 5, y 7

- Armónicos de corriente fase A





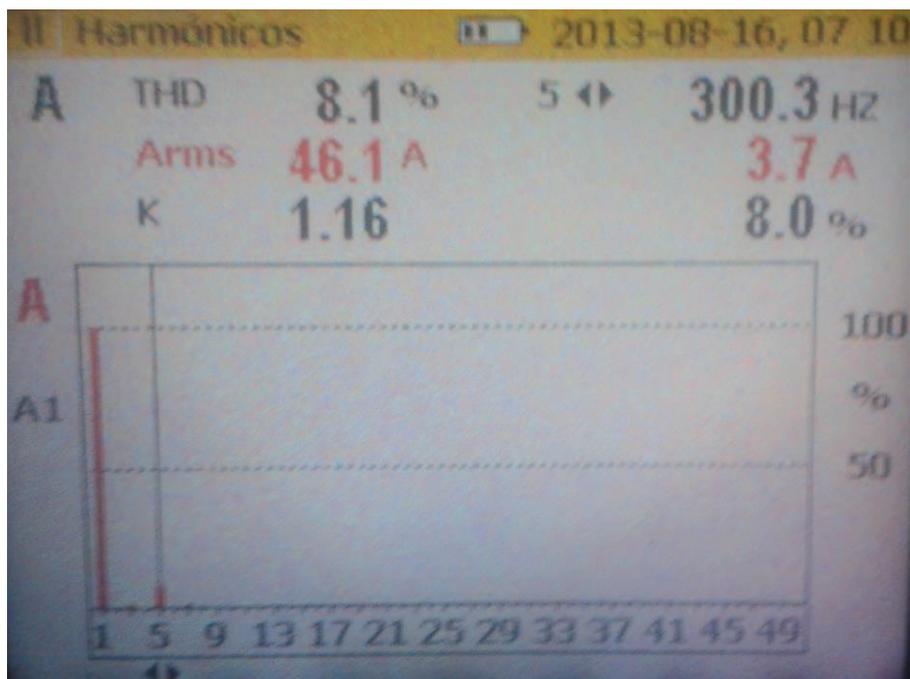


FIGURA 4.5.5.6: Valores eficaces de los armónicos de la onda de corriente fase A de orden 1, 3, 4, 5, y 6

En los cálculos posteriores, se realizará la comparación entre los armónicos medidos por el analizador de red y los calculados mediante el árbol completo de descomposición utilizando dos wavelets madres diferentes. Se tomará como referencia las siguientes ondas:

1) Voltaje de línea AB

La forma de onda del voltaje AB de la Figura 4.5.5.4, dibujado y simulado en el programa MATLAB, se aprecia en el gráfico 4.5.5.7, y el cual se observa que el grado de tendencia es muy alto con respecto a la obtenida en el laboratorio de máquinas eléctricas.

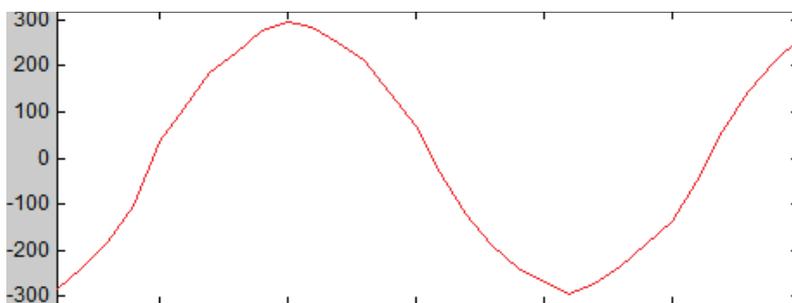


FIGURA 4.5.5.7: Onda de voltaje AB simulado en el programa MATLAB

- **Función Daubechies (db20):**

La Figura 4.5.5.4 simulada mediante los parámetros explicados en el literal 4.5.4, y escogiendo como wavelet madre la función Daubechies de orden 20, se tiene:

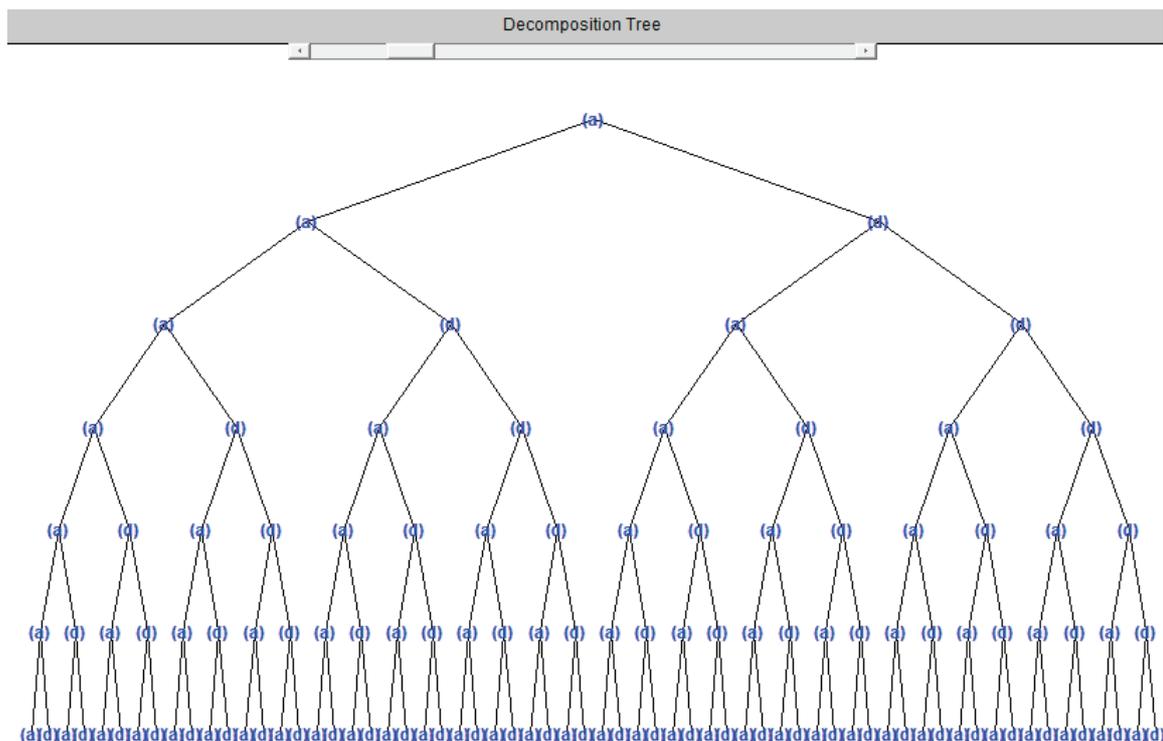


FIGURA 4.5.5.8: Árbol completo de descomposición de 6 niveles

Las formas de onda de un nodo en cada nivel de descomposición son:

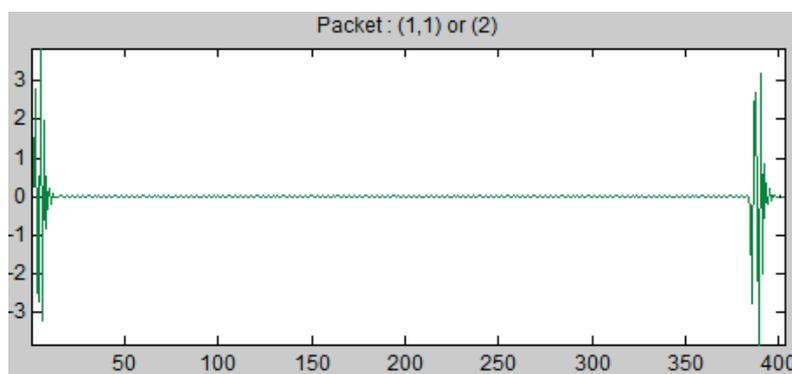


FIGURA 4.5.5.9: Primer nivel de descomposición correspondiente al coeficiente (cD_1)

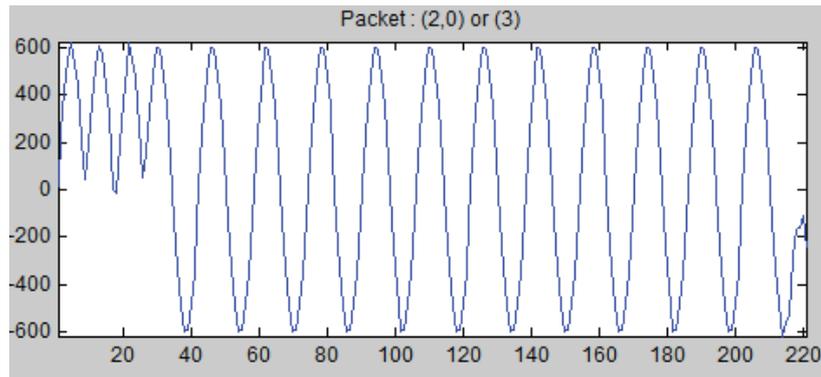


FIGURA 4.5.5.10: Segundo nivel de descomposición correspondiente al coeficiente (cAA_2)

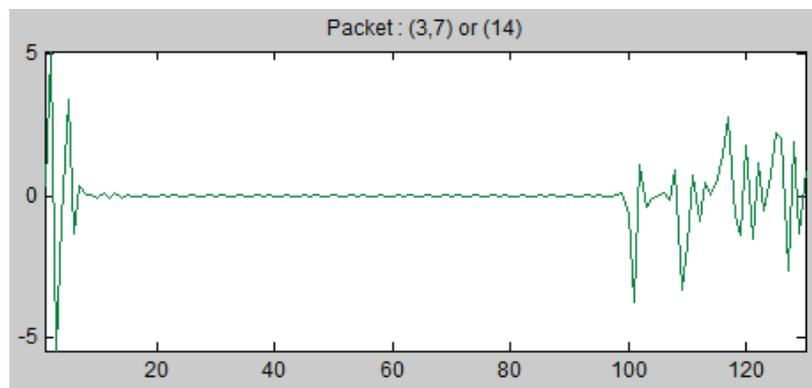


FIGURA 4.5.5.11: Tercer nivel de descomposición correspondiente al coeficiente ($cDDD_3$)

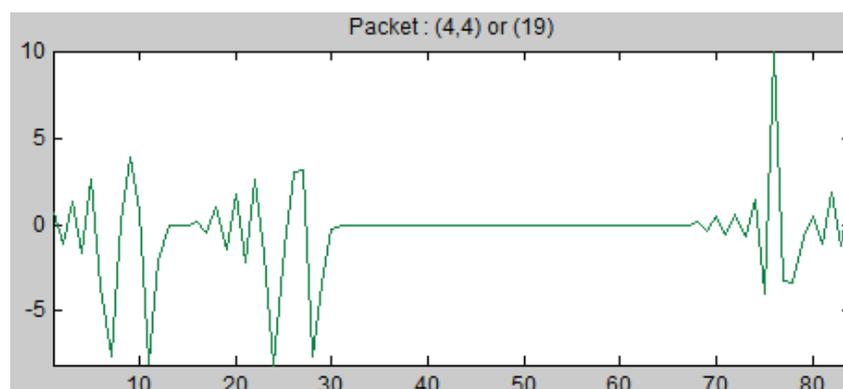


FIGURA 4.5.5.12: Cuarto nivel de descomposición correspondiente al coeficiente ($cAADA_4$)

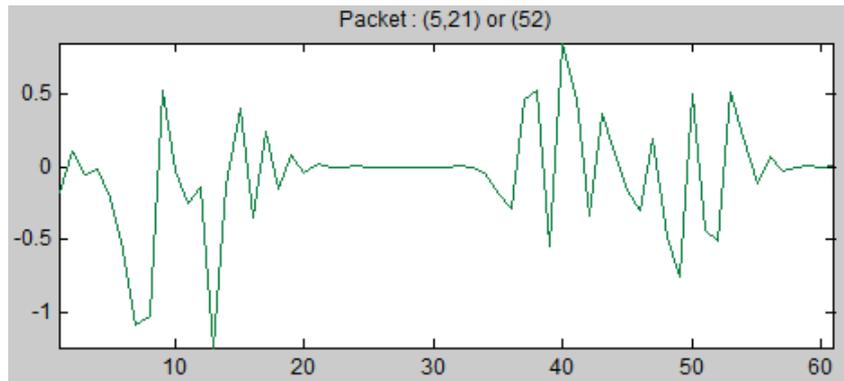


FIGURA 4.5.5.13: Quinto nivel de descomposición correspondiente al coeficiente ($cDADAD_5$)

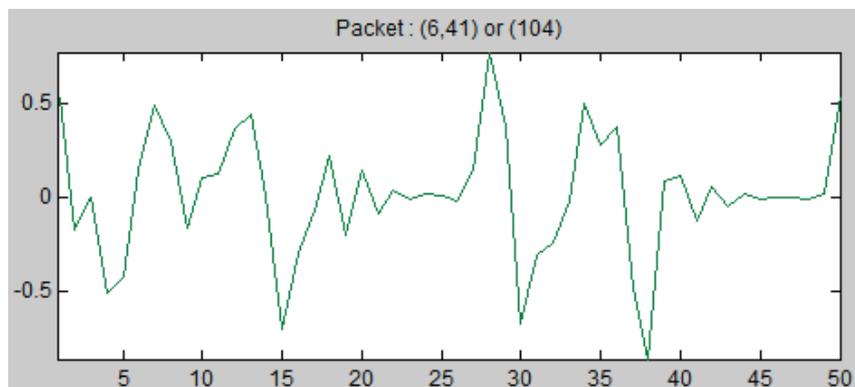


FIGURA 4.5.5.14: Sexto nivel de descomposición correspondiente al coeficiente ($cDAADAD_6$)

- **Función Coiflets (coif3):**

Las formas de onda para los diferentes nodos o bandas de salida de los seis niveles de descomposición de la Figura 4.5.5.4, se muestran en las Figuras 4.5.5.15 al 4.5.5.20.

