

**METODOLOGÍA PARA SELECCIÓN DE
CLASIFICADORES DE EVENTOS DE CALIDAD DE
LA ENERGÍA**

ALBA LIZZETH BOHORQUEZ SALAMANCA

**PROGRAMA DE INGENIERIA ELÉCTRICA
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS**



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

PAMPLONA, 10-12 de 2020

METODOLOGÍA PARA SELECCIÓN DE CLASIFICADORES DE EVENTOS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA

ALBA LIZZETH BOHORQUEZ SALAMANCA

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

Director: EDISON ANDRÉS CAICEDO
MSc. Ing. Eléctrico

Co-director: Luis David Pabón Fernández
MSc. Ing. Eléctrico

**PROGRAMA DE INGENIERIA ELÉCTRICA
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

Pamplona, 10 -12-2020

Dedico este trabajo de manera especial a mi madre Floralba Salamanca pues ella fue el principal cimiento para la construcción de mi vida profesional, sentó en mí las bases de responsabilidad y deseos de superación.

A mi hermana que siempre ha estado conmigo y será junto con mi madre el motor de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por guiarme en este arduo proceso de formación profesional, y agradecer a las personas que han sido apoyo durante esta etapa de mi vida.

A cada uno de mis docentes que hicieron parte de mi formación a nivel profesional, en especial a mi director y co-director de tesis, el profesor Edison Caicedo y Luis David Pabón, por su paciencia ante mi inconsistencia, por su dedicación, apoyo y ayuda a lo largo del desarrollo de este proyecto. A mi familia por su confianza, apoyo y motivación durante esta etapa de mi vida. A mis compañeros porque de cada uno aprendí cosas nuevas, mil gracias por todo su apoyo y enseñanzas. Al profesor Jorge Martín Villarreal Cabrera porque siempre creyó en mí y motivo para culminar con la carrera profesional. A mi novio porque siempre me apoyo en los momentos difíciles a lo largo de este proyecto y en especial a mi madre que a lo largo de mi vida me ha apoyado y motivado incondicionalmente creyendo en mí todo momento.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCION	11
2.	PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	13
3.	DELIMITACIÓN	15
3.1.	OBJETIVOS.....	15
3.1.1.	OBJETIVO GENERAL.....	15
3.1.2.	OBJETIVOS ESPECIFICOS	15
4.	MARCO REFERENCIAL.....	16
4.1.	ESTADO DEL ARTE.....	16
5.	MARCO TEÓRICO.....	18
5.1.	CALIDAD DE LA ENERGÍA.....	18
5.2.	IMPORTANCIA DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA.....	18
5.3.	CLASIFICACIÓN DE LOS EVENTOS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA.....	19
5.4.	CARACTERIZACIÓN DE LAS PERTURBACIONES ELÉCTRICAS.....	21
5.4.1.	TRANSITORIOS	21
5.4.1.1.	TRANSITORIOS IMPULSIVOS	22
5.4.1.2.	TRANSITORIO OSCILATORIO	22
5.4.2.	VARIACIONES DE LARGA DURACIÓN	22
5.4.2.1.	SOBRETENSIONES.....	23
5.4.2.2.	CAÍDAS DE TENSIÓN	23
5.4.2.3.	INTERRUPCIONES	24
5.4.3.	VARIACIONES DE CORTA DURACIÓN.....	24
5.4.3.1.	DEPRESIÓN (SAG O DIP)	25
5.4.3.2.	ELEVACIÓN (SWELL)	25
5.4.4.	DESEQUILIBRIOS DE TENSIÓN	26
5.4.5.	DISTORSIÓN DE LA FORMA DE ONDA.	26
5.4.5.1.	OFFSET DE CD	26
5.4.5.2.	ARMÓNICOS	26
5.4.5.3.	INTERARMÓNICOS.....	27
5.4.5.4.	MUESCA (NOTCHING).....	27
5.4.5.5.	RUIDO	27

5.4.6.	FLUCTUACIONES DE TENSION (FLICKER)	28
5.4.7.	VARIACION DE LA FRECUENCIA	28
6.	ESTRATEGIAS METODOLOGICAS PARA LA CLASIFICACION DE EVENTOS DE CALIDAD DE LA ENERGIA	29
6.1.	TRANSFORMADA DE FOURIER (TF)	30
6.1.1.	TRANSFORMADA RAPIDA DE FOURIER (FFT).....	32
6.2.	TRANSFORMADA WAVELET	33
6.2.1.	TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA	36
6.3.	TRANSFORMADA STOCWELL (S)	37
6.3.1.	TRANSFORMADA HILBERT HUANG	39
7.	ESTRATEGIAS AVANZADAS Y SELECCION DE LOS METODOS DE CLASIFICACION DE EVENTOS DE CALIDAD DE LA ENERGIA	42
7.1.	MAQUINA DE SOPORTE VECTORIAL (SVM).....	44
7.2.	REDES NEURONALES ARTIFICIALES (ANN).....	45
7.3.	SISTEMAS DE CLASIFICACION EN SISTEMAS EXPERTOS FUZZY (FUZZY LOGIC (FL)).....	46
7.4.	ALGORITMOS GENETICOS (GA)	46
8.	DISEÑO DE ALGORITMO PARA LA SELECCION DEL MÉTODO DE CLASIFICACION.....	49
9.	VERIFICACION FUNCIONAMIENTO DE LA METODOLOGIA	55
10.	CONCLUSIONES	65
11.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	67
12.	ANEXO	70
12.1.	INTERFAZ GRAFICA	70

LISTA DE TABLAS

TABLA 5. 1 CATEGORÍAS Y CARACTERÍSTICAS DE FENÓMENOS ELECTROMAGNÉTICOS (IEEE 1159-1995).[7]	20
TABLA 6. 1 DIFERENTES TIPOS DE PERTURBACIONES DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA. FUENTE:[29].....	41
TABLA 7. 1 COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN DE EVENTOS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA. FUENTE: [24]	47
TABLA 7. 2 COMPARACIÓN DE LOS PRINCIPALES MÉTODOS DE ANÁLISIS DE EVENTOS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA. FUENTE:[24]	48
TABLA 8. 1 COMPARATIVA DE LOS MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN DE EVENTOS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA MÁS EMPLEADA. FUENTE:[24]	49
TABLA 8. 2 MÉTODOS UTILIZADOS PARA CADA EVENTO. FUENTE: [24] [31]	50
TABLA 8. 3 EFICACIA DE LOS MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN DE EVENTOS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA. [24][32].....	51
TABLA 8. 4 FORTALEZAS Y DEBILIDADES DE DIFERENTES TÉCNICAS DE IA. FUENTE:[24]	52

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 5. 1 TRANSITORIOS IMPULSIVOS Y OSCILATORIOS. FUENTE: [14].....	22
FIGURA 5. 2 CONDICIÓN DE SOBRETENSIÓN[14]	23
FIGURA 5. 3 PERTURBACIONES DE CORTA DURACIÓN. FUENTE: [14].....	24
FIGURA 5. 4 DEPRESIÓN DE VOLTAJE FUENTE: [14]	25
FIGURA 5. 5 ELEVACIÓN DE VOLTAJE. FUENTE: [15]	25
FIGURA 6. 1 MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS PARA CLASIFICAR EVENTOS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA.	30
FIGURA 6. 2 SEÑAL ESTACIONARIA. FUENTE:[5]	31
FIGURA 6. 3 TRANSFORMADA DE FOURIER VENTANA. [16]...	32
FIGURA 6. 4 SEÑAL NO ESTACIONARIA. FUENTE: [5]	33
FIGURA 6. 6 WAVELET HAAR. FUENTE: [5].....	35
FIGURA 6. 6 WAVELET MADRE DAUBECHIE 4. FUENTE: [5] ..	35
FIGURA 6. 7 DESCOMPOSICIÓN WAVELET. FUENTE: [17]	36
FIGURA 7. 1 DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA CLASIFICACIÓN DE EVENTOS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA. FUENTE:[13].	42
FIGURA 7. 2 MÉTODOS BASADOS EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL (IA). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	43
FIGURA 7. 3 FRONTERAS DE DECISIÓN. FUENTE: [25]	44
FIGURA 7. 4 ESTRUCTURA RED NEURONAL ARTIFICIAL. FUENTE: [13]	45
FIGURA 8. 1 DIAGRAMA DE SELECCIÓN DE LOS MÉTODOS SEGÚN SUS CARACTERÍSTICAS.	53
FIGURA 8. 2 ALGORITMO GENERAL DE SELECCIÓN DE LOS EVENTOS.....	53

FIGURA 9. 1 SAG GENERADA SEGÚN EL MODELO MATEMÁTICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	56
FIGURA 9. 2 SELECCIÓN DE LOS MÉTODOS PARA UN EVENTO ESPECÍFICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	57
FIGURA 9. 3 CARACTERÍSTICAS DE LA TRANSFORMADA WAVELET PARA SAG.....	58
FIGURA 9. 4 TOOLBOX WAVELET. FUENTE: MATLAB®	59
FIGURA 9. 5 VISUALIZACIÓN DE LA PERTURBACIÓN GENERADA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	59
FIGURA 9. 6 FAMILIA DE WAVELETS DAUBECHIES. FUENTE: [5]	60
FIGURA 9. 7 VISUALIZACIÓN DE LA SEÑAL EN MODO SEPARADO. FUENTE MATLAB®	62
FIGURA 9. 8 COEFICIENTE DE DETALLE 1 (D1).....	63
FIGURA 9. 9 COEFICIENTE DE APROXIMACIÓN 4 (A4).....	63
FIGURA 9. 10 AMPLIACIÓN DE LA SEÑAL Y DE LOS COEFICIENTES DE APROXIMACIÓN. FUENTE: MATLAB®	64

Resumen

El presente proyecto presenta una metodología diseñada en la clasificación de eventos de calidad de la energía. Para ello y debido al amplio campo de estudio, se remitió a la consulta de diferentes fuentes bibliográficas con el fin de determinar las estrategias metodológicas para clasificación de los eventos de calidad de la energía, una vez realizado este paso se continuó con la selección de los métodos de clasificación de los eventos de calidad de la energía, posteriormente se continuo con el diseño de un algoritmo para la selección del método de clasificación, y finalmente se verificó el funcionamiento de la metodología para un evento transitorio particular.

1. INTRODUCCION

El uso de equipos electrónicos de potencia, de conmutación, convertidores de potencia electrónicos y de protección han ido en aumento en las últimas décadas, este aspecto ha alterado las señales de voltaje, corriente y frecuencia originando una desviación del valor normal o perturbación en la calidad de la energía. Al entrar a analizar las desviaciones indeseables se puede determinar que: por un lado, el uso de este tipo de equipos afecta indudablemente la calidad de la energía y por otro lado estos dispositivos han fallado debido a los problemas de calidad de la energía que ocasionaron.

Por tanto, es fundamental disponer de herramientas adecuadas que permitan una eficaz detección, clasificación e identificación de anomalías o perturbaciones en los sistemas eléctricos para minimizar su impacto mediante el diseño de medidas de mitigación.[1][2]

Debido a lo anterior, la identificación del tipo de perturbación es fundamental para definir los efectos que provocan estas distorsiones en los sistemas eléctricos de modo que se puedan formular diversas soluciones adecuadas. La propuesta de este trabajo es diseñar una metodología para clasificar eventos de calidad de energía, considerando las técnicas más utilizadas como la transformada de Wavelet (TW), transformada de Fourier (TF), transformada S (TS) y transformada Hilbert-Huang (THH) que son herramientas matemáticas útiles para el procesamiento de señales. Estos métodos proporcionan diferentes parámetros y, en comparación con otras técnicas, pueden tener una mayor eficiencia arrojando resultados óptimos en la clasificación de las perturbaciones.[2]

2. PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

En los últimos años, se han presentado cambios en la naturaleza de la carga en las redes eléctricas. La introducción de inversores, convertidores de frecuencia, controladores de velocidad de motores eléctricos, iluminación regulable, entre otros conducen a cualquier desviación tanto de corriente o de tensión de la forma de onda ideal por lo que estos eventos de la calidad de la energía deben controlarse y mitigarse. Por tanto la monitorización de los eventos de la calidad de la energía eléctrica es fundamental para brindar soluciones a la industria y al sector eléctrico[3].

La calidad de la energía se ha convertido en un problema considerable tanto para los proveedores como para los consumidores. Anteriormente, los proveedores solo estaban obligados a proporcionar electricidad sin interrupciones. No obstante, los consumidores han comenzado a imponer mayores exigencias a la calidad de la electricidad, lo que se asocia con serios cambios en los sistemas de suministro eléctrico, que afectan significativamente este aspecto. Como se enuncia a continuación, en primer lugar, la mayoría de los dispositivos tienen una relación no lineal entre voltaje y corriente que degradan la calidad de la energía. En segundo lugar, las cargas eléctricas se han vuelto más exigentes en términos de calidad de la energía. Por ejemplo, dispositivos de alta tecnología, variadores de velocidad, equipos de control de procesos y computadoras. [2]

Incluso si los "eventos de calidad de energía" no se mitigan, pueden provocar fallas o mal funcionamiento de varias cargas sensibles en los sistemas eléctricos y pueden ser muy costosas.[4]

La creciente preocupación por entregar energía limpia, libre de distorsiones de voltaje y corriente a los consumidores, ha llevado a una investigación activa en el área de detección y clasificación de perturbaciones en la calidad de la energía eléctrica (EPQ)[5]. Por lo tanto, existe una necesidad creciente de desarrollar técnicas de monitoreo de calidad de la energía que puedan clasificar las fuentes potenciales de perturbaciones (El-Saadany, Abdel-Galil y Salama, 2004; Gaing, 2004; Gargoom, Ertugrul y Soong, 2007)[4]. La elección del método requerido en cada caso es uno de los puntos fundamentales en el proceso de control de la calidad de la energía.[6]

Por lo general, para casi todas las metodologías en temas relacionados con el análisis de calidad de la energía como: detección, clasificación, monitoreo o medición de perturbaciones en la calidad de la energía, permiten desarrollar modelos matemáticos para analizar perturbaciones específicas[7]. Estos modelos pueden abstraerse como representaciones matemáticas de un número limitado de perturbaciones o fenómenos en un solo evento; en ese sentido, se podría decir que los modelos son soluciones parciales para problemas particulares de investigación y se basan en la naturaleza de una perturbación específica.[7] A causa de esto se han realizado investigaciones en métodos para clasificar los diferentes eventos de calidad de la energía. A partir de lo anterior la realización de este proyecto tiene como finalidad diseñar una metodología apropiada para la clasificación de eventos de calidad de la energía teniendo en cuenta los ya existentes, además se determinaran estrategias metodológicas para la clasificación de estos eventos, asimismo permitirá realizar estudios de investigación referentes a la calidad de la energía.

