



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Detección de perturbaciones en la tensión de red con la transformada
wavelet discreta.**

Autor: D. Óscar Milán Sanz
Tutor: D. Óscar Duque Pérez

Valladolid, Septiembre, 2020



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Detección de perturbaciones en la tensión de red con la transformada
wavelet discreta.**

Autor: D. Óscar Milán Sanz
Tutor: D. Óscar Duque Pérez

Valladolid, Septiembre, 2020

Índice general

Índice de tablas.	4
Índice de figuras.	5
Resumen.	7
Abstract.	7
1 INTRODUCCIÓN.	9
1.1 Objetivos.	9
1.2 Desarrollo.	9
2 LA CALIDAD ELÉCTRICA.	10
2.1 Introducción.	10
2.2 Sistema de energía eléctrica.	10
2.3 Normativa.	12
2.3.1 Continuidad del suministro.	14
2.3.2 Calidad del producto.	15
2.3.3 Atención y relación con el cliente.	17
2.4 Importancia.	17
3 LAS PERTURBACIONES.	18
3.1 Introducción.	18
3.2 Origen y consecuencias.	18
3.3 Clasificación.	19
3.3.1 Perturbaciones asociadas a la amplitud.	19
3.3.2 Perturbaciones asociadas a la frecuencia.	26
3.3.3 Perturbaciones asociadas a la forma de onda. Armónicos.	26
3.3.4 Diferencias de amplitud y fase.	29
3.4 Detección y análisis.	30
4 LA TRANSFORMADA WAVELET.	32
4.1 Introducción.	32
4.2 Reseña histórica y aplicaciones.	32
4.3 Transformada de Fourier de Tiempo Corto.	33
4.4 Transformada wavelet.	34
4.4.1 Conceptos generales.	34
4.4.2 Transformada wavelet continua.	38
4.4.3 Transformada wavelet discreta.	39

4.4.4	Análisis multirresolución.	41
4.5	Conclusiones.	43
4.6	Ejemplos.	43
4.6.1	Ejemplo numérico.	43
4.6.2	Ejemplo práctico.	46
5	CASOS PRÁCTICOS.	49
5.1	Señales analíticas.	49
5.1.1	Hueco.	50
5.1.2	Hueco con ruido.	53
5.1.3	Sobretensión.	55
5.1.4	Sobretensión con ruido.	58
5.1.5	Flicker.	61
5.1.6	Flicker con ruido.	63
5.1.7	Conclusiones para las señales analíticas.	65
5.2	Señales reales.	66
5.2.1	Hospital de Ávila.	66
5.2.2	Señales de la Escuela.	68
6	CONCLUSIONES.	71
A	SCRIPTS <i>MATLAB</i> (GENERALES).	72
A.1	Formas de onda genéricas.	72
A.1.1	Monofásica (Fig. 2.2).	72
A.1.2	Trifásica (Fig. 2.3).	73
A.2	Perturbaciones.	73
A.2.1	Fluctuaciones (Fig. 3.1).	73
A.2.2	Flickers (Fig. 3.2).	74
A.2.3	Interrupciones (Fig. 3.3 y Fig. 3.4).	74
A.2.4	Huecos (Fig. 3.5).	75
A.2.5	Sobretensiones temporales (Fig. 3.6).	75
A.2.6	Sobretensiones transitorias (Fig. 3.7).	75
A.2.7	Armónicos (Fig. 3.8 y Fig. 3.9).	76
A.2.8	Diferencias de amplitud y fase (Fig. 3.10 y Fig. 3.11)	76
A.3	Transformadas wavelet.	76
A.3.1	Diferentes tipos de wavelet madre (Fig. 4.1).	76
A.3.2	Diferentes tipos de Daubechies (Fig. 4.2).	77
A.3.3	Escala (Fig. 4.3).	78
A.3.4	Desplazamiento (Fig. 4.4).	78
A.3.5	Factores de escala CWT (Fig. 4.5).	79
A.3.6	Factores de escala DWT (Fig. 4.6).	79
A.3.7	Wavelet de Haar (Fig. 4.9).	79
A.3.8	Ejemplo con wavelet (Fig. 4.10, Fig. 4.11, Fig. 4.12 y Fig. 4.13).	80
B	SCRIPTS <i>MATLAB</i> (ANÁLISIS).	81
B.1	Señales analíticas.	81
B.1.1	Hueco.	81
B.1.2	Hueco con ruido.	83

B.1.3	Sobretensión.	84
B.1.4	Sobretensión con ruido.	86
B.1.5	Flicker.	88
B.1.6	Flicker con ruido.	90
B.2	Señales reales.	92
B.2.1	Hospital de Ávila.	92
B.2.2	Señal de la Escuela.	93

Bibliografía		94
---------------------	--	-----------

Índice de tablas

Tabla 2.1	TIEPI y NIEPI para el suministro individual. Fuente: Real Decreto 1955/2000.	15
Tabla 2.2	TIEPI y NIEPI para la calidad zonal. Fuente: Real Decreto 1955/2000.	15
Tabla 3.1	Clasificación de las perturbaciones de red. Fuente: UNE-EN 50160.	19
Tabla 3.2	Caracterización de los armónicos.	28
Tabla 4.1	Factores de escala.	38
Tabla 4.2	Construcción de los factores de escala.	38
Tabla 5.1	Comparativa de distintas wavelet para un hueco.	52
Tabla 5.2	Comparativa de Daubechies 3 y biortonormal 4.4 para diferentes huecos.	53
Tabla 5.3	Comparativa de distintas wavelet para una sobretensión.	58
Tabla 5.4	Comparativa de distintas wavelet para una sobretensión.	58
Tabla 5.5	Comparativa de distintas wavelet para un flicker.	63

Índice de figuras

Figura 2.1	Suministro de electricidad [2].	11
Figura 2.2	Onda eléctrica. Fuente: propia.	16
Figura 2.3	Onda eléctrica trifásica. Fuente: propia	16
Figura 3.1	Fluctuaciones de la tensión. Fuente: propia.	21
Figura 3.2	Parpadeo o flicker. Fuente: propia.	22
Figura 3.3	Interrupción de la tensión. Fuente: propia.	23
Figura 3.4	Detalle de la interrupción. Fuente: propia.	23
Figura 3.5	Hueco. Fuente: propia.	24
Figura 3.6	Sobretension temporal. Fuente: propia.	25
Figura 3.7	Sobretension transitoria. Fuente: propia.	25
Figura 3.8	Gráfica de ejemplo con tres frecuencias distintas. Fuente: Math- Works y propia.	27
Figura 3.9	Descomposicion Fourier. Fuente: MathWorks y propia.	28
Figura 3.10	Onda trifásica desequilibrada y desfasada. Fuente: propia.	29
Figura 3.11	Representación en coordenadas polares de la onda trifásica de la figura 3.10. Fuente: propia.	30
Figura 4.1	Distintas wavelet madre. Fuente: MathWoks y propia.	34
Figura 4.2	Funciones madre de la wavelet Daubechies. Fuente: MathWoks y propia.	35
Figura 4.3	Transformada wavelet de Morlet 4.4.5 escalada. Fuente: propia.	37
Figura 4.4	Transformada wavelet de Morlet 4.4.5 desplazada. Fuente: propia.	38
Figura 4.5	Construcción de los factores de escala para la CWT. Fuente: propia.	39
Figura 4.6	Construcción de los factores de escala para la CWT. Fuente: propia.	40
Figura 4.7	Filtrado de una señal. Fuente: [11].	41
Figura 4.8	Análisis multirresolución. Fuente: [11].	42
Figura 4.9	Wavelet de Haar. Fuente: propia.	44
Figura 4.10	Señal original con ruido. Fuente: biblioteca de MATLAB.	47
Figura 4.11	Aproximación a tres niveles. Fuente: propia.	47
Figura 4.12	Detalle a tres niveles. Fuente: propia.	48
Figura 4.13	Detalle de 4.11 a tres niveles. Fuente: propia.	48
Figura 5.1	Comparación onda con hueco y onda perfecta. Fuente: [19] y propia.	50
Figura 5.2	Hueco como porcentaje de la tensión. Fuente: propia.	50
Figura 5.3	Niveles de detalle para un hueco (Daubechies 3). Fuente: propia.	51
Figura 5.4	Niveles de aproximacion para un hueco (Daubechies 3). Fuente: propia.	51
Figura 5.5	Niveles de aproximacion para un hueco con la wavelet de Haar. Fuente: propia.	52

Figura 5.6	Comparación onda con hueco y ruido y onda perfecta. Fuente: propia.	53
Figura 5.7	Hueco con ruido como porcentaje de la tensión. Fuente: propia.	54
Figura 5.8	Detalle del ruido generado. Fuente: propia.	54
Figura 5.9	Niveles de detalle para un hueco con ruido (Daubechies 3). Fuente: propia.	55
Figura 5.10	Niveles de aproximacion para un hueco con ruido (Daubechies 3). Fuente: propia.	55
Figura 5.11	Comparación onda con sobretensión y onda perfecta. Fuente: propia.	56
Figura 5.12	Sobretensión como porcentaje de la tensión. Fuente: propia.	56
Figura 5.13	Niveles de detalle para una sobretensión (Daubechies 3). Fuente: propia.	57
Figura 5.14	Niveles de aproximacion para una sobretensión (Daubechies 3). Fuente: propia.	57
Figura 5.15	Comparación onda con sobretensión y ruido y onda perfecta. Fuente: propia.	59
Figura 5.16	Sobretensión con ruido como porcentaje de la tensión. Fuente: propia.	59
Figura 5.17	Niveles de detalle para una sobretensión con ruido (Biortogonal 4.4). Fuente: propia.	60
Figura 5.18	Niveles de aproximacion para una sobretensión con ruido (Biortogonal 4.4). Fuente: propia.	60
Figura 5.19	Comparación onda con flicker y onda perfecta. Fuente: propia.	61
Figura 5.20	Flicker como porcentaje de la tensión. Fuente: propia.	61
Figura 5.21	Niveles de detalle para un flicker (Daubechies 3). Fuente: propia.	62
Figura 5.22	Niveles de aproximacion para un flicker (Daubechies 3). Fuente: propia.	62
Figura 5.23	Comparación onda con flicker con ruido y onda perfecta. Fuente: propia.	63
Figura 5.24	Flicker con ruido como porcentaje de la tensión. Fuente: propia.	64
Figura 5.25	Niveles de detalle para un flicker con ruido (Daubechies 3). Fuente: propia.	64
Figura 5.26	Niveles de aproximacion para un flicker con ruido (Daubechies 3). Fuente: propia.	65
Figura 5.27	Detalle de la tensión. Hospital de Ávila. Fuente: propia.	66
Figura 5.28	Detalle de la intensidad de corriente. Hospital de Ávila. Fuente: propia.	67
Figura 5.29	Coefficiente de detalle. Hospital de Ávila. Fuente: propia.	67
Figura 5.30	Coefficiente de detalle. Hospital de Ávila. Fuente: propia.	68
Figura 5.31	Detalle de la perturbacion. Hospital de Ávila. Fuente: propia.	68
Figura 5.32	Detalle de la tensión. Señal de la Escuela. Fuente: propia.	69
Figura 5.33	Detalle de la intensidad de corriente. Señal de la Escuela. Fuente: propia.	69
Figura 5.34	Coefficiente de detalle. Señal de la Escuela. Fuente: propia.	70
Figura 5.35	Detalle de la perturbacion. Señal de la Escuela. Fuente: propia.	70

RESUMEN.

Debido al uso cada vez más extendido en las últimas décadas de dispositivos electrónicos, tanto en centros industriales como a nivel personal (móviles, ordenadores...), que demandaban una energía eléctrica más precisa, se comenzó a tratar el término de *calidad eléctrica*. Esta hace referencias a las características que debe satisfacer el suministro de energía eléctrica; las cuales se plasmaron en diciembre del año 2000 en el Real Decreto 1955/2000.

A partir de este momento se empezaba a exigir, tanto a las compañías suministradoras como a los usuarios finales, el evitar o limitar la aparición de defectos en la red que pudieran alterar a los parámetros que definen la alimentación eléctrica y afectar la continuidad del suministro; estos defectos reciben el nombre de *perturbaciones*.

Sin embargo, a pesar del marco legal, de todas las regulaciones y de las inversiones por parte de compañías eléctricas en mejorar la calidad eléctrica, es inevitable la aparición de fenómenos que la empeoran. Por ello, otro aspecto fundamental es la detección y análisis de perturbaciones en la tensión de red. En este momento entra en juego un concepto matemático conocido como *transformada wavelet*. Desde su desarrollo en la década de 1980 hasta la actualidad, numerosos estudios han demostrado su efectividad a la hora de analizar cambios bruscos, distorsiones o cualquier tipo de anomalía en una función que tenga forma de onda, como la que caracteriza a la tensión de la red eléctrica.

Palabras clave: suministro de energía eléctrica, calidad eléctrica, perturbaciones en la red eléctrica, transformada wavelet.

ABSTRACT.

Due to the increasingly use in the last decades of electronic devices in the industry environment, as well as in a more personal way (mobile phones, laptops...), which demanded more precise electric energy, the term *electric quality* soon became to gain importance. It makes reference to the characteristics that the electric energy supply must satisfy; which were written in December 2000 in the Real Decreto 1955/2000.

From this moment it started to be demanded to the electric companies and the final users, the avoid or the limitation of defects which could affect the parameters that define the electric supply and affect its continuity. These defects are known as *disturbances*.

However, and in spite of that legal frame, every rule and the investments of the electric companies in the improvement of the quality, it is nearly inevitable that these disturbances take place. For that, the detection and the analysis of them is quite important. In this moment, the mathematic concept of *wavelet transform* appears. From its developing in the 1980 decade until today, several papers and investigations have revealed its usefulness to analyze the electric consumption and, in general, any wave function.

Keywords: electric energy supply, electric quality, disturbances in the electric network, wavelet transform.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN.

1.1. Objetivos.

El objetivo de este Trabajo de Fin de Máster (TFM) es llevar a cabo la detección y la clasificación de las perturbaciones en la tensión de la red eléctrica. Para ello, se van a utilizar un tipo de función, las denominadas *transformadas wavelet*; las cuales se emplean en casos en los cuales los métodos tradicionales de detección de las citadas perturbaciones no se adecúan o están limitadas debido a la naturaleza de las mismas.

1.2. Desarrollo.

El orden que se va a seguir para este trabajo comienza con una visión global de la situación actual del sistema eléctrico. Se presentarán términos como generación, transporte y distribución de energía eléctrica para, a continuación, explicar qué parámetros determinan o caracterizan a la tensión de red. También se tratará un tema fundamental, en torno al cual gira todo el trabajo: la calidad de la energía eléctrica. Se verá qué normativa es aplicable a este campo y en qué medida afecta al usuario final, desde el origen hasta las consecuencias.

En el siguiente capítulo, se estudiarán las perturbaciones que afectan a dicha calidad eléctrica, y de cuyo análisis se obtendrá el grado de la misma. Se hará una clasificación general para luego pasar a ver más detalladamente las perturbaciones más frecuentes.

Posteriormente, se tratará el tema de las transformadas wavelet. Primero se hará una introducción general al concepto de transformada, así como al transcurso histórico y a sus aplicaciones más comunes. En segundo lugar se verá una variación de la transformada de Fourier, la cual también puede ser útil para analizar perturbaciones. Seguidamente, se verán aspectos fundamentales de las wavelet, para así poder explicar los tipos más comunes, así como los conceptos matemáticos que las rodean. Finalmente, se explicará de manera general cómo aplicar estos conceptos al análisis de señales.

En el último capítulo se pasarán a analizar ondas de la tensión de red mediante la transformada wavelet discreta, para así poder clasificar las perturbaciones que se encuentren en función de los parámetros dados en capítulos anteriores.

Capítulo 2

LA CALIDAD ELÉCTRICA.

2.1. Introducción.

El punto de inflexión a la hora de hablar de la calidad eléctrica se podría situar a partir del Real Decreto 1955/2000, en el cual se establecen parámetros e indicadores que marcarán tanto el nivel de la calidad como aspectos tan fundamentales como puede ser la continuidad del suministro eléctrico. Sin embargo, estos términos empezaron a surgir por el uso, cada vez más frecuente, de tecnología que requería unas características de la energía eléctrica más finas, precisas y sin tantas alteraciones. La electrónica que comenzaba a emplearse en los receptores era cada vez más sensible a las perturbaciones de la red eléctrica. Por esta razón, las compañías dedicadas al suministro de la misma empezaron a centrar sus esfuerzos en mejorar las prestaciones que podían dar.

Hoy en día, todos los sectores a nivel de ingeniería se encuentran dentro de un marco legal; es decir, una serie de normas y de leyes que regulan la actividad que encierran: desde la denominación de un simple tornillo hasta la construcción de un edificio. De esta manera, se consigue no solo que todo el mundo que se dedica a ello hable el mismo idioma, sino también asegurar la calidad y la seguridad en los proyectos, delimitando las obligaciones y responsabilidad de las partes involucradas.

Como cabría imaginar, una rama tan fundamental de la ingeniería como es la electricidad y, más concretamente el suministro de la misma, está fuertemente regulada por esas normas: Reales Decretos, disposiciones... Para poder continuar con el desarrollo del trabajo, se hace inevitable el tener que hablar de un tema como lo es la normativa que afecta a la calidad del suministro eléctrico, y que está, como se verá más adelante, ligada con las perturbaciones en la tensión de red.

2.2. Sistema de energía eléctrica.

Un sistema de energía eléctrica es el conjunto de las instalaciones necesarias, coordinadas entre sí, con la función de suministrar energía eléctrica. Este conjunto de instalaciones, a su vez, se divide en tres etapas o fases. La primera de ellas es la generación. Esta consiste en la transformación de un tipo de energía primaria (eólica, solar, térmica...) en energía eléctrica, y se lleva a cabo en grandes centrales. El elemento fundamental de este proceso es el generador, en el cual (a través de un generador síncrono o asíncrono, en función

del tipo de central [1]) se induce una corriente alterna de salida de frecuencia $f = 50 \text{ Hz}$ (frecuencia de red en España), es decir, se genera una tensión cuya forma es la de una onda. El valor eficaz de la tensión que se obtiene es pequeño para su posterior transporte (de unos $6 - 20 \text{ kV}$), ya que gran parte de la energía se perderá en los conductores; por lo que se hace necesario aumentarlo por medio de una estación de transformación hasta los $220 - 400 \text{ kV}$, adecuándolo a las grandes distancias que cubrirá durante la segunda etapa (figura 2.1, punto 1).

Una vez generada y transformada, entra en juego el segundo elemento del sistema: el transporte. La misión de este es la de llevar, por medio de tendidos eléctricos trifásicos a tres hilos y aéreos, la energía eléctrica desde la estación de transformación hasta la subestación de transformación; donde la tensión pasará a ser de $45 - 132 \text{ kV}$, ya apta para el transporte a menor escala (figura 2.1, puntos 2 y 3).

Finalmente, se llega al tercer elemento: el sistema de distribución. Una vez en este punto, se distribuye hasta los lugares de consumo: desde las grandes industrias hasta viviendas unifamiliares, pasando por los centros de transformación necesarios para adecuarla a la demanda final (figura 2.1, punto 4).

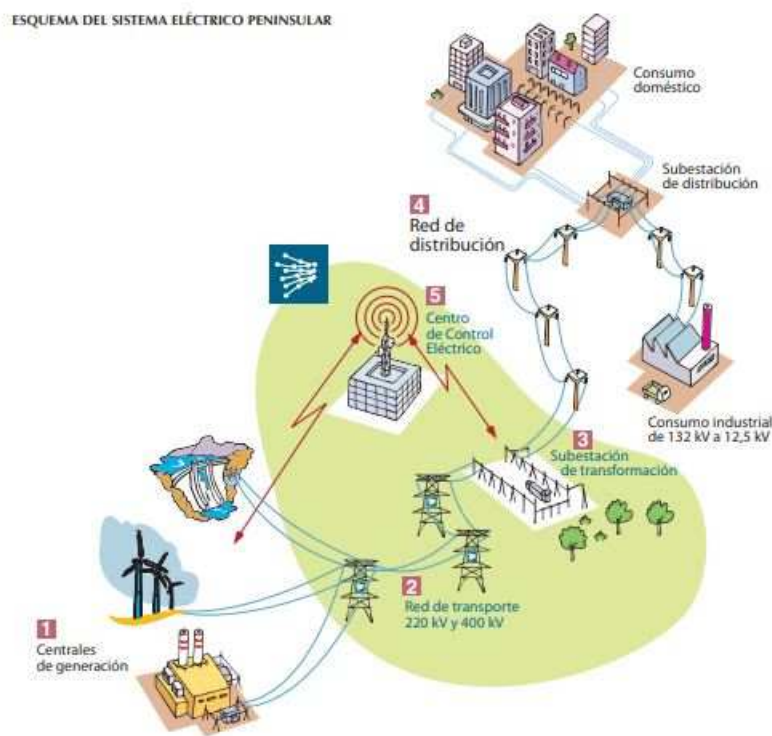


Figura 2.1: Suministro de electricidad [2].

En cada una de las etapas, estarán involucradas numerosas empresas que llevarán a cabo las labores de instalación, explotación y mantenimiento de centrales eléctricas, líneas de alta, media y baja tensión, elementos de protección... A nivel nacional, la empresa encargada de gestionar todas estas actividades en las líneas de alta tensión (más de 132 kV) es,

desde el año 1985, Red Eléctrica Española S.A. Para las líneas de media y baja tensión (hasta los 36 kV), existen numerosos distribuidores y gestores, estando todos ellos unidos en un conglomerado: aelec (anteriormente UNESA). Las empresas que lo conforman son: edp, Endesa, Iberdrola España, Naturgy y Viesgo [3]. Con esto se quiere decir que, cuando se hable de empresa, compañía o similar, se estará haciendo alusión a las mencionadas.

Durante todo este proceso (desde la generación hasta el consumo), como era de esperar, los parámetros que definen la energía eléctrica no van a tener siempre un valor ideal y predecible, sino que se verán condicionados por una serie de fenómenos que afectarán a la calidad eléctrica en el suministro: las perturbaciones de red. En un sistema de energía, como en el explicado en los párrafos anteriores, las perturbaciones son debidas a fallos durante el transporte y la distribución, así como a defectos o errores en las instalaciones finales (tanto industriales como usuarios a título individual). Durante la generación, se considera que esos parámetros son (casi) perfectos, por lo que en este punto del sistema de energía no aparecen apenas o no se tienen en cuenta.

Todo fallo que se dé durante el suministro de energía eléctrica va a afectar a las cargas (receptores últimos de la energía eléctrica), los tendidos de distribución e incluso si hay fallos de aislamiento o conexiones, poner en peligro a las personas. Generalmente, las perturbaciones sólo afectan al correcto funcionamiento de las mismas, pues no sobrepasan los límites que estas puedan soportar. Sin embargo, cuando se producen picos en la tensión de red, las cargas pueden sufrir daños y estropearse. Todo esto conlleva desde simples parones de escasos minutos en el suministro hasta costes económicos. Una vez se llega a este punto, se hace visible la importancia que puede llegar a tener la detección, análisis, clasificación y eliminación (en la medida de lo posible) de las perturbaciones en la tensión de red.

2.3. Normativa.

Hasta este momento, tan solo se ha introducido el término de calidad eléctrica sin entrar en mayor detalle. El objetivo del presente capítulo es profundizar más en este aspecto para ver su importancia. La legislación específica que regula la calidad del servicio a nivel estatal, y de acuerdo con el Ministerio para la Transformación Ecológica y el Reto Demográfico, es [4]:

- Ley 24/2013, de 26 de diciembre del Sector Eléctrico (BOE 27/12/2013).
- Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre (BOE 27/12/2000). Por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica.
- Orden ECO/797/2002, de 22 de marzo (BOE 13/04/2002). Por la que se aprueba el procedimiento de medida y control de la continuidad del suministro eléctrico.
- Disposición adicional duodécima del Real Decreto 738/2015, de 31 de julio (BOE 01/08/2015). Por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica y el procedimiento de despacho en los sistemas eléctricos de los territorios no peninsulares.

A mayores, existen otras disposiciones y normas, como pueden ser:

- Norma UNE-EN 50160:2011/A1:2015. *Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución.*
- UNE-EN 61000-4-30:2015. Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-30: *Técnicas de ensayo y de medida. Métodos de medida de la calidad de suministro.*

Una vez definido el marco legal sobre este tema, ya se puede dar una primera definición de lo que es la calidad eléctrica o de servicio [4]:

”La calidad de servicio es el conjunto de características, técnicas y comerciales, inherentes al suministro eléctrico exigibles por los sujetos, consumidores y por los órganos competentes de la Administración”

Para poder asegurar que la energía eléctrica se suministra con los estándares adecuados, es necesario respetar tres aspectos fundamentales:

- Continuidad del suministro, relativa al número y duración de las interrupciones del mismo y regulada por los indicadores TIEPI y NIEPI.
- Calidad del producto, relativa a las características de la onda de tensión recogidas en la Norma UNE-EN 50160:2011/A1:2015.
- Calidad en la atención y relación con el cliente y referida al conjunto de actuaciones de información, asesoramiento, contratación, comunicación y reclamación.

Cada uno de ello lleva asociados unos requisitos mínimos por medio de una serie de valores o puntos a tener en cuenta, los cuales servirán para indicar el nivel de calidad del servicio. En los puntos siguientes se ven más en detalle.

Sin embargo, antes es necesario hacer una clasificación en función de la cantidad de usuarios (suministros) a los que se abastece:

- Calidad individual, referida a cada uno de los consumidores a nivel particular.
- Calidad zonal, la cual hace referencia al número de suministros.