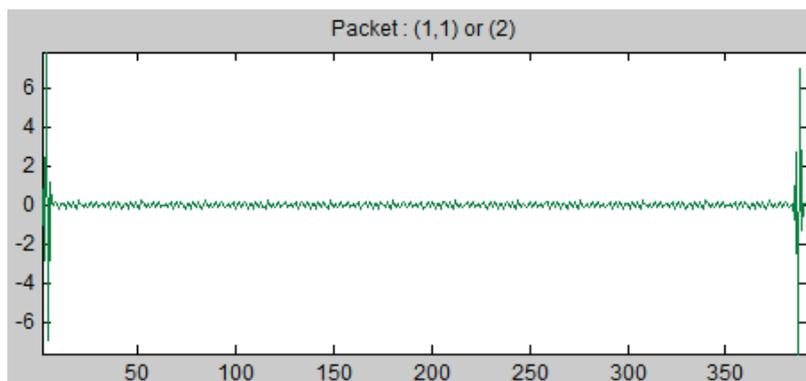


FIGURA 4.5.5.15: Primer nivel de descomposición correspondiente al coeficiente (cD_1)

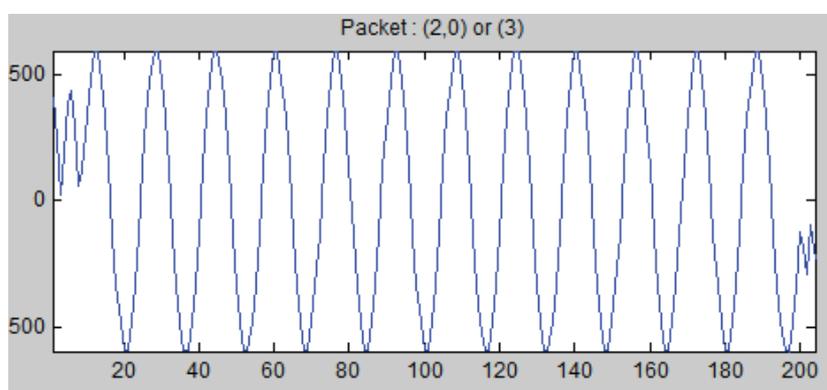


FIGURA 4.5.5.16: Segundo nivel de descomposición correspondiente al coeficiente (cAA_2)

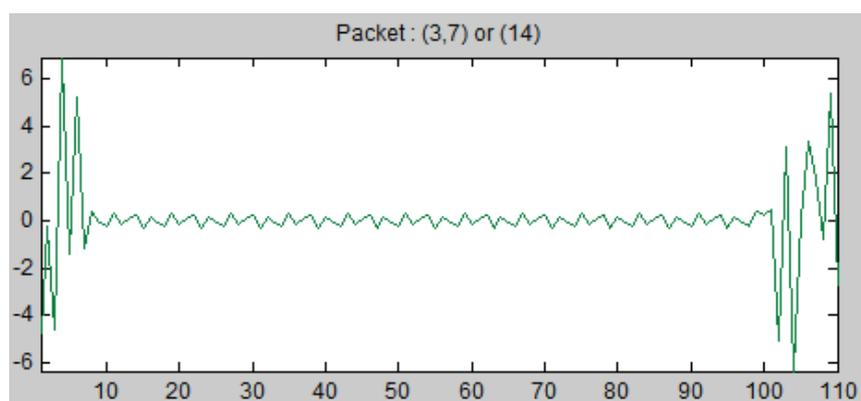


FIGURA 4.5.5.17: Tercer nivel de descomposición correspondiente al coeficiente ($cDDD_3$)

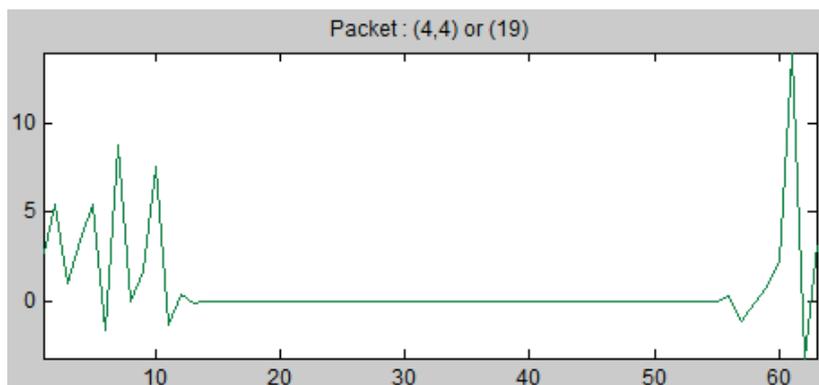


FIGURA 4.5.5.18: Cuarto nivel de descomposición correspondiente al coeficiente ($cAADA_4$)

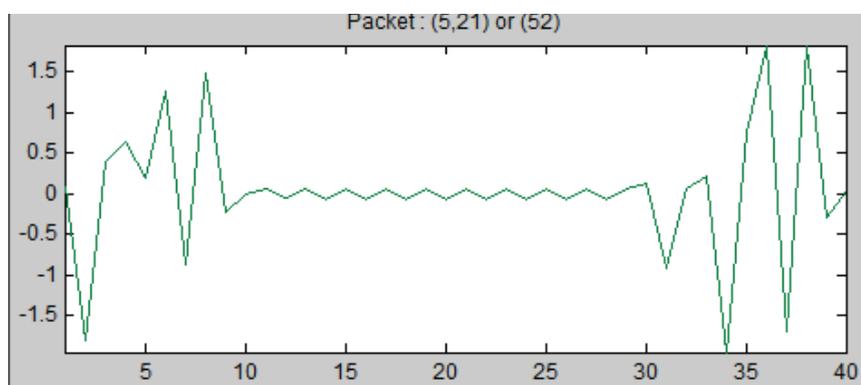


FIGURA 4.5.5.19: Quinto nivel de descomposición correspondiente al coeficiente ($cDADAD_5$)

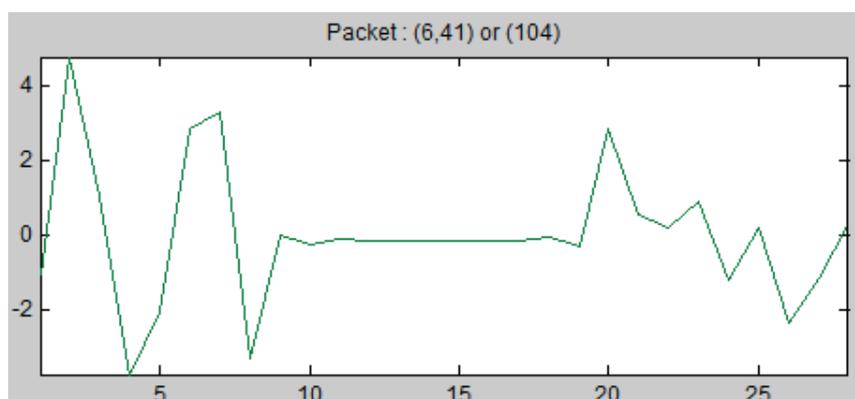


FIGURA 4.5.5.20: Sexto nivel de descomposición correspondiente al coeficiente ($cDAADAD_6$)

- **Cálculos**

Las ecuaciones [4-1] y [4-2], calculan los coeficientes de aproximación y detalle en el primer nivel de descomposición. Para obtener los coeficientes respectivos en el segundo nivel, se debe realizar el mismo procedimiento efectuado en el nivel uno, esto quiere decir, utilizar las mismas ecuaciones con la diferencia que el valor de la (k) muestras, son las que se calcularon en el nivel uno. Esta descomposición se repite continuamente hasta conseguir el nivel deseado.

Los valores de los coeficientes a la salida de los filtros pasa bajo para cualquier función se encuentran tabulados (Anexo 4), o se los puede obtener a través de MATLAB aplicando el siguiente pequeño programa:

```

"%Seleccionar la función Wavelet.
wname = 'coif3';
% Cálculo de los dos filtros asociados a la función wavelet
[Lo_D,Hi_D] = wfilters(wname);
subplot(221); stem(Lo_D);
title('Decomposition low-pass filter');
subplot(222); stem(Hi_D);
title('Decomposition high-pass filter');"63

```

Para elegir otras familias escribir los comandos descritos en la Tabla 4.5.5.1 en la variable 'wname'.

Familias Wavelets	Wavelets
Daubechies	'db1' or 'haar', 'db2', ... , 'db10', ... , 'db45'
Coiflets	'coif1', ... , 'coif5'
Symlets	'sym2', ... , 'sym8', ... , 'sym45'
Discrete Meyer	'dmey'
Biorthogonal	'bior1.1', 'bior1.3', 'bior1.5' 'bior2.2', 'bior2.4', 'bior2.6', 'bior2.8' 'bior3.1', 'bior3.3', 'bior3.5', 'bior3.7' 'bior3.9', 'bior4.4', 'bior5.5', 'bior6.8'

TABLA 4.5.5.1: Comandos utilizados en MATLAB para definir una familia Wavelet

⁶³ Mathworks, "Orthogonal and Biorthogonal filter banks". Consultado: <http://www.mathworks.com/help/wavelet/ref/wfilters.html>

La mayoría de libros que tabulan los coeficientes de los filtros no indican el valor de los filtros pasa altos, sin embargo, gracias a la propiedad que poseen los filtros de ortogonalidad, los filtros pasa altos pueden conseguirse a partir de los pasa bajos mediante la ecuación [4-13]:

$$g(n) = (-1)^n h(N-1-n) \quad \text{[4-13]}$$

Donde:

$g(n)$: Filtro pasa alto.

N : Orden de la wavelet madre.

$h(n)$: Filtro pasa bajo.

En el literal 4.5.3, se definió el valor eficaz de la señal mediante las ecuaciones [4-11] y [4-12], adicionalmente, es necesario definir el valor eficaz de voltaje y corriente en cada nodo o banda de salida para determinar la medida de cada orden del armónico, por lo tanto:

$$V_j^i = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} [c_j^i(k)]^2} \quad \text{[4-14]}$$

$$I_j^i = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} [c_j^i(k)]^2} \quad \text{[4-15]}$$

Donde:

i : Nodo o banda de salida.

j : Nivel de descomposición.

2^N : Número total de muestras de la señal.

V_j^i : Voltaje eficaz en el nodo i y en el nivel de descomposición j .

I_j^i : Corriente eficaz en el nodo i y en el nivel de descomposición j .

El valor eficaz al unir dos nodos se calcula mediante la siguiente expresión:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} [c_j^{i_1}(k)]^2 + \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} [c_j^{i_2}(k)]^2}{2^N}} \quad [4-16]$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} [c_j^{i_1}(k)]^2 + \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} [c_j^{i_2}(k)]^2}{2^N}} \quad [4-17]$$

Aplicando la ecuación [4-11] se consigue el valor eficaz de la onda total de voltaje y la ecuación [4-16] para el resto de componentes armónicas.

Los datos medidos con el analizador de red y los calculados mediante la transformada Wavelet Packet mediante las ecuaciones [4-11] y [4-16], se muestran en la Tabla 4.5.5.2:

Para mayor información de los cálculos de los coeficientes de aproximación y detalle revisar el Anexo 5.

Componente armónico	Fluke 1735	db20	coif3
1 (Fundamental)	211.8 V	211.48 V	182.73 V
2	0.5 V	2.00 V	67.92 V
3	0.4 V	0.51 V	5.48 V
4	0 V	0.84 V	4.68 V
5	6.3 V	6.5 V	1.24 V
6	0 V	0.71 V	0.33
7	1.1 V	1.19 V	1.41 V
8	0 V	0.88 V	4.32 V
9	0 V	0.56 V	0.061 V
10	0 V	0.42 V	0.157 V
11	0 V	0.48 V	0.16 V
12	0 V	0.11 V	0.30 V
13	0 V	0.39 V	0.35 V
14	0 V	0.25 V	0.39 V

15	0 V	0.32 V	0.34 V
16	0 V	1.26 V	0.60 V
17	0 V	1.4 V	0.058 V
18	0 V	1.23 V	0.097 V
19	0 V	0.95 V	0.056 V
20	0 V	0.9 V	0.087 V
21	0 V	0.6 V	0.12 V
22	0 V	0.9 V	0.065 V
23	0 V	0.8 V	0.076 V
24	0 V	0.9 V	0.082 V
25	0 V	1.2 V	0.099 V
26	0 V	0.5 V	0.13 V
27	0 V	0.52 V	0.18 V
28	0 V	0.23 V	0.1 V
29	0 V	0 V	0.044 V
30	0 V	0 V	0.097 V
31	0 V	0 V	0.11 V

TABLA 4.5.5.2: Resultados finales aplicando las funciones Daubechies y Coiflets para la onda de voltaje

Como se puede apreciar en la Tabla 4.5.5.2, los resultados de los armónicos impares de orden 1 (componente fundamental), 3, 5 y 7 aplicando la Wavelet madre Daubechies de orden 20, son similares a los medidos con el analizador de red Fluke 1735 pero con una pequeña variación en los decimales; en cambio, los otros armónicos pares e impares de hasta el orden 28, muestran variaciones unas más que otras, esto se debe a la dispersión de energía del contenido espectral que presentan las bandas de salida cercanas a causa de la no linealidad de los filtros como se mostró en la Figura 4.5.4.1. Para disminuir esos errores y acercarse a resultados óptimos, se puede utilizar la misma función con un orden mayor al empleado en los cálculos anteriores, como por ejemplo el orden 40.

La función Coiflets, aunque indica una menor dispersión del contenido espectral en aquellas bandas donde la familia Daubechies si presenta una variación

considerada, las componentes armónicas que tienen mayor distorsión poseen un alto grado de error (armónico 1, 3, y 5), y por lo tanto, esta función no es la mejor opción para realizar un análisis espectral en ondas estacionarias.

2) Corriente de la fase A

Construyendo de una manera aproximada la onda de corriente en el programa MATLAB, se observa que el grado de tendencia es muy alto con respecto a la obtenida en el laboratorio de máquinas eléctricas.

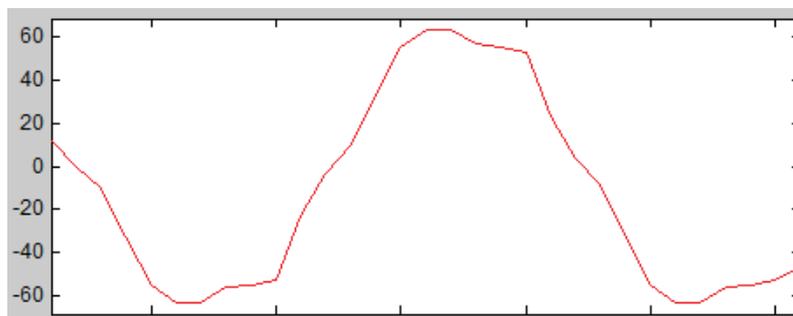


FIGURA 4.5.5.21: Onda de corriente de la fase A simulado en el programa MATLAB

- **Función Daubechies de orden 20:**

De manera similar que en el caso del voltaje de línea AB, el ancho de cada banda de salida será de 30Hz con una descomposición de 6 niveles para la Figura 4.5.4.2.

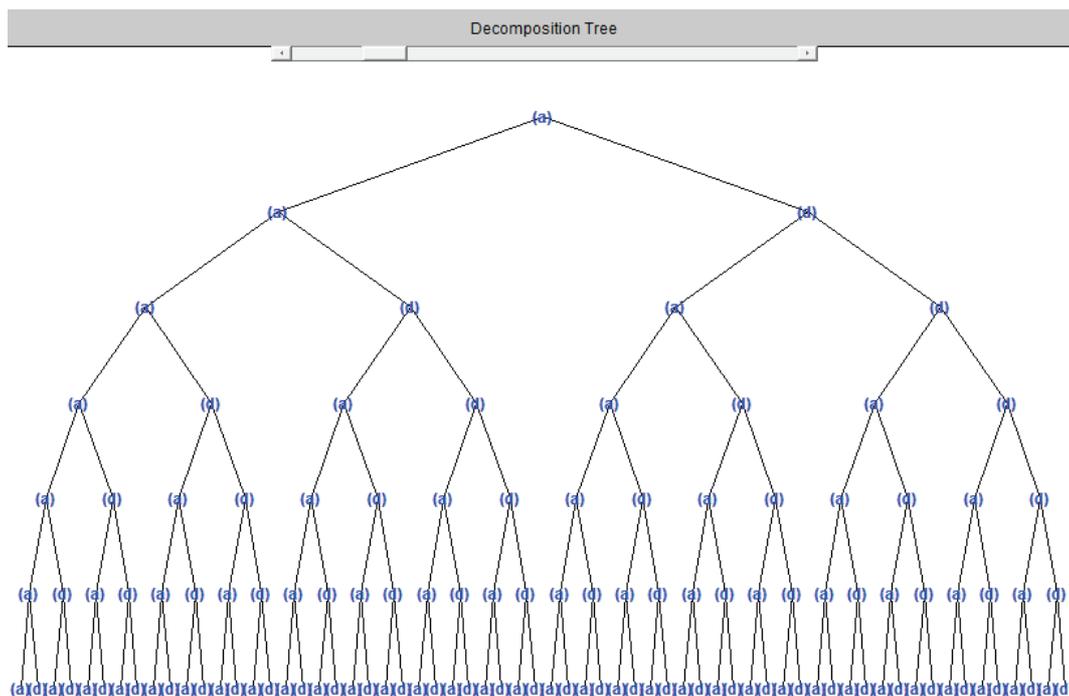


FIGURA 4.5.5.22: Árbol completo de descomposición de 6 niveles para la onda de corriente

Las formas de onda propias de un nodo en cada nivel son:

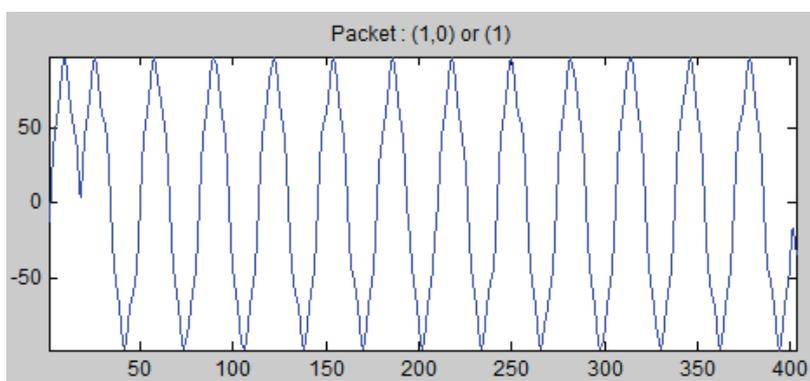


FIGURA 4.5.5.23: Primer nivel de descomposición correspondiente al coeficiente (cA_1)

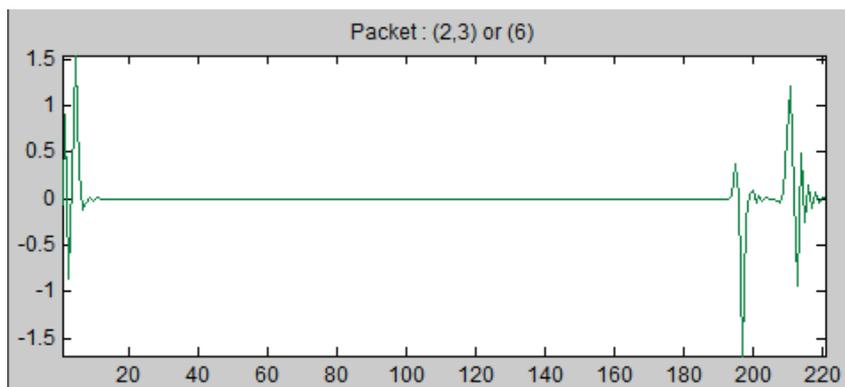


FIGURA 4.5.5.24: Segundo nivel de descomposición correspondiente al coeficiente (cDD_2)

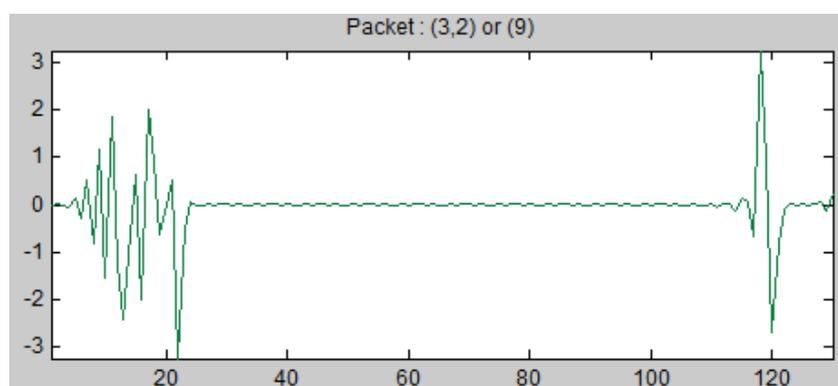


FIGURA 4.5.5.25: Tercer nivel de descomposición correspondiente al coeficiente ($cADA_3$)

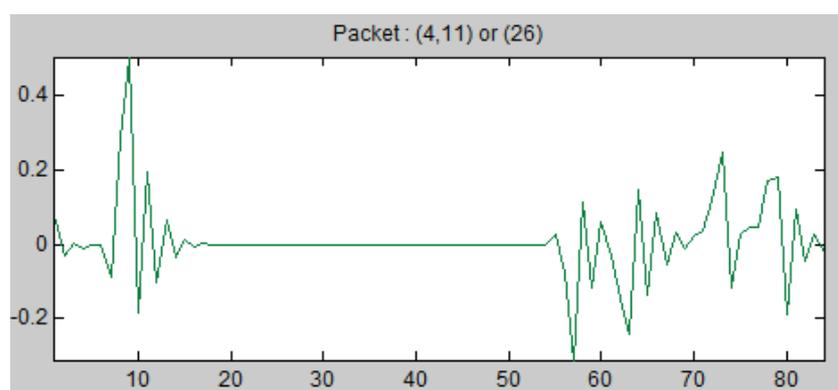


FIGURA 4.5.5.26: Cuarto nivel de descomposición correspondiente al coeficiente ($cDDAD_4$)

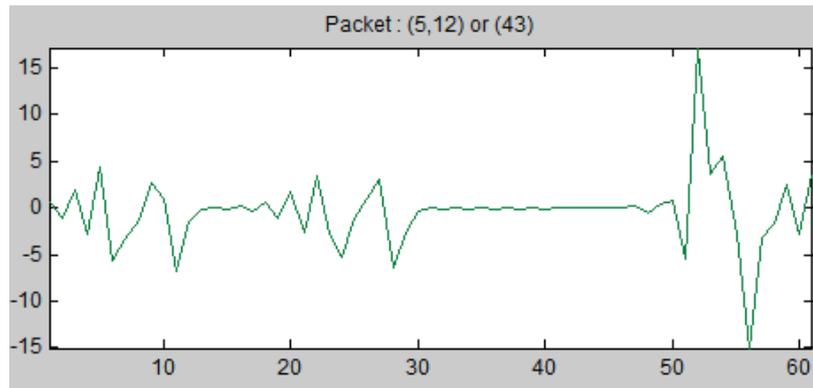


FIGURA 4.5.5.27: Quinto nivel de descomposición correspondiente al coeficiente ($cAADDA_5$)

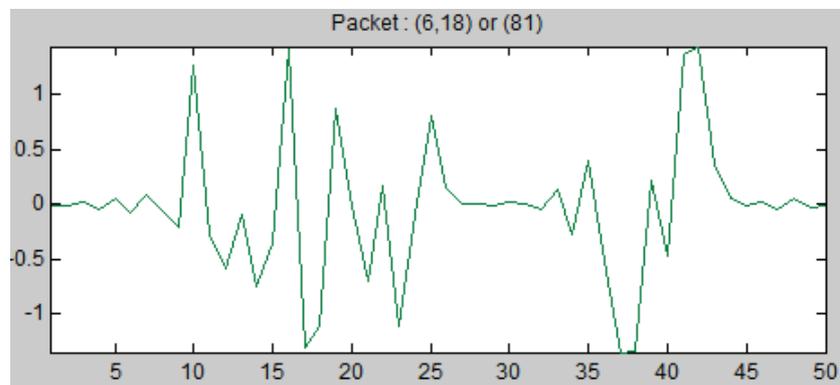


FIGURA 4.5.5.28: Sexto nivel de descomposición correspondiente al coeficiente ($cADAADA_6$)

- **Función Coiflets (coif3):**

Para la familia Coiflets las formas de onda en un nodo de cada nivel de descomposición son:

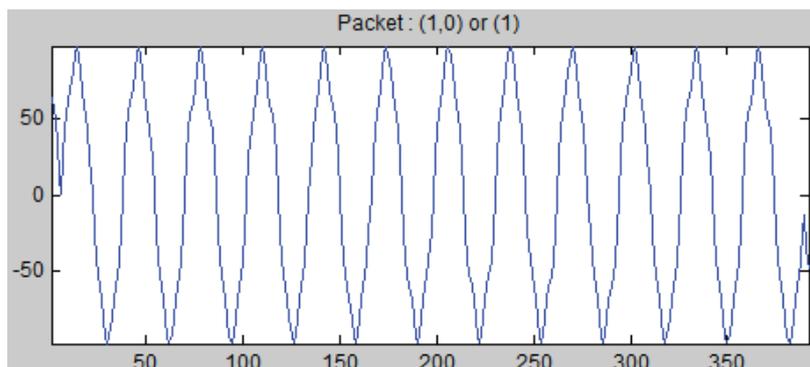


FIGURA 4.5.5.29: Primer nivel de descomposición correspondiente al coeficiente (cA_1)

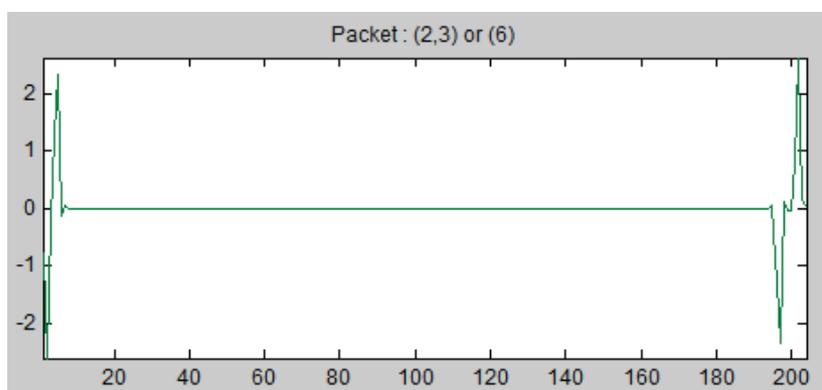


FIGURA 4.5.5.30: Segundo nivel de descomposición correspondiente al coeficiente (cDD_2)

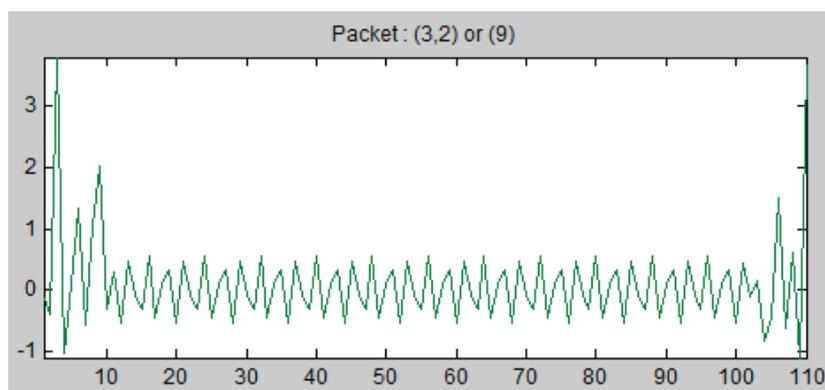


FIGURA 4.5.5.31: Tercer nivel de descomposición correspondiente al coeficiente ($cADA_3$)

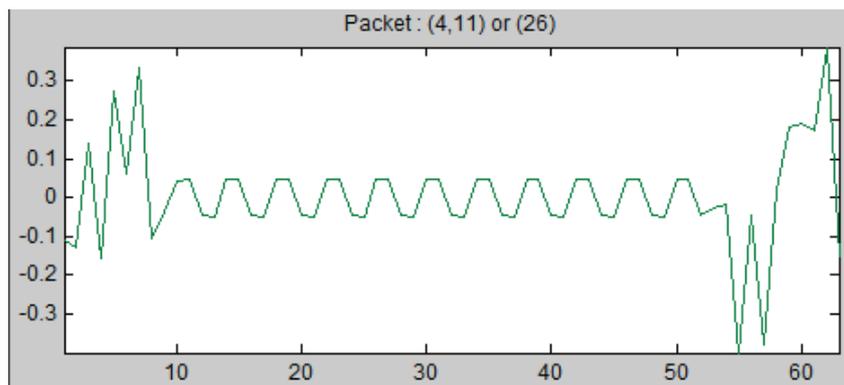


FIGURA 4.5.5.32: Cuarto nivel de descomposición correspondiente al coeficiente ($cDDAD_4$)

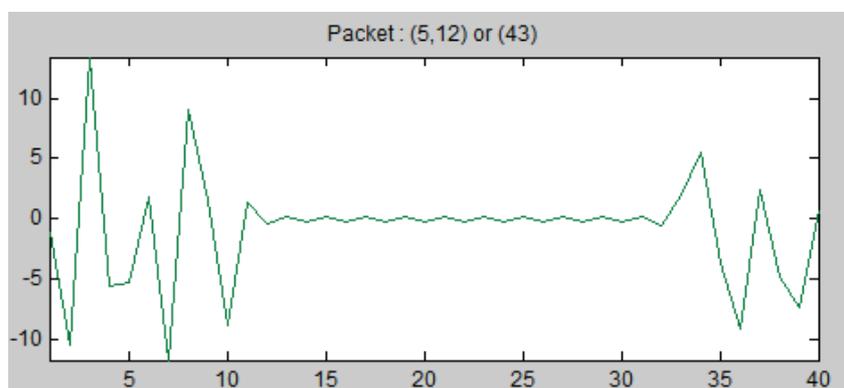


FIGURA 4.5.5.33: Quinto nivel de descomposición correspondiente al coeficiente ($cAADDA_5$)

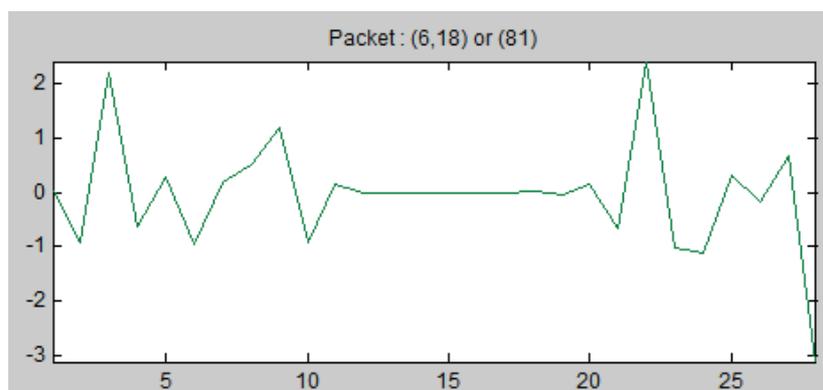


FIGURA 4.5.5.34: Sexto nivel de descomposición correspondiente al coeficiente ($cADAADA_6$)

Los resultados de las componentes armónicas de la onda de corriente calculadas mediante las wavelets Daubechies y Coiflets se observan en la Tabla 4.5.5.3:

Para mayor información de los cálculos de los coeficientes de aproximación y detalle revisar el Anexo 5.

Componente armónico	Fluke 1735	db20	coif3
1 (Fundamental)	46 A	46.65 A	37.89 A
2	0.2 A	0.86 A	13.85 A
3	0.4 A	0.59 A	0.73 A
4	0 A	0.32 A	1.50 A
5	3.7 A	3.31 A	0.33 A
6	0 A	1.98 A	0.21 A
7	0.6 A	0.53 A	0.77 A
8	0 A	0.22 A	2.40 A
9	0 A	0.38 A	0.015 A
10	0 A	0.21 A	0.041 A
11	0 A	0.11 A	0.081 A
12	0 A	0.028 A	0.08 A
13	0 A	0.069 A	0.091 A
14	0 A	0.051 A	0.07 A
15	0 A	0.094 A	0.24 A
16	0 A	0.17 A	0.21 A
17	0 A	1.19 A	0.02 A
18	0 A	0.18 A	0.025 A
19	0 A	0.15 A	0.014 A
20	0 A	0.035 A	0.023 A
21	0 A	0.05 A	0.032 A
22	0 A	0.014 A	0.018 A
23	0 A	0.022 A	0.021 A
24	0 A	0.032 A	0.024 A
25	0 A	0.13 A	0.027 A
26	0 A	0.022 A	0.034 A

27	0 A	0.03 A	0.045 A
28	0 A	0.011 A	0.026 A
29	0 A	0.024 A	0.012 A
30	0 A	0.024 A	0.024 A
31	0 A	0.013 A	0.025 A

TABLA 4.5.5.3: Resultados finales aplicando las funciones Daubechies y Coiflets para la onda de corriente

Al igual que el caso de la onda de voltaje, la función Daubechies presenta mejores resultados en comparación con su similar Coiflets, y para corregir los valores en aquellas componentes armónicas cuyo dato real sea cero, se debe aumentar el orden de la Wavelet madre Daubechies por las razones antes descritas en la Tabla 4.5.5.2.