3. DELIMITACIÓN

3.1.OBJETIVOS

3.1.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar una metodología para la selección de clasificadores de eventos de calidad de la energía.

3.1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar las estrategias metodológicas para la clasificación de eventos de calidad de la energía de acuerdo a la aplicación.
- Seleccionar los métodos de clasificación de eventos de calidad de la energía centrados en los requerimientos y funcionalidades.
- Diseñar un algoritmo para la selección del método de clasificación.
- Verificar el funcionamiento de la metodología para un evento transitorio particular.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1. ESTADO DEL ARTE

Los eventos de calidad de la energía se cuantifican matemáticamente mediante índices de calidad de la energía que sirven como parámetro para observar el efecto de las perturbaciones en el sistema eléctrico.[2]

Para la norma IEEE 1159 de 1995 se define como: “El término calidad de la energía eléctrica se refiere a una amplia variedad de eventos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente eléctrica, en un tiempo dado y en una ubicación dada en el sistema de potencia”[8].

A continuación, se contemplan algunas revisiones bibliográficas más relevantes sobre el tema de estudio, que permite recopilar diversos puntos de vista conceptuales y metodológicos con el propósito de garantizar el desarrollo constructivo en este proyecto.

S. Khokhar, A. Asuhaimi Mohd Zin, A.P. Memon, A. Safawi Mokhtar.” A new optimal feature selection algorithm for classification of power quality disturbances using discrete wavelet transform and probabilistic neural network”. Measurement (2016). En este artículo propone una técnica novedosa de clasificación automática de perturbaciones en la calidad de la energía en donde se toman en cuenta conocidas técnicas de procesamiento de señales, como como la Transformada de Fourier (FT), la Transformada Wavelet (WT), la Transformada S y la Transformada de Hilbert-Huang, se aplican generalmente para la detección y extracción de características de las formas de onda de perturbación[9].

Poras Khetarpal, Madan Mohan Tripathi. “A critical and comprehensive review on power quality disturbance detection and classification” En esta investigación se presenta una revisión amplia y exhaustiva sobre la detección de eventos de calidad de la energía y su clasificación, en donde se revisan críticamente más de 140 artículos y se clasifican en cuatro categorías. La primera categoría incluye temas sobre la calidad general de la energía, sus estándares, consideraciones económicas y el modelo de clasificador automático de energía. Asimismo la segunda categoría incluye técnicas de extracción de características como los métodos basados en la transformada de Fourier (FT), los métodos basados en la

transformada S (ST), los métodos basados en la transformada de Hilbert Huang (HHT), métodos basados en la transformada Wavelet (WT) y diversas técnicas de extracción de características[10].

D. De Yong, S. Bhowmik, F. Magnago. “An effective Power Quality classifier using Wavelet Transform and 4 Support Vector Machines”. Este artículo propone un método basado en una combinación de clasificadores binarios optimizado para señales reales de eventos complejos. El clasificador de calidad de la energía propuesta se basa en Transformadas Wavelet (WT) y Máquinas de vectores de soporte (SVM). La investigación presenta primero una descripción general de un sistema de procesamiento de perturbaciones, luego, se presenta una explicación detallada de los conceptos más importantes relacionados con la máquina de vectores de soporte. Posteriormente, se describe la metodología propuesta teniendo en cuenta métodos existentes como la transformada Wavelet y se muestran los resultados más relevantes[11].

C. Antonio Duarte Gualdrón, V. M. Vega García, E, G. Ordóñez Plata. “Detección e identificación de eventos de la calidad de la energía eléctrica utilizando la transformada wavelet discreta y redes neuronales”. En este artículo se estudia la aplicación de la transformada Wavelet discreta (TWD) y redes neuronales en la detección e identificación de eventos de la calidad de la energía eléctrica. Entre las técnicas de procesamiento de señal más utilizadas en la monitorización de la calidad de la energía eléctrica está la transformada de Fourier (TF) la cual se adapta bien para la monitorización de eventos en estado estacionario pero presenta limitaciones en el seguimiento de eventos transitorios como los huecos de tensión y/o los transitorios oscilatorios o de tipo impulso. Debido a esto, en este artículo propone la Transformada Wavelet (TW) como una nueva técnica de procesamiento para la monitorización[3].

5. MARCO TEÓRICO

5.1. CALIDAD DE LA ENERGÍA

Para el desarrollo de este proyecto se presenta la definición más apropiada que se enfoca en los eventos de calidad de la energía. Una señal de tensión ideal se entiende como una forma de onda sinusoidal cuya frecuencia y magnitud son constantes y corresponden con sus valores nominales. De la misma manera, una forma de onda ideal de corriente también se considera como una señal sinusoidal cuyos parámetros de frecuencia y magnitud corresponden con sus valores nominales, son constantes y, adicionalmente, la frecuencia y fase de la corriente deben corresponder con la frecuencia y fase de la señal de tensión. Cualquier desviación tanto de corriente o de tensión de la forma de onda ideal se conoce como evento de calidad de energía [12]. Se hace indispensable aclarar algunos fundamentos teóricos esenciales para comprender a cabalidad el desarrollo de este trabajo y de esta manera causar impacto en investigaciones futuras.

Para realizar la detección de los eventos es necesario clasificarlos según el estándar 1159-1995 e la IEEE, presenta una clasificación en siete grupos de acuerdo a parámetros como la duración de la perturbación, su contenido espectral y su magnitud típica según la forma de onda: transitorios electromagnéticos (tipo impulso y oscilatorio), armónicos, fluctuaciones de tensión (flicker), huecos de tensión (sags, dips), sobretensiones (swells), desbalances de tensión, interrupciones, muescas

5.2. IMPORTANCIA DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA

En la vida moderna, la electricidad es uno de los recursos más importantes. Se usa en varios campos de la actividad humana, y en la mayoría de los casos es imposible reemplazarlo con cualquier otra fuente de energía. [13]La electricidad se produce, se vende y se compra, es decir es un producto y, como cualquier otro producto, se imponen ciertos requisitos a su calidad.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la electricidad es un tipo de producto muy especial. Sus propiedades pueden cambiar con el tiempo [13]. En caso de reclamo, este producto no puede intercambiarse con el vendedor por una mejor

calidad similar, como se puede hacer con la mayoría de los otros productos. Otra característica de la electricidad es que sus propiedades dependen no solo del proveedor, sino también en gran medida del consumidor.

Las compañías eléctricas son las responsables de garantizar un suministro de calidad, aunque a veces esto conlleva ciertos conflictos con los propios intereses de dichas compañías, y además la calidad eléctrica también se puede ver afectada por fenómenos externos como pueden ser tormentas, o roturas de las líneas por accidentes meteorológicos.[2]

El estudio de la calidad de la energía eléctrica, es el primer y más importante paso para identificar y solucionar problemas a cabalidad. Los problemas eléctricos pueden dañar el comportamiento del equipo y reducir su confiabilidad, disminuir la productividad y la rentabilidad e incluso puede poner en peligro la seguridad del personal si permanecen sin corregirse.[13]

5.3. CLASIFICACIÓN DE LOS EVENTOS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA

En la Tabla 5.1 se detalla la clasificación propuesta por el estándar 1159-1995 de la IEEE [8]. Esta normativa trata sobre las prácticas recomendadas para el monitoreo de calidad de energía eléctrica. El estándar presenta una clasificación en siete grandes grupos de acuerdo parámetros como la duración de la perturbación, su contenido espectral y su magnitud típica, según la forma de la onda: transitorios, interrupciones, bajada de tensión, aumento de tensión (sobretensión), distorsión de la forma de onda, fluctuaciones de tensión y variaciones de frecuencia.

Categories	Typical spectral content	Typical duration	Typical voltage magnitude
1. Transients			
1.1 Impulsive			
1.1.1 Nanosecond	5 ns rise	< 50 ns	
1.1.2 Microsecond	1 μ s rise	50 ns – 1 ns	
1.1.3 Milisecond	0.1 ms rise	> 1 ms	
1.2 Oscillatory			
1.2.1 Low frequency	< 5kHz	0.3 – 50 ms	0-4 pu
1.2.2 Medium	5-500 kHz	20 μ s	0-8 pu

frecuency			
1.2.3 High frecuency	0.5 – 5 MHz	5 μ s	0-4 pu
2. Short duration frecuency			
2.1.1 Sag		.5 – 30 ciclos	0.1-0.9 pu
2.1.2 Swell		.5 – 30 ciclos	1.1-1.8 pu
2.2 Momentary			
2.2.1 Interruption		.5 ciclos – 3 s	< 0.1 pu
2.2.2 Sag		30 ciclos – 3 s	0.1-0.9 pu
2.2.3 Swell		30 ciclos – 3 s	1.1-1.4 pu
2.3 Temporary			
2.3.1 Interruption		3 s - 1 min	< 0.1 pu
2.3.2 Sag		3 s - 1 min	0.1-0.9 pu
2.3.3 Swell		3 s - 1 min	1.1-1.2 pu
3. Long duration variations			
3.1 Interruption. Sustained		>1 min	0.0 pu
3.2 Undervoltages		>1 min	0.8-0.9 pu
3.3 Overvoltages		>1 min	1.1-1.2 pu
4. imbalance Voltage		Steady state	0.5-2%
5. Waveform distortion			
5.1 DC offset		Steady state	0-0.1%
5.2 Harmonics	0-100th H	Steady state	0-20%
5.3 Interharmonics	0 - 6 kHz	Steady state	0-2%
5.4 Notching		Steady state	
5.5 Noise		Steady state	0-1%
6. Voltage fluctations	<25 Hz	Intermitent	0.1-7%
7. Power frecuency variations		<10 s	

Tabla 5. 1 Categorías y características de fenómenos electromagnéticos (IEEE 1159-1995). [7]

5.4. CARACTERIZACIÓN DE LAS PERTURBACIONES ELÉCTRICAS

Una vez establecida la clasificación de las perturbaciones eléctricas según el estándar 1159-1995 de la IEEE van a ser caracterizadas particularmente teniendo en cuenta las causas y efectos de cada una de ellas. Las categorías mencionadas en [8] y sus descripciones son importantes ya que permiten clasificar y describir los fenómenos electromagnéticos causantes de los problemas en la calidad de la señal.

5.4.1. TRANSITORIOS

El término transitorio ha sido tradicionalmente usado en el análisis de señales para describir un comportamiento momentáneo y no deseado de la señal. De otra manera se puede decir que es el cambio que se produce en una señal durante la transición de un estado estacionario a otro. Asimismo otra manera de definir los transitorios son eventos subcíclicos, que duran menos de un ciclo de la forma de onda de CA.[14][15]

Entre las principales causas de transitorios, se destaca la conmutación de cargas y de bancos de condensadores, así como la aparición y/o la eliminación de fallos en la red.

Según la duración, amplitud y forma de la perturbación transitoria se clasifican en dos categorías:

- Impulsivos
- Oscilatorios

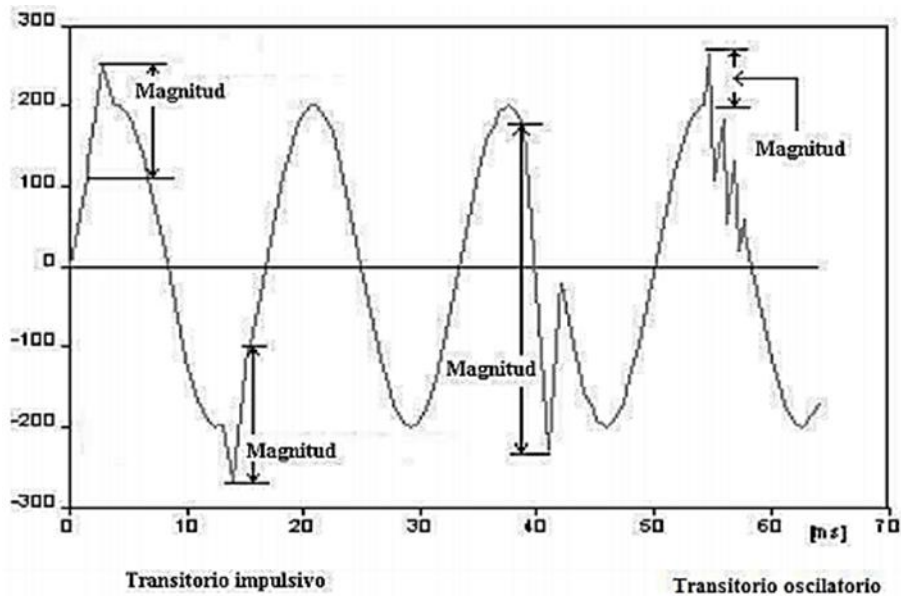


Figura 5. 1 Transitorios impulsivos y oscilatorios. Fuente: [14]

5.4.1.1. TRANSITORIOS IMPULSIVOS

Los transitorios impulsivos se caracterizan normalmente como un disturbio en la tensión de alimentación con duración menor a medio ciclo. La causa más común de los transitorios impulsivos son las descargas atmosféricas, que pueden originarse directamente por la caída de un rayo.[15]

5.4.1.2. TRANSITORIO OSCILATORIO

Es una perturbación, cuyo valor instantáneo cambia de polaridad muy rápidamente. La norma IEEE std 1159 los clasifica atendiendo a su contenido espectral, duración y magnitud. Un transitorio oscilatorio consiste de un voltaje o corriente cuyo valor instantáneo varía de polaridad rápidamente y se describe por su contenido espectral (frecuencia predominante), magnitud y duración.[15]

5.4.2. VARIACIONES DE LARGA DURACIÓN

Las variaciones de larga duración se caracterizan por desviaciones del valor eficaz de duración superior a un minuto. Pueden ser tanto sobretensiones o como caídas de tensión. Y no se originan como consecuencia de fallos en la red, sino que son causadas por variaciones de carga en el sistema y por operaciones de

conmutación. Los parámetros que caracterizan a este tipo de perturbación son, por tanto, la amplitud y la duración.