En función de dicho número, la calidad zonal quedará dividida en:

- Zona urbana: municipios de más de 20.000 suministros, incluyendo las capitales de provincia que no alcancen esta cifra
- Zona semiurbana: municipios de 2.000 a 20.000 suministros.
- Zona rural
 - Zona rural concentrada: municipios de 200 a 2.000 suministros.
 - Zona rural dispersa: municipios de menos de 200 suministros, además de todos aquellos suministros que se encuentren fuera de población, a excepción de los situados en polígonos industriales.

2.3.1. Continuidad del suministro.

La continuidad del suministro de energía eléctrica hace referencia al número y a la duración de las interrupciones (programadas o no) que puedan darse en la red. Se utilizan dos indicadores para medirlo:

- TIEPI.
- NIEPI.

El primero de ellos es el *Tiempo de Interrupción Equivalente a la Potencia Instalada* en media tensión (1 – 36kV). Se tomarán solo aquellas interrupciones cuya duración supere los tres minutos y se calcula como:

$$TIEPI = \frac{\sum_{i=1}^K (PI_i \cdot H_i)}{\sum_{i=1}^K PI} \quad (2.3.1)$$

Siendo:

- PI_i : potencia instalada en cada uno de los centros de transformación de media o baja tensión (BT/MT) del distribuidor más la potencia contratada en MT que se ve afectada por las interrupciones.
- H_i : tiempo de interrupción del suministro que afecta a la potencia PI_i (en horas).
- $\sum_{i=1}^N PI$: suma de las potencias instaladas de los centros de transformación de BT/MT más la potencia contratada en MT (en kVA).
- K : número total de interrupciones durante el tiempo considerado.

El segundo indicador muestra el *Número de Interrupciones Equivalentes a la Potencia Instalada* en media tensión (1 – 36 kV). Al igual que antes, las interrupciones tendrán que durar más de tres minutos para poder añadirse al cómputo. Para este caso, se calcula como:

$$NIEPI = \frac{\sum_{i=1}^K PI_i}{\sum_{i=1}^K PI} \quad (2.3.2)$$

Siendo:

- PI_i : potencia instalada en cada uno de los centros de transformación de media o baja tensión (BT/MT) del distribuidor más la potencia contratada en MT que se ve afectada por las interrupciones.
- $\sum_{i=1}^N PI$: suma de las potencias instaladas de los centros de transformación de BT/MT más la potencia contratada en MT (en kVA).
- K : número total de interrupciones durante el tiempo considerado.

Tanto el número como la duración de las interrupciones (en horas) nunca deben superar, en un intervalo de tiempo de un año natural, los siguientes valores:

Tabla 2.1: TIEPI y NIEPI para el suministro individual. Fuente: Real Decreto 1955/2000.

	MT (1 – 36 kV)		BT (1 kV)	
	TIEPI (h)	NIEPI (nº)	TIEPI (h)	NIEPI (nº)
Urbana	3,5	7	5	10
Semiurbana	7	11	9	13
Rural concentrada	11	14	14	16
Rural dispersa	15	19	19	22

Tabla 2.2: TIEPI y NIEPI para la calidad zonal. Fuente: Real Decreto 1955/2000.

	TIEPI (h)	Percentil 80 del TIEPI	NIEPI (nº)
Urbana	1,5	2,5	3
Semiurbana	3,5	5	5
Rural concentrada	6	10	8
Rural dispersa	9	15	12

Como era de esperar, la empresa suministradora se hace cargo de su parte de la instalación, pudiendo llegar a tener que indemnizar al cliente en caso de no mantener estos valores con hasta un 10% de la facturación anual. Sin embargo, también el consumidor tiene la obligación de que todos aquellos equipos y dispositivos que conecte a red no provoquen perturbaciones.

2.3.2. Calidad del producto.

Como ya se introdujo anteriormente, desde la generación hasta el consumo de energía eléctrica, esta se trata de corriente alterna, una onda. Por tanto, la tensión no tiene un valor constante en el tiempo. La calidad de producto se refiere, por tanto, a los parámetros que definen dicha onda. Al tratarse de una función sinusoidal, estará representada por una función matemática de la forma:

$$u(t) = U_{max} \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi) \quad (2.3.3)$$

Donde:

- $u(t)$: valor de la tensión respecto del tiempo.
- U_{max} : valor máximo o de pico que alcanza la tensión, es decir, la amplitud de la onda.
- ω : pulso angular, que equivale a $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$, siendo f la frecuencia de la onda.
- t : tiempo.

- φ : desfase inicial de la onda.

Si se representa esta onda para dos ciclos y con $U_{max} = 325 V$ (valor teórico de la tensión en España), $T = 20 ms$ ($f = 50 Hz$, para el caso de España) y $\varphi = 0 rad$, entonces:

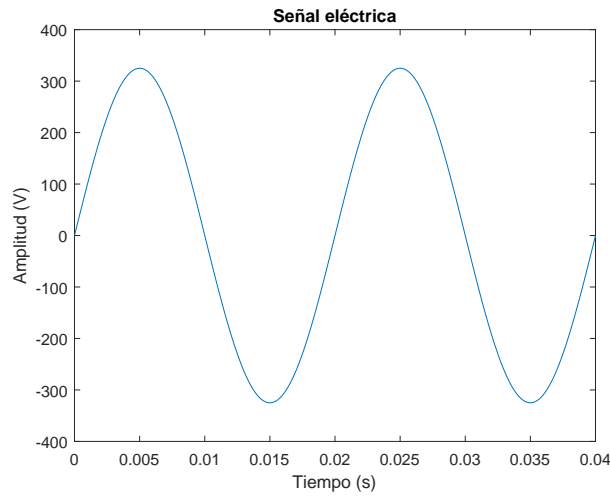


Figura 2.2: Onda eléctrica. Fuente: propia.

En el caso de que la alimentación fuera trifásica (como es el caso del transporte), la onda, para un periodo de dos ciclos, tendría la siguiente forma:

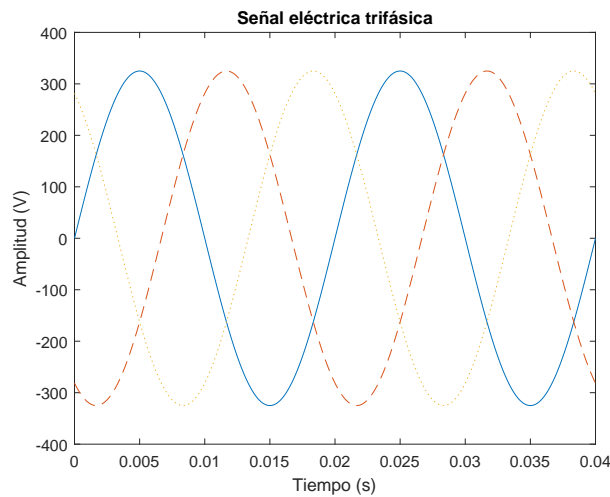


Figura 2.3: Onda eléctrica trifásica. Fuente: propia

Nótese que al ser una alimentación trifásica, existe un desfase entre las tres fases de la forma: $\varphi = 0 rad$ para la función continua, $\varphi = -2\pi/3$ para la rayada y $\varphi = 2\pi/3$ para la punteada.

Por tanto, el valor de la tensión quedaría definida por los siguientes cuatro parámetros, a los cuales afectarán las perturbaciones:

- Amplitud.
- Frecuencia.
- Forma de la onda
- Simetría.

2.3.3. Atención y relación con el cliente.

Finalmente, está la atención y el trato que recibe el consumidor por parte de la empresa suministradora y que, aunque no parezca un dato tan técnico como los anteriores, sí que es de gran valor y utilidad. Los indicadores que se usan para medir la calidad de este servicio son, entre otros:

- Elaboración de un presupuesto que se adapte a la demanda de potencia requerida por la nueva instalación o suministro.
- Ejecución de las instalaciones necesarias para abastecer al nuevo suministro, así como de los equipos de medida.
- Atención a las reclamaciones que puedan interponer los consumidores en relación a temas como cobros indebidos o cortes de suministro no anunciados.
- Información al consumidor sobre las características de la potencia a contratar en función de sus necesidades.

2.4. Importancia.

Ya se han mencionado algunas de las consecuencias que puede tener una mala calidad en el suministro. Sin embargo, la importancia de una buena calidad y continuidad del suministro se hace más palpable en situaciones en las cuales los receptores sean de vital importancia, como puede ser el caso de hospitales o centros de manejo de datos; o bien en momentos en los cuales la demanda de electricidad va a aumentar de manera considerable, como por ejemplo la vivida en los días durante la redacción de este trabajo, la provocada por el COVID-19. Ante un evento de estas características, empresas como Endesa dedican parte de su poder financiero a reforzar sus instalaciones. En la subestación de transformación de Jarandín (Zaragoza), la inversión alcanzó la cifra de 1,5 millones de euros en materias de seguridad y de fiabilidad [5]. También a nivel nacional en sus cinco centros de operación *Endesa implantó al comienzo de esta crisis sanitaria un Plan Operativo de Emergencia para asegurar el desempeño de estos centros de control*, para así poder interconectarlos y operarlos todos de manera simultánea [6].

Capítulo 3

LAS PERTURBACIONES.

3.1. Introducción.

Hasta este momento, tan solo se ha mencionado el término de perturbación sin llegar a entrar en materia. Para empezar este capítulo, una definición podría ser:

Las perturbaciones eléctricas son fenómenos que afectan a la calidad del producto del suministro eléctrico.

Como ya se vio con anterioridad, la calidad del producto está definida por la frecuencia, la amplitud, la simetría y la forma de onda. Cualquier evento que suceda en la red y que afecte a alguna de esas características, será una perturbación.

En las siguientes secciones se hará un análisis en mayor profundidad del origen y las consecuencias de las perturbaciones. A continuación, se hará una clasificación en función de la característica de la tensión a la que afectan.

Seguidamente, se analizarán las perturbaciones más frecuentes, haciendo especial hincapié en qué valores se han de tener en cuenta para poder estudiarlas.

Para terminar el capítulo, se verán los equipos y sistemas que se emplean para la detección y análisis de las perturbaciones.

3.2. Origen y consecuencias.

En función de en qué punto del suministro se produzca el fallo, el origen de las perturbaciones se puede encontrar en:

- El usuario, como puede ser la conexión y desconexión de cargas, errores en el cableado, cortocircuitos y el uso de cargas no lineales, las cuales, ante una tensión sinusoidal de entrada no van a consumir una intensidad de corriente con la misma forma ¹ (diodos, transistores...).

¹Las cargas lineales, por el contrario, sí que van a consumir una corriente con la misma forma de onda que la generada. Son las resistencias, bobinas y condensadores.

- El transporte y la distribución, como por ejemplo: fenómenos meteorológicos (rayos, etc.), accionamiento de protecciones o fallos en los centros de transformación.

Aunque a priori pueda parecer que la mayor parte de los fallos que provocan las perturbaciones se dé durante el transporte y la distribución, esto no es así. El grueso de estos va a tener su fuente de problemas en las instalaciones finales.

Cuando se ya se produce la perturbación y la calidad de la energía suministrada es deficiente, esta se manifiesta a través de una serie de fenómenos, algunos más apreciables que otros [7]:

- Fallos en equipos informáticos: reinicios, errores en discos o bloqueos.
- Mal funcionamiento en los sistemas de control.
- Sobrecalentamiento de transformadores.
- Fallos en las cargas eléctricas, como las baterías de condensadores empleadas para corregir el factor de potencia.
- Consumos anormales de energía y errores en su medición.

3.3. Clasificación.

La norma UNE-EN-50160 hace una clasificación de las perturbaciones en función del parámetro de la onda eléctrica que se ve afectado por ellas. A modo de resumen se tendría:

Tabla 3.1: Clasificación de las perturbaciones de red. Fuente: UNE-EN 50160.

Parámetro	Perturbación
Amplitud	Fluctuaciones
	Interrupciones
	Huecos
	Sobretensiones
Frecuencia	Variaciones de frecuencia
Forma de onda	Armónicos
	Interarmónicos
Simetría	Desequilibrio entre fases

Cada una de estas perturbaciones viene definida por su magnitud y duración. Estos dos valores se encuentran preestablecidos en la norma UNE-EN-50160. De esta manera, al poder agruparlas de tal forma, se facilita la estandarización de los informes periódicos que tienen que hacer las compañías eléctricas sobre la calidad del suministro.

3.3.1. Perturbaciones asociadas a la amplitud.

A la hora de analizar la amplitud de la onda, el valor que se toma como referencia es el valor eficaz. Este es la media cuadrática de la función de onda (2.3.3):

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [U(t)^2] dt} \quad (3.3.1)$$

Si se resuelve esta integral se tiene que:

$$V_{RMS} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}}$$

Si, por ejemplo, se toma el valor de pico de la tensión en una vivienda en España ($U_{max} = 325V$), entonces:

$$V_{RMS} = \frac{325V}{\sqrt{2}} = 230V$$

De (3.3.1), se entiende que este valor eficaz no es instantáneo, sino que para calcularlo es necesario tomar todos los valores de la tensión para un ciclo completo de la onda, y luego resolver la integral.

El proceso de calcular este valor eficaz, lo llevan a cabo los analizadores de red. Lo que hacen es calcular el valor eficaz de cada ciclo, con actualizaciones cada medio ciclo. Es decir, no analizan un ciclo de ciclo entero en ciclo entero, sino que aunque tomen los valores de un ciclo completo, cuando este llega a la mitad, se empiezan a tomar los valores del ciclo siguiente. Por ejemplo, en la figura 2.2, se calcula el valor eficaz de la tensión entre el instante $t = 0 s$ y $t = 0,02 s$, pero cuando el analizador llegue a $t = 0,01 s$, empezará a calcular otro valor hasta $t = 0,03 s$, y así sucesivamente. De esta forma, se guarda un dato de valor eficaz cada $10ms$, en lugar de hacerlo cada $20ms$, tiempo que correspondería al ciclo completo. Luego, todos estos puntos se representan y ya se puede ver de forma más directa en qué puntos ha habido perturbaciones.

Esto es útil para analizar pocos ciclos de una onda sinusoidal, ¿pero y si en lugar de unos pocos se tienen los valores de la tensión de una semana? ¿Y de un año? La cantidad de datos a procesar es demasiado grande y el tiempo invertido en hacerlo no compensaría. En estos casos, lo que propone la UNE-EN-50160 es fijar un intervalo de tiempo o de agregación ². Durante este periodo, el analizador toma los valores eficaces como se ha explicado en el párrafo anterior, pero tan solo se guardan tres de ellos el máximo, el mínimo y el medio. La cantidad de datos que se dejan de procesar es muy grande, pero ajustando el tiempo del intervalo correctamente, el resultado final será lo suficientemente preciso.

Existen otros valores que caracterizan la amplitud, como el valor de pico (máximo valor absoluto de la onda en un ciclo), el cual también se utiliza para medir el efecto de algunas perturbaciones. También se tendría el valor medio que, para el caso de un ciclo completo de onda, no es útil: el valor medio de una onda sinusoidal sin perturbaciones es nulo.

²La norma UNE-EN 61000-4-30 propone cuatro intervalos de agregación: $t = 200 ms$, $t = 3 s$, $t = 10 min$ y $t = 2 h$.

En los siguientes apartados, cada vez que se hable de tensión, se estará haciendo referencia a este valor eficaz, que también recibe el nombre de nominal o asignado. No tiene que ser necesariamente de 230 V , pues en las líneas de alta tensión u otros puntos de consumo no doméstico, el valor de la tensión distinto.

Hay que tener en cuenta que, para hacer más visible el efecto de las perturbaciones, se han idealizado todas las gráficas de esta capítulo, de tal manera que:

- El valor de la tensión antes y después de la perturbación es siempre del 100% . En la vida real esto no es así: antes de la misma tendrá pequeñas variaciones y una vez que pase no recuperará su valor de forma inmediata.
- En el eje horizontal no hay unidades temporales. De esta manera el gráfico no se altera y se hace más visible el efecto de la perturbación.

Fluctuaciones.

Las fluctuaciones son pequeñas variaciones cíclicas en la tensión, la cuales suelen estar provocadas por la conexión/desconexión de cargas o por maniobras en la red. Los límites que define la norma son del $\pm 10\%$ y del -15% de la tensión asignada; aunque no suelen sobrepasar el $\pm 5\%$ de esta, como se ve en el siguiente gráfico:

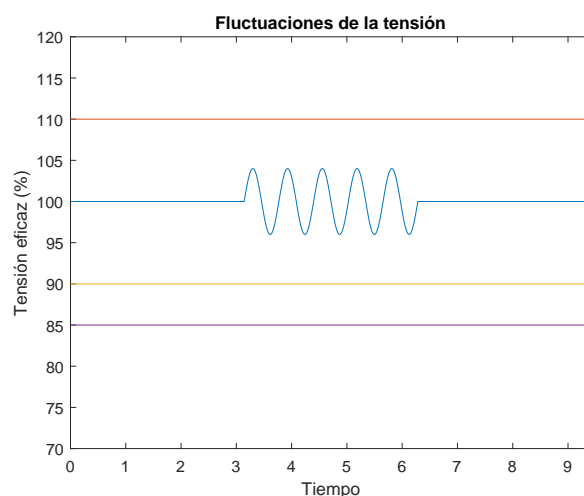


Figura 3.1: Fluctuaciones de la tensión. Fuente: propia.

En algunos casos, estas variaciones van a tener una mayor frecuencia. El fenómeno que se produce en estos casos se conoce como parpadeo, o más comúnmente por su traducción al inglés como *flicker*. Se manifiesta de una forma bastante clara, con un rápido encendido y apagado de las luminarias, y va a ser bastante molesto para el ojo humano, produciendo dolor de cabeza.

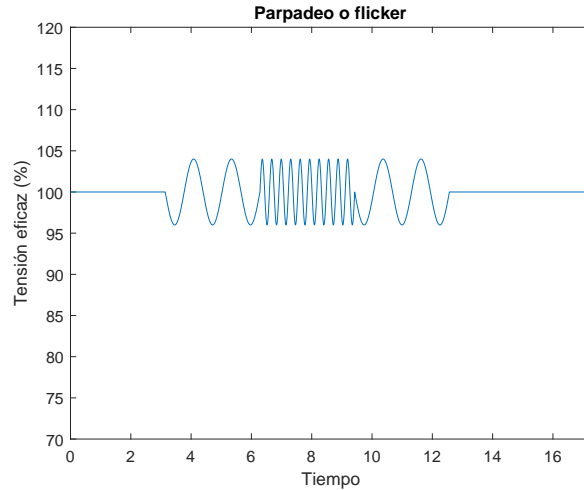


Figura 3.2: Parpadeo o flicker. Fuente: propia.

En un *flicker*, la frecuencia va a ser lo suficientemente elevada como para que sea casi imposible medir el valor eficaz de la tensión. Para estos casos, la norma UNE-EN 61000-4-30 propone dos métodos para facilitar el trabajo: flicker de corta duración o P_{st} ($t < 10 \text{ min}$) y flicker de larga duración o P_{lt} ($t < 2 \text{ h}$).

Interrupciones.

Las fluctuaciones de tensión van a producir caídas de tensión. Si, por ejemplo, saltara una protección, esto daría lugar a una interrupción o corte en el suministro. La norma UNE-EN-50160 establece que el valor eficaz de la misma debe caer por debajo del 1% de la asignada.

En función del tiempo que dure la interrupción, se tendrán de corta duración ($t < 3 \text{ min}$) o de larga duración ($t > 3 \text{ min}$); siendo las más comunes las primeras. El tiempo que dura la interrupción se empieza a medir una vez que la tensión cae por debajo del 90%. Cuando vuelve a pasar por este valor, se deja de contar; y la diferencia entre ambos es la duración.

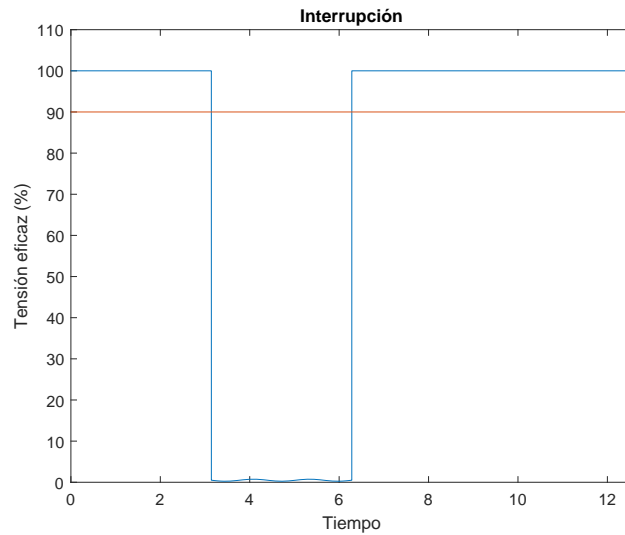


Figura 3.3: Interrupción de la tensión. Fuente: propia.

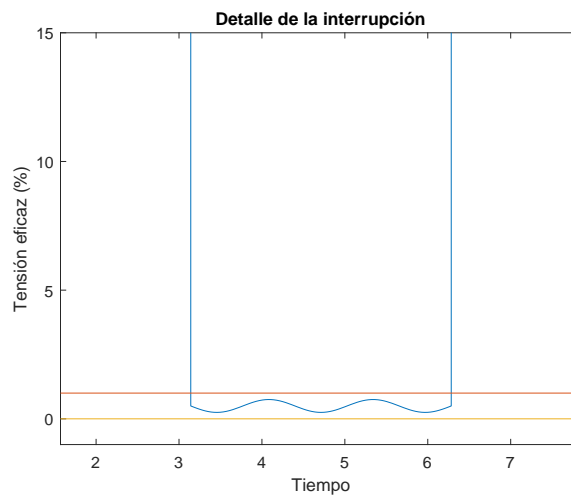


Figura 3.4: Detalle de la interrupción. Fuente: propia.

Huecos.

Los huecos son un tipo de interrupciones en los cuales el valor de la tensión cae entre el 1% y el 90% de la nominal. Se caracterizan por la profundidad, definida como la diferencia entre el 100% (valor nominal o declarado) y el % del valor que alcanza. En la Figura 3.5, por ejemplo, el valor al que cae es el 35%, por lo que el hueco tendrá una profundidad del 65% ($100\% - 35\% = 65\%$).

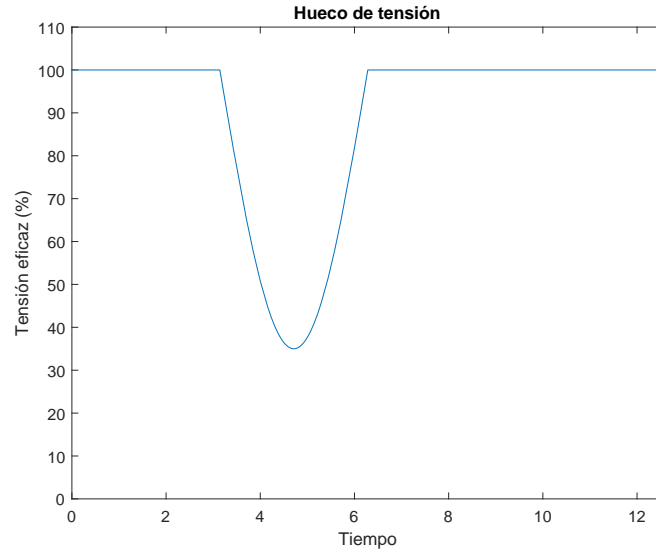


Figura 3.5: Hueco. Fuente: propia.

En la mayoría de los casos, la duración del hueco es inferior a 1 segundo, y con una profundidad menor del 60 %.

En una interrupción en la cual la tensión cae por debajo del 1 % de la nominal, las cargas conectadas van a dejar de funcionar, no pueden hacerlo con valores tan pequeños. Sin embargo, cuando se produce un hueco, habrá algunas cargas que puedan seguir funcionando (con o sin problemas), pero habrá otras a las que les sea imposible.

Las principales causas de los huecos se encuentran en fenómenos que afectan a la intensidad, como los cortocircuitos, las sobrecargas o las conexiones de grandes motores (producen picos en el consumo de corriente que afectará a la tensión de red). Este tipo de fenómenos suele ser provocado por maniobras en la red, como labores de mantenimiento o bien por efectos meteorológicos, como las descargas eléctricas durante las tormentas.

Sobretensiones.

Contrarias a las caídas de tensión, las sobretensiones son situaciones en las cuales se produce un incremento de su valor eficaz. La norma establece que para considerar una sobretensión, el valor que debe superar el 110 % del valor nominal o declarado:

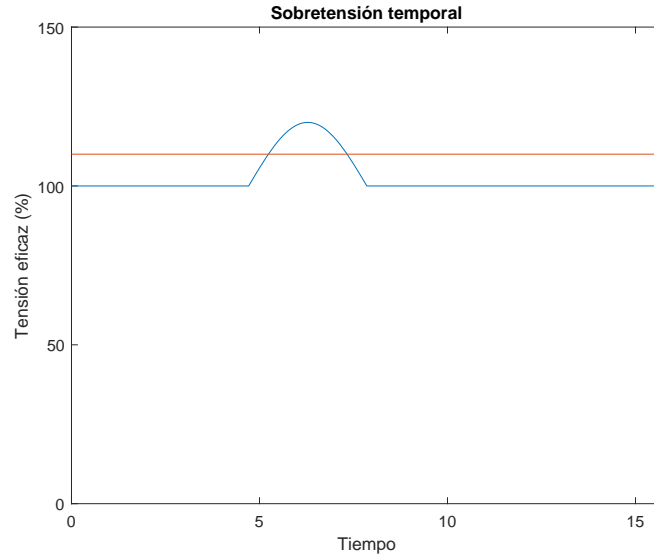


Figura 3.6: Sobretensión temporal. Fuente: propia.