4.6 MEDIDA DE INTERARMÓNICOS

Dado que, el equipo de medida FLUKE 1735, no tiene la capacidad de medir los interarmónicos para poder realizar un análisis comparativo como en el caso de los armónicos, se utilizará otro analizador de red denominado POWER XPLOERER PX5 donde una de las características principales de dicho equipo es la medida de interarmónicos.

La medida de interarmónicos es difícil y sus resultados dependen de muchos factores, por eso, la normativa IEC 61000-4-7 propone la medición al igual que los armónicos basado en agrupamiento llamado grupo interarmónico. Como los interarmónicos son definidos como señales de voltaje o corriente, cuya frecuencia es un múltiplo no entero de la frecuencia fundamental, se utilizará el árbol de descomposición de cinco niveles debido a que las once líneas espectrales de cada grupo interarmónico que establece la norma hasta el orden 31, se abarcará en cada una de las 32 bandas de salida (60 Hz). Además es importante señalar que antes de realizar los cálculos, es necesario filtrar las componentes armónicas que se encuentran en cada banda. La elección de la wavelet madre se basará en la función Daubechies de orden 20.

La medición de interarmónicos se lo realizó en la máquina de inducción de la mesa N°15 del laboratorio de máquinas eléctricas y la forma de onda a tomarse en cuenta para el análisis es el voltaje de línea AB.

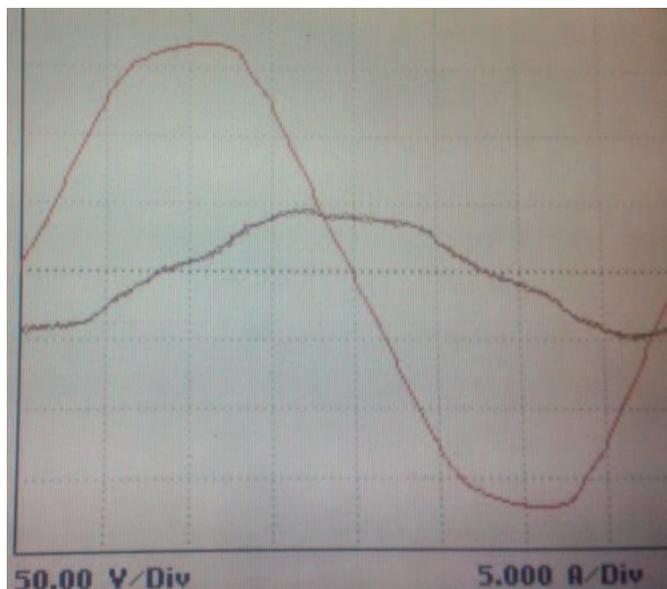


FIGURA 4.6.1: Voltaje de línea AB y Corriente fase A

La forma de onda del voltaje AB de la Figura 4.6.1, dibujado y simulado en el programa MATLAB, se aprecia en el gráfico 4.6.2. La figura obtenida en MATLAB no permite tener una buena observación del grado de tendencia con respecto a la original debido al ancho de la escala en el eje de las ordenadas, por lo tanto para realizar la comparación de una manera adecuada se utilizará el gráfico 4.6.3, el cual se observa que el grado de tendencia es alto con respecto a la obtenida en la máquina de inducción del laboratorio de máquinas eléctricas.

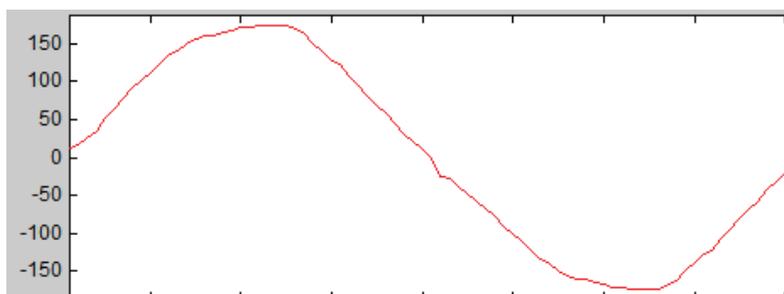


FIGURA 4.6.2: Onda de voltaje AB para el análisis de interarmónicos simulado en el programa MATLAB

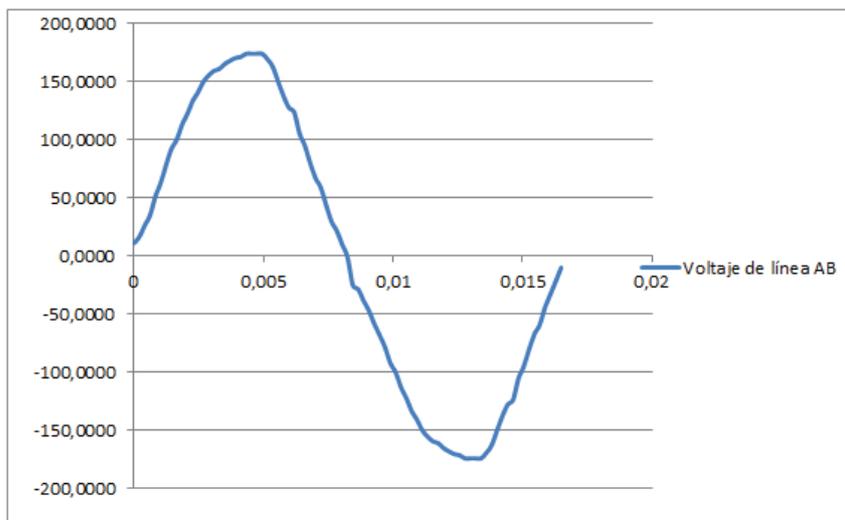


FIGURA 4.6.3: Onda de voltaje AB dibujado en EXCEL

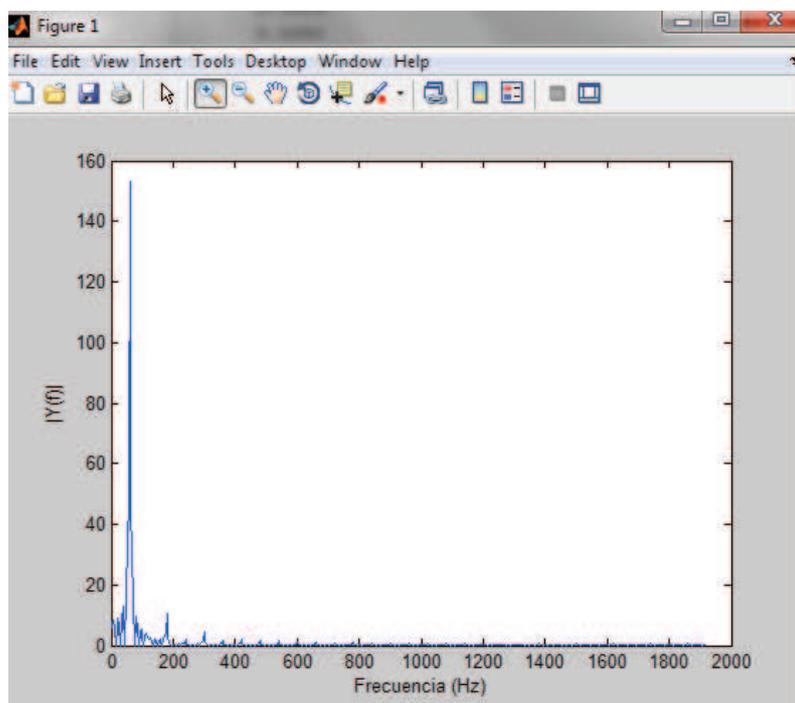


FIGURA 4.6.4: Transformada Rápida de Fourier de la Figura 4.6.2

Una vez eliminada la componente fundamental y las otras componentes armónicas de la Figura 4.6.2, se simula la nueva forma de onda mediante los parámetros antes explicados como la ventana de observación de 12 ciclos, una descomposición de cinco niveles, y una wavelet madre Daubechies de orden 20, obteniendo los siguientes resultados:

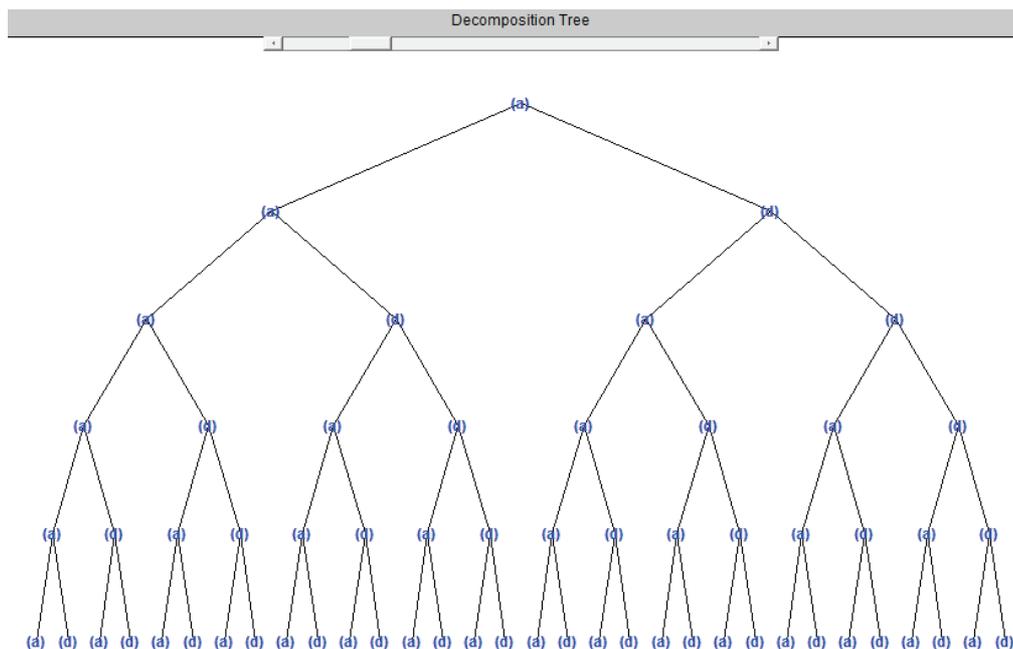


FIGURA 4.6.5: Árbol completo de descomposición de 5 niveles para el análisis de interarmónicos

Las formas de onda propias de un nodo en cada nivel son:

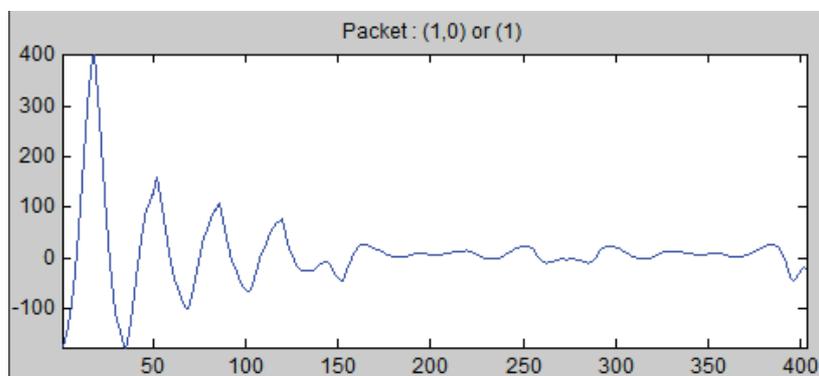


FIGURA 4.6.6: Primer nivel de descomposición correspondiente al coeficiente (cA_1)

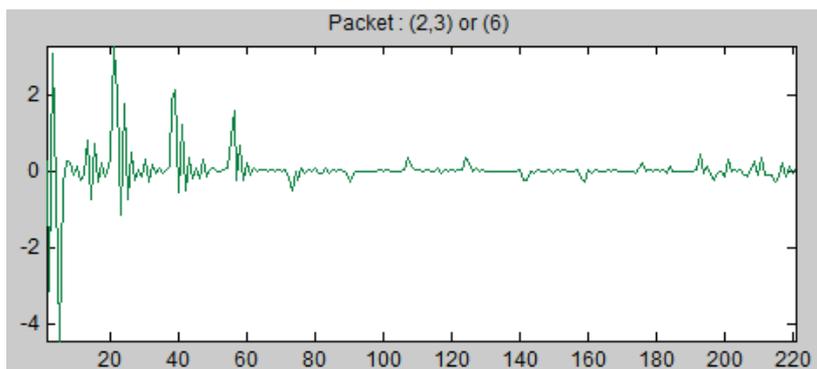


FIGURA 4.6.7: Segundo nivel de descomposición correspondiente al coeficiente (cDD_2)

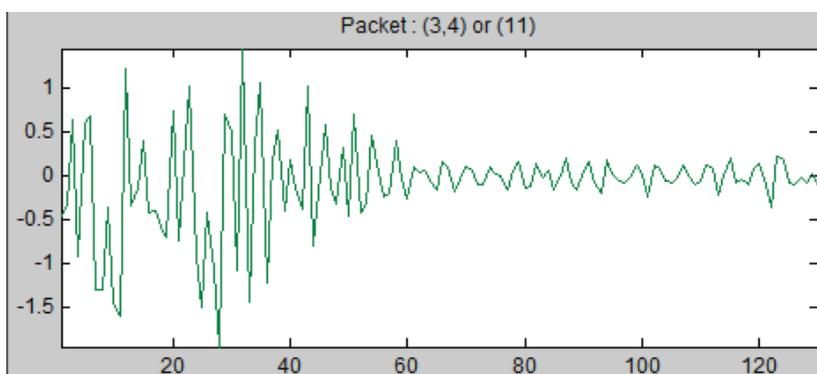


FIGURA 4.6.8: Tercer nivel de descomposición correspondiente al coeficiente ($cAAD_3$)

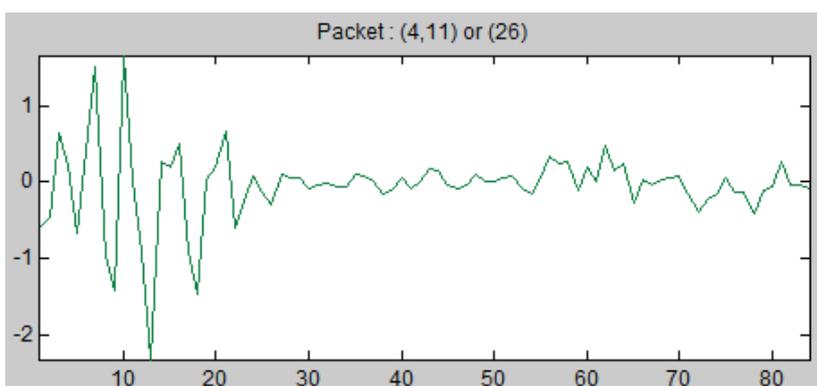


FIGURA 4.6.9: Cuarto nivel de descomposición correspondiente al coeficiente ($cDDAD_4$)

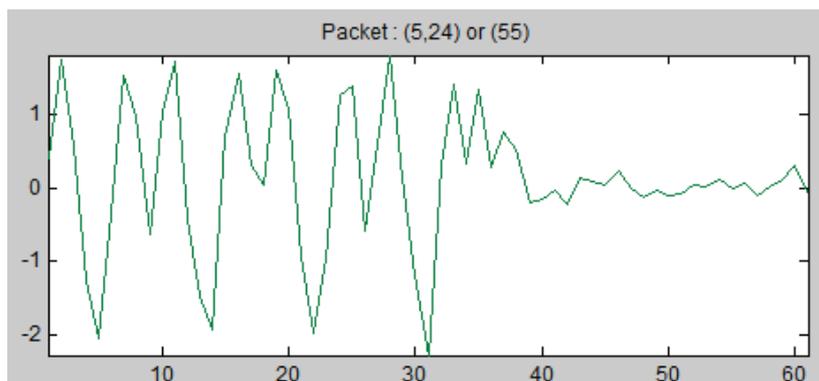


FIGURA 4.6.10: Quinto nivel de descomposición correspondiente al coeficiente ($cAAADD_5$)

Los resultados de los grupos interarmónicos de la onda de voltaje calculada mediante la wavelet Daubechies de orden 20 se observa en la Tabla 4.6.1.