5.4.2.1. SOBRETENSIONES

Una sobretensión es un aumento en el valor eficaz de la tensión de corriente alterna mayor que el 110%, con una duración superior a un minuto. Son el resultado de conmutaciones de cargas, generalmente desconexiones de grandes cargas o baterías de condensadores. Las sobretensiones se producen con una mayor magnitud cuando el sistema de distribución de energía eléctrica es demasiado débil para la regulación de tensión deseada o cuando los controles de la tensión son inadecuados. Son usualmente el resultado de la desconexión de grandes cargas o debido a la conexión de bancos de capacitores, las cuales también se presentan por operaciones de conmutación (switchéo) en el sistema.[14]

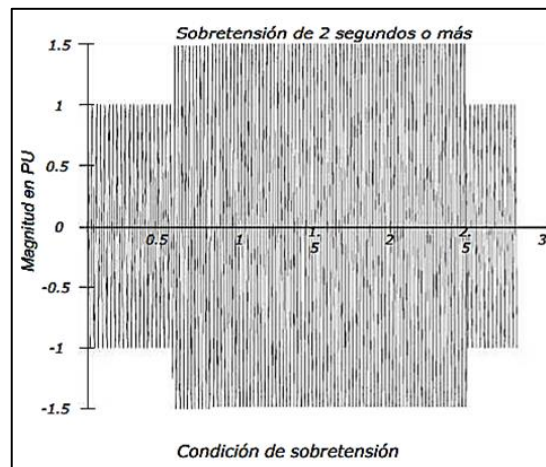


Figura 5. 2 Condición de Sobretensión[16]

5.4.2.2. CAÍDAS DE TENSION

Una caída de tensión es una disminución en el valor eficaz de la tensión en CA inferior al 90% con una duración superior a un minuto. Son el resultado de conmutaciones con eventos opuestos a los que causan sobretensiones.

Los principales efectos que producen son:

- Funcionamiento anormal de equipos electrónicos.

- Pérdida de datos y posible desconexión en computadores.

5.4.2.3. INTERRUPCIONES

La interrupción tiene lugar cuando el voltaje de alimentación o la corriente de carga se reducen a menos de 0.1 pu (10% del voltaje nominal). Cuando la amplitud de la señal es cero durante un periodo de tiempo que excede al minuto la perturbación se considera una interrupción. Son originados como consecuencia de averías en las líneas de alimentación, o en centros de generación y de transformación. Los efectos que producen son parada de equipos e instalaciones.[16]

5.4.3. VARIACIONES DE CORTA DURACIÓN

Las variaciones de tensión de corta duración son causadas por condiciones de fallo en la red eléctrica, conexiones de grandes cargas como motores eléctricos que requieren altas corrientes de arranque, o conexiones sueltas intermitentes en el cableado de alimentación. En este grupo se encuentran las desviaciones del valor eficaz de la tensión con duración inferior a un minuto. Se pueden clasificar como instantánea, momentánea o temporal.

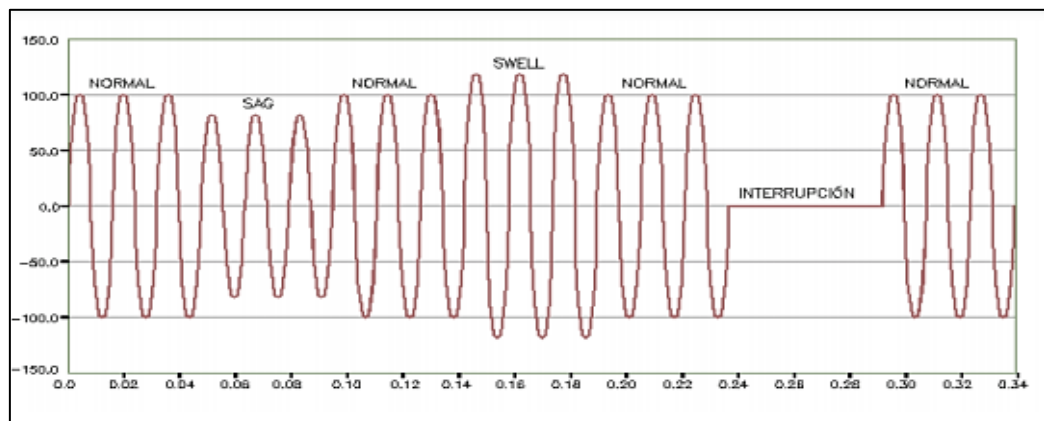


Figura 5. 3 Perturbaciones de corta duración. Fuente: [14]

5.4.3.1. DEPRESIÓN (SAG O DIP)

Un hueco es una disminución en el valor eficaz de la tensión o intensidad comprendido entre el 10% y el 90%, y una duración comprendida entre 0.5 ciclos y 1 min. Los huecos de tensión están normalmente asociados a fallos del sistema, sin embargo también se producen al conectar grandes cargas o en el arranque de grandes motores, para equipos controlados electrónicamente, un voltaje por debajo del 20% del valor normal resultará en salida de operación. [14]

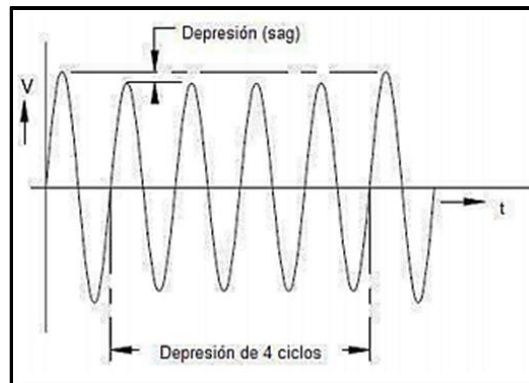


Figura 5. 4 Depresión de voltaje Fuente: [14]

5.4.3.2. ELEVACIÓN (SWELL)

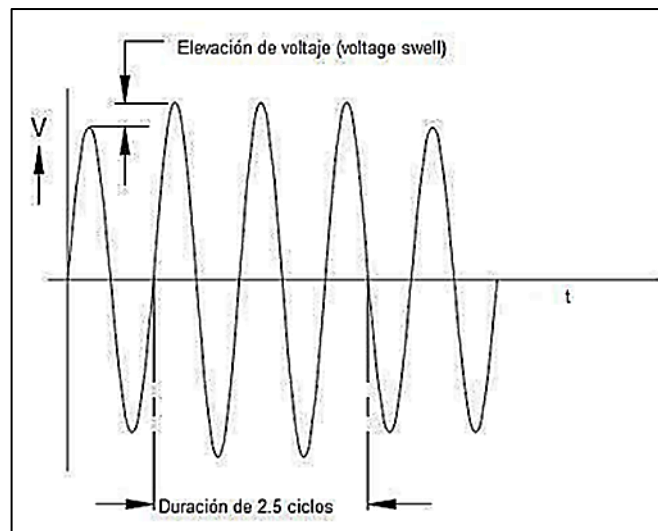


Figura 5. 5 Elevación de voltaje. Fuente: [17]

Se define como un crecimiento del valor eficaz de la tensión o intensidad comprendido entre el 110% y el 180%, y duración que abarca entre 0.5 ciclos y 1 minuto. Al igual que las depresiones son perturbaciones asociadas a condiciones de fallo en el sistema eléctrico, pero no son tan frecuentes como los huecos. [14]

5.4.4. DESEQUILIBRIOS DE TENSIÓN

Se dice que existe desequilibrio de tensión o que el sistema trifásico está desequilibrado o es asimétrico. Generalmente están producidos por la conexión de cargas monofásicas por las que circulan intensidades distintas, produciéndose tensiones asimétricas.[14]

5.4.5. DISTORSIÓN DE LA FORMA DE ONDA.

La distorsión armónica se define como la desviación de la forma de onda de la señal respecto a la forma sinusoidal pura en estado estacionario. Se clasifican, principalmente, en cinco tipos, offset de CD, armónico, interarmónicos, muesca (notching) y ruidos.[17]

5.4.5.1. OFFSET DE CD

Se define un offset de continua, como la presencia de una componente continua en una tensión o intensidad alterna. Entre los efectos que causan su presencia están la degradación y aumento de las pérdidas en transformadores y la degradación de los contactos en interruptores. Su magnitud puede estar comprendida entre 0 y el 10% del valor eficaz.[17]

5.4.5.2. ARMÓNICOS

Los armónicos son señales de tensión o de intensidad cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de operación de la alimentación del sistema (normalmente 50 Hz o 60 Hz). La distorsión armónica se origina como consecuencia de las características no lineales de los distintos dispositivos y cargas presentes en el sistema eléctrico.[16]

Los efectos que causan esta perturbación son conocidos, entre ellos destacan:

- Mayores pérdidas en los transformadores.
- Degradación de los condensadores.
- Vibraciones y aumento de las pérdidas en motores.
- Interferencias con las telecomunicaciones.
- Anormal funcionamiento de equipos electrónicos.
- Disminución de la sección efectiva en conductores.

- Dificultades para corregir el factor de potencia.

5.4.5.3. INTERARMÓNICOS

Se definen como las tensiones o intensidades que contienen componentes de frecuencia que no son múltiplos de la frecuencia fundamental. Los interarmónicos se pueden encontrar en todas las redes de tensión.[14]

Las principales fuentes de distorsión son convertidores estáticos de frecuencia, hornos de arco y de inducción y cicloconvertidores; en general, se producen con la incorporación de convertidores electrónicos como consecuencia de la variación de la frecuencia, su presencia no es constante y dependen de las características de las cargas.

5.4.5.4. MUESCA (NOTCHING)

Disturbio transitorio periódico en la forma de onda del voltaje de alimentación con una duración menor a medio ciclo. Es una perturbación periódica, causada por el normal funcionamiento de los dispositivos electrónicos de potencia cuando se produce una conmutación en los convertidores electrónicos.

Los efectos que producen son errores en los datos de equipos informáticos, funcionamiento anormal de equipos de instrumentación y control, y degradación de componentes y contactos.

5.4.5.5. RUIDO

El ruido es causado por los dispositivos electrónicos de potencia, circuitos de control, cargas con rectificadores de estado sólido, transmisión de señales por la red o puestas a tierra incorrectas. El ruido consiste en una distorsión de la señal que no puede ser clasificada como distorsión armónica o transitoria.[14]

Producen funcionamiento incorrecto en equipos electrónicos tales como microprocesadores, controladores programables y equipos de instrumentación y control.

5.4.6. FLUCTUACIONES DE TENSION (FLICKER)

Son perturbaciones asociadas a la señal de tensión. La magnitud de las fluctuaciones no excede los rangos de tensión comprendidos entre el 90% y el 110%. Estas variaciones de tensión si se repiten a intervalos cortos de tiempo, se producirán fluctuaciones en la iluminación perceptibles para el ojo humano, principalmente de aquella emitida por lámparas incandescentes.[14]

Los hornos de arco eléctrico así como los hornos de arco, son la causa más común de las variaciones de tensión en el sistema de transmisión y distribución. En instalaciones residenciales, el efecto de flicker es producido por el arranque automático de refrigeradores o al energizarse calefactores o estufas eléctricas.[14]

5.4.7. VARIACION DE LA FRECUENCIA

La variación de la frecuencia corresponde a la desviación de la frecuencia fundamental del sistema de su valor nominal especificado (50Hz o 60 Hz). Incremento o decremento en la frecuencia del sistema que puede durar desde varios ciclos hasta varias horas. Las variaciones en la frecuencia pueden ser causadas por fallas en el sistema de transmisión, desconexión de grandes cargas o paro de alguna fuente de generación.[14][16]

Hoy en día, el mundo se ha industrializado más y, por lo tanto, se han incrementado los usos de equipos electrónicos sensibles, dispositivos de conmutación, cargas no lineales, convertidores electrónicos de potencia y dispositivos de protección / relés.

Los principales motivos por los cuales es recomendable clasificar los eventos en diferentes categorías se debe a la necesidad de aplicar las técnicas adecuadas para obtener mediciones, resolver problemas, extraer parámetros característicos o establecer métodos de clasificación que dependen del tipo o clase de evento en cuestión. Existen diversos criterios para la clasificación de eventos de calidad de energía de acuerdo a la variación o los parámetros que difieren de la forma de onda ideal.[12]

En los últimos años con el empleo de técnicas matemáticas es posible determinar con gran precisión cuando una onda eléctrica de tensión o de corriente presenta alguna distorsión que pueda afectar al funcionamiento de los equipos eléctricos. Un ejemplo de ello es la introducción de la transformada Wavelet, lo cual permite determinar los instantes temporales donde se producen las perturbaciones. [2][18]

6. ESTRATEGIAS METODOLOGICAS PARA LA CLASIFICACIÓN DE EVENTOS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA

En el suministro de energía eléctrica, una mala calidad de energía está normalmente causada por perturbaciones en el sistema tales eventos como: transitorios, sobretensiones, sags, cambios de frecuencia, interrupciones, flicker entre otros. Es la consecuencia inmediata de la conducta no lineal de algunos dispositivos. El análisis de estos sistemas se ha hecho muy puntualmente, dando soluciones particulares a planteamientos específicos. El análisis de Fourier ha sido durante muchos años y sigue siendo en la actualidad, una técnica muy importante para el análisis de señales distorsionadas en el dominio frecuencial.