El caso de la figura anterior se trata de una sobretensión temporal. Se suelen dar durante las maniobras en la red, por el uso de cargas no lineales o simplemente por algún defecto en las conexiones. La duración y la magnitud no suelen tener efectos adversos en los equipos. Sin embargo, hay un tipo de sobretensión que sí que va a ser peligrosa para las cargas: las transitorias. En ellas el valor de pico que se alcanza puede ser muy superior al que pueda soportar casi cualquier carga. La mayor parte de las sobretensiones de corta duración se debe a rayos y a fenómenos de escasa duración, del orden de milisegundos. En la figura 3.7 se ve más claro este efecto:

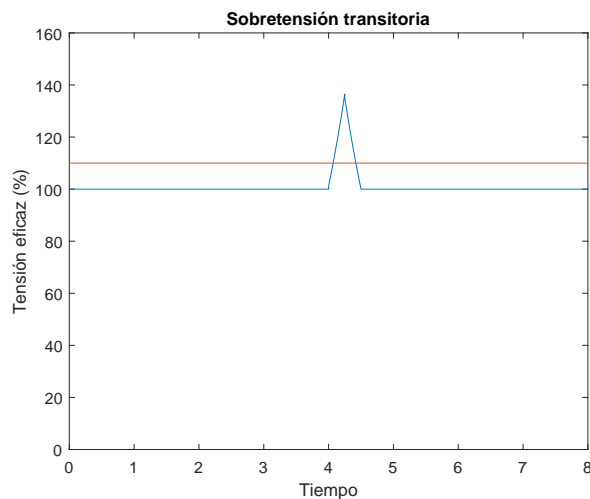


Figura 3.7: Sobretensión transitoria. Fuente: propia.

3.3.2. Perturbaciones asociadas a la frecuencia.

La frecuencia de la onda de tensión que se obtiene durante la generación de energía eléctrica en España es $f = 50 \text{ Hz}$, o lo que es lo mismo, su periodo es de $T = 20 \text{ ms}$. Si bien es cierto que se dijo que durante este proceso estos valores se consideraban ideales y las perturbaciones que generaban eran escasas, hay dos situaciones críticas en las cuales el periodo de la onda es más sensible, y se producen perturbaciones asociadas a la frecuencia [9]:

- Generación en islas.
- Grupos autónomos de generación.

En ambos casos se trata de generación de energía aislada, por lo que la sincronización con otro grupos no es tan exacta como en el caso de sistemas más grandes, como por ejemplo a nivel peninsular. Las máquinas que más dependan de una buena calidad de frecuencia serán las que más se vean afectadas por este fenómeno.

Entre los efectos más comunes se encuentran:

- Cambio en la velocidad de máquinas rotativas.
- Alteración en equipos electrónicos que usen la frecuencia como tiempo.
- Vibraciones en las turbinas de centrales eléctricas, que aumentarán los esfuerzos de fatiga.
- Fallos en los sistemas de autogeneración.

3.3.3. Perturbaciones asociadas a la forma de onda. Armónicos.

En algunas situaciones, la forma que va a tener la onda no va a ser una senoide perfecta (figura 2.2). Habrá ocasiones en las cuales esta quede distorsionada por variaciones en su amplitud y frecuencia, debido principalmente al uso de cargas no lineales, presentes en equipos electrónicos. Recuérdese, que en este tipo de cargas, aunque la tensión de alimentación sea sinusoidal, la corriente que van a consumir no va a tener la misma forma de onda que esta tensión. Además, estas corrientes ya distorsionadas van a circular por el resto de impedancias del sistema de red, dañando a todas ellas.

Para analizar este tipo de perturbación, es necesario recurrir a la descomposición en series de Fourier ³. Este demostró que si se tiene una función periódica $f(t)$, esta se puede desarrollar como una suma de funciones trigonométricas de la forma:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n \omega_0 t) + b_n \sin(n \omega_0 t)) \quad (3.3.2)$$

³Jean Baptiste Fourier (1768-1830) fue un matemático y físico francés, conocido por su trabajo en la descomposición de funciones mediante expresiones trigonométricas (Series de Fourier), con las que consiguió resolver la ecuación de transmisión del calor.

En esta ecuación, el término $a_0/2$ es una constante; el seno y el coseno de los múltiplos enteros de ω_0 son los llamados *armónicos* o *componentes armónicas*, siendo n su orden; y el término correspondiente a $n = 1$ será la *componente fundamental del armónico*. En el caso de una onda de tensión, la aplicación práctica es la siguiente:

- Componente fundamental del armónico: onda cuya frecuencia coincide con la de la función de estudio o *frecuencia fundamental*, es decir $f = 50 \text{ Hz}$.
- Componentes armónicas: ondas cuya frecuencia son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental.

Para hacerlo más visible se ha creado una onda trigonométrica $s(t)$ con tres sumandos, cuyas frecuencias son múltiplos de $f = 50 \text{ Hz}$:

$$s(t) = 325 \cdot \text{sen}(2\pi 50t) + 325 \cdot \text{sen}(2\pi 100t) + 325 \cdot \text{sen}(2\pi 150t)$$

Cuya gráfica sería:

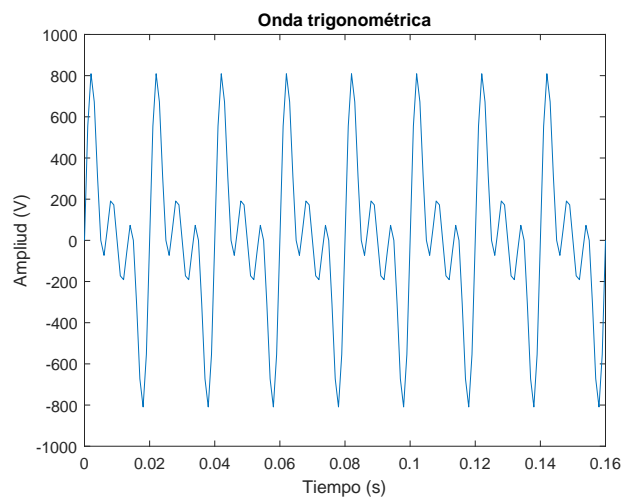


Figura 3.8: Gráfica de ejemplo con tres frecuencias distintas. Fuente: MathWorks y propia.

Luego se ha hecho la descomposición de Fourier y, como puede apreciarse, se obtiene una gráfica con tres máximos. Cada uno de ellos se corresponde con cada una de las frecuencias de $s(t)$:

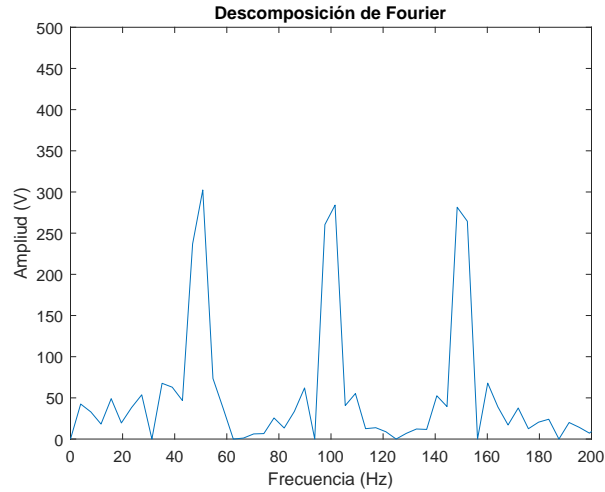


Figura 3.9: Descomposición Fourier. Fuente: MathWorks y propia.

Estos armónicos quedan caracterizados por su orden y su frecuencia:

Tabla 3.2: Caracterización de los armónicos.

Orden (n)	1	2	3
f (Hz)	50	100	150

Para poder cuantificar el efecto de los armónicos de una manera general, la norma UNE-EN-50160 establece dos parámetros, los cuales pueden emplearse para medir tanto la tensión como la intensidad de corriente. Las expresiones mostradas a continuación se han escrito en términos de tensión:

- Distorsión armónica total o THD:

$$THD = \frac{(\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2)^{1/2}}{U_1} [\%]$$

Donde U_1 es el valor de la tensión de la componente fundamental y U_h es el valor de la tensión correspondiente a cada componente armónica.

- Factor de distorsión o FD:

$$FD = \frac{(\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2)^{1/2}}{U_{RMS}} [\%]$$

Entre los efectos más comunes que producen las distorsiones armónicas estarían:

- Disparo de protecciones magnetotérmicas y diferenciales.
- Reducción efectiva de la sección del conductor por el *efecto skin*, provocando caída de tensión y sobrecalentamiento.
- Circulación de corriente por el neutro cuando las componentes armónicas son múltiplos de 3.
- Pérdidas por efecto Joule en los transformadores y en los motores.

Para solucionar estos problemas se tendría que hacer un correcto dimensionamiento de los conductores y de los transformadores, aislar las cargas no lineales respecto de las lineales o usar equipos electrónicos más precisos.

Aparte del armónico fundamental y de sus múltiplos enteros, a veces se encuentran en la red otros dos tipos [10]:

- Componentes interarmónicas: ondas cuya frecuencia son múltiplos no enteros de la frecuencia fundamental.
- Componentes subarmónicas: ondas cuya frecuencia es inferior a la frecuencia fundamental.

Tanto los interarmónicos como los subarmónicos han sido poco estudiados o no tienen una definición clara dentro de un marco legal, por lo que su aparición en este trabajo ha sido mínima.

3.3.4. Diferencias de amplitud y fase.

En un sistema trifásico, habrá situaciones en las cuales existan diferencias entre las amplitudes de las tensiones y las corrientes, o bien se puede dar que no se cumpla el desfase de $\varphi = \pm 2\pi/3$ entre fases. Para ilustrar esto se ha representado el mismo sistema que en la figura 2.3, pero se han cambiado tanto las amplitudes (en tensión) como los desfases de dos de las fases:

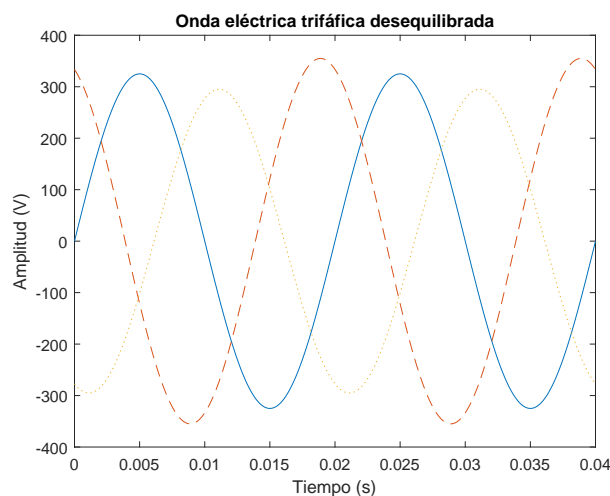


Figura 3.10: Onda trifásica desequilibrada y desfasada. Fuente: propia.

En la siguiente figura se han representado las tres fases en coordenadas polares. Este tipo de gráfico ofrece una idea más clara de las diferencias tanto de amplitud (radialmente) como de desfase (ángulo que forman entre sí las líneas) de este tipo de perturbación:

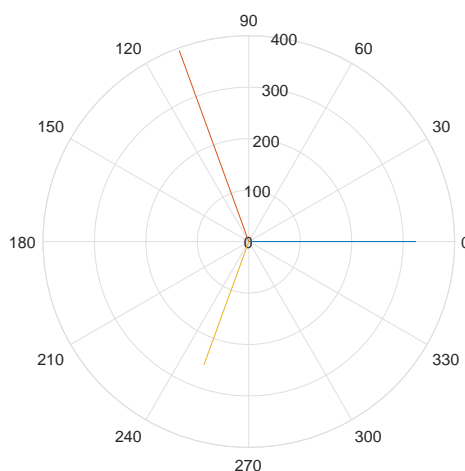


Figura 3.11: Representación en coordenadas polares de la onda trifásica de la figura 3.10. Fuente: propia.

En líneas generales, lo que causa este tipo de perturbación es una mala distribución de las cargas en la red.

3.4. Detección y análisis.

El objetivo de esta sección es introducir algunos de los equipos de detección y de análisis de perturbaciones, así como algunas de los sistemas empleados para corregir una mala calidad de producto.

A nivel nacional, la norma UNE-EN 61000-4-30:2015 ⁴ establece las técnicas de ensayo, de medida y de verificación de la calidad eléctrica. De esta manera, no importa qué equipo se esté utilizando o en qué condiciones se haga la medición, pues los métodos empleados están estandarizados.

A pesar de que no se haga alusión recíproca entre esta norma y la UNE-EN 50160, los límites que establece esta última son los que han de respetar los métodos de medida.

En función del nivel de precisión de medida del equipo, se tienen dos clases:

- Clase A: máxima exigencia; se aplica en medidas que tenga algún tipo de carácter legal (verificaciones, litigios...)
- Clase B: mínima exigencia; se usa para diagnósticos o seguimientos de la calidad.

Para cada tipo de perturbación se establecen tres apartados:

⁴La norma IEC 61000-4-30:2015 es el estándar internacional. La UNE-EN 61000-4-30:2015 es su versión traducida al español.

1. Método de medida.
2. Incertidumbre y rango.
3. Intervalo de agregación.

Capítulo 4

LA TRANSFORMADA WAVELET.

4.1. Introducción.

A la hora de analizar cualquier tipo de señal en forma de onda, se dispone de una serie de herramientas matemáticas. Una de ellas son las series de Fourier, las que, como ya se vio anteriormente, se utilizan para llevar a cabo la descomposición de una onda en sus armónicos. Sin embargo, este tipo de funciones se quedan cortas para algunas aplicaciones y, por tanto, se han ido mejorando con el tiempo. Sin embargo, en la últimas décadas han surgido nuevos métodos matemáticos, cuyos resultados han sido probados como más precisos en estos campos. Estos métodos reciben el nombre de *transformada wavelet*, y el objetivo de este capítulo es estudiarlos y entender su utilidad en el análisis de las perturbaciones en la red.

En primer lugar se hará una introducción histórica, desde los inicios de las wavelet hasta sus aplicaciones hoy en día. En el siguiente punto, se estudiará una de las modificaciones de la transformada de Fourier que cumple con algunos de los requisitos para el análisis de señales eléctricas.

A continuación, se explicará la transformada wavelet desde un punto de vista más teórico o matemático, explicando las características que la definen. Seguidamente, se tratará de explicar su utilidad dentro del campo del análisis de señales eléctricas.

4.2. Reseña histórica y aplicaciones.

El primer registro del que se tiene constancia acerca del término *wavelet* data del 1909, en una tesis escrita por el matemático Alfred Haar (1885-1933). Casi cuarenta años después, en 1946, el físico Dennis Gabor (1900-1979) usó una variante de la transformada de Fourier: la transformada de Fourier en tiempo corto (STFT, por sus siglas en inglés). Con esta, conseguía suplir una de las grandes desventajas de la transformada clásica de Fourier: el hecho de que solo puede analizar señales de una manera global y no poder desarrollar un análisis local [11]. Con la STFT, ya se podía analizar una señal en el dominio de la frecuencia, aunque solo fuera útil para aquellas que fueran estacionarias y periódicas. A pesar de este avance, todavía quedaba algo importante por hacer: analizar la onda en el dominio frecuencial-temporal.

Sin embargo, no fue hasta 1984 cuando este tipo de funciones experimentó un rápido

crecimiento. Ante la imposibilidad de analizar con la transformada de Fourier señales sísmicas cuya frecuencia variaba rápidamente en el tiempo, el geólogo Jean Morlet ¹ (1931-2007) y el físico Alex Grossmann (1930-2019), desarrollaron un tipo de función que permitía el análisis frecuencial-temporal, formulando lo que hoy en día se conoce como transformada wavelet continua (CWT, por sus siglas en inglés). Dieron a entender que, al hacer la transformada de una señal, la información contenida en ella no cambiaba [12].

Desde ese momento hasta hoy en día, la transformada wavelet se fue perfeccionando, surgiendo nuevas familias y métodos que la volvían más prácticas para determinadas aplicaciones. La más conocida puede que sea la compresión de imágenes con el sistema *jpeg2000* [13], pero no es la única [14]:

- Análisis de huellas dactilares, como las que usa el FBI.
- Eliminación del ruido en señales.
- Estudio de electroencefalogramas.
- Resolución de ecuaciones parciales diferenciales.

4.3. Transformada de Fourier de Tiempo Corto.

En la sección 3.3.3 se vio la aplicación de la transformada de Fourier a la hora de analizar las componentes armónicas de una señal. En este tipo de casos, la descomposición mediante funciones trigonométricas es útil, pues la señal de estudio no presenta grandes discontinuidades. Este es un gran problema para analizar perturbaciones en la red eléctrica, puesto que la inmensa mayoría se manifiesta mediante cambios abruptos en la amplitud. Con la transformada de Fourier se puede analizar una señal durante un tiempo determinado, perdiéndose toda la información relativa a su frecuencia.

Para solucionar estos problemas, se empieza a trabajar con la transformada de Fourier de ventana deslizante o STFT. Este tipo de función toma un intervalo de tiempo determinado, el cual se puede asemejar a una ventana de duración fija M . Durante este periodo de tiempo, la transformada analiza la señal. Cuando este finaliza, comienza un nuevo análisis, y así sucesivamente. De esta manera se puede conocer información frecuencial de la señal localizada en el tiempo. En algunas aplicaciones, las ventanas temporales se solapan, consiguiendo una mayor continuidad en el análisis.

Una de las grandes desventajas que se plantean, es que una vez fijado el tamaño de la ventana (en unidades temporales), este no se puede modificar. La otra, que hay una correlación inversa entre tiempo y frecuencia: cuanto menor sea el intervalo de tiempo, se obtendrán resultados más precisos a nivel temporal, pero se perderá resolución en el dominio frecuencial, y viceversa [15].

Sin embargo, una variante de la STFT, sí que ha sido probada como útil a la hora de analizar señales no estacionarias: la STFT discreta. Esta función descompone señales ondulatorias o cíclicas en componentes temporales-frecuenciales, por lo que es capaz de

¹Ya en el 1981, Morlet introdujo el concepto de wavelet, pero necesitó la ayuda de Grossman para poder desarrollar un modelo.

aportar información sobre la evolución temporal de cada componente, los cuales guardan la información de las frecuencias. El análisis que hace una vez fijado el tamaño de la ventana se adapta perfectamente a las perturbaciones de la red y se ha demostrado que es igual de útil que la transformada wavelet [11].

4.4. Transformada wavelet.

4.4.1. Conceptos generales.

La transformada wavelet, u *onduleta* u *ondícula* por su traducción más cercana al castellano, es una función concentrada en torno a un punto, de duración y energía finitas y cuyo valor medio es nulo:

$$\int_R \psi(t) dt = 0 \quad (4.4.1)$$

En esta ecuación, ψ representa a la wavelet madre. Esta, es la función primigenia u original de un subconjunto de wavelets que derivan de la misma. Algunas de las familias más conocidas de wavelets son la Daubechies ², la Morlet, la Haar o la de Ricker o de sombrero mejicano por su forma. Gráficamente, estas tienen la siguiente forma:

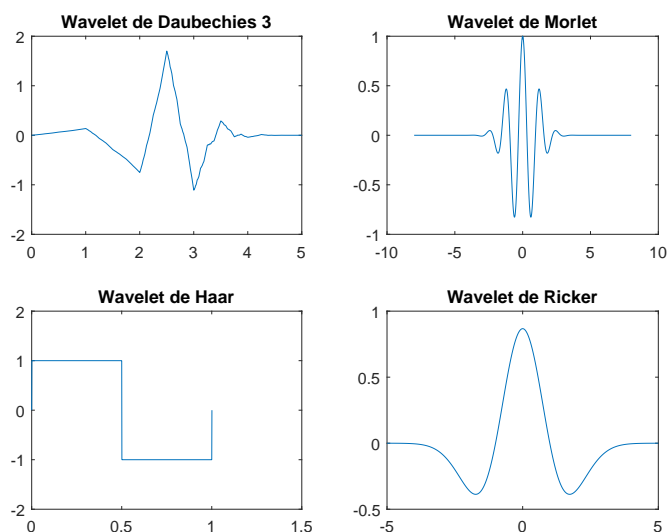


Figura 4.1: Distintas wavelet madre. Fuente: MathWoks y propia.

²Nótese que en su título de la siguiente gráfica, esta wavelet se define como *Daubechies 3*. Ese 3 hace referencia al número de veces que la función se anula.

En el siguiente conjunto de imágenes, se han graficado diferentes wavelet madre de Daubechies ³:

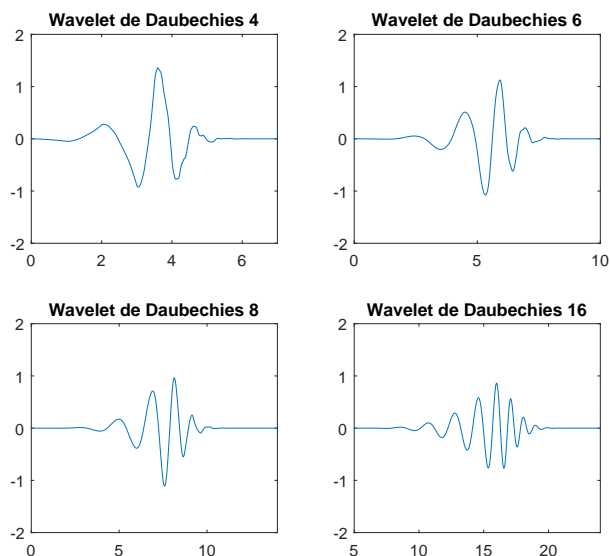


Figura 4.2: Funciones madre de la wavelet Daubechies. Fuente: MathWoks y propia.

Como puede verse a simple vista, tanto en la figura 4.1 como en la 4.2, todas difieren gráficamente entre sí. La elección de una familia u otra (e incluso dentro de una misma familia, como en las Daubechies) para el análisis de señales juega un papel fundamental, ya que unas encajarán mejor con la señal de estudio, mientras que otras darán lugar a resultados deficientes.

Una vez escogida la wavelet madre, es necesario ajustarla a la forma que tenga la señal que se quiere analizar. Ese ajuste es lo que origina todo ese subconjunto de wavelets más pequeñas, y se lleva a cabo mediante dos operaciones: escala y posicionamiento.

Escala.

La función escala se asemeja al zoom de una cámara de fotos o a la propia escala de un mapa. Cuanto mayor zoom tenga, es decir, cuanto menor sea la escala (si esta es $1 : x$, cuanto menor sea x mayor será la escala), se podrán apreciar los pequeños detalles. Por el contrario, a mayor escala, se obtiene una imagen más general. Lo mismo ocurre con las señales eléctricas al analizarlas con una wavelet: si se escala una wavelet madre contrayéndola, haciéndola más pequeña, se podrán analizar las variaciones, perturbaciones y, en general, cambios en la amplitud más abruptos. Por el contrario, si se dilata o se hace más grande, tan sólo se podrá obtener información a nivel general. Esto se debe a que tanto la escala como la frecuencia están relacionadas. Matemáticamente, el factor de escala a se representa de la siguiente manera

³Ingrid Daubechies (1954-actualidad) es una matemática y física de origen belga que en 1988 propuso un método sistemático para la construcción de wavelets ortogonales [17].

$$\psi\left(\frac{t}{a}\right), \quad a > 0$$

y se relaciona con la frecuencia mediante [16]:

$$F_{eq} = \frac{C_f}{a \cdot \delta t} \quad (4.4.2)$$

Siendo F_{eq} la frecuencia equivalente de la wavelet escalada, C_f el centro de frecuencia y δt es el tiempo de muestreo. Por tanto, para factores de escala superiores a la unidad $a > 1$ se podrán analizar frecuencias más bajas; y para aquellos en los que $0 < a < 1$ se analizarán las más altas.

Posicionamiento.

El posicionamiento de la wavelet es, simplemente, situar la wavelet ya escalada en el lugar de la señal que se quiere analizar. Se puede hacer tanto atrasando como adelantando la wavelet a lo largo de la onda objeto un tiempo τ de la forma:

$$\psi(t - \tau)$$

De esta forma, aplicando escala y posicionamiento a la par, se tendría:

$$\psi\left(\frac{t - \tau}{a}\right)$$

Por tanto, si se tiene la transformada wavelet $S(t)$ de una una función $s(t)$, esta quedaría representada en función de la escala y del posicionamiento como:

$$S(\tau, a) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi_{a,\tau}^*(t) dt \quad a, b \in R \quad a \neq 0 \quad (4.4.3)$$

Donde $\psi_{a,\tau}^*(t)$ es el conjugado de la función wavelet madre escalada y posicionada, de la forma:

$$\psi_{a,\tau}^* = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^*\left(\frac{t - \tau}{a}\right) \quad (4.4.4)$$

Una vez escalada y posicionada sobre la onda de estudio, el análisis con funciones wavelet arroja una serie de coeficientes, que indican, en términos generales, lo que difiere esta de la señal de origen. Estos coeficientes son función del factor de escala y del de ajuste. Su utilidad y aplicación se verán más adelante.

Ejemplo. Escalado y posicionado de una wavelet.