Para mayor información de los cálculos de los coeficientes de aproximación y detalle revisar el Anexo 5.

Grupo Interarmónico	Power Xplorer PX5	db20
1	0,9707 V	0.12 V
2	0,13592 V	0.1322 V
3	0,064 V	0.098 V
4	0,11177 V	0.16 V
5	0,09641 V	0.11 V
6	0,07239 V	0.098 V
7	0,07836 V	0.0833 V
8	0,089337 V	0.147 V
9	0,095363 V	0.107 V
10	0,08013 V	0.097 V
11	0,927129 V	0.15 V
12	0,924914 V	0.14 V
13	0,077708 V	0.0685 V
14	0,04524 V	0.050 V
15	0,063968 V	0.0505 V
16	0,13824 V	0.131 V
17	0,05255 V	0.059 V

18	0,06324 V	0.077 V
19	0,05558 V	0.0684 V
20	0,928523 V	0.12 V
21	0,047449 V	0.04701 V
22	0,098519 V	0.0824 V
23	0,074729 V	0.069 V
24	0,121574 V	0.131 V
25	0,092912 V	0.08076 V
26	0,051761 V	0.0605 V
27	0,061391 V	0.063 V
28	0,071232 V	0.088 V
29	0,059868 V	0.0665 V
30	0,099858 V	0.097 V
31	0.060039 V	0.07265 V

TABLA 4.6.1: Resultado final aplicando la wavelet madre Daubechies para la onda de voltaje

Como se puede apreciar en la Tabla 4.6.1 la transformada wavelet packet empleada para el análisis de los grupos interarmónicos presenta resultados similares a los medidos con el POWER XPLORER PX5 siendo en la mayoría de los casos pequeñas variaciones en los primeros decimales, por lo tanto la elección de la wavelet madre Daubechies de orden 20 para este caso de estudio es correcta.

4.7 MEDIDA DE SUBARMÓNICOS

Los subarmónicos no tienen un concepto y un método de medida establecido por las normas Internacionales, es por esa razón que en uno de los artículos por parte de la IEEE de título 'Measurement of Subharmonics in Power Voltages' realizado por Barros J., de Apraiz M. y Diego R. I. lo definen como señales de voltaje o corriente de frecuencia menores que la frecuencia fundamental y en cuanto a la

medida de la perturbación establecen un valor eficaz de un grupo de subarmónicos como una extensión de los grupos interarmónicos y armónicos.

“Esa magnitud se define como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los valores rms de las componentes espectrales por debajo de la componente fundamental.”⁶⁴

$$50 \text{ Hz} \quad \Rightarrow \quad G_{subg}^2 = \sum_{i=1}^9 C_i^2 \quad [4-18]$$

$$60 \text{ Hz} \quad \Rightarrow \quad G_{subg}^2 = \sum_{i=1}^{11} C_i^2 \quad [4-19]$$

Donde:

G_{subg} = Valor eficaz del grupo subarmónico.

C_i = Valor eficaz de la componente espectral correspondiente a una línea espectral.

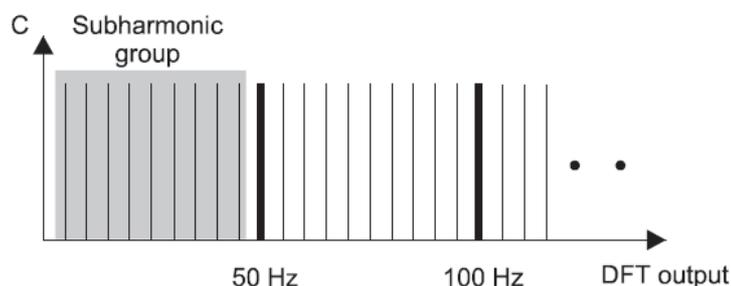


FIGURA 4.7.1: Ilustración del Grupo Subarmónico para un sistema de 50 Hz

Para el análisis mediante la transformada Wavelet Packet el ancho de banda en cada nodo debe ser de 60 Hz para abarcar todo el contenido espectral de la señal, por consiguiente el árbol completo de descomposición constará de cinco niveles con la misma frecuencia de muestreo de 3840 Hz. La dispersión de energía será baja porque los tonos de los subarmónicos no se acercan demasiado a los límites establecidos en los anchos de banda, y para la medida,

⁶⁴ Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE). “**Measurement of Subharmonics in Power Voltages**”. Consultado: <http://www.labplan.ufsc.br/congressos/powertech07/papers/31.pdf>

solo bastará la primera banda de salida ($cAAAAA_5$) filtrando el espectro de la primera componente armónica (fundamental).

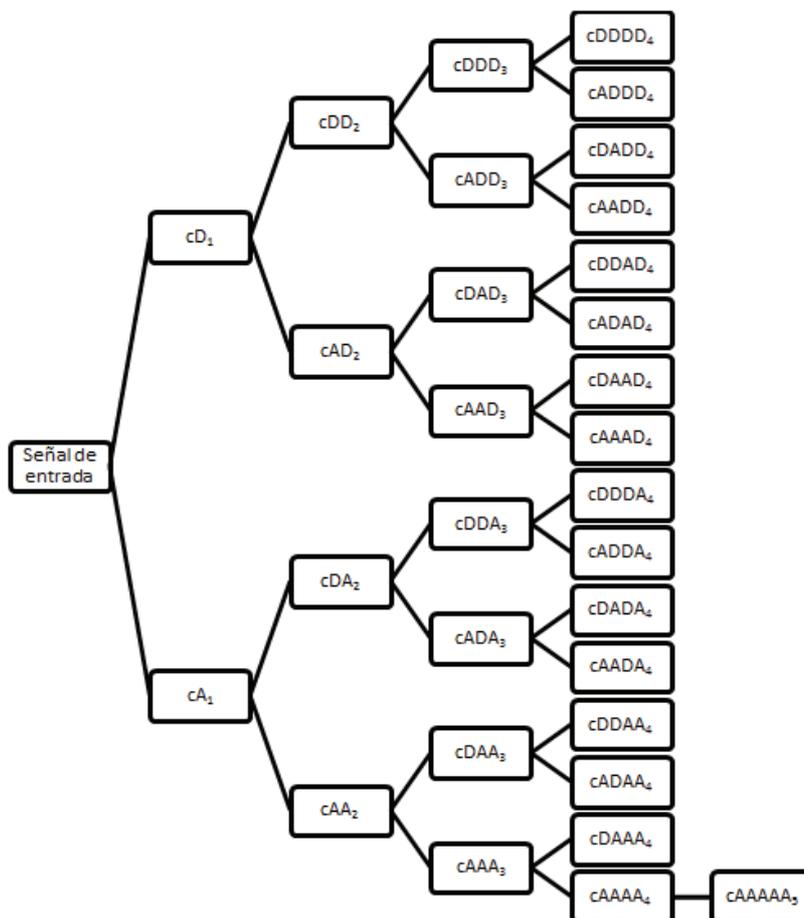


FIGURA 4.7.2: Wavelet Packet de cinco niveles de descomposición para la medida de subarmónicos

Se tomará en cuenta la misma forma de onda que se utilizó en la medida de interarmónicos para realizar el análisis de subarmónicos.

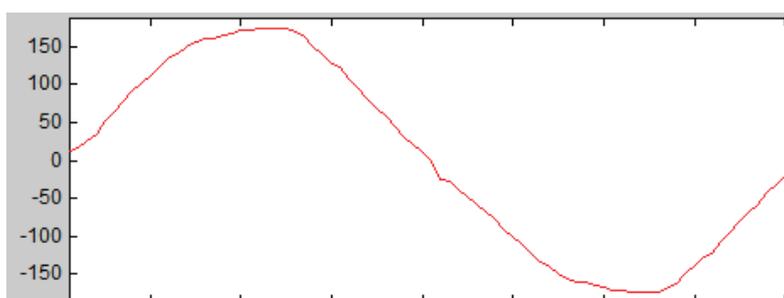


FIGURA 4.7.3: Onda de voltaje AB para el análisis de subarmónicos

La medida del grupo subarmónico de la onda de voltaje calculada mediante la wavelet Daubechies de orden 20 se observa en la Tabla 4.7.1:

Power Xplorer PX5	db20
0,081 V	0.091 V

TABLA 4.7.1: Medida del grupo subarmónico de la Figura 4.7.3

Como se puede apreciar en la Tabla 4.7.1 la medida del grupo subarmónico mediante la wavelet madre Daubechies de orden 20 y el analizador de red son semejantes con una ligera variación.

4.8 MEDIDA DEL VOLTAJE FLICKER

Debido a que los índices basados en la evaluación estadística como el flicker a corto y largo plazo solo ofrecen la gravedad cuantificada del problema; no son capaces de mostrar las características de los parpadeos, es por esta razón que con el uso del método de análisis multiresolución de la transformada Wavelet Packet, es capaz de detectar la señal del voltaje flicker y con él la frecuencia y la amplitud del voltaje.

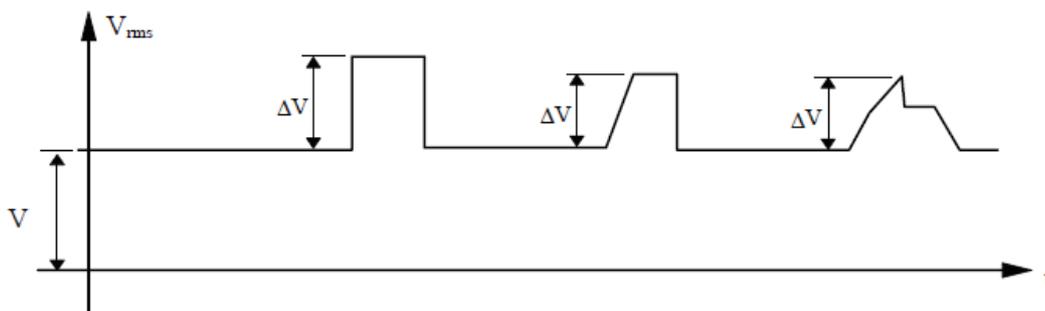


FIGURA 4.8.1: Fluctuaciones en el valor eficaz de la onda de voltaje

Para tener una idea acerca de cómo funciona este método se presenta el siguiente ejemplo:

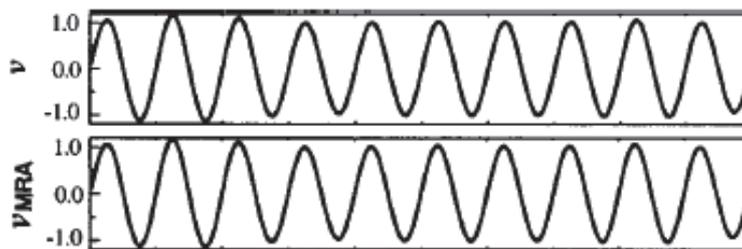


FIGURA 4.8.2: Forma de onda de voltaje con cambios en su amplitud

El cambio de la amplitud del voltaje se muestra en la Tabla 4-18:

	V_{rms}	Cambio de amplitud				
		ΔV_{01}	ΔV_{05}	ΔV_{10}	ΔV_{15}	ΔV_{30}
Valor calculado	1	0.031	0.052	0.08	0.047	0.0035
Wavelet Packet	1	0.031	0.052	0.08	0.047	0.0035

TABLA 4.8.1: Resultados de los cambios de amplitud de la forma de onda de voltaje de la Figura 4.8.2 mediante la Transformada Wavelet Packet

Como se puede observar en la Tabla 4.8.1, la transformada Wavelet Packet presenta resultados iguales a los calculados, en consecuencia es un método óptimo para la medida del voltaje flicker.

4.9 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez realizado los cálculos de armónicos, utilizando las familias de funciones Daubechies de orden 20 y Coiflets de orden 3, se puede hacer el siguiente análisis:

Los armónicos impares de orden 1, 3, 5 y 7 para la onda de voltaje, aplicando la Wavelet madre db20, son similares a los medidos con el analizador de red Fluke 1735 en el laboratorio de máquinas eléctricas pero con una pequeña variación en los decimales; en cambio, los otros armónicos pares e impares restantes muestran variaciones considerables siendo en algunos casos más del doble del valor real; estos incrementos se debe a dos causas, la primera corresponde a la dispersión de energía del contenido espectral que presentan las bandas de salida

cercanas a causa de la no linealidad de los filtros pasa bajos y pasa altos, y la segunda a la aproximación de los decimales en las operaciones matemáticas porque los coeficientes a la salida de los filtros no son números enteros y utilizan más de doce decimales.

Para reducir la dispersión de energía entre bandas se puede utilizar la misma función, pero con un orden mayor como el orden 40 porque a medida que se aumenta el orden, los filtros tienden a ser casi ideales como se muestra en la Figura 4.5.4.1.

La función Coiflets, muestra una menor dispersión del contenido espectral en aquellas bandas donde la familia Daubechies si presenta una variación elevada. Sin embargo, las componentes armónicas que tienen mayor distorsión (1, 3, 5 y 7) poseen un alto grado de error, por lo tanto, esta función no es la mejor forma de onda que se ajuste o se asemeje a la señal estudiada.

La medida de armónicos para la onda de corriente, la función db20 presenta mejores resultados que la función coif3 y a diferencia de la familia Daubechies usado en la onda de voltaje, la señal de corriente no muestra una dispersión significativa de energía en las bandas cuyo valor es cero. Para acercarse más a los valores reales se puede aumentar el orden de la función al igual que el caso de la onda de voltaje.

En la medida de interarmónicos y subarmónicos la wavelet madre db20 muestra resultados similares a los obtenidos con el analizador de red POWER XPLOER PX5, por lo tanto la elección de la wavelet básica es correcta para ese caso de estudio.

CAPÍTULO 5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez finalizado el estudio de la transformada Wavelet para el cálculo de las diferentes perturbaciones, se puede concluir y recomendar lo siguiente:

5.1 CONCLUSIONES

- La Transformada Wavelet por paquetes, se presenta como un método alternativo de la Transformada de Fourier para eliminar las deficiencias que muestra en el análisis tiempo- frecuencia de señales no estacionarias.
- El árbol completo de descomposición, es una herramienta matemática poderosa para el análisis de cualquier señal, porque permite dividir la señal original en subseñales de diferentes rangos de frecuencias e intervalos de tiempo.
- La no linealidad de los filtros pasa bajos y pasa altos no permiten obtener resultados exactos en la medida de armónicos, sin embargo, este problema puede disminuir si se utiliza un orden mayor de la Wavelet madre seleccionada.
- La función Daubechies presenta mejores resultados en la medida de armónicos que la Wavelet madre Coiflets, debido a que la primera función tiene más momentos de desvanecimiento que su similar Coiflets, permitiendo así, determinar la forma de onda de la familia Daubechies que mejor se ajuste a la señal a ser analizada.
- La elección de la Wavelet madre no solo depende de las propiedades que presenta cada una de las familias de funciones, sino también, de la semejanza que tiene la forma de onda de la wavelet básica y la señal estudiada.
- No siempre un mayor nivel de descomposición de lo adecuado, indica mejores resultados o buen análisis, todo depende del caso de estudio a realizarse.