La extracción de características de los eventos de calidad de la energía también se conoce como detección de perturbaciones. Las características extraídas se utilizan para clasificar los eventos de calidad de la energía. Las características pueden extraerse directamente de la medición original, ya sea de algún dominio transformado o de los parámetros de los modelos de señales. A partir de esto los métodos implementados y los desarrollos recientes con respecto a las técnicas de extracción de características se analizan a continuación en base a los métodos de resolución. [19]

La Transformada de Fourier (FT) y la Transformada Rápida de Fourier (FFT) han sido herramientas muy útiles para el procesamiento de señales eléctricas, pero presenta ciertas desventajas en lo referente a señales variantes en el tiempo; sin embargo se han planteado mejoras que ayudan a resolver el problema anterior, como es el caso de la Transformada de Fourier de Tiempo Corto (STFT), que vuelve a plantear inconvenientes cuando se pretende tener a la vez precisión en tiempo y en la frecuencia. Posteriormente surge la Transformada Wavelet (WT), que se presenta como una potente herramienta matemática capaz de representar señales no estacionarias en el dominio tiempo-frecuencia. [19]

Debido a esto, dentro de estas técnicas conocidas para la clasificación de eventos de calidad de la energía una de ellas es la Transformada Wavelet (TW) como una nueva técnica de procesamiento para la monitorización dado que ofrece la posibilidad de realizar un análisis multiresolución tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia.

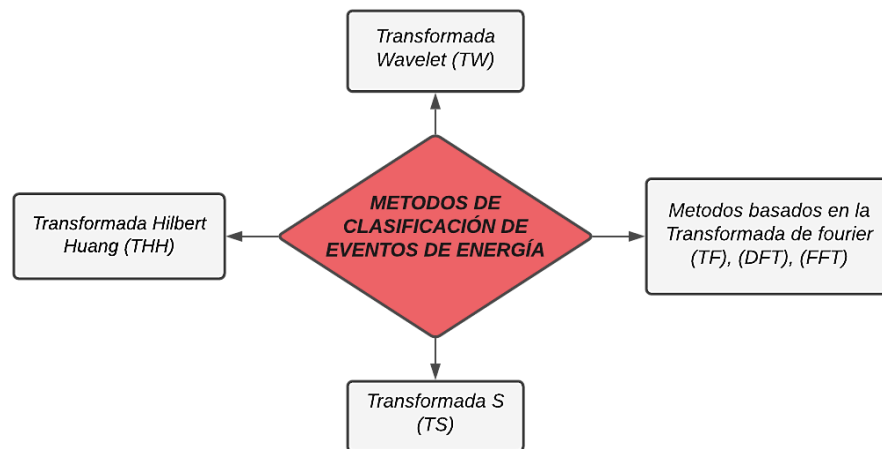


Figura 6. 1 Métodos de extracción de características para clasificar eventos de calidad de la energía. Fuente: Elaboración propia

Este capítulo presenta brevemente los métodos de extracción de características más comunes basados en las técnicas de procesamiento de señales. Estos métodos son necesarios para clasificar los eventos de calidad de energía, partiendo con la descripción de la transformada de Fourier, ya que representa un alto grado de utilización en cuanto a señales estacionarias.

6.1. TRANSFORMADA DE FOURIER (TF)

Como primera medida se presenta un análisis de la Transformada de Fourier, que aun siendo la transformada que más se emplea en el procesamiento de señales para determinados casos no es la técnica más adecuada. Aunque la TF es una de las más empleadas, especialmente en ingeniería eléctrica, no es la única, hay muchas otras transformadas que se emplean para la clasificación de eventos de calidad de la energía.

La TF entrega la información en frecuencia de la señal, pero no indica el instante de tiempo en el que aparece; esta información no es necesaria cuando la señal es

estacionaria; sin embargo es de crucial importancia para señales no estacionarias.[19]

El concepto de señal estacionaria es muy importante en el análisis de señales, las señales cuyo contenido de frecuencia no cambia en el tiempo se denominan señales estacionarias, (ver figura 6.1.), debido a esto no se necesita saber en qué instante de tiempo existen esas componentes de frecuencias, ya que todas las componentes de frecuencia están presentes en todo instante de tiempo.

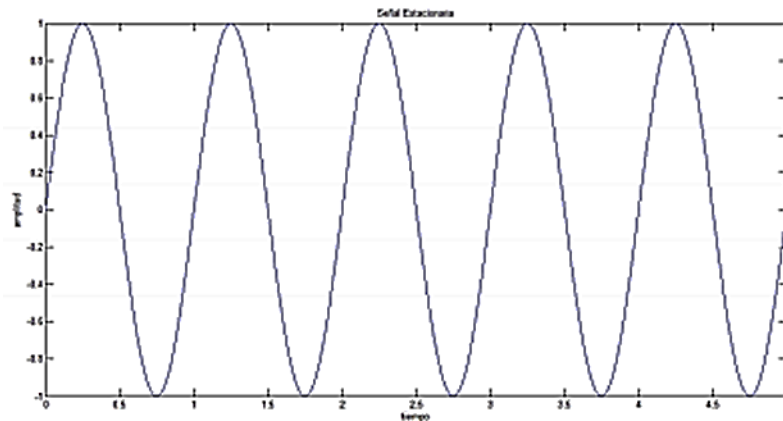


Figura 6. 2 Señal estacionaria. Fuente:[6]

La transformada de Fourier expresa una función periódica como una suma de exponenciales complejas periódicas tal como se muestra en la siguientes ecuaciones (1) y (2).

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) * e^{-2\pi*ft} dt \quad (1)$$

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) * e^{2\pi*ft} df \quad (2)$$

Donde:

$X(f)$: Transformada de Fourier de la señal en el dominio del tiempo $x(t)$.

La ecuación (1) se observa que la señal es multiplicada por un término sinusoidal de frecuencia f .

Es importante destacar que la información proporcionada por la integral corresponde a todos los instantes del tiempo ya que el intervalo de integración va desde $-\infty$ a $+\infty$, esto significa que no importa el instante del tiempo en el que

aparece la componente de frecuencia “f” porque no afectará el resultado de la integración. Por lo tanto la TF solamente es capaz de entregar información de la existencia o no de ciertas componentes de frecuencia.

6.1.1. TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT)

Esta transformada resuelve el problema del análisis de señales no estacionarias mediante la transformada de Fourier, básicamente consiste en dividir la señal en diferentes partes donde se puede asumir que la señal es estacionaria. La señal es multiplicada por una función ventana, cuya anchura debe ser igual a parte de la señal que se puede considerar como estacionaria. [24]

La FT expresa una señal $f(t)$, de período T , como suma de sus armónicos. Gracias a ella se puede representar una señal que originalmente se encuentra en el dominio de tiempo $f(t)$ a otra en el dominio de la frecuencia $F(m)$, o del dominio de la frecuencia $F(m)$ al dominio del tiempo $f(t)$. [18]

La idea básica consiste en multiplicar la señal de entrada $f(t)$ por una función ventana dada $W(t)$, cuya posición varía en el tiempo, dividiendo la señal en pequeños fragmentos de tiempo. De este modo, cada espectro de frecuencia muestra el contenido de frecuencia durante un corto intervalo de tiempo.



Figura 6. 3 Transformada de Fourier Ventana. Fuente: [13]

La posición del tiempo - frecuencia solo se puede obtener con una precisión limitada, que viene dada por el ancho de la ventana de tiempo utilizada. Por otro lado, a medida que disminuye el ancho de la ventana, la resolución en el dominio del tiempo aumenta, mientras que la resolución en el dominio de la frecuencia disminuye, por otro lado, si la ventana es muy amplia, se obtendrá una buena resolución de frecuencia. Y la resolución del tiempo es muy pobre.

La Transformada Rápida de Fourier (FFT) ha sido una herramienta muy útil para el procesamiento de señales eléctricas, pero presenta ciertas desventajas en

lo referente a señales variantes en el tiempo, sin embargo se han planteado técnicas que ayudan a resolver el problema anterior además la Transformada Wavelet (WT), se presenta como una potente herramienta matemática capaz de representar señales no estacionarias en el dominio conjunto tiempo-frecuencia como se puede evidenciar en la figura 6.3.

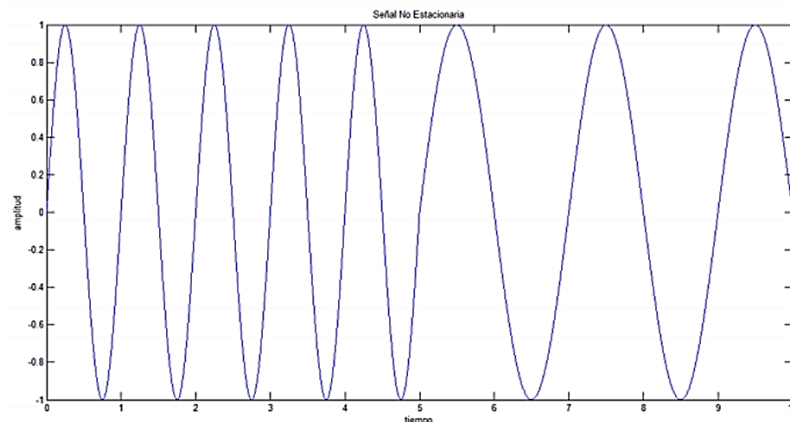


Figura 6. 4 Señal no estacionaria. Fuente: [6]

6.2. TRANSFORMADA WAVELET

Esta técnica se desarrolló como una alternativa para superar los problemas de resolución de la FT, haciendo posible una buena representación de una señal tanto en tiempo como en frecuencia de forma simultánea, con lo que se puede determinar el intervalo de tiempo en el cual aparecen determinadas componentes espectrales.

La transformada wavelet se utiliza como herramienta de extracción de características para identificar alteraciones en la calidad de la energía.[20] La WT, por el contrario, en lugar de utilizar exponenciales complejas de duración y energía infinita, emplea un grupo de funciones base conocida como wavelets.[6] Además permite no sólo determinar los instantes temporales donde se producen las perturbaciones sino que también proporciona una matriz de coeficientes complejos que a su vez son la base para poder hallar valores característicos como puede ser potencia activa, reactiva o aparente[21].

Los coeficientes de transformada wavelet poseen características clave de potencia señales de perturbación de calidad en varias bandas de frecuencia. Se pueden calcular varios parámetros estadísticos de las señales de perturbación de calidad de la energía, como amplitud, desviación estándar, a partir del

coeficiente aproximado y detallado de WT, se puede utilizar más para reconocer los eventos de calidad de la energía.[19] Por lo tanto, este método se ha utilizado ampliamente la WT para caracterizar y clasificar las alteraciones de la calidad de la energía. En las últimas dos décadas, varios investigadores utilizaron generalmente tres variantes de WT, como WT continuo (CWT), WT discreto (DWT) y transformada de paquetes de ondas (WPT) para el reconocimiento de perturbaciones de calidad de la energía[19].

La fórmula básica de la transformada Wavelet es

$$W(s, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{|S|}} \Psi * \left(\frac{t - \tau}{S} \right) dt \quad (3)$$

Puede verse en la ecuación anterior que la señal transformada es función de dos variables τ y s , que son los parámetros de traslación y escalado, respectivamente. $\Psi_{s, \tau}(t)$ es una función de transformación llamada "Wavelet madre"[19].

Donde $\Psi(t)$ es la función de transformación que se le denomina "Wavelet madre", este nombre se debe a dos importantes análisis wavelet:[22]

- El termino wavelet hace referencia a una onda pequeña, el cual representa el hecho que esta función (ventana) es de longitud finita y la onda se refiere a la función de condiciones oscilatoria.[19]
- La wavelet madre es un prototipo para generar otras funciones ventanas, funciones con diferentes regiones de actuación que se usan en el proceso de transformación proveniente de una función principal.[19]

Según el autor en [1] es de gran importancia ubicar la wavelet madre adecuada para la descomposición de los fenómenos de calidad de la energía, ya que la selección adecuada de la wavelet madre proporciona como resultado una detección precisa de las perturbaciones.

La señal original a descomponer se multiplica por la wavelet madre seleccionada para obtener la versión escalada y traducida de la señal original en diferentes niveles. Existen diferentes tipos de Wavelet madre, de las cuales se destacan las más comunes Haar, Daubechies, Meyer, Morlet, Simlet, y Coiffman. [14] [22][23]., que existen en la biblioteca de ondas. Según los estudios realizados por diferentes autores revelan que para el análisis de perturbaciones de la calidad

de la energía, la wavelet de Daubechies proporciona unos buenos resultados frente a las perturbaciones típicas de la red.[21] Nuevamente, la wavelet de Daubechies tiene varios órdenes, como Db2, Db3, Db4, Db5 Db6, Db7 Db8 y Db10 entre otros[1]. Las ondas de Daubechies con coeficientes de filtro de 4, 6, 8 y 10 funcionan bien en la mayoría de los casos de perturbación. Según el problema de detección, las perturbaciones se pueden clasificar en dos tipos, transitorios rápidos y lentos.

La selección adecuada de la Wavelet madre da como resultado una mejor estimación de la señal original y también afecta el espectro de frecuencia de la señal de falla. Una de las Wavelet más simples de la familia de Wavelets es la Wavelet de Haar. La wavelet de Daubechies es una de las wavelets más progresivas que han demostrado varios investigadores[24].

La propiedad de frecuencia de las ondas de Daubechies es mejor que las de Haar. Además, la descomposición de una señal en bandas de baja y alta frecuencia no es eficiente en la onda de Haar. Las ondas de Daubechies permiten al usuario establecer la cantidad de fluctuaciones aceptables en la banda de alta frecuencia.[24]

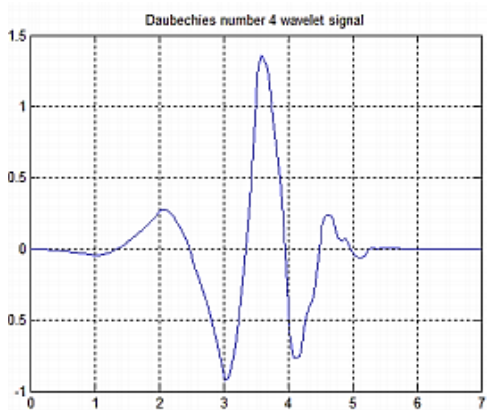


Figura 6. 6 Wavelet madre Daubechies 4. Fuente: [6]

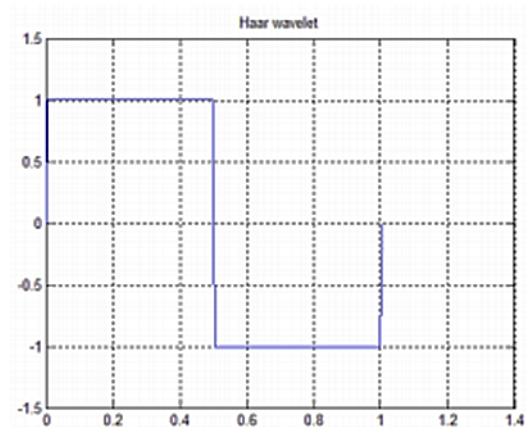


Figura 6. 6 Wavelet Haar. Fuente: [6]

La wavelet madre más comúnmente empleada para la detección de eventos de calidad de energía es la Daubechies número 4 que se muestra en la Figura 6.6, y Daubechies número 8. [6]

La transformada wavelet proporciona una representación local (tanto en tiempo como en frecuencia) de una señal dada; por lo tanto, es adecuado para analizar una señal donde se

necesita una resolución de tiempo-frecuencia, como eventos de transitorios de perturbación en la calidad de la energía.[10] Uno de los inconvenientes y desventajas que presenta la transformada wavelet es la complejidad de cómputo que añade al problema, así como la intolerancia a ruido en la señal y la dificultad en poder clasificar automáticamente los eventos detectados[21].