Para poder ver más claros estos dos conceptos, se ha tomado como ejemplo la función wavelet de Morlet, la cual responde a la siguiente expresión:

$$\psi(t) = \cos(5t) e^{-t^2/2} \quad (4.4.5)$$

Si se le introducen los factores de escala a y posicionamiento τ , entonces se tendría:

$$\psi(t) = \cos\left(5 \frac{t - \tau}{a}\right) \exp\left[-\frac{\left(\frac{t - \tau}{a}\right)^2}{2}\right] \quad (4.4.6)$$

En la figura 4.3 se han aplicado tres factores de escala distintos: $a = 0,5$, $a = 1$ y $a = 1,5$; para así ver mejor qué sucede cuando estos son inferiores, iguales y mayores que la unidad:

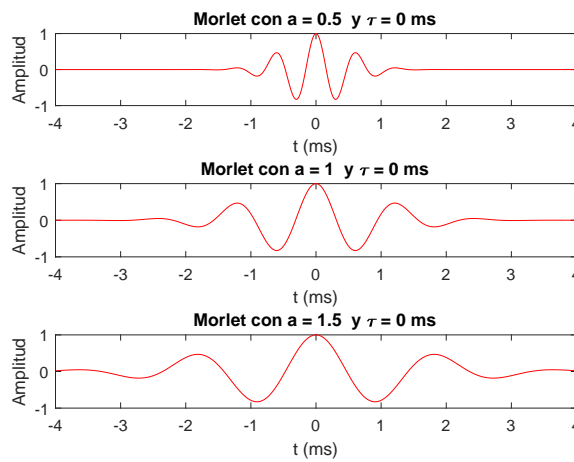


Figura 4.3: Transformada wavelet de Morlet 4.4.5 escalada. Fuente: propia.

Con estas tres imágenes se aprecia claramente cómo los factores de escala pequeños aumentan la frecuencia de la wavelet y, por tanto, encajarían mejor a la hora de analizar cambios bruscos o detalles. Por otro lado, las escalas mayores sirven para obtener esa información de carácter más general. En la siguiente terna, figura 4.4, se han mantenido constantes las escalas y se ha ido desplazando la función:

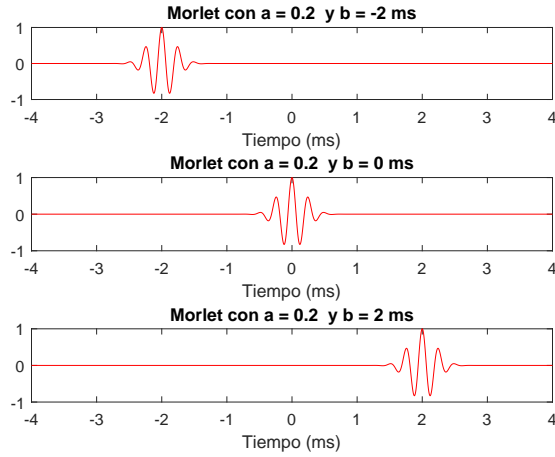


Figura 4.4: Transformada wavelet de Morlet 4.4.5 desplazada. Fuente: propia.

En función de como se construyen los parámetros de escala y de posicionamiento, las wavelet se podrán clasificar en continuas y en discretas.

4.4.2. Transformada wavelet continua.

En la transformada wavelet continua (CWT por sus siglas en inglés), como su propio nombre indica, la escala y el posicionamiento se tratan de variables continuas: entre un factor de escala y el siguiente pueden existir infinitos valores. La expresión matemática para la CWT se obtiene sustituyendo $\psi_{a,\tau}^*(t)$ en la ecuación (4.4.3) por su expresión de (4.4.4):

$$CWT(\tau, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi^* \left(\frac{t - \tau}{a} \right) dt \quad (4.4.7)$$

Recuérdese que tanto frecuencia como escala están relacionadas mediante (4.4.2). Por tanto [18]:

Tabla 4.1: Factores de escala.

a	1	2	4	...	a
F_{eq}	50	25	12,5	...	50/a

Los factores de escala intermedios se suelen construir con potencias de base dos, lo que recibe el nombre de escalas por octavo. Cuantas más escalas por octavo se tengan, el análisis que se podrá hacer será mucho más preciso:

Tabla 4.2: Construcción de los factores de escala.

Factor de escala	2	$2^{11/10}$	$2^{12/10}$	$2^{13/10}$...	$2^{19/10}$	4
------------------	---	-------------	-------------	-------------	-----	-------------	---

Ahora bien, la wavelet madre de forma continua se escala para cada uno de los valores de a y se desplaza a lo largo de la señal de origen comparándose con ella. Si se analiza la progresión de la tabla 4.2 desde $a = 1 = 2^{0/10}$ hasta un factor de escala $a = 32 = 2^5 = 2^{50/10}$, entonces se tienen un total de 50 posibles escalas:

$$a = \{2^{0/10}, 2^{1/10}, 2^{2/10}, \dots, 2^{49/10}, 2^{50/10}\}$$

Pero si en lugar de incrementarse de uno en uno se hiciera de $1/10$ en $1/10$, se tendrían 500 escalas. En una señal con 100 muestras, en el primer caso se compararía 5.000 veces, dando lugar a 5.000 coeficientes; pero en el segundo pasarían a ser 50.000 coeficientes. Gráficamente sería:

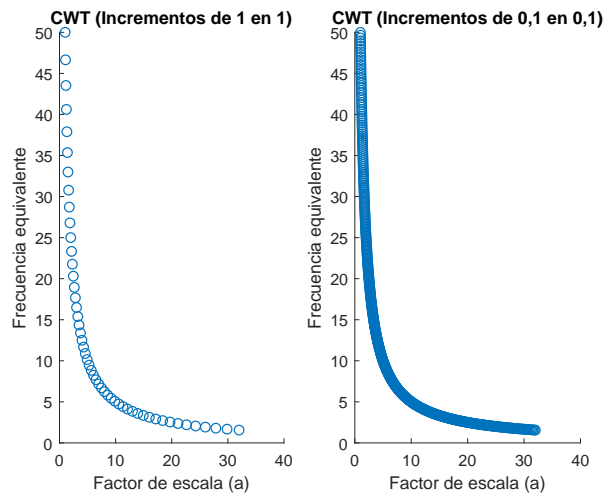


Figura 4.5: Construcción de los factores de escala para la CWT. Fuente: propia.

Esta característica hace que la transformada continua tenga una gran capacidad de análisis. Sin embargo, el coste computacional de utilizar tantas escalas y obtener tantos coeficientes no es práctico a la hora de la verdad, por lo que para el análisis de perturbaciones en el presente trabajo se ha optado por discretizar la escala y el desplazamiento. Aun así, la eficacia de la CWT para el análisis temporal-frecuencial y el filtrado de componentes frecuenciales localizados en el tiempo hace que se aplique a estos casos.

4.4.3. Transformada wavelet discreta.

Al contrario de lo que sucedía con la continua, los coeficientes de la transformada discreta de wavelet (DWT por sus siglas en inglés) van a ser variables discretas. Es decir, no va a haber escalas intermedias entre $a = 2$ y $a = 4$, por lo que el número de coeficientes se va a reducir considerablemente, así que el tiempo de computación será mucho menor.

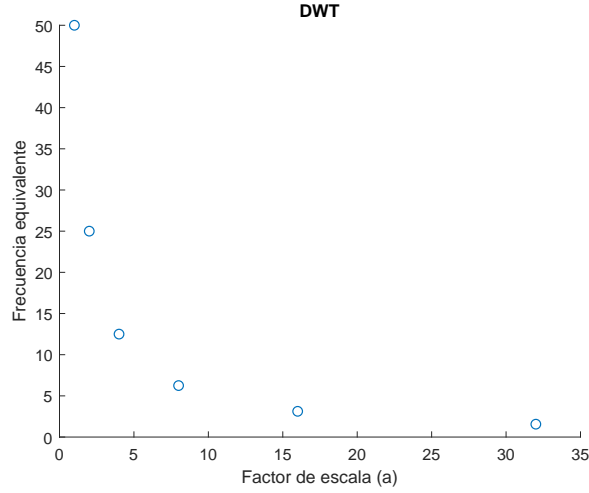


Figura 4.6: Construcción de los factores de escala para la CWT. Fuente: propia.

Ahora bien, para discretizar la expresión 4.4.4 se toma $a = a_0^m$ y $\tau = p\tau_0$ y entonces esta pasaría a ser de la siguiente manera:

$$\psi_{m,p} = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \psi^* \left(\frac{t - p\tau_0}{a_0^m} \right) \quad (4.4.8)$$

Donde a_0 y τ_0 son números enteros fijos que van a permanecer invariables durante todo el análisis (generalmente $a_0 = 2$); m definirá el número de niveles de descomposición (a mayor valor de m , menor frecuencia); y p será el parámetro de escala. En la mayoría de los casos se iguala τ_0 a a_0^m . La expresión 4.4.3 quedaría:

$$(DWT)_{m,p} = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi_{m,p} dt \quad (4.4.9)$$

Sustituyendo 4.4.8 en 4.4.9, se obtendría:

$$(DWT)_{m,p} = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi^* \left(\frac{t - p\tau_0}{a_0^m} \right) dt$$

Finalmente, y dado que se trata de valores discretos, la integral anterior se puede reescribir como:

$$(DWT)_{m,p} = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k s(k) \psi^* \left(\frac{k}{a_0^m} - p \right) \quad (4.4.10)$$

Siendo $s(k)$ la señal discretizada.

Entre las aplicaciones más conocidas de la DWT se encuentran la compresión tanto de señales como de imágenes y la eliminación de ruido en señales.

4.4.4. Análisis multirresolución.

El proceso de análisis se comienza determinando los coeficientes de la transformada wavelet. A continuación, la señal $f(n)$ (ver figura 4.7) pasa por un filtro alto $h_d(n)$, el cual almacenará las frecuencias más altas, y por un filtro bajo $g_d(n)$, que hará lo propio con las más bajas. Es decir, si se tiene una señal con una frecuencia máxima $f = 50 \text{ Hz}$ y se fija una escala $a_0 = 2$ (la frecuencia equivalente sería $F_{eq} = 50 \text{ Hz}/2 = 25 \text{ Hz}$), entonces el filtro $h_d(n)$ analizará las frecuencias comprendidas entre 25 Hz y 50 Hz y el filtro bajo las inferiores a 25 Hz . La operación de filtrar una señal se conoce matemáticamente como convolución. El $\downarrow 2$ significa que al pasar por esos filtros, el número de muestras de la señal se reduce a la mitad.

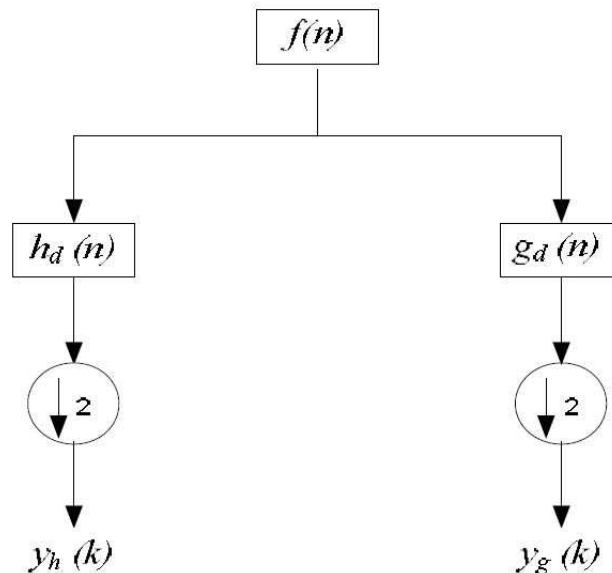


Figura 4.7: Filtrado de una señal. Fuente: [11].

Este primer análisis se conoce como primer nivel de descomposición y de él se obtienen dos señales, una con las frecuencias altas $y_h(k)$ y otra con las bajas $y_g(k)$; dando lugar a los coeficientes de detalle $d_1(n)$ y de aproximación $a_1(n)$, respectivamente. Estos se calculan como:

$$d_1(n) = \sum_k f(n) g_d(2n - k)$$

$$a_1(n) = \sum_k f(n) h_d(2n - k)$$

En el siguiente paso (segundo nivel de descomposición), se analiza la señal obtenida a partir del filtro de bajas frecuencias y se obtendrán los coeficientes $d_2(n)$ y $a_2(n)$:

$$d_2(n) = \sum_k a_1 g_d(2n - k)$$

$$a_2(n) = \sum_k a_1 h_d(2n - k)$$

La continuación de este proceso hasta la descomposición en n niveles es lo que se conoce como análisis multirresolución o MRA, por sus siglas en inglés (figura 4.8):

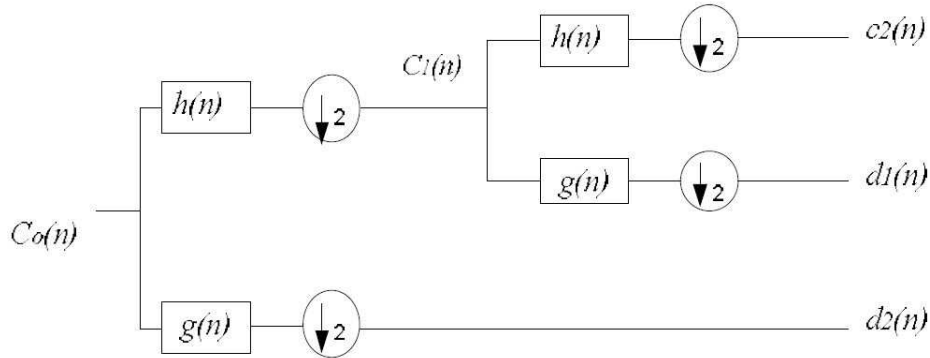


Figura 4.8: Análisis multirresolución. Fuente: [11].

Nótese que en el primer nivel, la descomposición se hizo para $m = 1$ y $a_0 = 2$, es decir, $a_0^m = 2^1 = 2$. En el siguiente nivel, $m = 2$, por lo que $a_0^m = 4$ y la frecuencia original se reduciría a $f = 12,5 \text{ Hz}$.

El MRA permite descomponer una señal $f(n)$ en una serie de componentes que son función de la frecuencia. En ellos está contenida la información necesaria para reconstruir de nuevo $f(n)$. Esta reconstrucción se hace gracias a que los coeficientes de aproximación representan la media aritmética entre dos valores consecutivos de la señal, mientras que los de detalle indican la desviación que tiene esta media respecto de la señal que se acaba de analizar. Así pues, si se tiene una descomposición de un único nivel, como la de la figura 4.7, $f(n)$ se podrá recalcular como:

$$f(n) = a_1 + d_1$$

En el siguiente nivel, serán los coeficientes de aproximación los que se analicen, por lo que $a_1 = a_2 + d_2$. Sustituyendo en la expresión anterior, se tiene que:

$$f(n) = a_2 + d_2 + d_1$$

Para m niveles:

$$f(n) = a_m + d_m + d_{m-1} + \dots + d_2 + d_1$$

4.5. Conclusiones.

A modo resumen de los conceptos que se han introducido en este capítulo, es necesario extraer una serie de conclusiones:

1. Transformada de Fourier: no es útil para analizar señales en las cuales se requiere información temporal-frecuencial.
2. Transformada de Fourier de ventana deslizante: aporta información acerca del momento en el cual se dan fenómenos relacionados con la frecuencia.
3. Transformada discreta de Fourier de ventana deslizante: análisis igual de eficaz que el que se puede llevar a cabo con las transformadas wavelet.
4. Transformada wavelet:
 - CWT: elevado coste computacional al tomar los valores de escala y desplazamiento como variables continuas.
 - DWT: facilidad de implementación y buenos resultados para el análisis de señales.

4.6. Ejemplos.

4.6.1. Ejemplo numérico.

A continuación se llevará a cabo un ejemplo numérico para entender como trabajan las transformadas wavelet. Se hará con la transformada de Haar, cuyo proceso de construcción se encuentra en el apartado 6.1 del capítulo 6 de [14]. En las siguientes líneas se darán unas nociones básicas de como funciona el proceso de filtrado.

La wavelet madre de Haar es de la forma:

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq t < \frac{1}{2} \\ -1 & \text{si } \frac{1}{2} \leq t < 1 \\ 0 & \text{de otro modo} \end{cases}$$

Gráficamente:

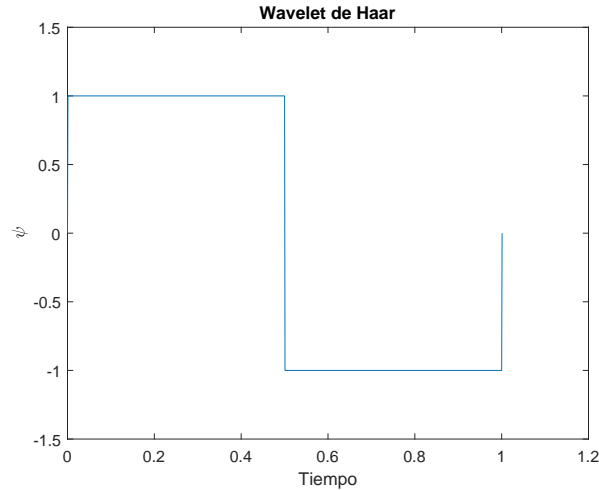


Figura 4.9: Wavelet de Haar. Fuente: propia.

Como ya se explicó anteriormente, las wavelet se componen de dos filtros. Con uno se obtienen los coeficientes de aproximación, que representan el valor medio entre dos consecutivos: x_n y x_{n+1} . Sea \mathbf{x} el vector de entrada, \mathbf{a} los valores de salida y \mathbf{h} el filtro de la forma $\mathbf{h} = (h_0, h_1) = (\frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2})$ ⁴ tal que:

$$a_m = \frac{\sqrt{2}}{2}x_n + \frac{\sqrt{2}}{2}x_{n+1}$$

Siendo i el número de veces que se haya filtrado el vector \mathbf{x} . Con el otro filtro se calcula lo que se desvía este valor medio de la señal original, y representa a los coeficientes de detalle. Para el mismo vector \mathbf{x} de entrada, sean \mathbf{d} los valores de salida y \mathbf{g} el filtro tal que $\mathbf{g} = (g_0, g_1) = (\frac{\sqrt{2}}{2}, -\frac{\sqrt{2}}{2})$:

$$d_m = \frac{\sqrt{2}}{2}x_n - \frac{\sqrt{2}}{2}x_{n+1}$$

Es decir, si se aplican a \mathbf{x} ambos filtros (el llamado proceso de convolución) de la forma $\mathbf{a} = \mathbf{h} * \mathbf{x}$ y $\mathbf{d} = \mathbf{g} * \mathbf{x}$, se obtendrá suficiente información para recuperar la señal de entrada. Si $j \times 1$ representa la dimensión de \mathbf{x} , entonces las matrices H y G , de dimensiones $\frac{j}{2} \times j$, representan las matrices de convolución de ambos filtros

$$H = \begin{bmatrix} \ddots & \ddots & & & & & & \\ & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & \\ \dots & 0 & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & 0 & \dots \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \\ & & & & & & \ddots & \ddots \end{bmatrix}$$

⁴ $\sqrt{2}$ se obtiene durante el proceso de construcción al ortogonalizar las matrices de convolución que representan los filtros \mathbf{h} y \mathbf{g} .

$$G = \begin{bmatrix} \ddots & \ddots & & & & & & & \\ & -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & & \\ \dots & 0 & 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & 0 & \dots & \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & & \\ & & & & & & \ddots & \ddots & \end{bmatrix}$$

las dos igualdades anteriores se pueden escribir de la manera $\mathbf{y} = H\mathbf{x}$ y $\mathbf{z} = G\mathbf{x}$. Combinando H y G , de dimensiones $j \times \frac{j}{2}$, todo lo anterior se puede escribir de la forma:

$$\begin{bmatrix} H \\ G \end{bmatrix} \mathbf{x} = \begin{bmatrix} H\mathbf{x} \\ G\mathbf{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{d} \end{bmatrix}$$

Pero de nada sirve la descomposición de una señal si no se puede recuperar la información. Por eso se hace necesario usar otras dos matrices W y V , de dimensiones $j \times \frac{j}{2}$, con la que se reconstruirá \mathbf{x} , y las cuales son de la forma:

$$W = \begin{bmatrix} \ddots & & & & & & & & \\ & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & 0 & & & & & \\ & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & 0 & & & & & \\ \dots & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & \dots & & & & \\ \dots & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & \dots & & & & \\ & 0 & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} & & & & & \\ & 0 & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} & & & & & \\ & & & & & & \ddots & \ddots & \end{bmatrix}$$

$$V = \begin{bmatrix} \ddots & & & & & & & & \\ & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & 0 & & & & & \\ & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & 0 & & & & & \\ \dots & 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & \dots & & & & \\ \dots & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & \dots & & & & \\ & 0 & 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & & & & & \\ & 0 & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} & & & & & \\ & & & & & & \ddots & \ddots & \end{bmatrix}$$

La reconstrucción de \mathbf{x} será de la forma:

$$[x] = [W \mid V] \begin{bmatrix} a \\ d \end{bmatrix}$$

Ahora bien, si se tiene, por ejemplo, un vector $\mathbf{x} = [60, 50, 40, 60, 80, 40, 50, 50]^T$, entonces:

$$a_1 = H_1 * x = [55\sqrt{2}, 50\sqrt{2}, 60\sqrt{2}, 50\sqrt{2}]^T = \sqrt{2} [55, 50, 60, 50]^T$$

$$d_1 = G_1 * x = [5\sqrt{2}, -10\sqrt{2}, 20\sqrt{2}, 0]^T = \sqrt{2} [-5, 10, -20, 0]^T$$

Nótese que tanto \mathbf{z}_1 como \mathbf{y}_1 están multiplicado por $\sqrt{2}$; lo cual no afecta en absoluto a la información de entrada, pues simplemente, estará escalada. Si se lleva a cabo un segundo filtrado (del vector de aproximación), se obtendrán los vectores de aproximación y de detalle del segundo nivel:

$$a_2 = H_2 * a_1 = [105, 110]^T$$

$$d_2 = G_2 * a_1 = [-5, -10]^T$$

Si se sigue el proceso de reconstrucción de \mathbf{x} , este sería:

$$[x] = [W_1 | V_1] \begin{bmatrix} a_1 \\ d_1 \end{bmatrix} = [W_1 | V_1] \left[\frac{[W_2 | V_2] \begin{bmatrix} a_2 \\ d_2 \end{bmatrix}}{d_1} \right] = [60, 50, 40, 60, 80, 40, 50, 50]^T$$

En el caso de que se estuviera comprimiendo una imagen, una vez obtenidos los coeficientes de detalle d_1 estos se truncarían. Es decir, se escogería un límite y todos los valores inferiores pasarían a ser nulos. Si para este ejemplo ese valor es 5, entonces:

$$a_1 = \sqrt{2} [55, 50, 60, 50]^T$$

$$d_1 = \sqrt{2} [-5, 10, -20, 0]^T \approx \sqrt{2} [0, 10, -20, 0]^T$$

Al querer reconstruir \mathbf{x} , el resultado sería un vector similar, el cual se denotará por \mathbf{x}_{desc} :

$$[x_{desc}] = [55, 55, 40, 60, 80, 40, 50, 50]^T$$

Este nuevo vector se parece mucho al original, y la información necesaria para guardarlo ha sido inferior, pues uno de los valores se ha anulado. Si en lugar de tener simplemente una serie de ocho dígitos se tuviera una compuesta por cientos, el ojo humano sería incapaz de apreciar la diferencia entre la imagen real (\mathbf{x}) y la descomprimida (\mathbf{x}_{desc}). La cantidad de datos que se sacrifican para comprimir/descomprimir una imagen es rentable.

4.6.2. Ejemplo práctico.

A continuación se va a mostrar la descomposición en tres niveles de una señal eléctrica con una wavelet Daubechies 3 para tratar de entender como funciona el análisis. Todo este ejemplo se ha implementado con un *script* del programa MATLAB. Lo primero que se hace es cargar la señal original para ver qué aspecto tiene:

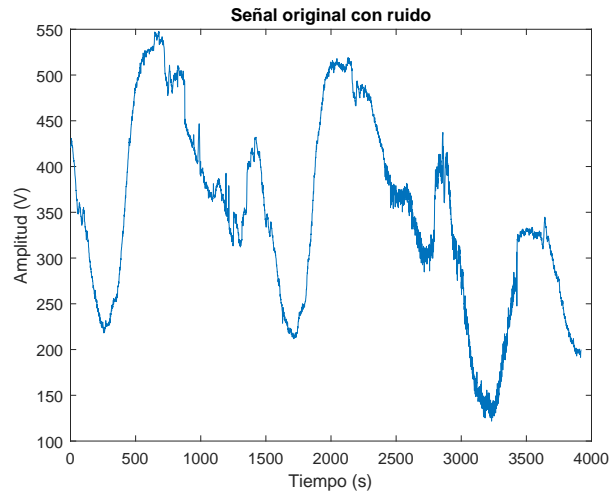


Figura 4.10: Señal original con ruido. Fuente: biblioteca de MATLAB.

En segundo lugar se lleva a cabo una descomposición de tres niveles. Los coeficientes que se van generando se almacenan en variables para, a continuación, reconstruir las señales de aproximación:

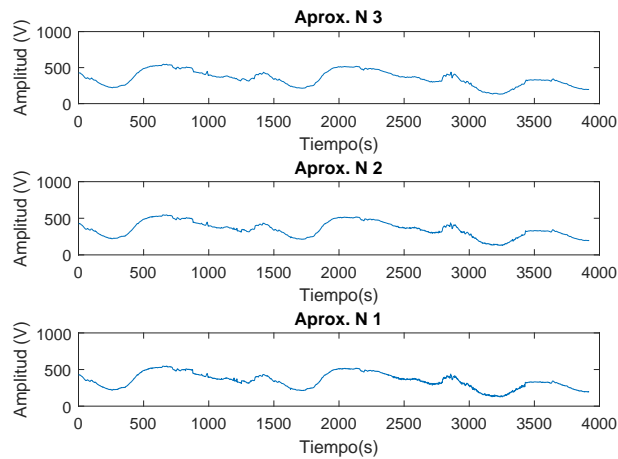


Figura 4.11: Aproximación a tres niveles. Fuente: propia.