- Si la onda examinada por los equipo de medida que generalmente solo miden armónicos no es periódica dentro de la ventana de observación o contiene interarmónicos, puede haber problemas con la interpretación de los resultados, ya que la mayoría de esos resultados son erróneos.
- La Transformada de Fourier no permite conocer el intervalo de tiempo en el cual sucede los espectros de frecuencia, siendo este un inconveniente para el análisis de señales no estacionarias cuyo contenido espectral puede variar en cada segundo.
- La Transformada de Fourier y la Transformada Wavelet parten del mismo principio de superposición de ondas con la diferencia que el primer método utiliza una suma infinita de ondas sinusoidales y cosenoidales, y el segundo método usa una wavelet madre en distintos valores de escala y traslación.
- La Transformada Wavelet no solamente tiene sus aplicaciones en el campo de la ingeniería, sino también, en el área de la medicina para la detección de enfermedades como el Alzheimer mediante la comparación de los espectros de frecuencias de un electroencefalograma de un paciente enfermo y uno que no lo padece.
- La Transformada Corta de Fourier a pesar de ser una evolución de la Transformada de Fourier para obtener el dominio del tiempo de los espectros de una onda no estacionaria, presenta diferentes problemas como el efecto del enventanado y el principio de incertidumbre.
- La Electrónica de Potencia a pesar de que se ha convertido en una herramienta fundamental para el funcionamiento de los equipos como en capacidad y rendimiento, ha deteriorado de una manera increíble la calidad de la energía eléctrica.
- La calidad de la energía eléctrica no solamente tiene relación con los usuarios y el control en las emisiones de las perturbaciones de los equipos conectados en red, sino también de las empresas distribuidoras del suministro eléctrico y los fabricantes de aparatos o equipos.

- El estándar norteamericano únicamente define las características principales que debe poseer un equipo de medida como la exactitud, selectividad y ventana de observación, caso contrario sucede con el estándar europeo que además de establecer las características de los equipos de medida indica el ancho de banda y tiempo de medición para cada uno de los diferentes tipos armónicos.
- El Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC), recopiló información de otros países en base a las experiencias que ellos han vivido para establecer los estándares mínimos de calidad y procedimientos técnicos de medición y evaluación a los que se deben someter las Empresas Distribuidoras del Servicio Eléctrico.
- El fenómeno de Gibbs es un problema que aparece en forma de pequeñas oscilaciones una señal con discontinuidades al tratar de expresarlo como una suma infinita de funciones senoidales y cosenoidales.
- El análisis multiresolución surge gracias al descubrimiento de Mallat en la Transformada Wavelet Discreta que demostró que cualquier onda puede ser descompuesta en dos categorías denominados los coeficientes de aproximación y los coeficientes de detalle.
- Los diseños de los aparatos o equipos que producen las fábricas, tienen que ser hechos de tal manera que funcionen en un entorno electromagnético de una manera satisfactoria, y además su nivel de emisión debe ser lo suficientemente bajo para no perturbar otros equipos que se encuentren dentro del mismo entorno electromagnético.
- El análisis multiresolución, es un buen método para determinar el contenido espectral en aquellas ondas o señales donde no se requiera de una descomposición a profundidad como las ondas cuadradas, triangulares, etc.
- El número de operaciones que se requiere en el algoritmo piramidal es menor que la Transformada Rápida de Fourier, puesto que, el método actual requiere de $N \log_2 N$ operaciones; mientras que el método propuesto solamente necesita de N multiplicaciones y sumas.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda la implementación de la Transformada Wavelet Packet, puesto que, permite determinar la medida de las perturbaciones de cualquier forma de onda sin ninguna restricción como de tipo estacionario, no estacionario, transitoria, periódica o no periódica.
- En la medida de las perturbaciones, se recomienda que la señal a ser analizada esté representada bajo las disposiciones establecidas en las normas Internacionales.
- Para aumentar el número de las componentes armónicas o grupos interarmónicos hasta el orden 64, es necesario duplicar la frecuencia de muestreo y adicionar un nivel de descomposición.
- La medida de armónicos, interarmónicos y subarmónicos en el presente trabajo, está realizado para un sistema de 60 Hz, si se desea para uno de 50 Hz es necesario cambiar la frecuencia de muestreo a 3200 Hz y la ventana de observación a 10 ciclos.
- Estar al tanto de las diferentes soluciones técnicas existentes a nivel mundial sobre las perturbaciones de las redes eléctricas, especialmente las personas propietarias de empresas generadoras de estos fenómenos.

CAPÍTULO 6.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- INTEREMPRESAS. “El coste de los armónicos”. Disponible: <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/9294-El-coste-de-los-armonicos.html>. 15/09/2004.
- NAVARRO, Jaime, Introducción a la transformada wavelet continua. Primera Edición. Editorial Reverté. México. 2010
- GOSWAMI, Jaideva, Fundamentals of wavelets. Primera edición. Editorial Wiley. New York. 1999
- FORNIELES, Francesc. “Armónicos: Efectos, diagnóstico y soluciones”. Disponible: http://www.jcee.upc.es/JCEE2009/pdf_ponencias/PDFs/Fornieles_17_11_09_M.pdf. 2009.
- MORA, Juan. “Perturbaciones en la onda de tensión: Huecos [sag] y Sobretensiones [swell]”. Disponible: http://eia.udg.es/~secse/curso_calidad/curso4-huecosdetension.pdf. 11/03/2003.
- MEROÑO, P. A.; GÓMEZ, F. C. “Análisis comparativo de las técnicas de procesamiento de señales de vibración para la detección de fallos de engranajes”. Disponible: www.uclm.es/actividades/2010/CongresoIM/pdf/cdarticulos/204.pdf
- ACEVEDO, L. “Computación Paralela de la Transformada Wavelet; Aplicaciones de la transformada Wavelet al álgebra lineal numérica”. Disponible: www.dsic.upv.es/docs/bib-dig/tesis/etd-05152009-123504/phd.pdf. 05/2009
- ESCUELA SUPERIOR DE INGENIEROS, Universidad de Sevilla, “Extracción de características de textura basada en la transformada Wavelet discreta”. Disponible: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11494/fichero/PROYECTO%252FCapitulo+4.pdf>
- ASAUSTRE, O.; GÓMEZ, C. “Compresión con Wavelet”. Disponible: www.sav.us.es/formaciononline/.../wavelet/wavelet-presentacin.ppt

- GONZÁLEZ, R. A., “Algoritmo basado en Wavelets aplicado a la detección de incendios forestales”.
 Disponible: catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/mel/...g_ra/capitulo2.pdf
- MATHWORKS, “Introduction to Wavelet Families”. Disponible: www.mathworks.com
- GARCÍA, Ramón, (2006). “Análisis wavelet aplicado a la medida de armónicos, interarmónicos y subarmónicos en redes de distribución de energía eléctrica”, Universidad de Cantabria, España.
- GÓMEZ, H. O., “Aplicación de la Transformada Wavelet y el método level set para el filtrado y segmentación de imágenes”. Disponible: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/1926>
- BORRÁS, María. “Calidad de suministro eléctrico”. Disponible: http://www.ccoo.us.es/uploads/descargas/formacion/cursos/2009%20-%20calidad%20redes%20electricas/curso_armonicos_parte_1.pdf
- CASTRO, Rosa. “Análisis de la teoría de ondículas orientada a las aplicaciones en ingeniería eléctrica: Fundamentos”. Disponible: www.uta.cl/hdiaz/Documents/Fundamentos_Wavelets.pdf. 07/2002.
- COIFMAN, R; WICKERHAUSER, M. “Entropy-based algorithms for best basis selection”.
 Disponible:
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/abstractAuthors.jsp?reload=true&tp=&arnumber=119732&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jjs%3Farnumber%3D119732. 06/08/2002.
- GEETHA, S. “Wavelet Analysis and Applications”. Disponible: <http://books.google.com.ec/books?id=ON2q3zLrD1gC&pg=PA133&lpg=PA133&dq=Power+Measurement+Using+the+Wavelet+Transform&source=bl&ots=8wqa-T0OMO&sig=vLUaYshn4e3egUnDAf0BsTv--W0&hl=es-419&sa=X&ei=vvo5UtszpOLaBaXtgZgM&ved=0CHkQ6AEwCDgU#v=onepage&q=Power%20Measurement%20Using%20the%20Wavelet%20Transform&f=false>. 2004.

- YANTI, Efrina; ZEN-ICHIRO, Kawasaki. “Wavelet Packet Transform for RMS and Power Measurements”. Disponible: <http://ir.library.osaka-u.ac.jp/dspace/bitstream/11094/3237/1/00970246.pdf>. 04/2002.
- GÓMEZ, E.; SILVA, D.; APONTE, G. “Selección de una wavelet madre para el análisis frecuencial de señales eléctricas transitorias usando WPD”. Disponible: http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-33052013000200009&script=sci_arttext#TAB01
- MATHWORKS, “Orthogonal and Biorthogonal Filter Banks”. Disponible: <http://www.mathworks.com/help/wavelet/ref/wfilters.html>. 08/2013.
- ADEL, A; MAJED, A.; WAAD, N. “A Wavelet Packet Transform – Based Technique for the Discrimination of Inrush Currents from Faults in Three-Phase Transformer”. Disponible: <http://www.iasj.net/iasj?func=fulltext&ald=55883>. 15/08/2011.
- MARJAN, S., SEYED, S. “Two modified method for Harmonic and Flicker measurement base on RWPC considering spectral leakage and edge effects”. Disponible: <http://eeeic.eu/proc/papers/43.pdf>.
- FÉRNANDEZ, Francisco; TOLEDO, Rodrigo. “Seminario para optar al título de Ingeniero de Ejecución en Electricidad”. Disponible: http://cybertesis.ubiobio.cl/tesis/2010/fernandez_f/doc/fernandez_f.pdf. 2010.
- MARTÍNEZ, Félix; PERIS, Alfredo, RODENAS, Francisco. “Tratamiento de señales digitales mediante wavelets y su uso con Matlab”. Disponible: <http://books.google.com.ec/books?id=JSQMAQAAQBAJ&pg=PA120&lpg=PA120&dq=entropia+wavelet+packet+matlab&source=bl&ots=zs4Dgbtt7s&sig=PUcNO1DUZe0bqrCLa8KM4byUxxs&hl=es-419&sa=X&ei=ZP9WUpOsJKuh4AOFjID4CQ&ved=0CDcQ6AEwAQ#v=onepage&q&f=false>
- YE, Kai; HUANG, Chao; ZHANG Xue; YANG, Xia. “The Design of Power Harmonic Measurement System Base on ARM and Wavelet Packet Transform”. Disponible: http://www.joics.com/publishedpapers/2012_9_15_4647_4654.pdf. 2012

- Componentes electrónicos y dispositivos especiales (CEDE). “Registrador de Voltaje Trifásico Fluke 1735”. Disponible: <http://www.cedesa.com.mx/fluke/registadores/voltaje/1735/>
- FLUKE. “Registrador Trifásico Fluke 1735”. Disponible: <http://www.fluke.com/fluke/eses/medidores-de-calidad-de-la-energ%C3%ADa-el%C3%A9ctrica/registadores-de-calidad-el%C3%A9ctrica/fluke-1735.htm?PID=56028>
- SALAZAR, Gustavo. “Transformada Discreta de Fourier”. Disponible: <http://www.slideshare.net/gugaslide/transformada-discreta-de-fourier-presentation.22/12/2008>.
- RINCÓN, José. “La Transformada Rápida de Fourier”. Disponible: https://lc.fie.umich.mx/~jrincon/Apuntes%20PDS_cap_6.pdf. 2010.
- DE LA FRAGA, Luis. “La Transformada Discreta de Fourier y la Transformada Rápida de Fourier”. Disponible: <http://www.el.bqto.unexpo.edu.ve/dmavares/html/TransDiscfourier.pdf>. 30/05/2001.
- ENRIQUE, Juan. “Transformada de Fourier”. Disponible: <http://es.scribd.com/doc/6942319/series-y-transformada-de-fourier>
- JAMES, Glyn; BURLEY, David. “Matemáticas avanzadas para ingeniería”. Disponible: http://books.google.com.ec/books?id=R7Ryiml5Yd8C&pg=PA361&lpg=PA361&dq=transformada+de+fourier&source=bl&ots=_VzmlnA5Wi&sig=nQnbBQGcfJaXNoObrOr1AjlXlJo&hl=es-419&sa=X&ei=gOZZUZ20IIPS9QTyyoHACQ&sqi=2&ved=0CGAQ6AEwCA#v=onepage&q=transformada%20de%20fourier&f=false. 2002.
- BOYLESTAD, Robert. “Introducción al análisis de circuitos”. Disponible: http://books.google.com.ec/books?id=fd-PRcPpf_EC&pg=PA1124&dq=serie+de+fourier&hl=es-419&sa=X&ei=CedZUcOhEIWs9ASG5YBw&ved=0CEsQ6AEwBQ#v=onepage&q=serie%20de%20fourier&f=false. 2004.
- DOCSTOC. “La transformada de Fourier”. Disponible: <http://www.docstoc.com/docs/37066720/La-transformada-de-Fourier>

- NATIONAL INSTRUMENTS. “Preguntas Frecuentes sobre Análisis en LabWindows/CVI”.
 Disponible: <http://www.ni.com/support/esa/cvi/analysis/analy3.htm>
- PEÑA, Elio; PADILLA, Anthony; CASTILLO, Jean; CALVO, Pedro. “Señales y Sistemas”. Disponible: <http://es.slideshare.net/Telecomunefasenaes/peresentacion-transformada-y-serie-de-fourier-e-transformada-de-laplace>. 04/07/2011.
- OPPENHEIM, Alan; WILLSKY, Alan; NAWAB, Hamid. “Señales y Sistemas”.
 Disponible:
http://books.google.com.ec/books?id=g2750K3PxRYC&pg=PA390&lpg=PA390&dq=transformada+fourier+en+tiempo+discreto%2Bpropiedades&source=bl&ots=f_Ojlli1H&sig=nBwg8Jr12A6acCp6DNj2ztQNaus&hl=es-419&sa=X&ei=dQmUUbSPGIPV0gHx7IAg&ved=0CCkQ6AEwAA#v=onepage&q=transformada%20fourier%20en%20tiempo%20discreto%2Bpropiedades&f=false. 1998.
- ORDOÑEZ, A.; CASTEJÓN, C.; GARCÍA, J. “Selección del nivel de descomposición WPT mediante el análisis de la sensibilidad de la energía relativa Wavelet.”
 Disponible:
<http://www.uclm.es/actividades/2010/CongresoIM/pdf/cdarticulos/196.pdf>. 2010.
- ENERGICE TECNOLOGÍAS, S.A. “Armónicos IEEE 519”. Disponible: http://jaimevp.tripod.com/Electricidad/armonico519_pag2.htm. 17/09/1992.
- VILLAMIL, Jairo. “Calidad de la Potencia Eléctrica”. Disponible: <http://empresas.micodensa.com/BancoMedios/Documentos%20PDF/capacitacion%20calidad%20de%20potencia.pdf>
- Grupo de Gestión Eficiente de Energía, KAI; Grupo de Investigación en Energías, GIEN. “Calidad de la Energía Eléctrica”. Disponible: <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Docs/calidad.pdf>
- COBAS, Manuel. “La Calidad del Suministro de la Energía Eléctrica”.
 Disponible:
http://www.cec.cubaindustria.cu/contenido/jornada%20VI/2_6.pdf

- Universidad de Sevilla, “La Transformada Wavelet”. Consultado: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11511/fichero/PFC+Silvia+Blasco+V Vadill%252FCap%C3%ADtulo+9+--+Anexo+2.pdf>
- MEROÑO, Pedro; GÓMEZ, F. “Análisis Comparativo de Técnicas de Procesamiento de Señales de Vibración para la Detección de Fallos en Engranajes”.
Disponible: <http://www.uclm.es/actividades/2010/CongresoIM/pdf/cdarticulos/204.pdf>. 2010.
- CIRCUTOR SA. “Procedimientos para el Estudio y Análisis de Perturbaciones Armónicas”. Disponible: http://www.circutor.com/filtrado/sp/docs/procedimientos_sp.pdf
- MARTÍNEZ, Armando. “El análisis de Fourier”. Disponible: <http://la-mecanica-cuantica.blogspot.com/2009/08/el-analisis-de-fourier.html>. 11/08/2009.
- SELIK, Melissa; BARANIUK, Richard; HAAG, Michael. “Clasificación y Propiedades de las Señales”. Disponible: <http://cnx.org/content/m12818/latest/>. 29/09/2006.
- ENRIQUE, Luis. “Análisis Frecuencial de Señales”. Disponible: http://www.ing.ula.ve/patrones.electroforesis/Seminarios/Transforma_Fouri Fo.pdf. 01/2007.
- WIKIPEDIA. “Ventana (función)”. Disponible: [http://es.wikipedia.org/wiki/Ventana_\(funci%C3%B3n\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Ventana_(funci%C3%B3n))
- LÓPEZ, Ernesto; ROCAMORA, Martín. “La Transformada de Fourier teoría y aplicaciones en audio”. Disponible: <http://ie.fing.edu.uy/investigacion/grupos/gmm/audio/seminario/seminariosv semin/2005/charlas2005/charla8.pdf>. 2005.
- MORALES, Luis. “Señales en Tiempo Discreto”. Disponible: <http://www.ingenierias.ugto.mx/profesores/ljavier/documentos/Lec02%20--%20Se%C3%B1ales%20%20en%20Tiempo%20Discreto.pdf>
- MARTÍNEZ, Marcelino; SERRANO, Antonio; GÓMEZ, Juan. “Introducción al Procesado Digital de Señales”. Disponible: <http://ocw.uv.es/ingenieria-y-arquitectura/1-1/tema3.pdf>. 2010.