6.2.1. TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA

La Transformada Wavelet Discreta (TWD) descompone una señal en una disposición de funciones de base de wavelet comúnmente ortogonales, las capacidades de wavelets son formas expandidas, descifradas y escaladas de una función típica φ , conocida como wavelet madre. [14]

La principal ventaja de las wavelets es que tienen un tamaño de ventana variable, que es ancho para frecuencias lentas y estrecho para frecuencias rápidas, lo que da como resultado la mejor resolución de tiempo-frecuencia en todos los rangos de frecuencia. [14]. En el caso de transformada Wavelet discreta la señal se descompone simultáneamente usando un filtro pasa alto g y filtro pasa bajo h . Las salidas que se obtienen al pasar por los filtros son los coeficientes de detalle del filtro pasa alto y los coeficientes de aproximación del filtro pasa bajo.[5]

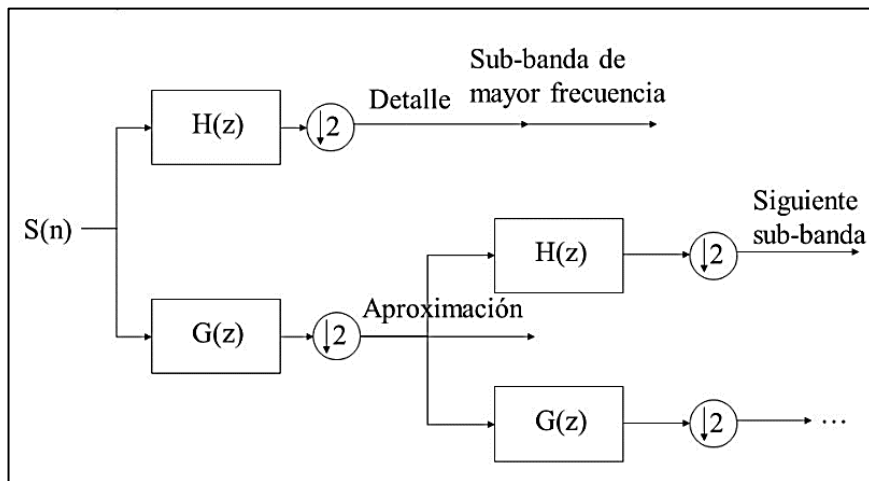


Figura 6. 7 Descomposición Wavelet. Fuente: [19]

La Figura 6.7 muestra un ejemplo de este proceso, donde $S[n]$ es la señal original a descomponer, y $h[z]$ y $g[z]$ son filtros de paso bajo y paso alto, respectivamente.

En cada nivel de descomposición, el ancho de banda de la señal se presenta como la frecuencia[19].

La descomposición de la señal en diferentes bandas de frecuencia se obtiene mediante un sucesivo filtrado de paso bajo y paso alto, por lo tanto la señal original $S[n]$ se pasa a través de un filtro paso alto de media banda $g[z]$ y de un filtro paso bajo $h[z]$; después de este filtrado pueden eliminarse la mitad de las muestras.[14][19]

En la descomposición de la señal se obtienen coeficientes de aproximación (baja frecuencia y coeficientes de detalle (alta frecuencia). En las componentes de baja frecuencia los coeficientes de aproximación son los que otorgan a la señal mayor parte de su información. En cambio las componentes de alta frecuencia o detalles se encargan de incorporar características más particulares. [19]

De acuerdo a lo anterior y a diversas investigaciones las wavelets se han convertido en una herramienta matemática necesaria en muchos estudios. Se utilizan en los casos en que el resultado del análisis de una determinada señal debe contener no solo una simple enumeración de sus frecuencias características (escalas), sino también información sobre determinadas coordenadas locales en las que se manifiestan estas frecuencias. Por lo tanto, el análisis y procesamiento de señales no estacionarias (en el tiempo) o no homogéneas (en el espacio) de diferentes tipos es el campo principal de las aplicaciones de análisis de la transformada Wavelet.

La transformada wavelet es una herramienta bien adecuada para analizar transitorios de alta frecuencia en presencia de componentes de baja frecuencia tales como señales de banda ancha no estacionarias y no periódicas.[25]

6.3. TRANSFORMADA STOCKWELL (S)

La transformada S es una herramienta de tiempo-frecuencia generada por la combinación de la transformada Wavelet (WT) y la transformada de Fourier (FT). En el caso de perturbaciones no estacionarias con datos ruidosos; la transformada S proporciona patrones que se asemejan mucho al tipo de perturbación y, por lo tanto, requiere un procedimiento de clasificación simple[11][26]. La transformada de Stockwell (ST) es una herramienta de descomposición de señales que comprende las propiedades de WT y FT, el cual

ofrece una representación mejorada del tiempo y la frecuencia de una señal además combina exclusivamente una resolución dependiente de la frecuencia que simultáneamente localiza los espectros real e imaginario.[1]

La transformada S proporciona patrones que se parecen mucho al tipo de perturbación y, por lo tanto, requiere un procedimiento de clasificación simple. Además, puede derivarse de la Transformada Wavelet (WT) eligiendo una Wavelet madre específica de modo que la transformada S genera contornos, que son adecuados para la clasificación mediante una simple inspección visual a diferencia de la transformada wavelet que requiere métodos específicos como el análisis de resolución múltiple estándar.[1]

La identificación de fuentes de perturbaciones es muy crítica en el análisis de la calidad de la energía, ya que una fuente de perturbación puede originarse desde el interior de una instalación o desde el exterior de una red de distribución. De acuerdo a esto para la detección de entornos ruidosos y la localización de perturbaciones en la calidad de la energía, las capacidades de la transformada wavelet a menudo se degradan. Pero usando la transformada S se puede detectar correctamente incluso en presencia de ruido. [1]

- En el caso de la transformada de Wavelet , se requiere la prueba de varias familias de Wavelets madre para una mejor clasificación, mientras que la transformación S no requiere varios pasos.[1]
- Las características extraídas de la transformada S se proporcionan como entrada a una red neuronal para la clasificación. Solo se requieren cuatro características para la clasificación de cuatro tipos de eventos de calidad de la energía. Debido a esta selección de este método como resultado, el tiempo de cálculo se reducirá.
- En [27] el autor seleccionó la transformada S para clasificar eventos de calidad de la energía, que utilizó este método para producir la representación de frecuencia y tiempo para las formas de onda de voltaje y corriente, donde las amplitudes promediadas en el tiempo y los contenidos espectrales de todas estas señales se extrajeron de los valores de frecuencia y tiempo que luego se utilizaron para determinar el origen de caídas de tensión (Sag). En el método de predicción de fuente de caída de voltaje en este caso, las características que caracterizan tanto las formas de onda de voltaje como de corriente se extraen de las resoluciones de tiempo y frecuencia de la transformada S. Para estos casos la transformada S genera contornos de frecuencia de tiempo, que muestran

claramente los patrones de perturbación para facilitar las inspecciones visuales. También genera los contornos relevantes para las formas de onda de voltaje y corriente. A partir de estos contornos se derivan los valores de las tensiones, corrientes y potencias de perturbación.[28]

- El uso de la transformada S en lugar de la transformada Wavelet evita ensayar con varias familias Wavelets madre el cual ayuda a determinar las mejores condiciones para la mejor clasificación.

6.3.1. TRANSFORMADA HILBERT HUANG

La HHT es muy adecuado para analizar señales estacionarias y no estacionarias. Sin embargo, se ha encontrado que la HHT tiene dificultades para descomponer señales con componentes de frecuencia cercanos, así como para identificar tiempos de transición para cambios repentinos en una forma de onda.[28]La transformada de Hilbert - Huang (HHT), se implementó como un nuevo algoritmo de procesamiento de señales, el cual fue propuesta en 1998 por el Dr. Huang.

El método de la HHT se ha desarrollado en los últimos años para estudiar las perturbaciones en la calidad de la energía no estacionarias. Generalmente, esta técnica es la fusión de dos técnicas: la descomposición en modo empírico y la transformada de Hilbert [11]; el cual consta de dos procesos distintos. Inicialmente, la señal que se va a analizar se descompone utilizando el proceso de descomposición en modo empírico (EMD) en funciones de modo intrínseco (IMF) que tienen frecuencias y amplitudes instantáneas significativas. La EMD descompone las señales en IMF de tal manera que los IMF se ordenan desde la frecuencia más alta a la más baja, es decir, la primera IMF contiene la frecuencia más alta de cada evento en la señal. Una vez que la señal se descompone en IMF, la transformada de Hilbert se puede aplicar a cada IMF dando la amplitud instantánea y la frecuencia instantánea en función del tiempo. [28]

Esta combinación del proceso la descomposición en modo empírico (EMD) y la transformada de Hilbert se conoce como Hilbert - Huang (HHT). La HHT se adapta bien a datos de series de tiempo no lineales y no estacionarias y, por lo tanto, este es uno de los métodos más adecuados para la descomposición de formas de onda para la clasificación de eventos de calidad de la energía.[28]

La alta resolución de tiempo es una de las ventajas principales de la transformada Hilbert - Huang (HHT) sobre otros métodos de descomposición de señales para eventos de calidad de la energía (PQ). Además, el método HHT proporciona información visual intuitiva de la frecuencia y amplitudes contenidas en la señal, a diferencia de la transformada Wavelet (WT).[28]

Sin embargo, para que el HHT funcione correctamente, el proceso de EMD debe poder descomponer la señal extraída en componentes separados, es decir, cada uno con un solo componente de frecuencia. Aunque según el autor en [28] se ha encontrado que el proceso de EMD tiene dificultades cuando un evento en la señal tiene frecuencias cercanas entre sí (menos de un factor de 2), lo que resulta en IMF que contienen frecuencias mixtas. Estas señales se encuentran a menudo en formas de onda de calidad de la energía, por ejemplo, armónicos 17 y 19. Cuando se aplica la transformada de Hilbert a IMF que contienen frecuencias mixtas, se pueden obtener resultados erróneos [28].

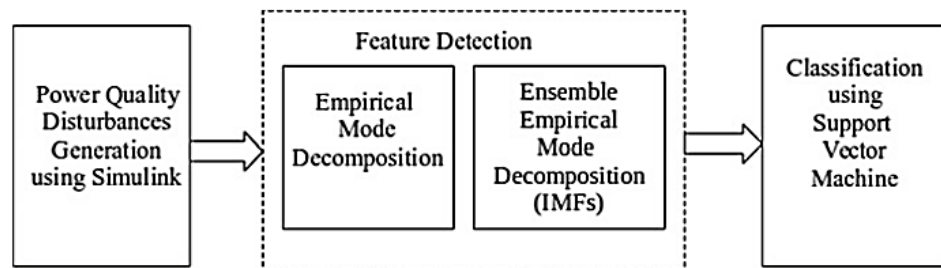


Figura 6. 8 Etapas de clasificación en base a la transformada Hilbert- Huang. [29]

En la figura 6.8 se evidencia las fases fundamentales del método propuesto por el autor en [29]teniendo en cuenta la transformada Hilbert- Huang para la detección y clasificación de los eventos de calidad de la calidad de la energía, que como primera medida se genera la perturbación de la señal, luego se detectan las características extraídas de la señal de calidad de la energía y por último se clasifican por uno de los métodos de inteligencia artificial (IA), para ese caso el autor clasifico los eventos en base a la máquina de soporte vectorial (SVM).

Eventos de calidad de la energía	Modelo	Parámetros de medición
Onda sinusoidal	$X(t) = A \sin(\omega t)$	Frecuencia = 60 Hz $A = 1$
Sag	$X(t) = A \left(1 - \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2)) \right) \sin(\omega t)$	$0.1 \leq \alpha \leq 0.9$ $T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$
Swell	$X(t) = A \left(1 + \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2)) \right) \sin(\omega t)$	$0.1 \leq \alpha \leq 0.8$ $T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$
Interrupción	$X(t) = A \left(1 - \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2)) \right) \sin(\omega t)$	$0.1 \leq \alpha \leq 1$ $T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$
Flicker	$X(t) = A(1 + \alpha \sin(b\omega t))$	$0.1 \leq \alpha \leq 0.2$ $0.4 \leq b \leq 0.6$
Armónicos	$X(t) = A(\sin(\omega t) + \alpha_3 \sin(3\omega t) + \alpha_5 \sin(5\omega t))$	$0.1 \leq \alpha \leq 0.2$ $0.4 \leq b \leq 0.6$

Tabla 6. 1 Diferentes tipos de perturbaciones de la calidad de la energía. Fuente:[30]

La Tabla 6.1 muestra los modelos matemáticos que son utilizados para caracterizar diferentes tipos de perturbaciones en la calidad de la energía. En la señal de potencia $x(t)$, se dan modelos matemáticos usados para caracterizar diferentes tipos de perturbaciones.

Donde:

- A Es la magnitud de la onda.
- ωt Es la frecuencia de la onda sinusoidal.
- α representa el porcentaje de perturbación en la onda.
- $u(t)$ Es la función de paso unitario, proporciona el intervalo de perturbaciones presente en la onda sinusoidal pura.