Y las de detalle:

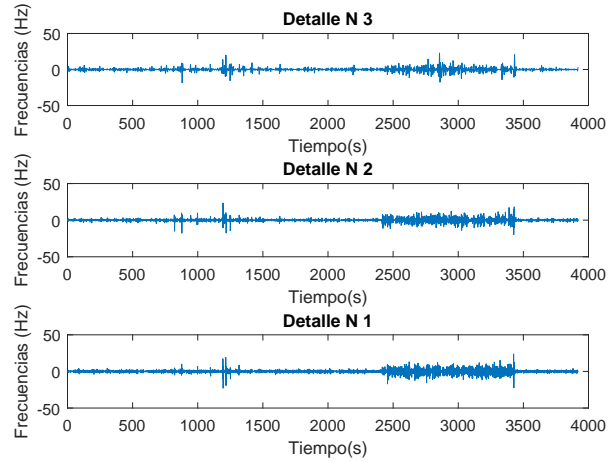


Figura 4.12: Detalle a tres niveles. Fuente: propia.

A simple vista no se nota el filtrado de las frecuencias más altas en las señales de aproximación, pero si se hace zoom en torno a $t = 3000\text{ s}$ se nota claramente este fenómeno:

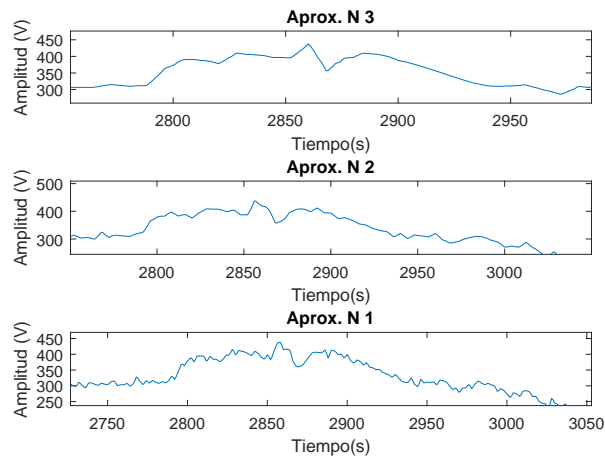


Figura 4.13: Detalle de 4.11 a tres niveles. Fuente: propia.

Capítulo 5

CASOS PRÁCTICOS.

El objetivo de este capítulo es el análisis de señales *per se*, dividiéndose el mismo en dos partes. Durante la primera de ellas se va a probar, con diferentes perturbaciones generadas en MATLAB, la utilidad de las wavelet a la hora de analizar las mismas. Como son señales generadas en las que se sabe que tipo de evento va a tener lugar, su estudio se simplifica sustancialmente, permitiendo así probar los *scripts* que se utilizarán a continuación. Los códigos de las señales que se van a emplear son cortesía de Miguel Fernández Sanz [19].

Además, el poder trabajar en entornos simulados permite probar diferentes tipos de transformada wavelet, estudiar y escoger qué parámetros funcionan mejor en cada una de ellas y analizar su tiempo de computación. De esta manera, el análisis final se llevará a cabo con la que mejores resultados aporte.

En la segunda parte se utilizarán señales reales de consumo eléctrico de un hospital y de una industria. De esta manera se probará que la detección de perturbaciones con wavelet tiene una utilidad práctica, más allá de un entorno académico.

5.1. Señales analíticas.

Como ejemplos para probar los scripts de MATLAB que se implementarán más adelante en los casos reales, se van a estudiar los siguientes tipos de perturbación:

- Hueco.
- Hueco con ruido.
- Sobretensión.
- Sobretensión con ruido.
- Flicker.
- Flicker con ruido.

En las señales sin ruido se estudiará el efecto de usar una wavelet madre u otra, así como diferentes familias. En el caso de las perturbaciones a las que a mayores se les ha añadido ruido, se utilizará la wavelet escogida y se probarán los niveles de descomposición para ver en qué punto empiezan a notarse los cambios.

5.1.1. Hueco.

El primer evento a analizar es un hueco, en el cual el valor de la tensión cae hasta un 20 % de la nominal. En esta primera imagen se puede ver una comparación entre la onda con hueco y lo que sería una onda sin alterar:

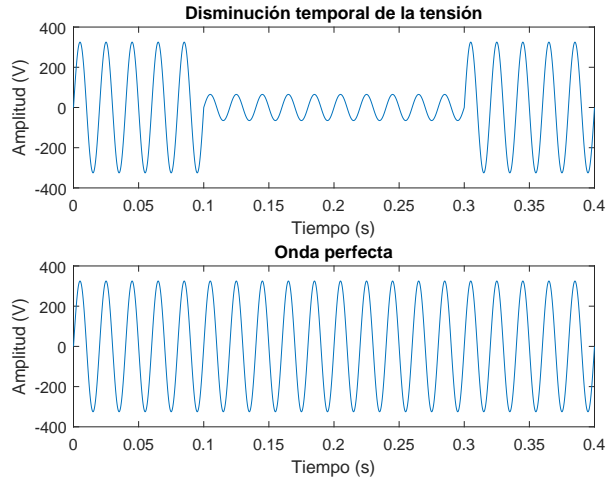


Figura 5.1: Comparación onda con hueco y onda perfecta. Fuente: [19] y propia.

Ahora se muestra otra imagen en la cual el valor de la tensión (eje vertical) de la onda en la cual se produce la perturbación, se representa como el % de la onda original. De esta manera se puede ver claramente la cuantía en la cual disminuye:

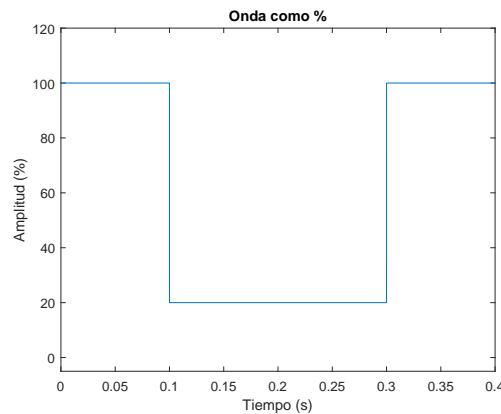


Figura 5.2: Hueco como porcentaje de la tensión. Fuente: propia.

A continuación se lleva a cabo una descomposición en los coeficientes de detalle y de aproximación y se grafican como en el ejemplo 4.6.2.:

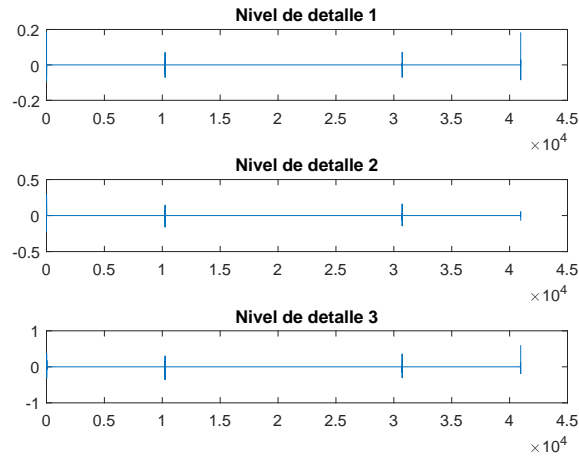


Figura 5.3: Niveles de detalle para un hueco (Daubechies 3). Fuente: propia.

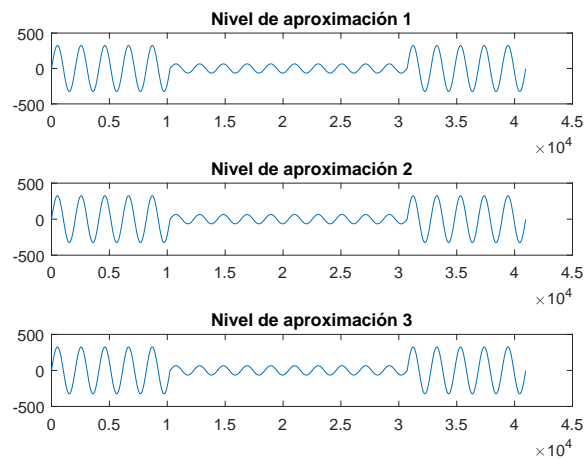


Figura 5.4: Niveles de aproximacion para un hueco (Daubechies 3). Fuente: propia.

En la figura 5.4 no se aprecia muy bien en qué puntos se produce una discontinuidad, un cambio en la tensión. Sin embargo, en la 5.3 se ve claramente en qué instante comienza y en qué instante acaba la perturbación. Esta es una de las grandes ventajas de las wavelet: un análisis visual muy rápido de si la señal se mantiene en los niveles deseados o no.

Para poder analizar el resultado, se ha incluido durante el proceso una condición, la cual implica que si el coeficiente de detalle es superior a un determinado valor, se van almacenando los tiempos para los cuales se dé esta condición. De esta manera, se podrá averiguar qué wavelet cumple con los parámetros que se buscan en un análisis:

- Mayor resolución, entendida como el número de ocasiones en las cuales los niveles de detalle superen el listón establecido.
- Menor coste computacional, calculado como una aproximación de la media correspondiente a cinco tiempos de computación tomados de manera consecutiva.

Poniendo el límite superior en 0,6 y el inferior en $-0,6$, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 5.1: Comparativa de distintas wavelet para un hueco.

Wavelet	Tiempo (s)	n ^o de eventos	Wavelet	Tiempo (s)	n ^o de eventos
Haar	0.40	16481	Biortogonal 1.3	0.40	16483
Daubechies 2	0.24	3	Biortogonal 2.2	0.26	6
Daubechies 3	0.26	11	Biortogonal 3.3	0.25	5
Daubechies 4	0.25	6	Biortogonal 4.4	0.27	15
Daubechies 6	0.25	2	Coiflet 2	0.27	8
Daubechies 12	0.27	5	Coiflet 4	0.27	8

De esta tabla se extraen varias conclusiones:

1. La primera de ellas es el número de veces que los coeficientes de detalle se encuentran por encima del listón en las wavelet de Haar y biortogonal 1.3. Si se observa, por ejemplo, la gráfica de Haar de los parámetros de detalle, se ve claramente que esta no se ajusta nada a la señal perturbada:

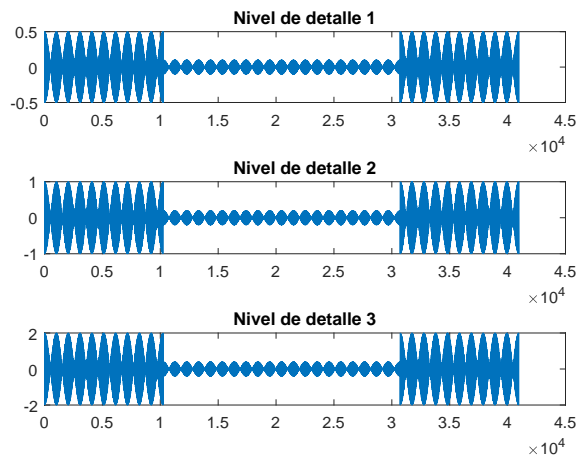


Figura 5.5: Niveles de aproximación para un hueco con la wavelet de Haar. Fuente: propia.

Por tanto, las transformadas con forma cuadrática quedan descartadas para posteriores análisis.

2. El coste computacional es similar en el resto de wavelets. Todos ellos están en el mismo orden de magnitud; por lo que finalmente no es un parámetro determinante a la hora de analizar.
3. El número de eventos es claramente superior en algunas de ellas, como la Daubechies 3 y la biortogonal 4.4. Será con estas dos con las que se pruebe a partir de ahora.

Se probarán ahora distintos huecos para ver cómo se comporta cada una de estas dos wavelet madre:

Tabla 5.2: Comparativa de Daubechies 3 y biortonormal 4.4 para diferentes huecos.

		50 % ($t = 0,30\text{ s}$)	75 % ($t = 0,15\text{ s}$)	95 % ($t = 0,05\text{ s}$)
Daubechies 3	Tiempo de comp.	0,27	0,28	0,26
	Nº. de eventos	9	11	13
Bior. 4.4	Tiempo de comp.	0,28	0,29	0,26
	Nº. de eventos	9	11	15

No se observan grandes cambios de una a otra wavelet madre para los diferentes huecos generados, lo que hace pensar que ambas se adaptan correctamente a cualquier situación.

5.1.2. Hueco con ruido.

En esta sección se analizará la misma señal anterior pero esta vez con ruido aleatorio Gaussiano. Este ruido se genera mediante una función en MATLAB de forma aleatoria. De tal manera se comprobará no solo como se comportan las wavelet en cambios importantes en la tensión, sino también cuando la señal está contaminada. Esta sería de la forma:

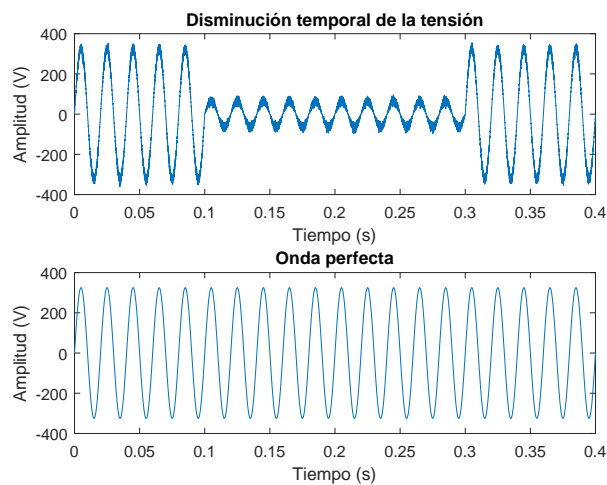


Figura 5.6: Comparación onda con hueco y ruido y onda perfecta. Fuente: propia.

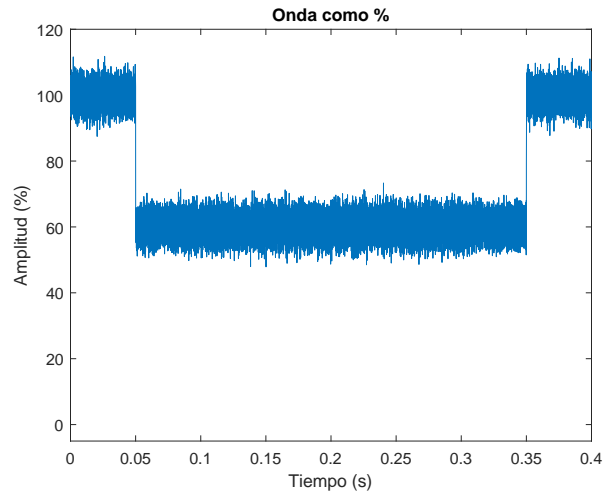


Figura 5.7: Hueco con ruido como porcentaje de la tensión. Fuente: propia.

En la siguiente imagen se ha hecho *zoom* a la gráfica con ruido para poder ver mejor cómo es este:

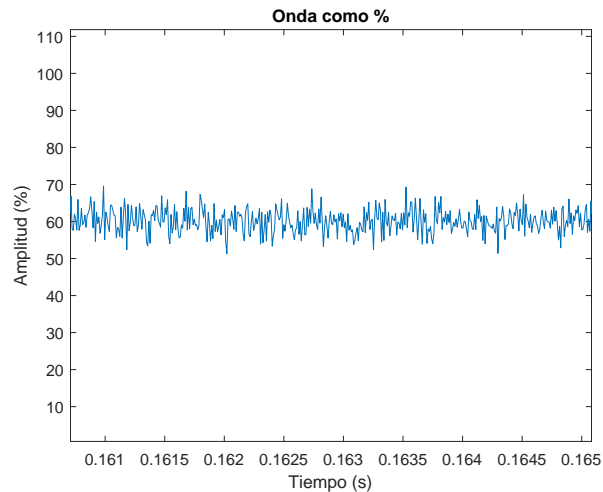


Figura 5.8: Detalle del ruido generado. Fuente: propia.

A continuación, se hizo una descomposición en tres niveles, siguiendo los mismos estándares que hasta ahora. Sin embargo, las gráficas donde se representaban los niveles de detalles no aportaban nada. Por ello, se fue aumentando el número de niveles de descomposición hasta llegar a ocho. En este punto se hacía más visible el cambio de tensión más el ruido. Estas gráficas son:

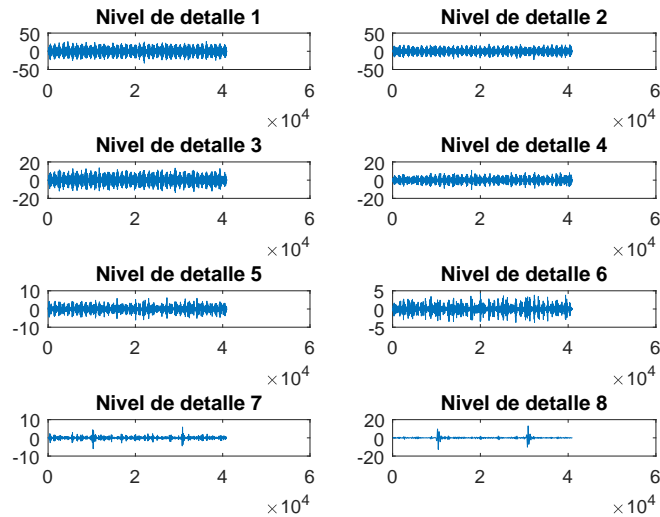


Figura 5.9: Niveles de detalle para un hueco con ruido (Daubechies 3). Fuente: propia.

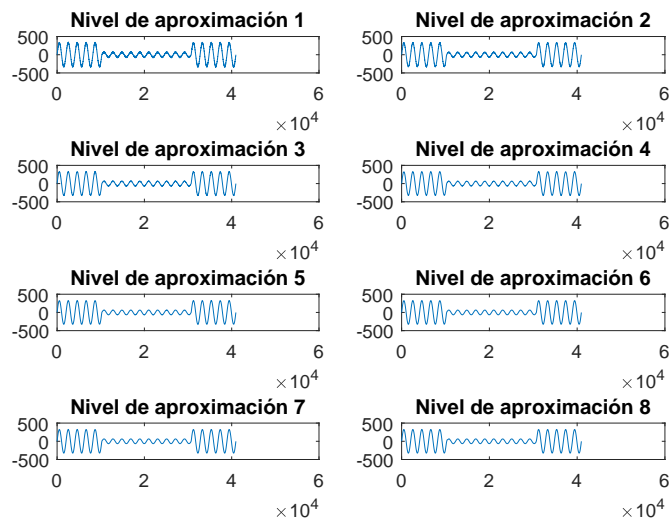


Figura 5.10: Niveles de aproximacion para un hueco con ruido (Daubechies 3). Fuente: propia.

Las dos imágenes anteriores no se ven especialmente bien. Esto se debe al alto número de niveles de descomposición. Sin embargo en ellas se aprecia claramente en qué momento se producen los cambios en la tensión que es el objetivo último de estos análisis.

5.1.3. Sobretensión.

Ahora se analizará una sobretensión en la cual el valor máximo es de un 175 % del valor nominal. De esta manera se estudiará un fenómeno distinto al anterior: se produce un

aumento y no una caída de tensión y el tiempo de duración es menor. Al igual que antes se comienza mostrando las gráficas:

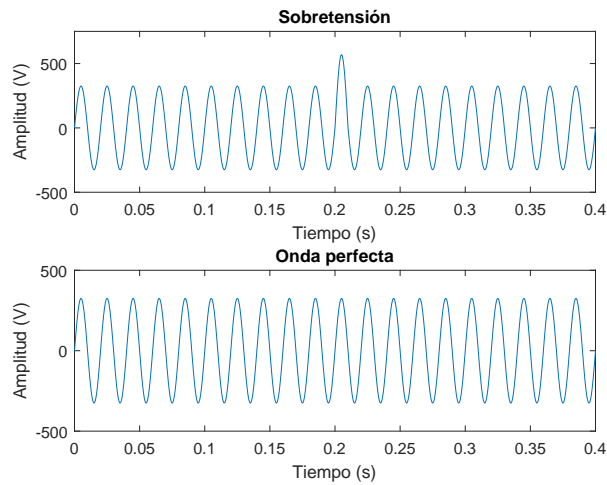


Figura 5.11: Comparación onda con sobretensión y onda perfecta. Fuente: propia.

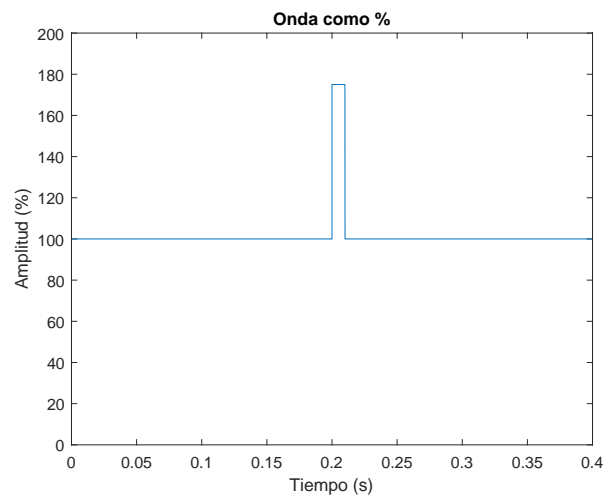


Figura 5.12: Sobretensión como porcentaje de la tensión. Fuente: propia.

Si se hace una descomposición en tres niveles de detalle y de aproximación con una Daubechies 3 y se obtienen las siguientes gráficas:

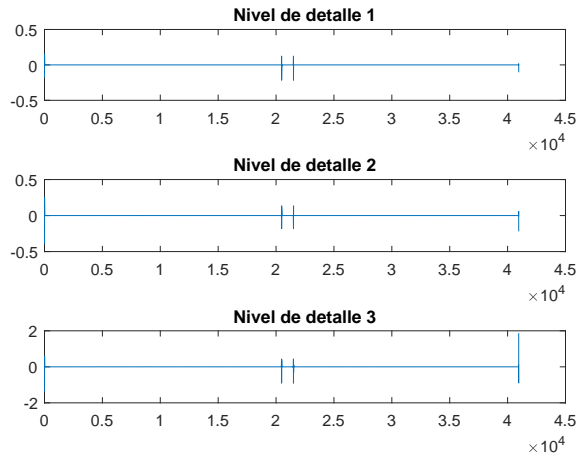


Figura 5.13: Niveles de detalle para una sobretensión (Daubechies 3). Fuente: propia.

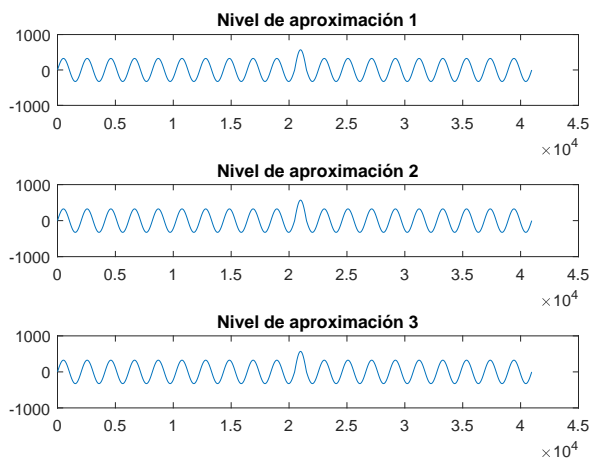


Figura 5.14: Niveles de aproximacion para una sobretensión (Daubechies 3). Fuente: propia.

Al igual que antes, gracias a la descomposición en los coeficientes de detalle y su posterior gráfica, se ve claramente en qué puntos comienza y acaba la perturbación. Si bien es cierto que en la figura 5.12 este efecto es también claro, en el análisis de ondas en las cuales haya más perturbaciones, más variaciones de tensión y más eventos, el análisis wavelet será más eficaz.

Para ver cómo se comportan las diferentes transformadas se hace una tabla igual que la anterior:

Tabla 5.3: Comparativa de distintas wavelet para una sobretensión.

Wavelet	Tiempo (s)	n ^o de eventos	Wavelet	Tiempo (s)	n ^o de eventos
Haar	0.90	33049	Biortogonal 1.3	0.91	33047
Daubechies 2	0.28	3	Biortogonal 2.2	0.27	6
Daubechies 3	0.27	11	Biortogonal 3.3	0.28	5
Daubechies 4	0.28	6	Biortogonal 4.4	0.27	11
Daubechies 6	0.28	2	Coiflet 2	0.28	8
Daubechies 12	0.30	5	Coiflet 4	0.27	8

Analizando estos resultados, se ve claramente que sucede lo mismo que con el hueco:

1. Las dos transformadas con forma cuadrada (Haar y biortogonal 1.3) no son válidas porque no se ajustan bien a la señal, dando lugar a un número demasiado elevado de eventos.
2. En el resto de ellas, tanto los tiempos de computacion como en número de eventos es similar, si bien es cierto que hay diferencias notables entre, por ejemplo, Daubechies 2 y Daubechies 3.

Ahora se probarán ambas wavelet para distintos valores de sobretensión:

Tabla 5.4: Comparativa de distintas wavelet para una sobretensión.

		Sobret. al 150 %	Sobret. al 200 %	Sobret. al 250 %
Daubechies 3	Tiempo de comp.	0,30	0,34	0,26
	N ^o . de eventos	9	13	27
Bior. 4.4	Tiempo de comp.	0,28	0,39	0,27
	N ^o . de eventos	9	15	23

Al igual que para el caso del hueco, las diferencias son mínimas, con una ligera ventaja de la Daubechies 3 sobre la biortonormal 4.4.