ANEXOS

ANEXO 1

1.1. Atenuación mínima requerida por los equipos de medida

Minimum Required Attenuation (dB)

Injected Frequency (Hz)	Frequency-Domain Instrument	Time-Domain Instrument
60	0	0
30	50	60
120 to 720	30	50
720 to 1200	20	40
1200 to 2400	15	35

1.2. Clase A (Testing State)

Influence quantities	Testing state 1	Testing state 2	Testing state 3
Frequency	$f_{nom} \pm 0,5 \text{ Hz}$	$f_{nom} - 1 \text{ Hz} \pm 0,5 \text{ Hz}$	$f_{nom} + 1 \text{ Hz} \pm 0,5 \text{ Hz}$
Voltage magnitude	$U_{din} \pm 1 \%$	Determined by flicker, unbalance, harmonics, interharmonics (below)	Determined by flicker, unbalance, harmonics, interharmonics (below)
Flicker	$P_{st} < 0,1$	$P_{st} = 1 \pm 0,1$ – rectangular modulation at 39 changes per minute	$P_{st} = 4 \pm 0,1$ – rectangular modulation at 110 changes per minute NOTE This only applies to 10-min values. For other values, use $P_{st} = 0$ to 0,1
Unbalance	0 % to 0,5 % of U_{din}	0,73% \pm 0,5 % of U_{din} Phase A 0,80% \pm 0,5 % of U_{din} Phase B 0,87% \pm 0,5 % of U_{din} Phase C all phase angles 120°	1,52% \pm 0,5 % of U_{din} Phase A 1,40% \pm 0,5 % of U_{din} Phase B 1,28% \pm 0,5 % of U_{din} Phase C all phase angles 120°
Harmonics	0% to 3 % of U_{din}	10 % \pm 3 % of U_{din} 3 rd at 0° 5 % \pm 3 % of U_{din} 5 th at 0° 5 % \pm 3 % of U_{din} 29 th at 0°	10 % \pm 3 % of U_{din} 7 th at 180° 5 % \pm 3 % of U_{din} 13 th at 0° 5 % \pm 3 % of U_{din} 25 th at 0°
Interharmonics	0% to 0,5 % of U_{din}	1 % \pm 0,5 % of U_{din} at $7,5 f_{nom}$	1 % \pm 0,5 % of U_{din} at $3,5 f_{nom}$

1.3. Límites permitidos de distorsión armónica de corriente y voltaje según el estándar IEEE 519- (1992)

- Distorsión armónica de corriente:

- 120-69000 V:

**Current Distortion Limits for General Distribution Systems
(120 V Through 69 000 V)**

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L .

where

I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC.
 I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.

- 69001-161000 V:

**Current Distortion Limits for General Subtransmission Systems
(69 001 V Through 161 000 V)**

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20*	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20<50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50<100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100<1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L .

where

I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC.
 I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.

➤ Mayor a 161000 V:

Table 10.5
Current Distortion Limits for General Transmission Systems (>161 kV),
Dispersed Generation and Cogeneration

I_{sc}/I_L	Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)					THD
	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L .

where

I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC.
 I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.

• Distorsión armónica de voltaje:

Voltage Distortion Limits

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Voltage Distortion THD (%)
69 kV and below	3.0	5.0
69.001 kV through 161 kV	1.5	2.5
161.001 kV and above	1.0	1.5

NOTE: High-voltage systems can have up to 2.0% THD where the cause is an HVDC terminal that will attenuate by the time it is tapped for a user.

1.4. Distorsión interarmónica total de voltaje:

Low-Voltage System Classification and Distortion Limits

	Special Applications*	General System	Dedicated System†
Notch Depth	10%	20%	50%
THD (Voltage)	3%	5%	10%
Notch Area (A_N)‡	16 400	22 800	36 500

NOTE: The value A_N for other than 480 V systems should be multiplied by $V/480$

*Special applications include hospitals and airports.

†A dedicated system is exclusively dedicated to the converter load.

‡In volt-microseconds at rated voltage and current.

ANEXO 2

- **Propiedades de la Transformada de Fourier:**

Propiedad	Señal Aperiódica	Transformada de Fourier
Linealidad	$ax(t) + by(t)$	$aX(\omega) + bY(\omega)$
Desplazamiento temporal	$x(t - t_0)$	$e^{-j\omega t_0} X(\omega)$
Desplazamiento en frecuencia	$e^{j\omega_0 t} x(t)$	$X(\omega - \omega_0)$
Conjugación	$x^*(t)$	$X^*(-\omega)$
Inversión temporal	$x(-t)$	$X(-\omega)$
Escalado	$x(at)$	$\frac{1}{ a } X\left(\frac{\omega}{a}\right)$
Convolución	$x(t) * y(t)$	$X(\omega)Y(\omega)$
Multiplicación	$x(t)y(t)$	$\frac{1}{2\pi} X(\omega) * Y(\omega)$
Diferenciación en tiempo	$\frac{d}{dt}x(t)$	$j\omega X(\omega)$
Integración	$\int_{-\infty}^t x(\tau)d\tau$	$\frac{1}{j\omega} X(\omega) + \pi X(0)\delta(\omega)$
Diferenciación en frecuencia	$tx(t)$	$j\frac{d}{d\omega}X(\omega)$

Relación de Parseval

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |X(\omega)|^2 d\omega$$

- **Propiedades de la Serie Continua de Fourier:**

Propiedad	Señal periódica	Coef. Serie de Fourier
	$\left. \begin{array}{l} x(t) \\ y(t) \end{array} \right\} \text{Periodo } T \left(\omega_0 = \frac{2\pi}{T} \right)$	$\begin{array}{l} a_k \\ b_k \end{array}$
Linealidad	$Ax(t) + By(t)$	$Aa_k + Bb_k$
Desplazamiento temporal	$x(t - t_0)$	$a_k e^{-jk\omega_0 t_0}$
Desplazamiento en frecuencia	$e^{jM\omega_0 t} x(t)$	a_{k-M}
Conjugación	$x^*(t)$	a_{-k}^*
Escalado temporal	$x(\alpha t), \alpha > 0$	a_k
	Periódica con periodo T/α	
Convolución Periódica	$\int_T x(\tau)y(t - \tau)d\tau$	$T a_k b_k$
Multiplicación	$x(t)y(t)$	$\sum_{l=-\infty}^{+\infty} a_l b_{k-l}$
Diferenciación	$\frac{d}{dt}x(t)$	$jk\omega_0 a_k$
Integración	$\int_{-\infty}^t x(\tau)d\tau$ (Finita y periódica)	$\left(\frac{1}{jk\omega_0}\right) a_k$
	sólo si $a_0 = 0$	
Simetría Conjugada	$x(t)$ real	$a_k = a_{-k}^*$

Relación de Parseval

$$\frac{1}{T} \int_T |x(t)|^2 dt = \sum_{-\infty}^{+\infty} |a_k|^2$$

- **Propiedades de la Transformada de Fourier de Tiempo Discreto:**

Propiedad	Señal Aperiódica	Transformada de Fourier
Linealidad	$ax[n] + by[n]$	$aX(\Omega) + bY(\Omega)$
Desplazamiento temporal	$x[n - n_0]$	$e^{-j\Omega n_0} X(\Omega)$
Desplazamiento en frecuencia	$e^{j\Omega_0 n} x[n]$	$X(\Omega - \Omega_0)$
Conjugación	$x^*[n]$	$X^*(-\Omega)$
Inversión temporal	$x[-n]$	$X(-\Omega)$
Expansión en tiempo	$x_{(k)}[n]$	$X(k\Omega)$
Convolución	$x[n] * y[n]$	$X(\Omega)Y(\Omega)$
Multiplicación	$x[n]y[n]$	$\frac{1}{2\pi} X(\Omega) \otimes Y(\Omega)$
Diferenciación en tiempo	$x[n] - x[n - 1]$	$(1 - e^{-j\Omega})X(\Omega)$
Acumulación	$\sum_{k=-\infty}^n x[k]$	$\frac{1}{1 - e^{-j\Omega}} X(\Omega) + \pi X(0)\delta_p(\Omega)$
Diferenciación en frecuencia	$nx[n]$	$j \frac{dX(\Omega)}{d\Omega}$

Relación de Parseval

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} |x[n]|^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi} |X(\Omega)|^2 d\Omega$$

- **Propiedades de la Serie Discreta de Fourier:**

Propiedad	Señal periódica	Coef. Serie de Fourier
	$\left. \begin{matrix} x[n] \\ y[n] \end{matrix} \right\} \text{Periodo } N \text{ } (\Omega_0 = \frac{2\pi}{N})$	$\left. \begin{matrix} a_k \\ b_k \end{matrix} \right\} \text{Periodo } N$
Linealidad	$Ax[n] + By[n]$	$Aa_k + Bb_k$
Desplazamiento temporal	$x[n - n_0]$	$a_k e^{-jk(2\pi/N)n_0}$
Desplazamiento en frecuencia	$e^{jM(2\pi/N)n} x[n]$	a_{k-M}
Conjugación	$x^*[n]$	a_{-k}^*
Inversión de tiempo	$x[-n]$	a_{-k}
Escalado temporal	$x_{(m)}[n]$ (Periódica de periodo mN)	$\frac{1}{m} a_k$
Convolución Periódica	$\sum_{r=\langle N \rangle} x[r]y[n-r]$	$Na_k b_k$
Multiplicación	$x[n]y[n]$	$\sum_{l=\langle N \rangle} a_l b_{k-l}$
Diferenciación	$x[n] - x[n - 1]$	$(1 - e^{-jk(2\pi/N)})a_k$
Acumulación	$\sum_{k=-\infty}^n x[k]$ (Finita y periódica sólo si $a_0 = 0$)	$\left(\frac{1}{(1 - e^{-jk(2\pi/N)})} \right) a_k$
Simetría Conjugada	$x[n]$ real	$a_k = a_{-k}^*$

Relación de Parseval

$$\frac{1}{N} \sum_{n=\langle N \rangle} |x[n]|^2 = \sum_{k=\langle N \rangle} |a_k|^2$$

ANEXO 3

	Haar	Sombrero Mexicano	Morlet	Daubechies	Symmlets	Coiflets	Biortogonal	Meyer
Propiedades	(haar)	(mexh)	(morl)	(dbN)	(symN)	(coifN)	(biorNr.Nd)	(meyr)
Orden	--	--	--	1, 2, ..., 45	1, 2, ..., 41	1, 2, ..., 5	1.1, ..., 6.8	--
Regularidad	No	Sí	Sí	Relativa	Relativa	Relativa	Relativa	Sí
Tamaño del soporte	1	[-5,5]	[-4,4]	2N-1	2N-1	6N-1	2Nd+1	[-8,8]
Longitud del filtro	2	--	--	2N	2N	6N	--	--
Simetría	Sí	Sí	Sí	No	Aproximada	Aproximada	Sí	Sí
Momentos de desvanecimiento	1	--	--	N	N	2N	Nr	--
Función de escala	Sí	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	No
CWT	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible
DWT	Posible	No permite	No permite	Posible	Posible	Posible	Posible	No permite

ANEXO 4

- **Coeficientes para la familia Daubechies (N=2p)**

- **p=2**

n	LoD	HiD
0	-0.129409523	-0.482962913
1	0.224143868	0.836516304
2	0.836516304	-0.224143868
3	0.482962913	-0.129409523

- **p=3**

n	LoD	HiD
0	0.035226292	-0.332670553
1	-0.085441274	0.806891509
2	-0.13501102	-0.459877502
3	0.459877502	-0.13501102
4	0.806891509	0.085441274
5	0.332670553	0.035226292

- **p=4**

n	LoD	HiD
0	-0.010597402	-0.230377813
1	0.032883012	0.714846571
2	0.030841382	-0.630880768
3	-0.187034812	-0.027983769
4	-0.027983769	0.187034812
5	0.630880768	0.030841382
6	0.714846571	-0.032883012
7	0.230377813	-0.010597402

➤ p=5

n	LoD	HiD
0	0.003335725	-0.160102398
1	-0.012580752	0.60382927
2	-0.00624149	-0.724308528
3	0.077571494	0.138428146
4	-0.03224487	0.242294887
5	-0.242294887	-0.03224487
6	0.138428146	-0.077571494
7	0.724308528	-0.00624149
8	0.60382927	0.012580752
9	0.160102398	0.003335725

➤ p=6

n	LoD	HiD
0	-0.001077301	-0.111540743
1	0.004777258	0.49462389
2	0.000553842	-0.751133908
3	-0.031582039	0.315250352
4	0.027522866	0.226264694
5	0.097501606	-0.129766868
6	-0.129766868	-0.097501606
7	-0.226264694	0.027522866
8	0.315250352	0.031582039
9	0.751133908	0.000553842
10	0.49462389	-0.004777258
11	0.111540743	-0.001077301

➤ **p=7**

n	LoD	HiD
0	0.000353714	-0.077852054
1	-0.001801641	0.396539319
2	0.000429578	-0.729132091
3	0.012550999	0.469782287
4	-0.016574542	0.143906004
5	-0.038029937	-0.224036185
6	0.080612609	-0.071309219
7	0.071309219	0.080612609
8	-0.224036185	0.038029937
9	-0.143906004	-0.016574542
10	0.469782287	-0.012550999
11	0.729132091	0.000429578
12	0.396539319	0.001801641
13	0.077852054	0.000353714

➤ **p=8**

n	LoD	HiD
0	-0.000117477	-0.054415842
1	0.000675449	0.312871591
2	-0.00039174	-0.675630736
3	-0.004870353	0.585354684
4	0.008746094	0.015829105
5	0.013981028	-0.284015543
6	-0.044088254	-0.000472485
7	-0.017369301	0.128747427
8	0.128747427	0.017369301
9	0.000472485	-0.044088254
10	-0.284015543	-0.013981028
11	-0.015829105	0.008746094
12	0.585354684	0.004870353
13	0.675630736	-0.00039174
14	0.312871591	-0.000675449
15	0.054415842	-0.000117477