Variando la posición α de $u(t)$ se obtiene un gran número de señales.

7. ESTRATEGIAS AVANZADAS Y SELECCIÓN DE LOS MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN DE EVENTOS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA

En este capítulo se tomarán en cuenta metodologías basadas en inteligencia artificial (IA) el cual hacen parte de los métodos anteriormente mencionados para el modelo clasificador.

La mayoría de los trabajos publicados se centran en el análisis de diversos métodos utilizados para identificar y clasificar la señal medida, sin embargo, hasta el momento se han realizado pocos estudios en cuanto al análisis de fenómenos transitorios.

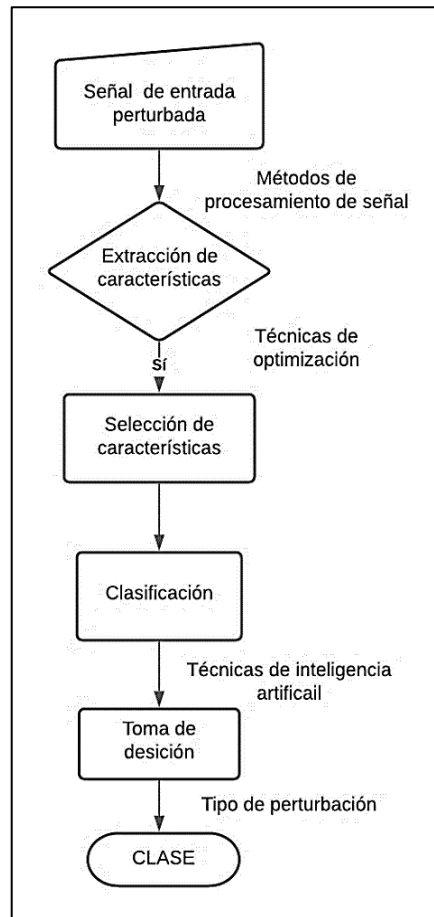


Figura 7. 1 Diagrama de flujo para la clasificación de eventos de calidad de la energía.

Fuente:[14].

Los pasos principales implicados generalmente en la clasificación automática de perturbaciones se ilustran en la Figura 7.1[14].

La etapa de detección es la responsable de descubrir si existe una anomalía en la señal de voltaje o corriente, pero el proceso de clasificación puede diagnosticar el tipo de evento en la muestra. Para la detección y clasificación incluye principalmente el monitoreo de ciertos parámetros que solo ocurren cuando ocurre un evento. Por tanto, la detección está estrechamente relacionado con la técnica de procesamiento de señales seleccionada.

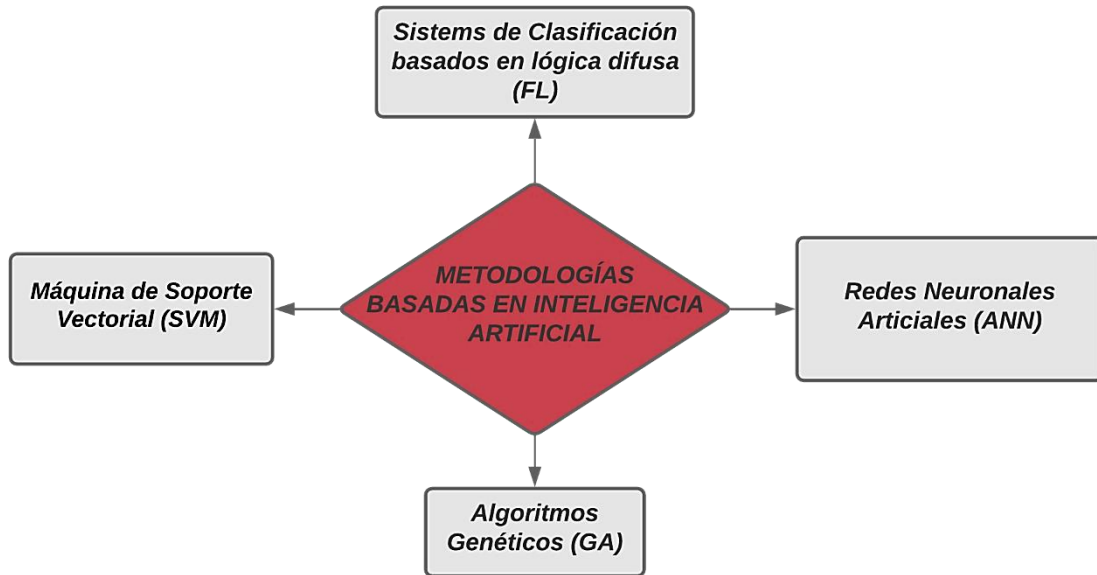


Figura 7. 2 Métodos basados en inteligencia artificial (IA). Fuente: Elaboración propia

Entre las numerosas metodologías de inteligencia artificial (IA), se destacan seguidamente, aquellas que se han utilizado comúnmente o que son potencialmente muy útiles para el análisis de los fenómenos de calidad de la energía. Algunos métodos usados son[14][19]:

- Máquinas de soporte vectorial (SVM).
- Redes neuronales artificiales (ANN).
- Sistemas de clasificación basados en Lógica Difusa (Fuzzy Logic (FL)).
- Algoritmos Genéticos (GA).

7.1. MÁQUINA DE SOPORTE VECTORIAL (SVM).

La máquina de soporte vectorial (SVM) es un método moderno de aprendizaje computacional basado en la teoría del aprendizaje estadístico presentado por Vapnik y se especializa en un número menor de muestras para entrenamiento [14]. Así la máquina de soporte vectorial se conforma como un conjunto de métodos de aprendizaje basados en supervisión, cuya finalidad es la resolución de problemas relacionados con el reconocimiento y la clasificación. [14][31]

Las Máquina de Soporte Vectorial integra un método el cual se fundamenta en el aprendizaje para la resolución de problemas de clasificación y regresión. Para los dos casos, la resolución se basa primero en una fase de entrenamiento donde se ingresan datos de problema y solución en forma de pares, y una segunda fase de uso para la resolución de problemas suministrando como salida la solución a un problema dado[14][31] [5].

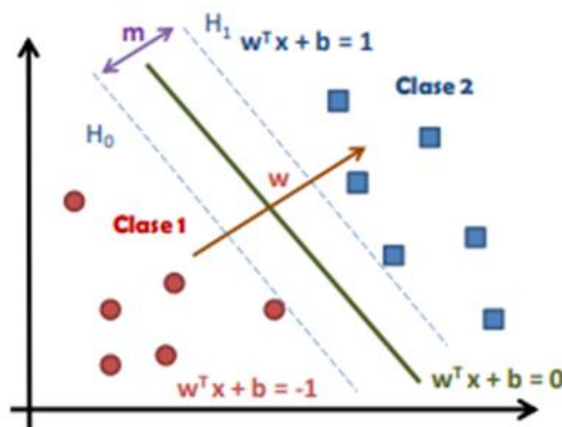


Figura 7. 3 Fronteras de decisión. Fuente: [6]

La finalidad de una máquina de soporte vectorial para el uso de clasificación de perturbaciones es de proveer una forma computacional y eficiente de aprendizaje que realice un óptimo análisis de dos clases por medio de un hiperplano ubicado en un espacio característico de mayor dimensión.[26]

El aprendizaje se formula como un problema de optimización donde la clasificación de los datos se realiza determinando un conjunto de vectores de soporte, que son miembros del conjunto de entradas de entrenamiento que delimitan el hiperplano. SVM puede encontrar límites no lineales si las clases son linealmente no separables.

Los SVM son sistemas de aprendizaje que utilizan espacios de hipótesis de funciones lineales en un espacio característico de mayor dimensión, entrenados con un algoritmo que se basa en la teoría de optimización matemática y que implementan un sesgo de aprendizaje proveniente de la teoría de aprendizaje estadístico. [10][6]

7.2. REDES NEURONALES ARTIFICIALES (ANN)

Las redes neuronales (ANN) son útiles en tareas como identificación de patrones, clasificación, aproximación de funciones, optimización y agrupación de datos. Asimismo han sido muy utilizadas en diferentes aplicaciones en los sistemas eléctricos debido a su capacidad de clasificación y de aproximación de funciones. Las ANN establecen una metodología sólida para la generación de sistemas de procesamiento de señales.[3] [14]

Una red neuronal es un conjunto de elementos de computación independientes (llamados neuronas), totalmente relacionados entre sí, cuyo propósito está determinado por la estructura de la red el cual que operan en paralelo, actuando cada uno de forma autónoma pero en sincronía con los demás.[10] [14]

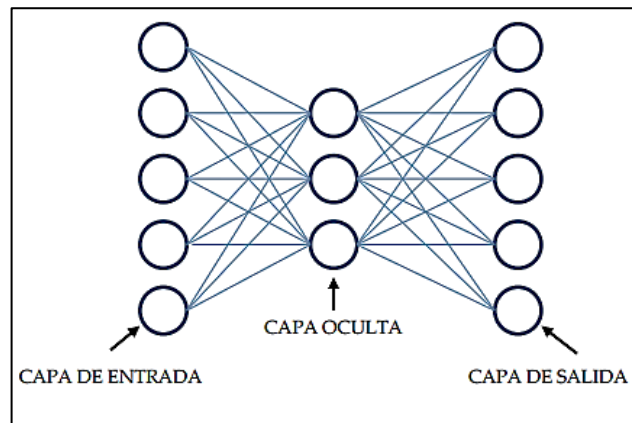


Figura 7. 4 Estructura Red Neuronal Artificial.
Fuente: [14]

Las redes neuronales artificiales ofrecen un enfoque completamente diferente para la resolución de problemas. Una red neuronal artificial es un modelo construido mediante el aprendizaje de varios ejemplos de este comportamiento. Transforma los datos dados que pertenecen a un problema en un modelo o predictor, y luego aplica este modelo a los datos actuales para obtener una

estimación. Además de tener ventajas como la insensibilidad al ruido (moderado) o falta de fiabilidad en los datos. [20]

Las ANN presentan una serie de problemas que pusieron en duda sus capacidades. Los algoritmos empleados para el entrenamiento de una ANN generalmente necesitan de un número grande de muestras para lograr una precisión deseada lo que provoca que, en implementaciones reales, se deba contar con un número grande de mediciones para entrenar un algoritmo de este tipo. Por otro lado; el proceso de entrenamiento generalmente toma mucho tiempo.[6]

Los mencionados problemas que las ANN presentan impulsaron a los investigadores a estudiar algunas técnicas de aprendizaje lineal superadoras para resolver problemas de reconocimiento de patrones y aproximación de funciones. Dentro de la familia de algoritmos de AI existe una técnica conocida como Maquina de soporte vectorial por sus características intrínsecas, resuelven muchas de las desventajas que presentan las ANN. [6]

7.3. SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN EN SISTEMAS EXPERTOS FUZZY (FUZZY LOGIC (FL))

El sistema experto Fuzzy es una aplicación particular de inteligencia artificial (IA) que se utiliza en el módulo de diagnóstico. Este método posee una buena capacidad de caracterización, ofrecen una solución rentable y presentan facilidad en su aplicación a problemas complejos, por ello, en la literatura se muestra como una herramienta muy potente y con una amplia aplicación en las áreas de sistemas de energía y el diagnóstico de la calidad eléctrica, donde la información disponible pueda dar lugar a incertidumbre.[10][14]

7.4. ALGORITMOS GENÉTICOS (GA)

Los Algoritmos Genéticos (GA) consisten en un conjunto de reglas de búsqueda basadas en la mecánica de la selección natural y la genética natural. Son métodos adaptativos que pueden usarse para resolver problemas de búsquedas y optimización.[10] Están basados en el progreso genético de los organismos vivos. A lo largo de las generaciones, las poblaciones evolucionan en la naturaleza de acorde con los principios de la selección natural y de la supervivencia de los más fuertes. Por imitación de este proceso, los GA son capaces de ir creando soluciones para problemas del mundo real. La evolución de

dichas soluciones hacia los valores óptimos del problema depende en buena medida de una adecuada codificación de las mismas.[14]

El GA se presenta como una herramienta poderosa para monitorear y supervisar las perturbaciones del sistema de energía generadas debido al desempeño dinámico de los sistemas de energía.[14] Entre las principales limitaciones que presentan los GA pueden citarse la dificultad para encontrar el óptimo global, la falta de constancia en la optimización del tiempo de respuesta, la complicación de su uso en aplicaciones en tiempo real, lo inadecuados que resultan para conjuntos de datos dinámicos, y la dependencia de la precisión de la salida con un amplio conocimiento del problema.[14]

	Métodos de clasificación	Ventajas	Desventajas
1	Red Neuronal	Alta precisión de clasificación de eventos de calidad de la energía.	Menos eficiente en condiciones ruidosas.
2	Red Neuronal Artificial	Alta precisión para aplicaciones en tiempo real y proporciona flexibilidad matemática.	La velocidad y la precisión de la convergencia dependen de la arquitectura de la red y del ruido en la señal.
3	Máquina de soporte vectorial	Potencial para manejar grandes funciones, proporcionar una solución estable a la optimización cuadrática, alto proceso de aprendizaje.	Poca precisión de clasificación cuando las muestras de entrenamiento son mínimas.
4	Lógica difusa	Preciso en el modelado y análisis de sistemas complejos.	El conjunto de entrenamiento para cada caso es fijo, por lo que no es adecuado para nuevas perturbaciones.
5	Algoritmo Genético	Clasifica con precisión las perturbaciones de calidad de la energía generadas debido al rendimiento dinámico del sistema de energía.	Alto tiempo computacional.

Tabla 7.1 Comparación de métodos de clasificación de eventos de calidad de la energía. Fuente: [26]

La Tabla 7.1 muestra una comparación de métodos basados en inteligencia artificial que van de la mano con los métodos ya antes mencionados, las cuales

se identifican las ventajas y desventajas de otros métodos considerados en relación a la información previamente recolectada de diversas investigaciones.