5.1.4. Sobretensión con ruido.

En este caso se probará la wavelet Biortogonal 4.4. Los resultados son iguales a los que ha ofrecido la Daubechies 3; sin embargo, para el caso con ruido anterior la Daubechies 3 ya se probó como válida. De aquí que ahora se emplee la otra:

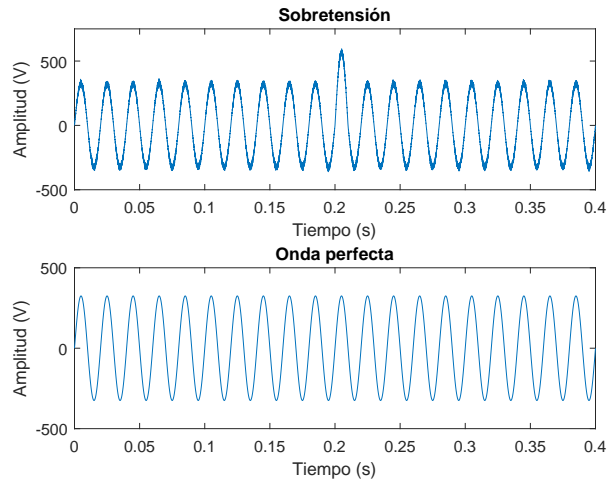


Figura 5.15: Comparación onda con sobretensión y ruido y onda perfecta. Fuente: propia.

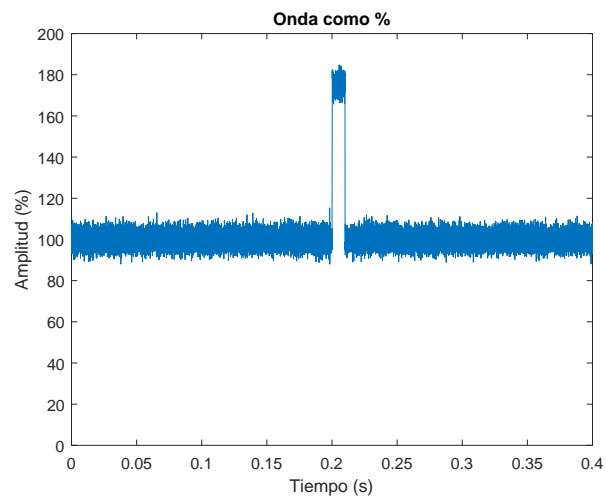


Figura 5.16: Sobretensión con ruido como porcentaje de la tensión. Fuente: propia.

Se descomponen en nueve niveles. Para evitar añadir tantas imágenes o tan pocas y que no se vean bien, tan solo se van a mostrar los últimos niveles de detalle y de aproximación:

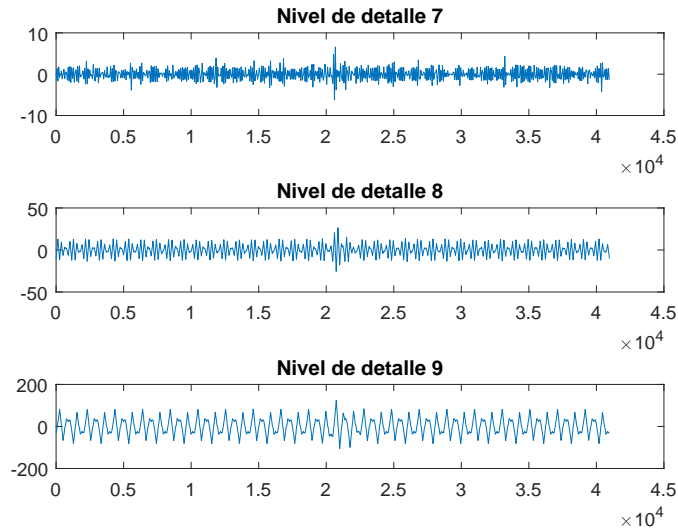


Figura 5.17: Niveles de detalle para una sobretensión con ruido (Biortogonal 4.4). Fuente: propia.

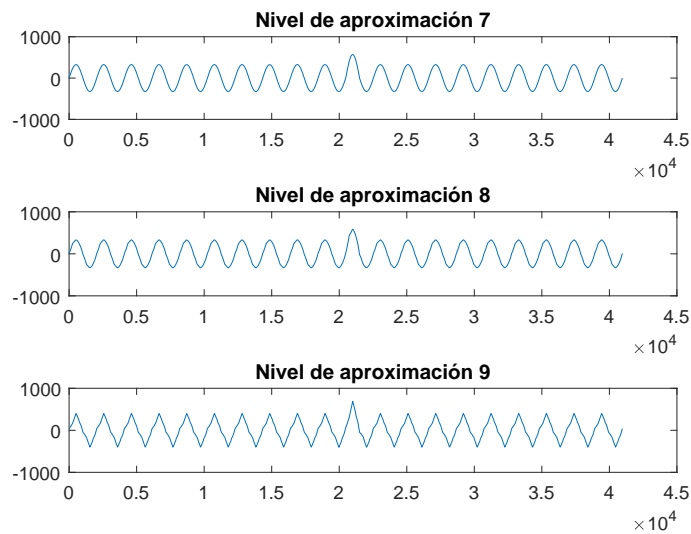


Figura 5.18: Niveles de aproximación para una sobretensión con ruido (Biortogonal 4.4). Fuente: propia.

Como puede verse, en el noveno y último nivel de la descomposición la información que se puede extraer de las imágenes es casi nula. En el séptimo, y mucho más en el octavo, los cambios en la tensión se aprecian claramente, dando lugar a entender que hasta ocho niveles la descomposición sea útil, y que a partir de ahí se empiece a perder información valiosa.

5.1.5. Flicker.

Ahora se probará con un flicker, el cual es de la forma:

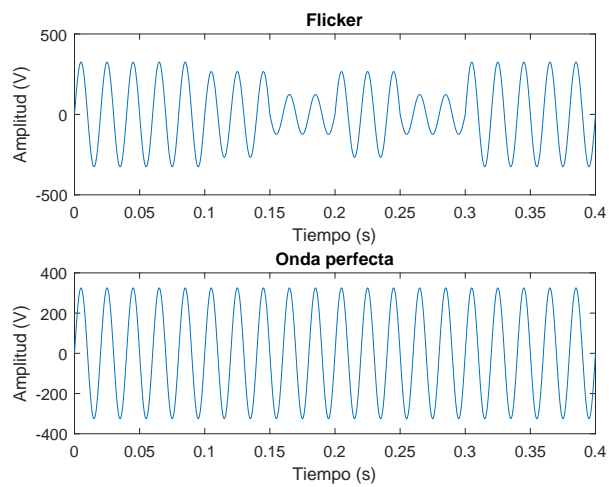


Figura 5.19: Comparación onda con flicker y onda perfecta. Fuente: propia.

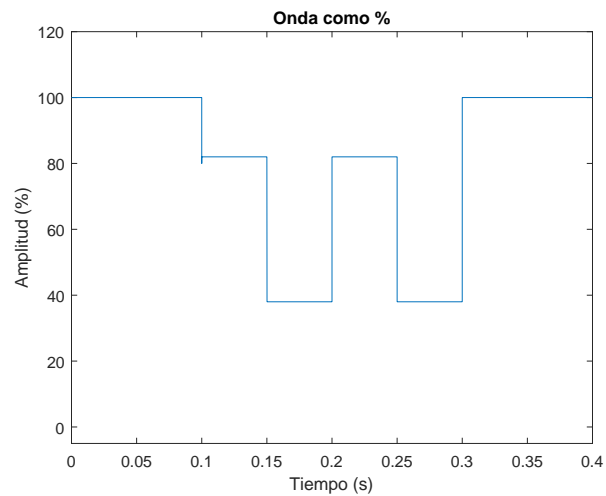


Figura 5.20: Flicker como porcentaje de la tensión. Fuente: propia.

Si se hace una descomposición en tres niveles de detalle y de aproximación con una Daubechies 3 y se obtienen las siguientes gráficas:

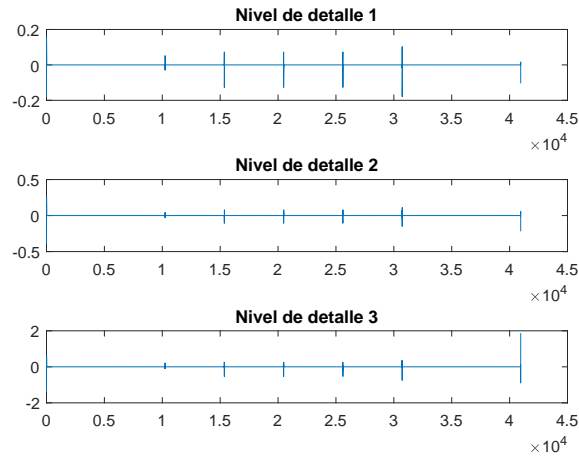


Figura 5.21: Niveles de detalle para un flicker (Daubechies 3). Fuente: propia.

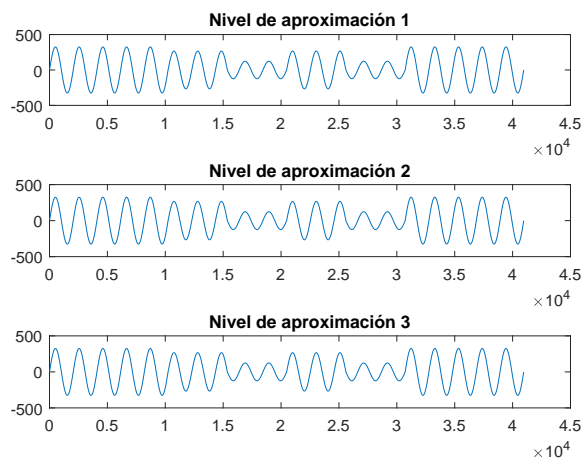


Figura 5.22: Niveles de aproximacion para un flicker (Daubechies 3). Fuente: propia.

Este ejemplo es más útil que los dos anteriores. Al no ser una perturbación encuadrada en un espacio determinado de tiempo, la gráfica de los coeficientes de detalle arroja más información. En ella se ve claramente en qué puntos se produce un cambio en la tensión, y el primer análisis a nivel visual es más que suficiente para tener una idea clara de lo que está sucediendo con la onda.

Ahora se comprobará como funcionan los distintos tipos de wavelet para este caso:

Tabla 5.5: Comparativa de distintas wavelet para un flicker.

Wavelet	Tiempo (s)	n ^o de eventos	Wavelet	Tiempo (s)	n ^o de eventos
Haar	0.65	28641	Biortogonal 1.3	0.70	28559
Daubechies 2	0.24	3	Biortogonal 2.2	0.19	4
Daubechies 3	0.18	9	Biortogonal 3.3	0.20	5
Daubechies 4	0.20	6	Biortogonal 4.4	0.20	10
Daubechies 6	0.19	2	Coiflet 2	0.17	8
Daubechies 12	0.23	5	Coiflet 4	0.19	8

Como era de esperar, los resultados son similares a las pruebas hechas sobre las dos perturbaciones anteriores: las señales cuadráticas no son útiles para analizar señales y en el resto las diferencias son pocas.

En el caso del flicker no se va a hacer una comparativa entra la Daubechies 3 y la biortonormal 4.4 como fue el caso del hueco y de la sobretensión. Se considera que los resultados anteriores son bastante claros para poder determinar y escoger una de ambas.

5.1.6. Flicker con ruido.

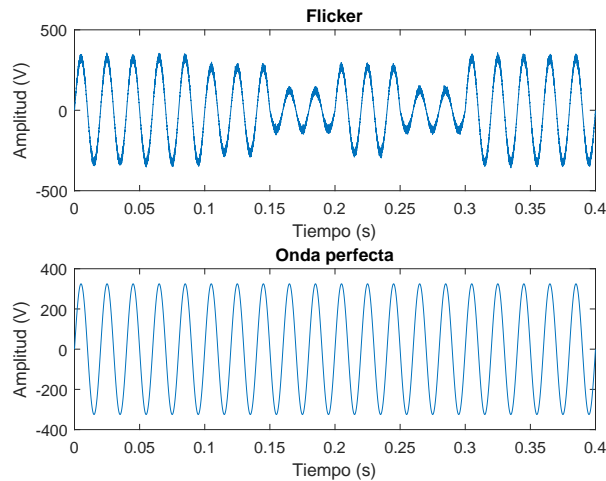


Figura 5.23: Comparación onda con flicker con ruido y onda perfecta. Fuente: propia.

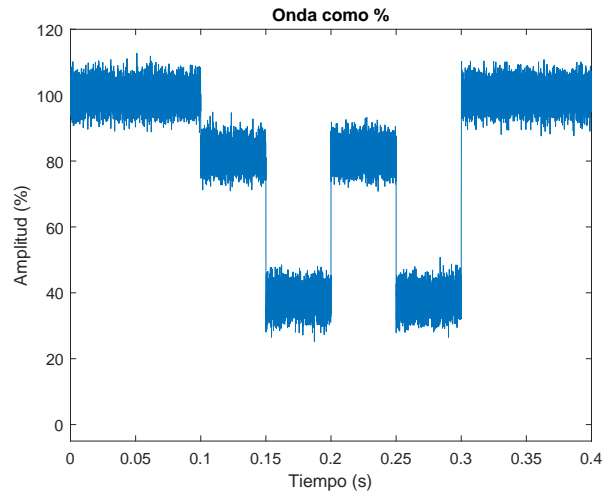


Figura 5.24: Flicker con ruido como porcentaje de la tensión. Fuente: propia.

Si se hace una descomposición en nueve niveles con una Daubechies 3 (mejora el tiempo de computación respecto a la Biorotnormal 4.4 y se obtienen las siguientes gráficas:

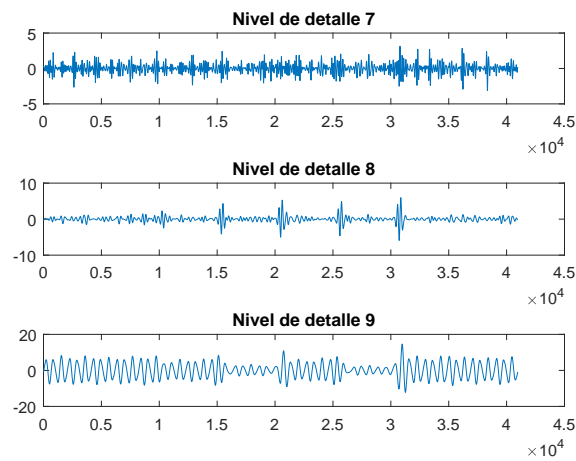


Figura 5.25: Niveles de detalle para un flicker con ruido (Daubechies 3). Fuente: propia.

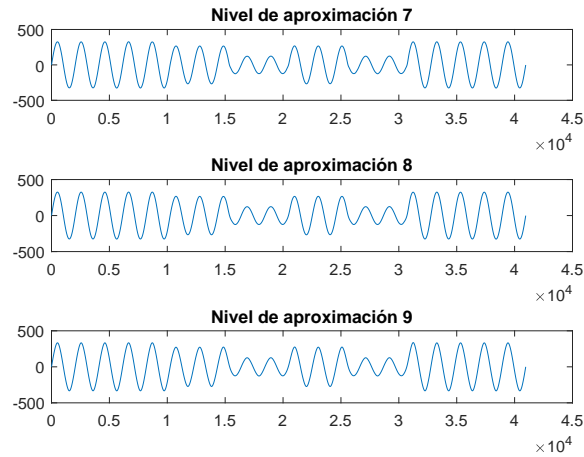


Figura 5.26: Niveles de aproximación para un flicker con ruido (Daubechies 3). Fuente: propia.

Al igual que para el caso de sobretensión con ruido, a partir del nivel ocho la información deja de ser útil.

5.1.7. Conclusiones para las señales analíticas.

A lo largo de los diferentes casos se han ido analizando los resultados. Una vez en este punto, se decide tomar la decisión de realizar un análisis de los casos siguientes casos reales con una transformada wavelet Daubechies 3 en base a:

1. El tiempo de computación que ha necesitado para analizar la señal ha sido de los más bajos.
2. El número de veces que los coeficientes de detalle han pasado por encima del listón ha sido siempre el mayor, lo que da lugar a pensar que este tipo de transformada se ajusta mejor a los distintos tipos de señal.

En cuanto al número de niveles de descomposición:

1. Para un factor de ruido Gaussiano de magnitud 30 (introducido con la función *awgn* en MATLAB), es necesario llegar hasta un total de ocho niveles de descomposición. Si este factor aumenta, se ha probado que con hasta cuatro niveles es suficiente; y que si se disminuye demasiado habría que hacer una análisis wavelet mucho más minucioso.
2. Tanto la wavelet Daubechies 3 como la Biortonormal 4.4 han sido probadas como útiles para analizar señales con ruido.

Por tanto, el análisis de las señales reales se llevará a cabo en ocho niveles de descomposición y con una Daubechies 3.

5.2. Señales reales.

En este último capítulo se estudiará la capacidad que tienen las transformadas wavelet a la hora de analizar casos reales. Para ello se seguirán los mismos pasos que en señales anteriores y se probarán las conclusiones extraídas del capítulo anterior en señales de campo.

Las dos medidas objeto de estudio corresponden a las tomadas en un hospital de Ávila y a las conseguidas en la Escuela de Ingeniería Industrial de Valladolid.

5.2.1. Hospital de Ávila.

Al igual que en los casos anteriores se carga la señal y se grafica. Sin embargo, debido a que son en total casi cinco millones de muestras, se va a representar una mínima parte para tomar idea de la forma de la onda:

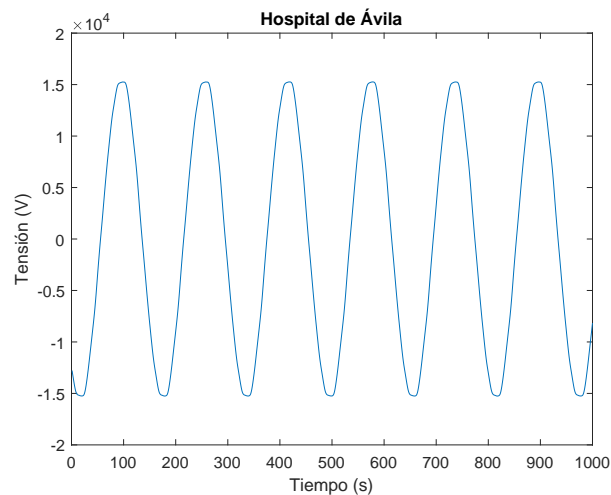


Figura 5.27: Detalle de la tensión. Hospital de Ávila. Fuente: propia.

Para dar un poco más de visión también se incluye un detalle del consumo de corriente:

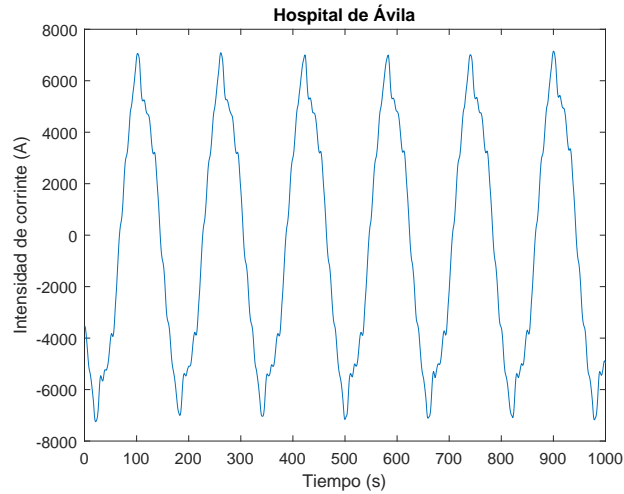


Figura 5.28: Detalle de la intensidad de corriente. Hospital de Ávila. Fuente: propia.

Como se puede ver la onda es bastante uniforme, y no presenta ninguna perturbación por ruido. Al carecer de este fenómeno, la descomposición en ocho niveles no aporta ninguna ventaja, por lo que se vuelve a poner una descomposición en tres niveles con Daubechies 3.

Los niveles de aproximación, como puede verse, no aportan, a nivel general, nada:

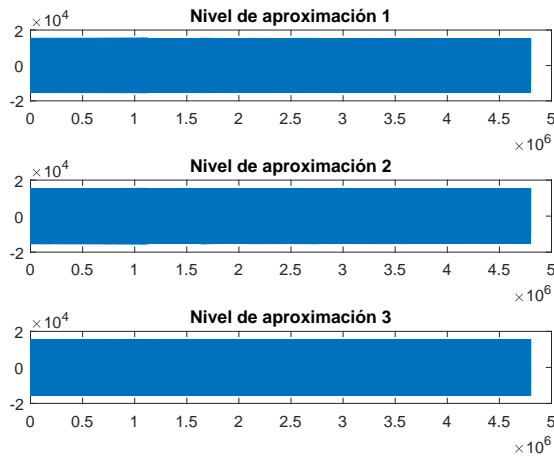


Figura 5.29: Coeficiente de detalle. Hospital de Ávila. Fuente: propia.

Sin embargo, los de detalle, como era de esperar, arrojan una información visual bastante clara y concisa de que se ha producido una perturbación entre la muestra $1,5 \cdot 10^6$ y $2,0 \cdot 10^6$:

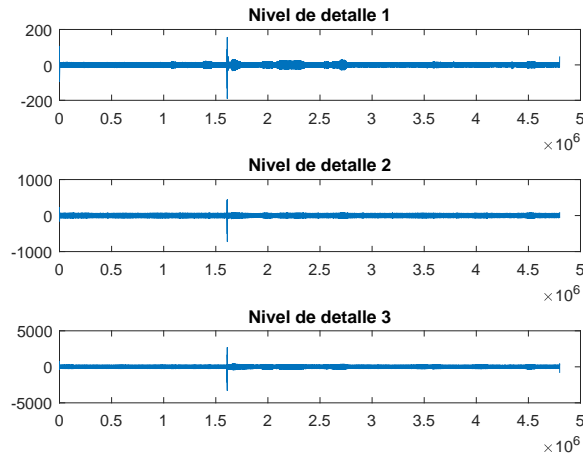


Figura 5.30: Coeficiente de detalle. Hospital de Ávila. Fuente: propia.

Simplemente haciendo zoom con el editor de gráficas del *Matlab* se puede ver el momento en el cual se produce y su magnitud:

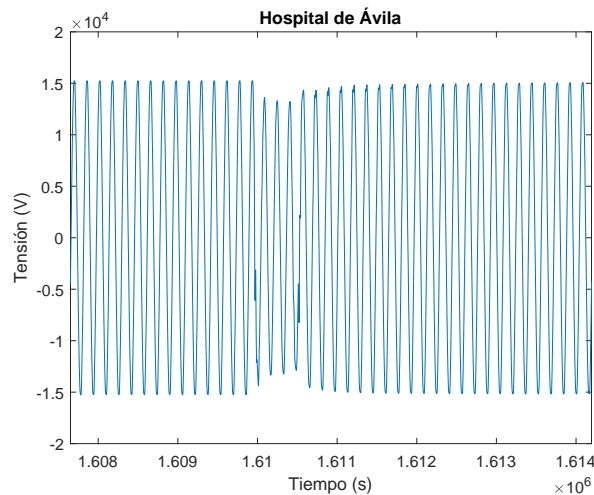


Figura 5.31: Detalle de la perturbacion. Hospital de Ávila. Fuente: propia.

El valor de pico de esta perturbación es de aproximadamente $1,28 \cdot 10^4 V$. Teniendo en cuenta que la tensión máxima a la que se encuentra el equipo receptor en un ciclo normal es de $1,5 \cdot 10^4 V$, la tensión había caído hasta un 85 % de su valor nominal. Esto indica que la perturbación se trata de un hueco de una duración a aproximada de 3 ciclos.

5.2.2. Señales de la Escuela.

Lo primero que se hace es cargar la señal y representar unos cuantos ciclos de la misma (al igual que antes hay cerca de 5 millones de datos):

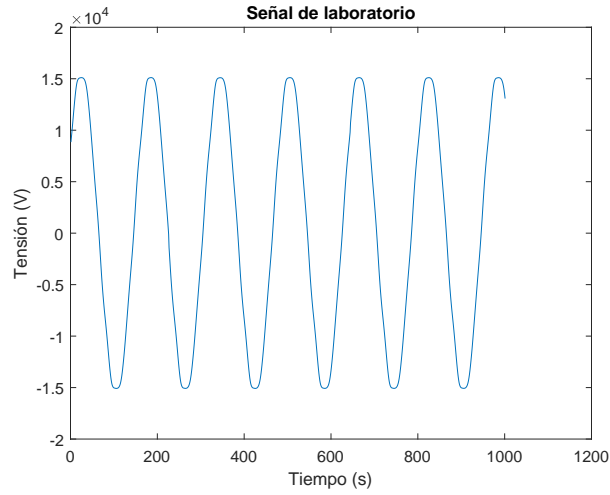


Figura 5.32: Detalle de la tensión. Señal de la Escuela. Fuente: propia.

En la siguiente gráfica se muestra el consumo de corriente durante la misma franja de tiempo:

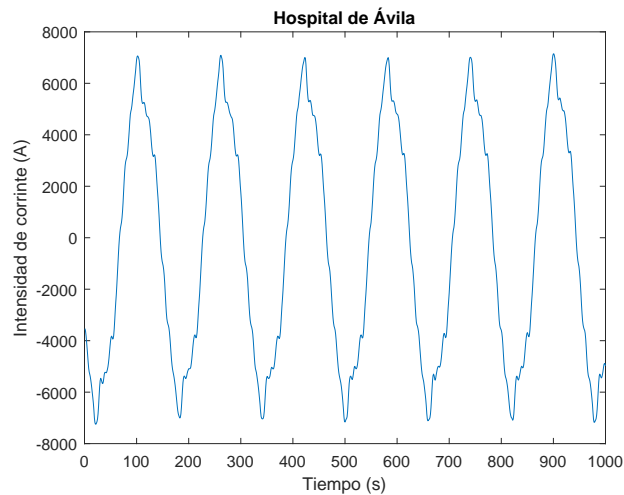


Figura 5.33: Detalle de la intensidad de corriente. Señal de la Escuela. Fuente: propia.