➤ p=9

n	LoD	HiD
0	3.93E-05	-0.038077947
1	-0.000251963	0.243834675
2	0.000230386	-0.604823124
3	0.001847647	0.657288078
4	-0.004281504	-0.133197386
5	-0.004723205	-0.293273783
6	0.022361662	0.096840783
7	0.000250947	0.148540749
8	-0.067632829	-0.030725681
9	0.030725681	-0.067632829
10	0.148540749	-0.000250947
11	-0.096840783	0.022361662
12	-0.293273783	0.004723205
13	0.133197386	-0.004281504
14	0.657288078	-0.001847647
15	0.604823124	0.000230386
16	0.243834675	0.000251963
17	0.038077947	3.93E-05

➤ p=10

n	LoD	HiD
0	0.026670058	-1.33E-05
1	0.1881768	-9.36E-05
2	0.527201189	-0.000116467
3	0.688459039	0.000685857
4	0.281172344	0.001992405
5	-0.249846424	-0.001395352
6	-0.195946274	-0.010733175
7	0.12736934	-0.003606554
8	0.093057365	0.033212674
9	-0.071394147	0.029457537
10	-0.029457537	-0.071394147
11	0.033212674	-0.093057365
12	0.003606554	0.12736934
13	-0.010733175	0.195946274
14	0.001395352	-0.249846424
15	0.001992405	-0.281172344
16	-0.000685857	0.688459039
17	-0.000116467	-0.527201189
18	9.36E-05	0.1881768
19	-1.33E-05	-0.026670058

- **Coeficientes para la familia Coiflets**

- **p=1**

n	LoD	HiD
0	-0.015655728	0.07273262
1	-0.07273262	0.337897662
2	0.384864847	-0.85257202
3	0.85257202	0.384864847
4	0.337897662	0.07273262
5	-0.07273262	-0.015655728

- **p=2**

n	LoD	HiD
0	-0.000720549	-0.016387336
1	-0.001823209	-0.041464937
2	0.005611435	0.067372555
3	0.023680172	0.386110067
4	-0.059434419	-0.812723635
5	-0.076488599	0.417005184
6	0.417005184	0.076488599
7	0.812723635	-0.059434419
8	0.386110067	-0.023680172
9	-0.067372555	0.005611435
10	-0.041464937	0.001823209
11	0.016387336	-0.000720549

➤ p=3

n	LoD	HiD
0	-3.46E-05	0.003793513
1	-7.10E-05	0.007782596
2	0.000466217	-0.023452696
3	0.001117519	-0.065771911
4	-0.002574518	0.06112339
5	-0.009007976	0.405176902
6	0.015880545	-0.793777223
7	0.034555028	0.428483476
8	-0.082301927	0.071799822
9	-0.071799822	-0.082301927
10	0.428483476	-0.034555028
11	0.793777223	0.015880545
12	0.405176902	0.009007976
13	-0.06112339	-0.002574518
14	-0.065771911	-0.001117519
15	0.023452696	0.000466217
16	0.007782596	7.10E-05
17	-0.003793513	-3.46E-05

➤ p=4

n	LoD	HiD
0	-1.78E-06	-0.000892314
1	-3.26E-06	-0.001629492
2	3.12E-05	0.007346166
3	6.23E-05	0.016068944
4	-0.000259975	-0.0266823
5	-0.000589021	-0.0812667
6	0.001266562	0.056077313
7	0.003751436	0.415308407
8	-0.005658287	-0.782238931
9	-0.015211732	0.434386056
10	0.025082262	0.066627474
11	0.039334427	-0.096220442
12	-0.096220442	-0.039334427
13	-0.066627474	0.025082262
14	0.434386056	0.015211732
15	0.782238931	-0.005658287
16	0.415308407	-3.75E-03
17	-0.056077313	1.27E-03
18	-0.0812667	0.000589021
19	0.0266823	-0.000259975
20	0.016068944	-6.23E-05
21	-0.007346166	3.12E-05
22	-0.001629492	3.26E-06
23	0.000892314	-1.78E-06

➤ p=5

n	LoD	HiD
0	-9.52E-08	0.000212081
1	-1.67E-07	0.00035859
2	2.06E-06	-0.002178236
3	3.73E-06	-0.004159359
4	-2.13E-05	0.010131118
5	-4.13E-05	0.023408157
6	0.000140541	-0.028168029
7	0.00030226	-0.091920011
8	-0.000638131	0.052043163
9	-0.001662864	0.421566207
10	0.002433373	-0.774289604
11	0.006764185	0.437991626
12	-0.009164231	0.062035964
13	-0.019761779	-0.105574209
14	0.032683574	-0.041289209
15	0.041289209	0.032683574
16	-0.105574209	1.98E-02
17	-0.062035964	-9.16E-03
18	0.437991626	-0.006764185
19	0.774289604	0.002433373
20	0.421566207	1.66E-03
21	-0.052043163	-6.38E-04
22	-0.091920011	-3.02E-04
23	0.028168029	1.41E-04
24	0.023408157	4.13E-05
25	-0.010131118	-2.13E-05
26	-0.004159359	-3.73E-06
27	0.002178236	2.06E-06
28	0.00035859	1.67E-07
29	-0.000212081	-9.52E-08

ANEXO 5

Nota: Debido a que el tamaño de las Tablas son muy grandes, solo se presenta una parte. Si se desea revisar todas las Tablas en su totalidad, revisar el archivo adjunto digital Excel.

➤ **MEDIDA DE ARMÓNICOS:**

- **Coeficiente de aproximación $cA1(0)$ para la onda de voltaje empleando la función Daubechies (db20):**

$cA1(0)$				
$x(k)$	k	$k-2n$	$h(k-2n)$	$h(k-2n)*x(k)$
0	0	0	0,026670057901	0
35,2090312	1	1	0,188176800078	6,62552283
68,1538769	2	2	0,527201188932	35,9308049
97,5695199	3	3	0,688459039454	67,1726179
123,451996	4	4	0,281172343661	34,7112872
146,523928	5	5	-0,249846424327	-36,6084795
167,520071	6	6	-0,195946274377	-32,8249338
186,925863	7	7	0,127369340336	23,8086239
205,2	8	8	0,093057364604	19,0953712
222,964226	9	9	-0,071394147166	-15,9183407
240,73191	10	10	-0,029457536822	-7,0913691
258,349422	11	11	0,033212674059	8,58047514
274,75772	12	12	0,003606553567	0,99092843
288,443456	13	13	-0,010733175483	-3,09591424
298,265356	14	14	0,001395351747	0,41618509
303,935118	15	15	0,001992405295	0,60556194
305,752972	16	16	-0,000685856695	-0,20970272
303,935118	17	17	-0,000116466855	-0,03539837
298,265356	18	18	0,000093588670	0,02791426
288,443456	19	19	-0,000013264203	-0,00382597
274,75772	20	20	0,000000000000	0
258,349422	21	21	0,000000000000	0
240,73191	22	22	0,000000000000	0
222,964226	23	23	0,000000000000	0
205,2	24	24	0,000000000000	0
186,925863	25	25	0,000000000000	0
167,520071	26	26	0,000000000000	0
146,523928	27	27	0,000000000000	0
123,451996	28	28	0,000000000000	0
97,5695199	29	29	0,000000000000	0

68,1538769	30	30	0,000000000000	0
35,2090312	31	31	0,000000000000	0
1,7947E-13	32	32	0,000000000000	0
-35,2090312	33	33	0,000000000000	0
-68,1538769	34	34	0,000000000000	0
				102,177328

- **Coeficiente de aproximación $cA1(0)$ para la onda de voltaje empleando la función Coiflets (coif3):**

$cA1(0)$				
$x(k)$	k	$k-2n$	$h(k-2n)$	$h(k-2n)*x(k)$
0	0	0	-0,000034599773	0
35,2090312	1	1	-0,000070983303	-0,00249925
68,1538769	2	2	0,000466216960	0,03177449
97,5695199	3	3	0,001117518771	0,10903577
123,451996	4	4	-0,002574517689	-0,31782935
146,523928	5	5	-0,009007976137	-1,31988405
167,520071	6	6	0,015880544864	2,66031
186,925863	7	7	0,034555027573	6,45922836
205,2	8	8	-0,082301927107	-16,8883554
222,964226	9	9	-0,071799821619	-16,0087916
240,73191	10	10	0,428483476378	103,149646
258,349422	11	11	0,793777222626	205,071887
274,75772	12	12	0,405176902410	111,325482
288,443456	13	13	-0,061123390003	-17,6306419
298,265356	14	14	-0,065771911282	-19,6174825
303,935118	15	15	0,023452696142	7,12809796
305,752972	16	16	0,007782596427	2,37955199
303,935118	17	17	-0,003793512864	-1,15298178
298,265356	18	18	0,000000000000	0
288,443456	19	19	0,000000000000	0
274,75772	20	20	0,000000000000	0
258,349422	21	21	0,000000000000	0
240,73191	22	22	0,000000000000	0
222,964226	23	23	0,000000000000	0
205,2	24	24	0,000000000000	0
186,925863	25	25	0,000000000000	0
167,520071	26	26	0,000000000000	0
146,523928	27	27	0,000000000000	0
123,451996	28	28	0,000000000000	0
97,5695199	29	29	0,000000000000	0

68,1538769	30	30	0,000000000000	0
35,2090312	31	31	0,000000000000	0
1,7947E-13	32	32	0,000000000000	0
-35,2090312	33	33	0,000000000000	0
-68,1538769	34	34	0,000000000000	0
-97,5695199	35	35	0,000000000000	0
				365,376547

- **Coeficiente de aproximación $cA1(0)$ para la onda de corriente empleando la función Daubechies (db20):**

$cA1(0)$				
$x(k)$	k	$k-2n$	$h(k-2n)$	$h(k-2n)*x(k)$
0	0	0	0,026670057901	0
9,11623546	1	1	0,188176800078	1,71546402
17,5478508	2	2	0,527201188932	9,25124779
24,7607753	3	3	0,688459039454	17,0467796
30,4844005	4	4	0,281172343661	8,57137034
34,7591855	5	5	-0,249846424327	-8,68445821
37,9083718	6	6	-0,195946274377	-7,42800422
40,442622	7	7	0,127369340336	5,15115008
42,9228427	8	8	0,093057364604	3,99428662
45,8157625	9	9	-0,071394147166	-3,27097729
49,3770443	10	10	-0,029457536822	-1,4545261
53,588431	11	11	0,033212674059	1,77981509
58,1613862	12	12	0,003606553567	0,20976215
62,6037829	13	13	-0,010733175483	-0,67193739
66,3322392	14	14	0,001395351747	0,09255681
68,803565	15	15	0,001992405295	0,13708459
69,6358758	16	16	-0,000685856695	-0,04776023
68,6932053	17	17	-0,000116466855	-0,00800048
66,1157608	18	18	0,000093588670	0,00618769
62,2895049	19	19	-0,000013264203	-0,00082622
57,7613862	20	20	0,000000000000	0
53,1180808	21	21	0,000000000000	0
48,8544191	22	22	0,000000000000	0
45,2609465	23	23	0,000000000000	0
42,3571573	24	24	0,000000000000	0
39,887806	25	25	0,000000000000	0
37,3857466	26	26	0,000000000000	0
34,2888353	27	27	0,000000000000	0
30,0844005	28	28	0,000000000000	0

24,4464974	29	29	0,000000000000	0
17,3313723	30	30	0,000000000000	0
9,00587571	31	31	0,000000000000	0
4,0021E-14	32	32	0,000000000000	0
-9,00587571	33	33	0,000000000000	0
-17,3313723	34	34	0,000000000000	0
-24,4464974	35	35	0,000000000000	0
				26,3892146

- **Coefficiente de aproximación $cA1(0)$ para la onda de corriente empleando la función Coiflets (coif3):**

$cA1(0)$				
$x(k)$	k	$k-2n$	$h(k-2n)$	$h(k-2n)*x(k)$
0	0	0	-0,000034599773	0
9,11623546	1	1	-0,000070983303	-0,0006471
17,5478508	2	2	0,000466216960	0,00818111
24,7607753	3	3	0,001117518771	0,02767063
30,4844005	4	4	-0,002574517689	-0,07848263
34,7591855	5	5	-0,009007976137	-0,31310991
37,9083718	6	6	0,015880544864	0,6020056
40,442622	7	7	0,034555027573	1,39749592
42,9228427	8	8	-0,082301927107	-3,53263267
45,8157625	9	9	-0,071799821619	-3,28956357
49,3770443	10	10	0,428483476378	21,1572476
53,588431	11	11	0,793777222626	42,5372759
58,1613862	12	12	0,405176902410	23,5656503
62,6037829	13	13	-0,061123390003	-3,82655544
66,3322392	14	14	-0,065771911282	-4,36279815
68,803565	15	15	0,023452696142	1,6136291
69,6358758	16	16	0,007782596427	0,54194792
68,6932053	17	17	-0,003793512864	-0,26058856
66,1157608	18	18	0,000000000000	0
62,2895049	19	19	0,000000000000	0
57,7613862	20	20	0,000000000000	0
53,1180808	21	21	0,000000000000	0
48,8544191	22	22	0,000000000000	0
45,2609465	23	23	0,000000000000	0
42,3571573	24	24	0,000000000000	0
39,887806	25	25	0,000000000000	0
37,3857466	26	26	0,000000000000	0
34,2888353	27	27	0,000000000000	0

30,0844005	28	28	0,000000000000	0
24,4464974	29	29	0,000000000000	0
17,3313723	30	30	0,000000000000	0
9,00587571	31	31	0,000000000000	0
4,0021E-14	32	32	0,000000000000	0
-9,00587571	33	33	0,000000000000	0
-17,3313723	34	34	0,000000000000	0
-24,4464974	35	35	0,000000000000	0
				75,7867261

➤ **MEDIDA DE INTERARMÓNICOS:**

- **Coeficiente de aproximación $cA1(0)$ para la onda de voltaje empleando la función Daubechies (db20):**

$cA1(0)$				
$x(k)$	k	$k-2n$	$h(k-2n)$	$h(k-2n)*x(k)$
292,721184	0	0	0,026670057901	7,80689094
272,370269	1	1	0,188176800078	51,2537657
256,540384	2	2	0,527201188932	135,248395
241,989649	3	3	0,688459039454	166,599961
225,842167	4	4	0,281172343661	63,5005715
212,106788	5	5	-0,249846424327	-52,9941226
192,763997	6	6	-0,195946274377	-37,7713871
177,110805	7	7	0,127369340336	22,5584865
157,914828	8	8	0,093057364604	14,6951377
141,77602	9	9	-0,071394147166	-10,1219781
123,071812	10	10	-0,029457536822	-3,62539242
106,755568	11	11	0,033212674059	3,54563787
88,6407424	12	12	0,003606553567	0,31968759
72,2516866	13	13	-0,010733175483	-0,77549003
55,0573132	14	14	0,001395351747	0,07682432
39,0777134	15	15	0,001992405295	0,07785864
23,2611651	16	16	-0,000685856695	-0,01595383
8,20184287	17	17	-0,000116466855	-0,00095524
-5,89712931	18	18	0,000093588670	-0,0005519
-19,6548635	19	19	-0,000013264203	0,00026071
-31,8376443	20	20	0,000000000000	0
-43,9924486	21	21	0,000000000000	0
-54,1362239	22	22	0,000000000000	0
-64,4374298	23	23	0,000000000000	0
-72,5145896	24	24	0,000000000000	0
-80,9529339	25	25	0,000000000000	0

-87,402697	26	26	0,000000000000	0
-94,7018912	27	27	0,000000000000	0
-100,736709	28	28	0,000000000000	0
-107,71716	29	29	0,000000000000	0
-112,250007	30	30	0,000000000000	0
-117,478667	31	31	0,000000000000	0
-121,710739	32	32	0,000000000000	0
-122,638666	33	33	0,000000000000	0
-126,095348	34	34	0,000000000000	0
-122,072982	35	35	0,000000000000	0
				360,3776472