#	Principales Métodos De Análisis De	Ventajas	Desventajas
1	Métodos basados en la transformada de Fourier	Utilizado con éxito para señales estacionarias cuyas características no cambian con el tiempo. Simple de implementar.	Debido a la limitación de ancho de ventana fija, no puede rastrear la dinámica de la señal correctamente, por lo que no es adecuado para señales no estacionarias.
2	Transformada Hilbert Huang	Se puede utilizar para extraer características de formas de onda distorsionadas y genera una señal en cuadratura a través de la cual se pueden evaluar fácilmente la amplitud y la fase instantáneas.	Limitado solo para condiciones de banda estrecha.
3	Transformada S	Conversión completa del dominio del tiempo al dominio de conversión de frecuencia bidimensional, y luego al dominio de frecuencia de Fourier.	Basado en el método de procesamiento de bloques y no cumple con los requisitos de tiempo real, dado que el ancho de la ventana de frecuencia depende de la frecuencia central, la medición de armónicos es incorrecta.
4	Transformada Wavelet	Proporciona representación local en tiempo y frecuencia. Por lo tanto, es adecuado para ocasiones que requieren una buena resolución de frecuencia de tiempo.	Fuertemente influenciado por el ruido presente en la señal, que sufre de fugas espectrales.

Tabla 7. 2 Comparación de los principales métodos de análisis de eventos de calidad de la energía. Fuente:[26]

De acuerdo con los métodos de clasificación antes mencionados se proporciona la tabla 7.2 que compara los principales métodos de detección y clasificación de eventos de calidad de la energía. Estos métodos suelen determinar los

parámetros característicos que representan a cada perturbación lo que conducen a la descomposición de cada señal modelada, dando lugar al modelo clasificador.

8. DISEÑO DE ALGORITMO PARA LA SELECCIÓN DEL MÉTODO DE CLASIFICACIÓN

A partir de la selección de los métodos de clasificación mencionados anteriormente, se deben considerar aspectos importantes antes de entrar en el proceso de detección y extracción de características de eventos de calidad de la energía. Lo primero a considerar es elegir el método más adecuado para la clasificar eventos específicos, y de la misma manera considerar la técnica más efectiva en cuanto a términos computacionales de acuerdo con los criterios enumerados en la tabla 8.1, el cual resumen las principales ventajas y desventajas del método de clasificación. Los criterios expuestos para la clasificación son aspectos considerados en investigaciones previamente estudiadas.

Características	Métodos basados en la TF	Transformada Wavelet	Transformada S	Transformada Hilbert- Huang
Complejidad de cálculo	Sencillo	Complejo	Muy complejo	Muy complejo
Detección de eventos	Mínima	Muy Buena	Excelente	Muy Buena
Clasificación de eventos	Nula	Automática con IA	Automática con IA	Automática con IA
Estudio del origen del evento	Nula	Factible	Factible	Factible
Comprensión de datos	Buena	Excelente	Excelente	Excelente
Detección de armónicos (Frecuencia)	Muy Buena	Muy Buena	Muy Buena	Muy Buena
Grado de utilización actual	Elevado	Escaso	Escaso	Escaso
Hardware para implementación en tiempo real	Muy Básico	Potente	Potente	Potente

Tabla 8. 1 Comparativa de los métodos de clasificación de eventos de calidad de la energía más empleada. Fuente:[26]

El segundo aspecto importante antes de la correcta elección es considerar las tablas 8.2 y 8.3 como referencias para obtener resultados más precisos en términos de eficacia seleccionando el método adecuado correspondiente para cada evento. Esto es muy importante porque tiene como objetivo ser lo más preciso posible en la técnica de procesamiento de señales a aplicar.

Evento	Método			
	TF	TS	TW	THH
Transitorios				
Sag	X	X	X	
Swell	X	X	X	
Bajo voltaje		X	X	
Sobrevoltaje		X		
Interrupciones			X	
Muesca				X
Flicker				X
Armónicos	X	X	X	X

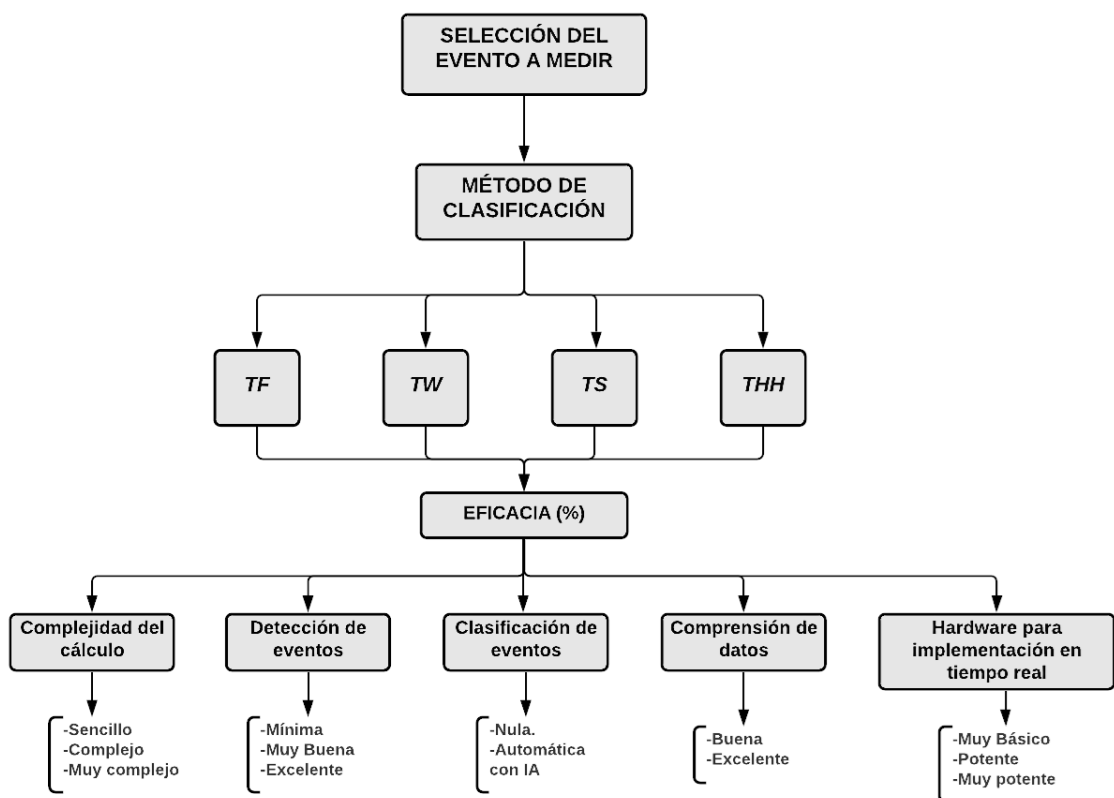
Tabla 8. 2 Métodos utilizados para cada evento. Fuente: [26] [32]

La tabla anterior brinda información clara sobre la elección del método a utilizar ya que simplifica el proceso de decisión en la implementación del método de clasificación para cada caso, esto basándose en los análisis realizados en revisiones previas que se han hecho en este campo de estudio.

En la tabla 8.3 muestra la eficacia de los principales métodos de clasificación de eventos calidad de la energía. Dado que esta información recopilada se deriva de varios estudios anteriores, la eficacia general de los métodos de clasificación se muestra como un porcentaje describiendo la precisión de los métodos para eventos específicos.

Evento	Eficacia %			
	TS	TW	THH	TF
Transitorios	100	98.67	88	100
Sag	100	98.67	36	95
Swell	100	99.33	-	98
Muesca	83	97.33	100	-
Flicker	100	98.67	100	89
Armónicos	100	99.33	100	100

Tabla 8. 3 Eficacia de los métodos de clasificación de eventos de calidad de la energía. [10][33]



El rendimiento del clasificador depende en gran medida de las características extraídas de la entrada. Los métodos basados en FT, WT y otros modelos son el mejor punto de partida para generar características a probar.

El diagrama de la Figura 8.1 muestra un proceso de clasificación de eventos específicos, que considera los siguientes parámetros: complejidad computacional, detección de eventos, clasificación automática con inteligencia artificial (IA), comprensión de datos y sus características computacionales. Según sus respectivos porcentajes de eficacia, se seleccionan los métodos más adecuados (como la transformada wavelet, la transformada de Fourier, la transformada S y la transformada de Hilbert Huang) teniendo en cuenta los parámetros de las tablas anteriores.

Característica	Técnicas de Inteligencia Artificial			
	ANN	AG	SVM	FL
Representación del conocimiento	Mala	Bastante Mala	Mala	Buena
Tolerancia a la incertidumbre	Buena	Buena	Muy Buena	Buena
Tolerancia a la imprecisión	Buena	Buena	Muy Buena	Buena
Adaptabilidad	Buena	Buena	Buena	Bastante Mala
Capacidad de aprendizaje	Buena	Buena	Muy Buena	Mala
Procesamiento de datos	Buena	Bastante Buena	Buena	Bastante Mala
Mantenibilidad	Buena	Bastante Buena	Buena	Bastante Buena
Rendimiento de generalización	Buena	Mala	Excelente	Mala

Tabla 8. 4 Fortalezas y debilidades de diferentes técnicas de IA. Fuente:[34]

La estructura del algoritmo se puede ver en la Figura 8.2, la cual inicia con la selección del evento a medir, considerando los modelos matemáticos expuestos en la Tabla 6.1 que son utilizados para caracterizar los diferentes tipos de perturbaciones en la calidad de la energía. La metodología se demostrará a través de un estudio de caso mediante la creación de un Guide o interfaz sencillo mediante la aplicación de la herramientas computacional Matlab®.

Después de seleccionar el evento a medir, se observará un menú de opciones con diferentes métodos de clasificación. Este menú proporciona la información necesaria sobre las siguientes características: complejidad computacional, detección de eventos, clasificación de eventos, estudio del origen de los eventos, comprensión de datos, detección de armónicos , grado de utilización actual, hardware implementado en tiempo real y la eficacia asociada a cada método (TW, TF, TS y THH).

Las características asociadas con estos métodos proporcionan una perspectiva más objetiva para elegir un método que arroje mejores resultados. Luego de haber seleccionado el método apropiado según el resultado de la observación, se permite graficar la perturbación.

Finalmente, se verifica el funcionamiento de la metodología descomponiendo la señal generada originalmente.

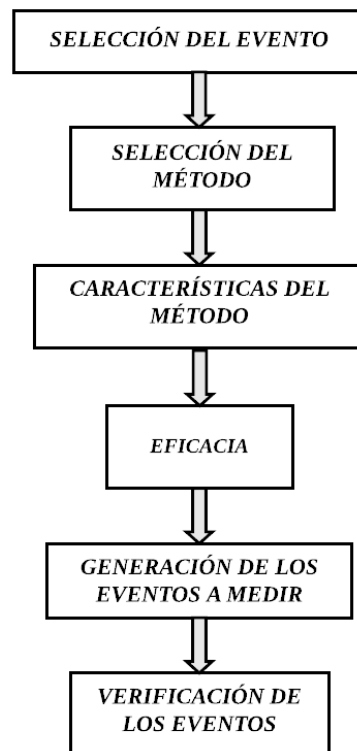


Figura 8. 1 Algoritmo General para la selección de los eventos. Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de estudio que se verificará en el siguiente capítulo, se procederá a utilizar el Toolbox Wavelet de Matlab, que es una herramienta útil y sencilla en la clasificación de los eventos de calidad de la energía. Esto se da en base a la información extraída de investigaciones ya realizadas en este campo, que ha llevado al uso de la transformada Wavelet, debido a que este método proporciona una mayor eficacia en la clasificación de perturbaciones.

La descomposición mediante el Toolbox Wavelet facilita el análisis de cualquier señal ya que permite dividir la señal original en sub señales de diferentes rangos de frecuencias e intervalos de tiempo presentando un comportamiento óptimo en la verificación y clasificación de los eventos a estudiar.

9. VERIFICACIÓN FUNCIONAMIENTO DE LA METODOLOGÍA

Las ventajas de los métodos matemáticos relacionados con la inteligencia artificial y las transformadas (T. Wavelet, T. S, T. Fourier y T. Hilbert-Huang) se han descrito anteriormente. Se puede observar que en comparación con técnicas más clásicas, la transformada S o la transformada Wavelet permiten una detección muy precisa de diferentes eventos relacionados con eventos transitorios, mientras que técnicas más clásicas como TF no pueden detectar todos los tipos de eventos.

En este caso, para analizar las perturbaciones o eventos en la calidad de la energía, estos métodos deben combinarse con inteligencia artificial. Para elegir un método adecuado se deben considerar los parámetros expuestos del algoritmo, el cual nos muestra sus respectivas características, y a su vez su eficacia porcentual para cada caso.

El siguiente es un estudio de caso para un evento específico, en el que se selecciona la transformada de Wavelet para detectar y localizar fenómenos transitorios, descomponiendo así la perturbación. En este caso, se utilizará la interfaz gráfica de MATLAB Wavelet Toolbox el cual es una biblioteca de Matlab que proporciona un amplio conjunto de funciones de análisis de Wavelet.

Las aplicaciones más relevantes de la transformada Wavelet en los sistemas eléctricos se concentran en los siguientes campos de investigación:

- Calidad de la energía.
- Protección de sistemas eléctricos de potencia.
- Transitorios en sistemas eléctricos de potencia.
- Estimación de la demanda.
- Medida de potencia

En base a los estudios hallados en diversos artículos del tema en el análisis Wavelet de una señal eléctrica, se trató de diseñar un nuevo esquema de detección en base únicamente a la descomposición mediante la transformada Wavelet. Por lo tanto se generaron parametros para medir un Sag , por lo que se pasaron datos correspondientes a varios niveles de descomposiión Wavelet (con Wavelet madre Daubechies).