Al igual que para el caso del hospital, no se necesitan 8 niveles de descposición para llevar a cabo el análisis. Esta vez, los niveles de aproximación no se van a mostrar, quedando claro en los de detalle dónde hay un cambio en la tensión:

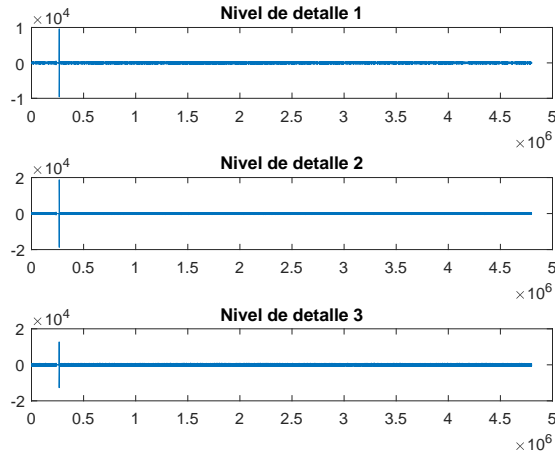


Figura 5.34: Coeficiente de detalle. Señal de la Escuela. Fuente: propia.

Se hace zoom en la gráfica de la tensión entre los tiempos que indican los niveles de detalles y aparece este fenómeno:

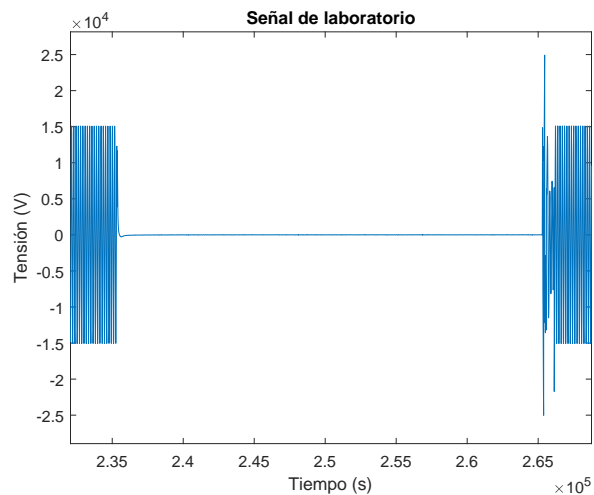


Figura 5.35: Detalle de la perturbacion. Señal de la Escuela. Fuente: propia.

Como se ve en la imagen la tensión ha caído hasta un valor nulo y se ha mantenido durante un largo periodo de tiempo. Lo más seguro es que se produjera un corte en el suministro o interrupción de larga duración. Los valores de pico que se produjeron tras esta estarían relacionados con la puesta en marcha de los equipos conectados, en los cuales pasarían unos cuantos ciclos hasta que se estabilizara la señal.

Capítulo 6

CONCLUSIONES.

Durante todo el desarrollo de este TFM se han podido extraer una serie de conclusiones, no solo en cuanto al uso de las wavelet, sino en otros apartados *a priori* más secundarios.

La primera de ellas es el papel fundamental que juegan las perturbaciones en la tensión de red en algo tan clave como la calidad eléctrica. Ya no solo por la extensa normativa y legislación por la que se ve afectada esta última (lo cual da una idea de su magnitud), sino porque pueden suponer un riesgo para las personas y los equipos conectados a la red. Debido a esto se hace necesaria su detección, análisis y estudio para así poder eliminar o mitigar sus efectos.

Para poder estudiar dichas perturbaciones se pueden emplear diversas herramientas y recursos matemáticos. En este trabajo se ha optado por las transformadas wavelet, lo que ha servido para demostrar que:

1. Son un tipo de función que por sus parámetros y características se adaptan con gran precisión a la onda generada en la red eléctrica. Se ha podido observar en los ejemplos simulados al principio, y en los reales ya al final del trabajo, que son eficaces y precisas para observar fenómenos en la tensión de red.
2. La elección de una wavelet madre u otra y los niveles en los cuales se haga la descomposición determinan de manera significativa el resultado final del estudio. Una mala decisión al principio induciría a una serie de errores y haría que las conclusiones extraídas no se ajustaran en ningún caso a la perturbación que se está dando.

También cabe destacar que un estudio más detallado de la wavelet a emplear y un análisis en tiempo real de la señal, servirían para anticiparse a los eventos y obtener unos resultados más claros. Esto requeriría de más tiempo, más recursos y conocimientos más avanzados en *softwares* como *MATLAB*. Por las características del trabajo y por la situación en la que se ha llevado a cabo, el tiempo del que se ha dispuesto ha sido limitado.

Finalmente, cabe destacar que las señales eléctricas no son el único fenómeno ondulatorio en el que se puedan aplicar estos conocimientos. Señales como las generadas durante los terremotos o estudios médicos como los electrocardiogramas también podrían beneficiarse de esta aplicación.

Apéndice A

SCRIPTS *MATLAB* (GENERALES).

A lo largo de todo el trabajo se han incluido bastantes imágenes, la mayoría de las cuales se han generado mediante códigos implementados en el sistema **MATLAB**. En el siguiente anexo, se van a mostrar los códigos empleados para la generación de dichas imágenes, según el orden de aparición de las mismas.

A.1. Formas de onda genéricas.

A.1.1. Monofásica (Fig. 2.2).

```
1 %%Sinusoide de f=50Hz:
2 % Caracterización de la sinusoide que define la alimentación eléctrica
   III:
3 t = (0:0.0001:0.04); % Tiempo de muestreo
4 f = 50; % Frecuencia
5 a = 325; % Amplitud
6 y = a*sin(2*pi*f*t); % Sinusoide sin desfase
7 figure (1)
8 plot(t,y)
9 xlabel('Tiempo (s)'); ylabel('Amplitud (V)'); title('Señal eléctrica');
```

A.1.2. Trifásica (Fig. 2.3).

```
1 %%Caracterización de la senoide que define la alimentación eléctrica
   trifásica:
2 t = (0:0.0001:0.04); % Tiempo de muestreo
3 f = 50; % Frecuencia
4 a = 325; % Amplitud
5 y1 = a*sin(2*pi*f*t); % Senoide sin desfase
6 y2 = a*sin(2*pi*f*t-2*pi/3); % Senoide con desfase
7 y3 = a*sin(2*pi*f*t+2*pi/3); % Senoide con desfase
8 figure(2)
9 plot(t,y1,t,y2,'--',t,y3,':'); xlabel('Tiempo (s)'); ylabel('Amplitud (V)
   '); title('Señal eléctrica trifásica');
```

A.2. Perturbaciones.

A.2.1. Fluctuaciones (Fig. 3.1).

```
1 syms x
2 y1 = piecewise(x<=pi, 100, pi<x<2*pi, 4*sin(10*x)+100, x>2*pi, 100); %
   Funcion a trozos
3 y1a = 110; % Limite superior de la fluctuacion
4 y1b = 90; % Limite inferior 1 de la fluctuacion
5 y1c = 85; % Limite inferior 2 de la fluctuacion
6 figure(1)
7 fplot(y1)
8 hold on
9 fplot(y1a)
10 hold on
11 fplot(y1b)
12 hold on
13 fplot(y1c)
14 hold off
15 xlabel('Tiempo'); ylabel('Tensión eficaz (\%)'); title('Fluctuaciones de
   la tensión'); axis([0 3*pi 70 120])
```

A.2.2. Flickers (Fig. 3.2).

```
1 syms x
2 y7 = piecewise(x<=pi,100,pi<x<2*pi,4*sin(5*x)+100,2*pi<=x<3*pi,4*sin(20*x
   )+100,3*pi<x<4*pi,4*sin(5*x)+100,x>4*pi, 100);
3 figure (7)
4 fplot(y7); xlabel('Tiempo'); ylabel('Tensión eficaz (%)'); title('
   Parpadeo o flicker '); axis([0 5.5*pi 70 120])
```

A.2.3. Interrupciones (Fig. 3.3 y Fig. 3.4).

```
1 syms x
2 y2 = piecewise(x<=pi, 100, pi<x<2*pi, 0.25*sin(5*x)+0.5, x>2*pi, 100);
3 y3 = piecewise(x<=pi, 100, pi<x<2*pi, 0.25*sin(5*x)+0.5, x>2*pi, 100);
4 y3a=1;\
5 y3b=0;
6 y3c=90;
7 figure (2)
8 fplot(y2);
9 hold on
10 fplot(y3c)
11 hold off
12 title('Interrupción'); xlabel('Tiempo'); ylabel('Tensión eficaz (\%)');
   axis([0 4*pi 0 110])
13 figure (3)
14 fplot(y3);title('Detalle de la interrupción');
15 hold on
16 fplot(y3a)
17 hold on
18 fplot(y3b)
19 hold off
20 xlabel('Tiempo'); ylabel('Tensión eficaz (\%)'); axis([pi/2 5*pi/2 -1
   15])
```

A.2.4. Huecos (Fig. 3.5).

```
1 syms x
2 y4 = piecewise(x<=pi, 100, pi<x<2*pi, 65*sin(x)+100, x>=2*pi, 100);
3 figure (4)
4 fplot(y4);title('Hueco de tensión');xlabel('Tiempo');ylabel('Tensión
    eficaz (\%)');axis([0 4*pi 0 110])
```

A.2.5. Sobretensiones temporales (Fig. 3.6).

```
1 syms x
2 y5 = piecewise(x<=3*pi/2, 100, 3*pi/2<x<5*pi/2, 20*cos(x)+100, x>=5*pi/2,
    100);
3 y5a=110;
4 figure (5)
5 fplot(y5);
6 hold on
7 fplot(y5a)
8 hold off
9 title('Sobretensión temporal');
10 xlabel('Tiempo');
11 ylabel('Tensión eficaz (\%)');
12 axis([0 5*pi 0 150])
```

A.2.6. Sobretensiones transitorias (Fig. 3.7).

```
1 syms x
2 y6 = piecewise(x<=4, 100, 4<x<4.25, 0.8311*(3.3215^x), 4.25<=x<4.5,
    22181.81*0.30107^x, x>=4.5, 100);
3 y6a=110;
4 figure (6)
5 fplot(y6);
6 hold on
7 fplot(y6a)
8 hold off
9 title('Sobretensión transitoria'); xlabel('Tiempo'); ylabel('Tensión
    eficaz (\%)'); axis([0 8 0 160])
```

A.2.7. Armónicos (Fig. 3.8 y Fig. 3.9).

```
1 Fs = 1000;
2 t=0:1/Fs:0.16;
3 a=325;
4 frec=50;
5 s1 = a*sin(2*pi*frec*t) + (a)*sin(2*pi*(frec*2)*t)+ (a)*sin(2*pi*(frec*3)
   *t);
6 L=length(s1);
7 NFFT=2^nextpow2(L);
8 Y=fft(s1,NFFT)/L;
9 f=Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
10 figure (1)
11 plot(t,s1),xlabel('Tiempo (s)'),ylabel('Ampliud (V)'),title('Onda
   trigonométrica')
12 figure (2)
13 plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1))),xlabel('Frecuencia (Hz)'),ylabel('Ampliud (V
  )'),title('Descomposición de Fourier'),axis([0 200 0 500])
```

A.2.8. Diferencias de amplitud y fase (Fig. 3.10 y Fig. 3.11) .

```
1 %%Sinusoide III desequilibrada:
2 t = (0:0.0001:0.04);
3 f = 50;
4 a = 325;
5 y4 = a*sin(2*pi*f*t);
6 desf5=11*pi/18;
7 desf6=25*pi/18;
8 y5 = (a+30)*sin(2*pi*f*t+desf5);
9 y6 = (a-30)*sin(2*pi*f*t+desf6);
10 figure (3)
11 plot(t,y4,t,y5,'--',t,y6,':'),xlabel('Tiempo (s)'),ylabel('Amplitud (V)')
   ,title('Onda eléctrica trifásica desequilibrada')
12 %%En coordenadas polares sería:
13 figure (4)
14 polarplot([0 desf5 desf6;0 desf5 desf6], [0 0 0; a a+70 a-70])
```

A.3. Transformadas wavelet.

A.3.1. Diferentes tipos de wavelet madre (Fig. 4.1).

```
1 %%Daubechies:
2 [phi1,psi1,xval1] = wavefun('db3',10);
3 %%Morlet:
4 [psi2,xval2] = wavefun('morl',10);
5 %%Haar:
6 [phi3,psi3,xval3] = wavefun('haar',10);
7 %%De sombrero mejicano:
8 lb = -5;
9 ub = 5;
10 N = 1000;
11 [psi4,xval4] = mexihat(lb,ub,N);
12 %%Representación gráfica:
```

```

13 figure (1)
14 subplot(2,2,1),plot(xval1,psi1),title('Wavelet de Daubechies 3');
15 subplot(2,2,2),plot(xval2,psi2),title('Wavelet de Morlet');
16 subplot(2,2,3),plot(xval3,psi3),title('Wavelet de Haar');
17 subplot(2,2,4),plot(xval4,psi4),title('Wavelet de Ricker');

```

A.3.2. Diferentes tipos de Daubechies (Fig. 4.2).

```

1 %%Distintas Daubechies y representación gráfica:
2 [phi5,psi5,xval5] = wavefun('db4',10);
3 [phi6,psi6,xval6] = wavefun('db6',10);
4 [phi7,psi7,xval7] = wavefun('db8',10);
5 [phi8,psi8,xval8] = wavefun('db16',10);
6 figure (2)
7 subplot(2,2,1),plot(xval5,psi5),title('Wavelet de Daubechies 4'),axis([0
8 7 -2 2]);
9 subplot(2,2,2),plot(xval6,psi6),title('Wavelet de Daubechies 6'),axis([0
10 10 -2 2]);
11 subplot(2,2,3),plot(xval7,psi7),title('Wavelet de Daubechies 8'),axis([0
12 14 -2 2]);
13 subplot(2,2,4),plot(xval8,psi8),title('Wavelet de Daubechies 16'),axis([5
14 24 -2 2]);

```

A.3.3. Escala (Fig. 4.3).

```
1 N = 1000;
2 t=-4:1/N:4;
3 n=3;
4 figure (1)
5 for k=1:n
6     b=0;
7     a1=k*0.5;
8     X = ((t-b)/a1).^2;
9     F = exp((-X)/2);
10    psi =cos(5*((t-b)/a1)).*F;
11    subplot(n,1,k);plot(t,psi,'r');title(['Morlet con a = ',num2str(a1),'
        y \tau = ', num2str(b),' ms']);
12    xlabel('t (ms)');ylabel('Amplitud')
13 end;
```

A.3.4. Desplazamiento (Fig. 4.4).

```
1 a1=0.2;
2 b1=-2;
3 X1 = ((t-b1)/a1).^2;
4 F1 = exp((-X1)/2);
5 psi1 =cos(5*((t-b1)/a1)).*F1;
6 b2=0;\vskip0.1cm
7 X2 = ((t-b2)/a1).^2;
8 F2 = exp((-X2)/2);
9 psi2 =cos(5*((t-b2)/a1)).*F2;
10 b3=2;
11 X3 = ((t-b3)/a1).^2;
12 F3 = exp((-X3)/2);
13 psi3 =cos(5*((t-b3)/a1)).*F3;
14 figure (2)
15 subplot(3,1,1);plot(t,psi1,'r');xlabel('Tiempo (ms)');title(['Morlet con
        a = ',num2str(a1),' y b = ', num2str(b1),' ms']);
16 subplot(3,1,2);plot(t,psi2,'r');xlabel('Tiempo (ms)');title(['Morlet con
        a = ',num2str(a1),' y b = ', num2str(b2),' ms']);
17 subplot(3,1,3);plot(t,psi3,'r');xlabel('Tiempo (ms)');title(['Morlet con
        a = ',num2str(a1),' y b = ', num2str(b3),' ms']);
```


A.3.5. Factores de escala CWT (Fig. 4.5).

```
1 %%Construcción de los factores de escala para la CWT:
2 figure (3)
3 p=50;
4 frec=50;
5 j1=0:1:p;
6 x1=2.^(j1/10);
7 y1=frec.*(x1.^(-1));
8 j2=0:0.1:p;
9 x2=2.^(j2/10);
10 y2=frec.*(x2.^(-1));
11 subplot(1,2,1),scatter(x1,y1);ylabel('Frecuencia equivalente');xlabel('
    Factor de escala (a)');title('CWT (Incrementos de 1 en 1)')
12 subplot(1,2,2),scatter(x2,y2);ylabel('Frecuencia equivalente');xlabel('
    Factor de escala (a)');title('CWT (Incrementos de 0,1 en 0,1)')
```

A.3.6. Factores de escala DWT (Fig. 4.6).

```
1 %%Haar:
2 figure (3)
3 [phi9,psi9,xval9] = wavefun('haar',10);
4 plot(xval9,psi9),title('Wavelet de Haar');xlabel('Tiempo');ylabel('\psi
    ')
```

A.3.7. Wavelet de Haar (Fig. 4.9).

```
1 %%Construcción de los factores de escala para la DWT:
2 figure (4)
3 p=5;
4 j3=0:1:p;
5 x3=2.^j3;
6 y3=frec.*(x3.^(-1));
7 scatter(x3,y3);ylabel('Frecuencia equivalente');xlabel('Factor de escala
    (a)');title('DWT')
```

A.3.8. Ejemplo con wavelet (Fig. 4.10, Fig. 4.11, Fig. 4.12 y Fig. 4.13).

```
1 %% Descomposición multinivel.
2 %A continuación se lleva a cabo una descomposición multinivel de la
   señal
3 %ya cargada usando la transformada db3:
4 level= 3;
5 wname='db3'
6 [C,L]=wavedec(s,level,wname);
7 %%
8 %Como se ha visto en teoría, la señal original se puede recuperar a
   partir
9 %del último nivel de aproximación y los N niveles de detalle. Sin
   embargo,
10 %para poder comparar los 3 niveles de aproximación se extraen todos
11 %ellos:
12 cA3=appcoef(C,L,wname,3);
13 cA2=appcoef(C,L,wname,2);
14 cA1=appcoef(C,L,wname,1);
15 %%
16 %y los niveles de detalle:
17 cD3=detcoef(C,L,3);
18 cD2=detcoef(C,L,2);
19 cD1=detcoef(C,L,1);
20 %%
21 %Se reconstruye la aproximación 3-nivel
22 A3=wrcoef('a',C,L,wname,3);
23 A2=wrcoef('a',C,L,wname,2);
24 A1=wrcoef('a',C,L,wname,1);
25 %%
26 %y los detalles de los 3 niveles:
27 D3=wrcoef('d',C,L,wname,3);
28 D2=wrcoef('d',C,L,wname,2);
29 D1=wrcoef('d',C,L,wname,1);
30 %%
31 %Se representan gráficamente los resultados de la descomposición de 3
32 %niveles:
33 figure (3)
34 subplot(3,1,1);plot(A3);title('Aprox. N 3');xlabel('Tiempo(s)');ylabel('
   Amplitud (V)')
35 subplot(3,1,2);plot(A2);title('Aprox. N 2');xlabel('Tiempo(s)');ylabel('
   Amplitud (V)')
36 subplot(3,1,3);plot(A1);title('Aprox. N 1');xlabel('Tiempo(s)');ylabel('
   Amplitud (V)')
37 figure (4)
38 subplot(3,1,1);plot(D3);title('Detalle N 3');xlabel('Tiempo(s)');ylabel('
   Frecuencias (Hz)')
39 subplot(3,1,2);plot(D2);title('Detalle N 2');xlabel('Tiempo(s)');ylabel('
   Frecuencias (Hz)')
40 subplot(3,1,3);plot(D1);title('Detalle N 1');xlabel('Tiempo(s)');ylabel('
   Frecuencias (Hz)')
```

Apéndice B

SCRIPTS *MATLAB* (ANÁLISIS).

En este nuevo apéndice se incluirán los códigos de MATLAB empleados en el análisis de señales del capítulo 5.

B.1. Señales analíticas.

B.1.1. Hueco.

```
1 clc;clear;
2
3 %%Disminución temporal con escalón.
4 %% Ver archivo de eventos.m:
5 %%
6 %% Se cargan los parámetros del tiempo y del tipo de señal
7 sc=2048;
8 c_total=20;
9 a=325;
10 f_0=50;
11 t=(0:(sc*f_0)^-1:(sc*c_total-1)/(sc*f_0))';
12 x_a=a*sin(2*pi*f_0*t);
13 %%
14 %% Matriz de disminución de amplitud: factor de amplitud, t inicio y t fin
15 sag=[.8 .1 .3];
16 %%
17 %% Y se generan la señal con la perturbación:
18 delta(:,1)=0;
19 for s=1:size(sag,1)
20     figure (1)
21     delta=delta-sag(s,1)*(heaviside(t-sag(s,2))-heaviside(t-sag(s,3)));
22     subplot (2, 1, 1)
23     plot(t,x_a.*(1+delta));
24     title('Disminución temporal de la tensión'); xlabel('Tiempo (s)');
25     ylabel('Amplitud (V)');ylim([-400 400]);
26 end
27
28 %%
29 %% Se genera una onda perfecta:
30 x_b=a*sin(2*pi*f_0*t);
31 subplot (2, 1, 2)
32 plot(t,x_b); title('Onda perfecta');
33 xlabel('Tiempo (s)'); ylabel('Amplitud (V)');ylim([-400 400]);
```

```

34 %%
35 %Y se expresa la forma de onda perturbada como porcentaje de la onda
36 % perfecta:
37 x_c=(x_a.*(1+delta)./x_b).*100;
38 figure (2)
39 plot(t,x_c);ylim([-5 120]); title('Onda como %');
40 xlabel('Tiempo (s)'); ylabel('Amplitud (%)');
41
42
43 %%
44 % Descomposición a 3 niveles mediante wavelet:
45 tic
46 nivel=3;
47 s_1=x_a.*(1+delta);
48 wname='db3';
49 [C,L]=wavedec(s_1,nivel,wname);
50
51
52 %%
53 % Se hace un bucle para los niveles de detalle; de tal manera que a
54 % medida
55 % que va extrayendo los coeficientes de la descomposición anterior, los
56 % vaya reconstruyendo y graficando los coeficientes los vaya graficando:
57 figure(3)
58 for j=1:nivel
59     det=detcoef(C,L,wname,j);
60     D=wrcoef('d',C,L,wname,j);
61     subplot(nivel,1,j);plot(D),title(['Nivel de detalle ',num2str(j)])
62 end
63
64 %%
65 % Se hace un bucle para que cada vez que el coeficiente de detalle "D"
66 % sea
67 % mayor que un valor, lo almacene en un vector "v_1":
68 v_1=(1);
69 for k=1:length(D);
70     if D(k)>0.6
71         v_1=[v_1,k];
72     end
73     if D(k)<-0.6
74         v_1=[v_1,k];
75     end
76 end
77
78 %%
79 % Se grafican los coeficientes de aproximación:
80 figure(4)
81 comp=(1);
82 for i=1:nivel
83     app=appcoef(C,L,wname,i);
84     A=wrcoef('a',C,L,wname,i);
85     subplot(nivel,1,i);plot(A),title(['Nivel de aproximación ',num2str(i)
86     ])
87 end
88 toc

```

B.1.2. Hueco con ruido.

```
1  clc;clear;
2
3  %%Disminución temporal con escalón y ruido.
4  % Ver archivo de eventos.m:
5  %%
6  % Se cargan los parámetros del tiempo y del tipo de señal
7  sc=2048;
8  c_total=20;
9  a=325;
10 f_0=50;
11 t=(0:(sc*f_0)^-1:(sc*c_total-1)/(sc*f_0))';
12 x_a=a*sin(2*pi*f_0*t);
13 %%
14 % Matriz de disminución de amplitud: factor de amplitud, t inicio y t fin
15 sag=[.8 .1 .3];
16 %%
17 %Y se generan la señal con la perturbación:
18 delta(:,1)=0;
19 for s=1:size(sag,1)
20     figure (1)
21     delta=delta-sag(s,1)*(heaviside(t-sag(s,2))-heaviside(t-sag(s,3)));
22     ruido=awgn(delta,30);
23     subplot (2, 1, 1);plot(t,x_a.*(1+ruido));
24     title('Disminución temporal de la tensión'); xlabel('Tiempo (s)');
25     ylabel('Amplitud (V)');ylim([-400 400]);
26 end
27
28 %%
29 % Se genera una onda perfecta:
30 x_b=a*sin(2*pi*f_0*t);
31 subplot (2, 1, 2)
32 plot(t,x_b); title('Onda perfecta');
33 xlabel('Tiempo (s)'); ylabel('Amplitud (V)');ylim([-400 400]);
34 %%
35 %Y se expresa la forma de onda perturbada como porcentaje de la onda
36 % perfecta:
37 x_c=(x_a.*(1+ruido)./x_b).*100;
38 figure (2)
39 plot(t,x_c);ylim([-5 120]); title('Onda como %');
40 xlabel('Tiempo (s)'); ylabel('Amplitud (%)');
41
42
43 %%
44 % Descomposición a 3 niveles mediante wavelet:
45 tic
46 nivel=8;
47 medionivel=nivel/2+1
48 s_1=x_a.*(1+ruido);
49 wname='db12';
50 [C,L]=wavedec(s_1,nivel,wname);
51
52
53 %%
54 % Se hace un bucle para los niveles de detalle; de tal manera que a
    medida
```

```

55 % que va extrayendo los coeficientes de la descomposición anterior , los
56 % vaya reconstruyendo y graficando los coeficientes los vaya graficando:
57 figure(3)
58 for j=1:nivel
59     det=detcoef(C,L,wname,j);
60     D=wrcoef('d',C,L,wname,j);
61     subplot(nivel/2,2,j);plot(D),title(['Nivel de detalle ',num2str(j)])
62 end
63
64
65 %%
66 % Se hace un bucle para que cada vez que el coeficiente de detalle "D"
    sea
67 % mayor que un valor , lo almacene en un vector "v_1":
68 v_1=(1);
69 for k=1:length(D);
70     if D(k)>0.6
71         v_1=[v_1,k];
72     end
73     if D(k)<-0.6
74         v_1=[v_1,k];
75     end
76 end
77
78 %%
79 % Se grafican los coeficientes de aproximación:
80 figure(4)
81 for i=1:nivel
82     app=appcoef(C,L,wname,i);
83     A=wrcoef('a',C,L,wname,i);
84     subplot(nivel/2,2,i);plot(A),title(['Nivel de aproximación ',num2str(
        i)])
85 end
86
87 toc

```

B.1.3. Sobretenión.

```

clc;clear;
2 %%Sobretensión.
3 % Ver archivo de eventos.m:
4 %%
5 % Se cargan los parámetros del tiempo y del tipo de señal
6 sc=2048;
7 c_total=20;
8 a=325;
9 f_0=50;
10 t=(0:(sc*f_0)^-1:(sc*c_total-1)/(sc*f_0))';
11 x_a=a*sin(2*pi*f_0*t);
12 %%
13 % Matriz de disminución de amplitud: factor de amplitud, t inicio y t fin
    :
14 swell=[0.75 0.2 0.21];
15 %%
16 %Y se generan la señal con la perturbación:
17 delta(:,1)=0;

```

```

18 for s=1:size(swell,1)
19     figure (1)
20     delta=delta+swell(s,1)*(heaviside(t-swell(s,2))-heaviside(t-swell(s
21         ,3)));
22     subplot (2, 1, 1)
23     plot(t,x_a.*(1+delta));
24     title('Sobretensión'); xlabel('Tiempo (s)');
25     ylabel('Amplitud (V)');ylim([-500 750]);
26 end
27 %%
28 % Se genera una onda perfecta:
29 x_b=a*sin(2*pi*f_0*t);
30 subplot (2, 1, 2)
31 plot(t,x_b); title('Onda perfecta');
32 xlabel('Tiempo (s)'); ylabel('Amplitud (V)');ylim([-500 500]);
33 %%
34 % Y se expresa la forma de onda perturbada como porcentaje de la onda
35 % perfecta:
36 x_c=(x_a.*(1+delta)./x_b).*100;
37 figure (2)
38 plot(t,x_c);ylim([-5 120]); title('Onda como %');
39 xlabel('Tiempo (s)'); ylabel('Amplitud (%)');ylim([0 200]);
40
41
42 %%
43 % Descomposición a 3 niveles mediante wavelet:
44 tic % Inicio de la cuenta del tiempo de computación
45 nivel=3;
46 s_1=x_a.*(1+delta);
47 wname='coif4';
48 [C,L]=wavedec(s_1,nivel,wname);
49
50
51 %%
52 % Se hace un bucle para los niveles de detalle; de tal manera que a
53 % medida
54 % que va extrayendo los coeficientes de la descomposición anterior, los
55 % vaya reconstruyendo y graficando los coeficientes los vaya graficando:
56 figure(3)
57 for j=1:nivel
58     det=detcoef(C,L,wname,j);
59     D=wrcoef('d',C,L,wname,j);
60     subplot(nivel,1,j);plot(D),title(['Nivel de detalle ',num2str(j)])
61 end
62 %%
63 % Se hace un bucle para que cada vez que el coeficiente de detalle "D"
64 % sea
65 % mayor que un valor, lo almacene en un vector "v_1":
66 v_1=(1);
67 for k=1:length(D);
68     if D(k)>0.6
69         v_1=[v_1,k];
70     end
71     if D(k)<-0.6
72         v_1=[v_1,k];

```

```

72     end
73 end
74
75 %%
76 % Se grafican los coeficientes de aproximación:
77 figure(4)
78 comp=(1);
79 for i=1:nivel
80     app=appcoef(C,L,wname,i);
81     A=wrcoef('a',C,L,wname,i);
82     subplot(nivel,1,i);plot(A),title(['Nivel de aproximación ',num2str(i)
      ])
83 end
84 toc

```

B.1.4. Sobretensión con ruido.

```

1  clc;clear;
2  %%Sobretensión con ruido.
3  % Ver archivo de eventos.m:
4  %%
5  % Se cargan los parámetros del tiempo y del tipo de señal
6  sc=2048;
7  c_total=20;
8  a=325;
9  f_0=50;
10 t=(0:(sc*f_0)^-1:(sc*c_total-1)/(sc*f_0))';
11 x_a=a*sin(2*pi*f_0*t);
12 %%
13 % Matriz de disminución de amplitud: factor de amplitud, t inicio y t fin
14 :
15 swell=[0.75 0.2 0.21];
16 %%
17 %Y se generan la señal con la perturbación:
18 delta(:,1)=0;
19 for s=1:size(swell,1)
20     figure(1)
21     delta=delta+swell(s,1)*(heaviside(t-swell(s,2))-heaviside(t-swell(s,3)));
22     ruido=awgn(delta,30);
23     subplot(2,1,1)
24     plot(t,x_a.*(1+ruido));
25     title('Sobretensión'); xlabel('Tiempo (s)');
26     ylabel('Amplitud (V)');ylim([-500 750]);
27 end
28 %%
29 % Se genera una onda perfecta:
30 x_b=a*sin(2*pi*f_0*t);
31 subplot(2,1,2)
32 plot(t,x_b); title('Onda perfecta');
33 xlabel('Tiempo (s)'); ylabel('Amplitud (V)');ylim([-500 500]);
34 %%
35 %Y se expresa la forma de onda perturbada como porcentaje de la onda
36 % perfecta:
37 x_c=(x_a.*(1+ruido)./x_b).*100;

```



```

38 figure (2)
39 plot(t,x_c);ylim([-5 120]); title('Onda como %');
40 xlabel('Tiempo (s)'); ylabel('Amplitud (%)');ylim([0 200]);
41
42
43 %%
44 % Descomposición a 3 niveles mediante wavelet:
45 tic
46 nivel=9;
47 s_1=x_a.*(1+ruido);
48 wname='db3';
49 [C,L]=wavedec(s_1,nivel,wname);
50
51
52 %%
53 % Se hace un bucle para los niveles de detalle; de tal manera que a
54 % medida
55 % que va extrayendo los coeficientes de la descomposición anterior, los
56 % vaya reconstruyendo y graficando los coeficientes los vaya graficando:
57 figure(3)
58 for j=1:3
59     det=detcoef(C,L,wname,j);
60     D=wrcoef('d',C,L,wname,j);
61     subplot(3,1,j);plot(D),title(['Nivel de detalle ',num2str(j)])
62 end
63 figure(4)
64 for j=4:6
65     det=detcoef(C,L,wname,j);
66     D=wrcoef('d',C,L,wname,j);
67     subplot(3,1,j-3);plot(D),title(['Nivel de detalle ',num2str(j)])
68 end
69 figure(5)
70 for j=7:9
71     det=detcoef(C,L,wname,j);
72     D=wrcoef('d',C,L,wname,j);
73     subplot(3,1,j-6);plot(D),title(['Nivel de detalle ',num2str(j)])
74 end
75 %%
76 % Se hace un bucle para que cada vez que el coeficiente de detalle "D"
77 % sea
78 % mayor que un valor, lo almacene en un vector "v_1":
79 v_1=(1);
80 for k=1:length(D);
81     if D(k)>0.6
82         v_1=[v_1,k];
83     end
84     if D(k)<-0.6
85         v_1=[v_1,k];
86     end
87 end
88 %%
89 % Se grafican los coeficientes de aproximación:
90 figure(6)
91 comp=(1);
92 for i=1:3

```

```

93     app=appcoef(C,L,wname,i);
94     A=wrcoef('a',C,L,wname,i);
95     subplot(3,1,i);plot(A),title(['Nivel de aproximación ',num2str(i)])
96 end
97
98 figure(7)
99 comp=(1);
100 for i=4:6
101     app=appcoef(C,L,wname,i);
102     A=wrcoef('a',C,L,wname,i);
103     subplot(3,1,i-3);plot(A),title(['Nivel de aproximación ',num2str(i)])
104 end
105
106 figure(8)
107 comp=(1);
108 for i=7:9
109     app=appcoef(C,L,wname,i);
110     A=wrcoef('a',C,L,wname,i);
111     subplot(3,1,i-6);plot(A),title(['Nivel de aproximación ',num2str(i)])
112 end
113 toc

```

B.1.5. Flicker.

```

1  clc;clear
2  %%
3  % Análisis mediante wavelet de un flicker:
4  %%
5  % Se cargan los parámetros del tiempo y del tipo de señal
6  sc=2048;
7  c_total=20;
8  a=325;
9  f_0=50;
10 t=(0:(sc*f_0)^-1:(sc*c_total-1)/(sc*f_0))';
11 x_a=a*sin(2*pi*f_0*t);
12 %%
13 % Parámetros necesarios para la creación del flicker:
14 A_rfl=.22; % Valor de amplitud de flicker (p.u.)
15 A_mrfl=-.4; % Valor de amplitud media de flicker (p.u.)
16 f_rfl=10; % frecuencia de flicker (Hz)
17 alpha_rfl=.1; % Tiempo de inicio de flicker
18 beta_rfl=.3; % Tiempo de fin de flicker
19 theta_rfl=0; % Desfase inicial de flicker
20
21 delta(:,1)=0;
22
23 % Flicker rectangular
24 delta=delta+(A_mrfl+A_rfl*sign(sin(2*pi*f_rfl*(t-alpha_rfl)+theta_rfl)))
    .*(heaviside(t-alpha_rfl)-heaviside(t-beta_rfl));
25 figure(1);
26 subplot(2,1,1)
27 plot(t,x_a.*(1+delta));title('Flicker');xlabel('Tiempo (s)');
28 ylabel('Amplitud (V)');ylim([-500 500]);
29 x_b=a*sin(2*pi*f_0*t);
30
31 subplot(2,1,2)

```

```

32 plot(t,x_b); title('Onda perfecta ');
33 xlabel('Tiempo (s)'); ylabel('Amplitud (V)');ylim([-400 400]);
34
35 %%
36 %Y se expresa la forma de onda perturbada como porcentaje de la onda
37 % perfecta:
38 x_c=(x_a.*(1+delta)./x_b).*100;
39 figure (2)
40 plot(t,x_c);ylim([-5 120]); title('Onda como %');
41 xlabel('Tiempo (s)'); ylabel('Amplitud (%)');
42
43 %%
44 % Descomposición a 3 niveles mediante wavelet:
45 tic
46 nivel=3;
47 s_1=x_a.*(1+delta);
48 wname='db3';
49 [C,L]=wavedec(s_1,nivel,wname);
50
51
52 %%
53 % Se hace un bucle para los niveles de detalle; de tal manera que a
54 % medida
55 % que va extrayendo los coeficientes de la descomposición anterior, los
56 % vaya reconstruyendo y graficando los coeficientes los vaya graficando:
57 figure(3)
58 for j=1:nivel
59     det=detcoef(C,L,wname,j);
60     D=wrcoef('d',C,L,wname,j);
61     subplot(nivel,1,j);plot(D),title(['Nivel de detalle ',num2str(j)])
62 end
63
64 %%
65 % Se hace un bucle para que cada vez que el coeficiente de detalle "D"
66 % sea
67 % mayor que un valor, lo almacene en un vector "v_1":
68 v_1=(1);
69 for k=1:length(D);
70     if D(k)>0.6
71         v_1=[v_1,k];
72     end
73     if D(k)<-0.6
74         v_1=[v_1,k];
75     end
76 end
77
78 %%
79 % Se grafican los coeficientes de aproximación:
80 figure(4)
81 comp=(1);
82 for i=1:nivel
83     app=appcoef(C,L,wname,i);
84     A=wrcoef('a',C,L,wname,i);
85     subplot(nivel,1,i);plot(A),title(['Nivel de aproximación ',num2str(i)
86     ])
87 end
88 toc

```

B.1.6. Flicker con ruido.

```
1  clc;clear
2  %%
3  % Análisis mediante wavelet de un flicker con ruido:
4  %%
5  % Se cargan los parámetros del tiempo y del tipo de señal
6  sc=2048;
7  c_total=20;
8  a=325;
9  f_0=50;
10 t=(0:(sc*f_0)^-1:(sc*c_total-1)/(sc*f_0))';
11 x_a=a*sin(2*pi*f_0*t);
12 %%
13 % Parámetros necesarios para la creación del flicker:
14 A_rfl=.22; % Valor de amplitud de flicker (p.u.)
15 A_mrfl=-.4; % Valor de amplitud media de flicker (p.u.)
16 f_rfl=10; % frecuencia de flicker (Hz)
17 alpha_rfl=.1; % Tiempo de inicio de flicker
18 beta_rfl=.3; % Tiempo de fin de flicker
19 theta_rfl=0; % Desfase inicial de flicker
20
21 delta(:,1)=0;
22
23 % Flicker rectangular
24 delta=delta+(A_mrfl+A_rfl*sign(sin(2*pi*f_rfl*(t-alpha_rfl)+theta_rfl)))
    .* (heaviside(t-alpha_rfl)-heaviside(t-beta_rfl));
25 ruido=awgn(delta,30);
26 figure(1);
27 subplot(2,1,1)
28 plot(t,x_a.*(1+ruido));title('Flicker');xlabel('Tiempo (s)');
29 ylabel('Amplitud (V)');ylim([-500 500]);
30 x_b=a*sin(2*pi*f_0*t);
31
32 subplot(2,1,2)
33 plot(t,x_b);title('Onda perfecta');
34 xlabel('Tiempo (s)');ylabel('Amplitud (V)');ylim([-400 400]);
35
36 %%
37 % Y se expresa la forma de onda perturbada como porcentaje de la onda
38 % perfecta:
39 x_c=(x_a.*(1+ruido)./x_b).*100;
40 figure(2)
41 plot(t,x_c);ylim([-5 120]);title('Onda como %');
42 xlabel('Tiempo (s)');ylabel('Amplitud (%)');
43
44 %%
45 % Descomposición a 3 niveles mediante wavelet:
46 tic
47 nivel=9;
48 s_1=x_a.*(1+ruido);
49 wname='coif4';
50 [C,L]=wavedec(s_1,nivel,wname);
51
52
53 %%
```

```

54 % Se hace un bucle para los niveles de detalle; de tal manera que a
    medida
55 % que va extrayendo los coeficientes de la descomposición anterior, los
56 % vaya reconstruyendo y graficando los coeficientes los vaya graficando:
57 figure(3)
58 for j=1:3
59     det=detcoef(C,L,wname,j);
60     D=wrcoef('d',C,L,wname,j);
61     subplot(3,1,j);plot(D),title(['Nivel de detalle ',num2str(j)])
62 end
63 figure(4)
64 for j=4:6
65     det=detcoef(C,L,wname,j);
66     D=wrcoef('d',C,L,wname,j);
67     subplot(3,1,j-3);plot(D),title(['Nivel de detalle ',num2str(j)])
68 end
69 figure(5)
70 for j=7:9
71     det=detcoef(C,L,wname,j);
72     D=wrcoef('d',C,L,wname,j);
73     subplot(3,1,j-6);plot(D),title(['Nivel de detalle ',num2str(j)])
74 end
75
76 %%
77 % Se hace un bucle para que cada vez que el coeficiente de detalle "D"
    sea
78 % mayor que un valor, lo almacene en un vector "v_1":
79 v_1=(1);
80 for k=1:length(D);
81     if D(k)>0.6
82         v_1=[v_1,k];
83     end
84     if D(k)<-0.6
85         v_1=[v_1,k];
86     end
87 end
88
89 %%
90 % Se grafican los coeficientes de aproximación:
91 figure(6)
92 comp=(1);
93 for i=1:3
94     app=appcoef(C,L,wname,i);
95     A=wrcoef('a',C,L,wname,i);
96     subplot(3,1,i);plot(A),title(['Nivel de aproximación ',num2str(i)])
97 end
98
99 figure(7)
100 comp=(1);
101 for i=4:6
102     app=appcoef(C,L,wname,i);
103     A=wrcoef('a',C,L,wname,i);
104     subplot(3,1,i-3);plot(A),title(['Nivel de aproximación ',num2str(i)])
105 end
106
107 figure(8)
108 comp=(1);

```

```

109 for i=7:9
110     app=appcoef(C,L,wname,i);
111     A=wrcoef('a',C,L,wname,i);
112     subplot(3,1,i-6);plot(A),title(['Nivel de aproximación ',num2str(i)])
113 end
114 toc

```

B.2. Señales reales.

B.2.1. Hospital de Ávila.

```

1   clc;
2   clear;
3   %%Análisis de eventos del hospital de Ávila.
4
5   %Lo primero que se hace es cargar la señal:
6   Y=load('Vb.mat')
7   s=(Y.Data);
8   m=s(1610000:1611000);
9   l_s=length(s)
10  figure(1);
11  plot(s); title('Hospital de Ávila');xlabel('Tiempo (s)');ylabel('
    Tensión (V)')
12  figure(2)
13  plot(m); title('Hospital de Ávila');xlabel('Tiempo (s)');ylabel('
    Tensión (V)')
14
15  %%
16  % Se lleva a cabo la descomposición en n niveles de la misma:
17  nivel=3;
18  wname='db3';
19  [C,L]=wavedec(s,nivel,wname);
20  L;
21  L(1);
22  %%
23  % Se hace un bucle para los niveles de detalle; de tal manera que a
    medida
24  % que va extrayendo los coeficientes de la descomposición anterior, los
25  % vaya reconstruyendo y graficando los coeficientes los vaya graficando
    :
26
27  figure(3)
28  for i=1:nivel
29      app=appcoef(C,L,wname,i);
30      A=wrcoef('a',C,L,wname,i);
31      subplot(nivel,1,i);plot(A),title(['Nivel de aproximación ',num2str(
        i)])
32      for i=1:2:l_s
33          h=C(i);
34          g=C(i+1);
35
36      end
37  end
38
39  %%

```

```

40 %Y se hace lo mismo con los coeficientes de aproximación:
41 figure(4)
42 for j=1:nivel
43     det=detcoef(C,L,wname,j);
44     D=wrcoef('d',C,L,wname,j);
45     subplot(nivel,1,j);plot(D),title(['Nivel de detalle ',num2str(j)])
46 end

```

B.2.2. Señal de la Escuela.

```

1  clc;
2  clear;
3  %%Análisis de eventos en un laboratorio.
4
5  %Lo primero que se hace es cargar la señal:
6  Y=load('Vb.mat')
7  s=(Y.Data);
8  m=s(2300000:2700000);
9  l_s=length(s)
10 figure(1)
11 plot(s); title('Señal de laboratorio');xlabel('Tiempo (s)');ylabel('
    Tensión (V)')
12 figure(2)
13 plot(m); title('Señal de laboratorio');xlabel('Tiempo (s)');ylabel('
    Tensión (V)')
14 %%
15 %Se lleva a cabo la descomposición en n niveles de la misma:
16 nivel=3;
17 wname='haar';
18 [C,L]=wavedec(s,nivel,wname);
19 L;
20 L(1);
21 %%
22 %Se hace un bucle para los niveles de detalle; de tal manera que a
    medida
23 %que va extrayendo los coeficientes de la descomposición anterior, los
24 %vaya reconstruyendo y graficando los coeficientes los vaya graficando
    :
25
26 figure(3)
27 for i=1:nivel
28     app=appcoef(C,L,wname,i);
29     A=wrcoef('a',C,L,wname,i);
30     subplot(nivel,1,i);plot(A),title(['Nivel de aproximación ',num2str(
        i)])
31     for i=1:2:l_s
32         h=C(i);
33         g=C(i+1);
34
35     end
36 end
37
38 %%
39 %Y se hace lo mismo con los coeficientes de aproximación:
40 figure(4)
41 for j=1:nivel

```

```
42     det=detcoef(C,L,wname,j);
43     D=wrcoef('d',C,L,wname,j);
44     subplot(nivel,1,j);plot(D),title(['Nivel de detalle ',num2str(j)])
45 end
```


Bibliografía

- [1] FRAILE MORA, J. *Máquinas Eléctricas*. Año 2015. Madrid, España. Ibergaceta publicaciones, S.L..
- [2] RED ELÉCTRICA DE ESPAÑA (REE). *EL SUMINISTRO DE LA ELECTRICIDAD. UN EQUILIBRIO ENTRE GENERACIÓN Y CONSUMO*. Publicaciones. Consultado a fecha 02/04/2020. Disponible en <https://www.ree.es/es/publicaciones/educacion/el-suministro-de-la-electricidad-un-equilibrio-entre-generacion-y-consumo>.
- [3] AELEC. *Sobre aeléc. Socios*. Publicaciones. Consultado a fecha 06/04/2020. Disponible en <https://aelec.es/sobre-aelec/socios/>.
- [4] MINISTERIO PARA LA TRANSFORMACIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO. *¿Qué es la calidad de servicio?* Consultado a fecha 03/04/2020. Disponible en <https://energia.gob.es/electricidad/CalidadServicio/Paginas/IndexCalidad.aspx>.
- [5] EL ECONOMISTA (12 DE MARZO DE 2020). *Endesa invierte 1,5 millones para mejorar la calidad del suministro eléctrico en Zaragoza*. Disponible en <https://www.economista.es/aragon/noticias/10411926/03/20/Endesa-invierte-15-millones-para-mejorar-la-calidad-del-suministro-electrico-en-Zaragoza-.html>.
- [6] SMARTGRIDSINFO (27 DE MARZO DE 2020). *Refuerzo de la seguridad del suministro eléctrico a través de los cinco centros de control de Endesa*. Disponible en <https://www.smartgridsinfo.es/2020/03/27/refuerzo-seguridad-suministro-electrico-traves-cinco-centros-control-endesa>.
- [7] MELÉNDEZ FRIGOLA, J. HERRAIZ JARAMILLO, S. COLOMER LLINÁS, J.. *Causas y efectos de las perturbaciones. Calidad de onda en el servicio eléctrico*. Instituto de Informática y Aplicaciones. Universidad de Gerona. Automatica e Instrumentación. Marzo 2005 / n.o 360.
- [8] SÁNCHEZ HUERTA, V.. *Perturbaciones en la red eléctrica*. Departamento de Ingeniería, Universidad de Quintana Roo. *Chaos Conciencia* 1: 25-29, 2006.
- [9] VOLTIMUM ESPAÑA (PUBLICADO A 8 DE NOVIEMBRE DE 2017). *WEBINAR COMPLETO: Verificación de calidad eléctrica y aprovechamiento energético*. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=Pv5ximOmE2o>.
- [10] DIEGO GARCÍA, R. I. (OCTUBRE DE 2006). *ANÁLISIS WAVELET APLICADO A LA MEDIDA DE ARMÓNICOS, INTERARMÓNICOS Y SUBARMÓNICOS EN*

REDES DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA. Universidad de Cantabria. Dpto. de Electrónica y Computadores. Santander.

- [11] KUMAR, V., GAWRE, S. K., KUMAR, T. (2014). *Power Quality Analysis Using Wavelet Transform: A Review*. Department of Electrical Engineering, MANIT, Bhopal, India. Volume 3, Special Issue 3 (130-136).
- [12] OLIVEIRA, M. O., REVERSAT, J. H., REYNOSO, L. A. (2019). *Wavelet Transform Analysis to Applications in Electric Power Systems*. En IntechOpen (Ed.) *Wavelet Transform and Complexity*. Disponible en <https://doi.org/10.5772/intechopen.85274>.
- [13] *Overview of JPEG 2000*. Disponible en <https://jpeg.org/jpeg2000/>.
- [14] VAN FLEET, P. J. (2008). *DISCRETE WAVELET TRANSFORM. An Elementary Approach with Applications*. Hoboken, Nueva Jersey, Estados Unidos. John Wiley and Sons, Inc.
- [15] KEHTARNAVAZ, N. (2008). *Digital Signal Processing System Design*. Elsevier Inc (Ed.)
- [16] MATLAB (PUBLICADO A 18 DE AGOSTO DE 2016). *Understanding Wavelets, Part 1: What Are Wavelets*. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=QX1-xGVFqmw>.
- [17] C., LIU. *A Tutorial of the Wavelet Transform*. February 23, 2010.
- [18] MATLAB (PUBLICADO A 18 DE AGOSTO DE 2016). *Understanding Wavelets, Part 2: Types of Wavelet Transforms*. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=F7Lg-nFYooU>.
- [19] FERNÁNDEZ SANZ, M., (SEPTIEMBRE DE 2017). *MODELADO DE ONDAS ELÉCTRICAS MEDIANTE MÉTODO DE SÍNTESIS SIMULTÁNEA DE PERTURBACIONES DE CALIDAD*. Universidad de Valladolid. Dpto. de Ingeniería Eléctrica.

En la lista anterior, se ha incluido casi la totalidad de la bibliografía que se ha utilizado en la elaboración de este TFM. Como viene siendo habitual hoy en día, se han consultado a través de Internet las páginas y artículos dedicadas al estudio de la calidad, las perturbaciones y las transformadas wavelet, por lo que algunas de las fuentes consultadas podrían no aparecer. Sin embargo, y aunque el número de entradas referentes a este tema es muy amplio y el profundizar en ellas ha sido una tarea complicada, el resultado ha merecido la pena.