De acuerdo con los diferentes modelos matemáticos expuestos en la Tabla 6.1, el modelo se selecciona de acuerdo al evento a medir, en este caso se utilizan los parámetros para medir un Sag.

$$X(t) = A \left(1 - \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2)) \right) \sin(\omega t) \quad (3)$$

$$0.1 \leq \alpha \leq 0.9$$

$$T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$$

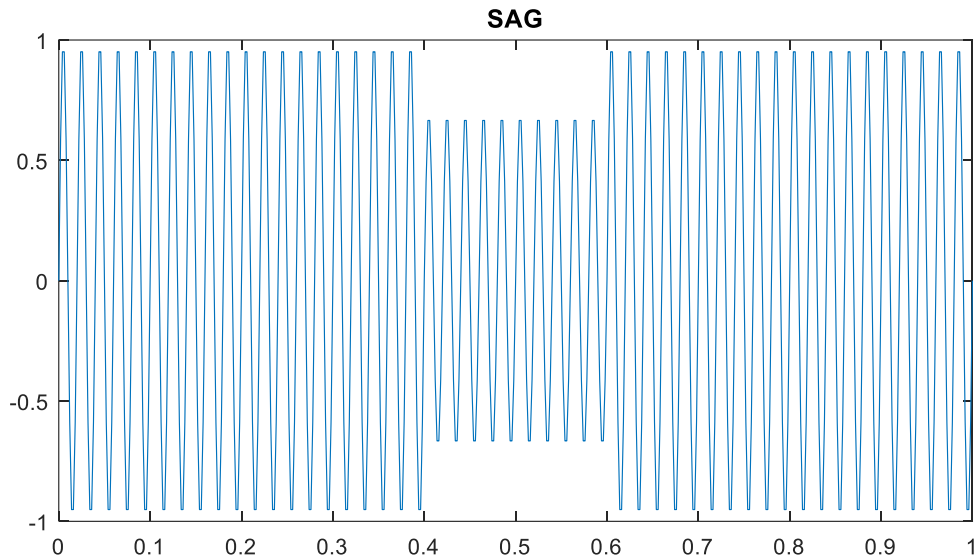


Figura 9. 1 Sag generada según el modelo matemático. Fuente: Elaboración propia.

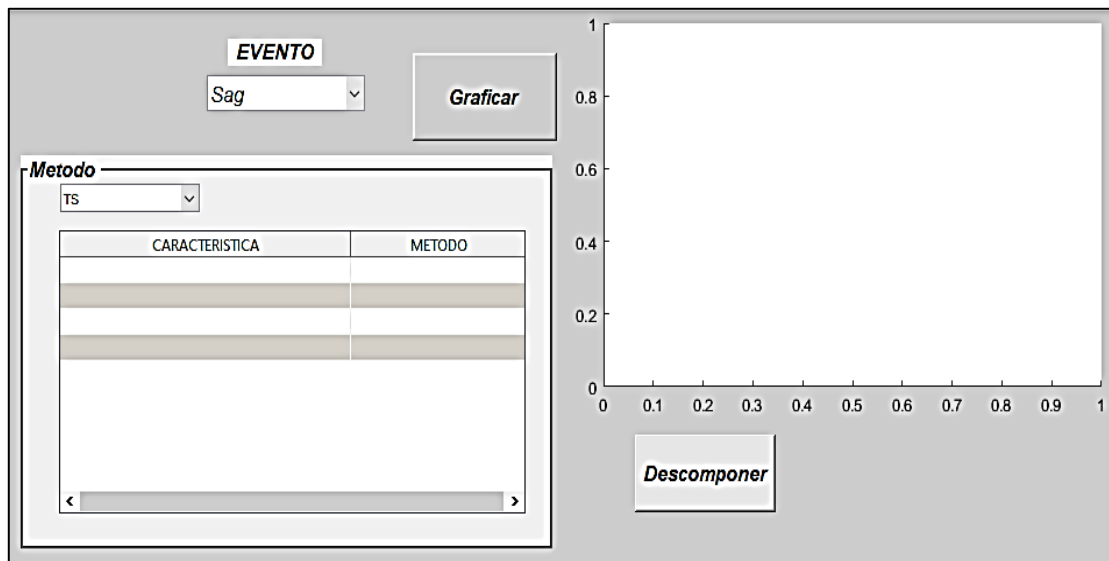


Figura 9. 2 Selección de los métodos para un evento específico. Fuente: Elaboración propia

Las ecuaciones algebraicas se utilizan para generar señales de perturbación de la calidad de la energía permitiendo visualizar el gráfico resultante.

Para visualizar mejor este evento, se consideran los parámetros expuestos en el capítulo anterior, el cual permite la selección del método mediante la implementación de la interfaz Guide de Matlab. En el menú de la interfaz (Figura 9.2), se pueden seleccionar diferentes eventos, y estos eventos arrojan diferentes métodos de clasificación.

De acuerdo con los parámetros arrojados por los métodos de clasificación de la interfaz, se selecciona la transformada de Wavelet porque es uno de los métodos que proporciona una mayor eficacia y mejores características computacionales en la clasificación de eventos transitorios en comparación con los métodos TF, TS y THH.

Luego de seleccionar la transformada Wavelet como se muestra en la Figura 9.4, se puede visualizar el gráfico generado para este evento (Sag). Luego de tener la señal generada se procede a realizar la descomposición de la señal empleando la Wavelet Toolbox de Matlab el cual incluye algoritmos para el análisis continuo de wavelets, coherencia wavelet, y análisis de tiempo-frecuencia permitiendo obtener una representación de datos descomponiendo la señal en varios niveles.

Una vez cargada la señal se ejecuta el Toolbox Wavelet mediante la interfaz que representa la descomposición, el cual se despliega una ventana como observa en la figura 9.5 donde se describen los parámetros que se definirán antes de analizar la señal. El nombre de la señal seleccionada y su tamaño aparecen en la ventana Data (Size). En la sección "Wavelet", se seleccionará la familia de wavelet más adecuada para el análisis de la señal originalmente generada, y en el menú (Nivel), se seleccionará el número de niveles en los que se descompondrá la señal original.

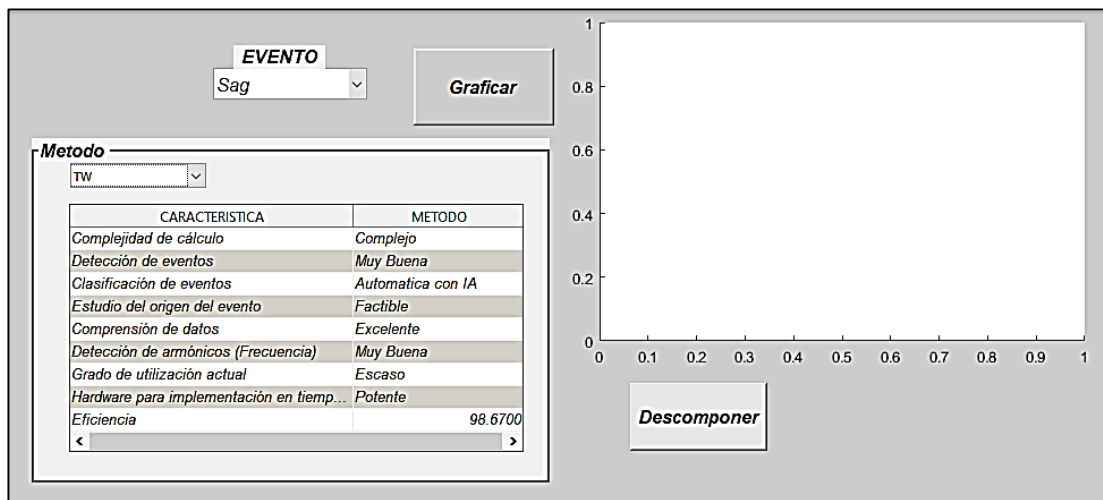


Figura 9. 3 Características de la transformada Wavelet para Sag.

Para este caso se selecciona el tipo de Wavelet madre en este caso se seleccionó las funciones wavelet Daubechies ya que se comportan adecuadamente en la detección de la mayoría de los tipos de eventos de calidad de la energía y la dB4 o Db8 es la wavelet madre más utilizada para aplicaciones enfocadas en calidad de la energía.[23]

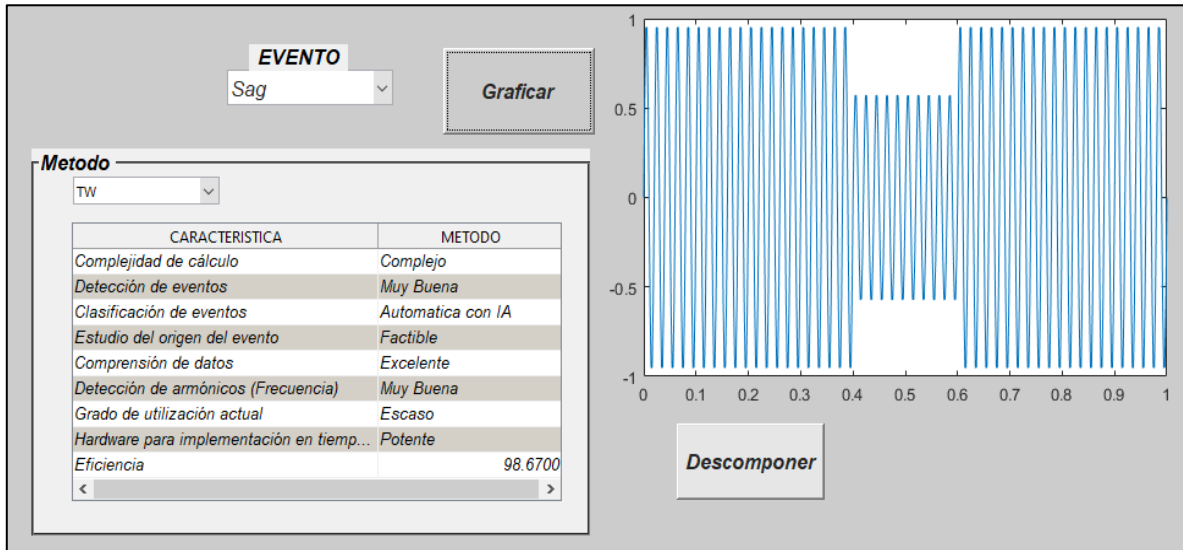


Figura 9. 5 Visualización de la perturbación generada. Fuente: Elaboración propia

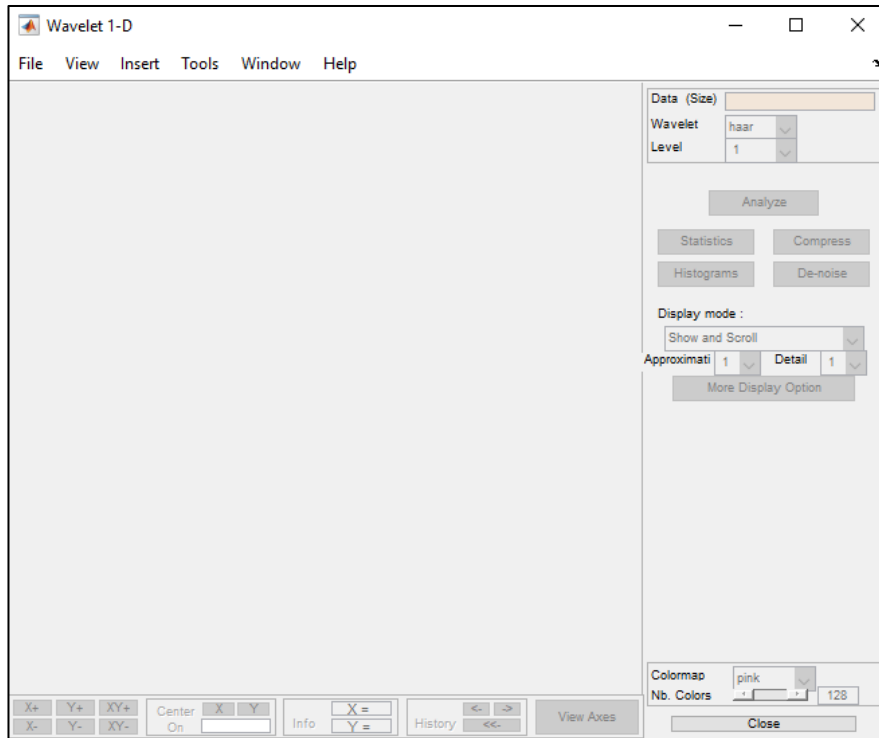


Figura 9. 4 Toolbox Wavelet. Fuente: Matlab®

Para esta señal se seleccionará la Wavelet madre Daubechies de orden 8 con 6 niveles de descomposición.

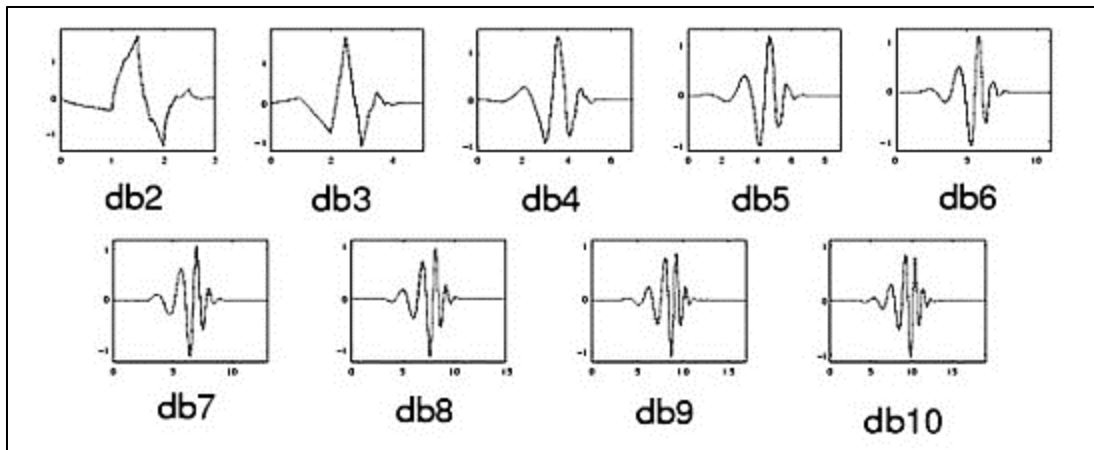


Figura 9. 6 Familia de Wavelets Daubechies. Fuente: [5]

En [6], el autor concluye que para las señales que involucran tales señales eléctricas la wavelet madre más adecuada son la familia Daubechies.

En este caso, para la selección de los parámetros, se hizo necesario extraer información basada en investigaciones que se han llevado a cabo en este campo

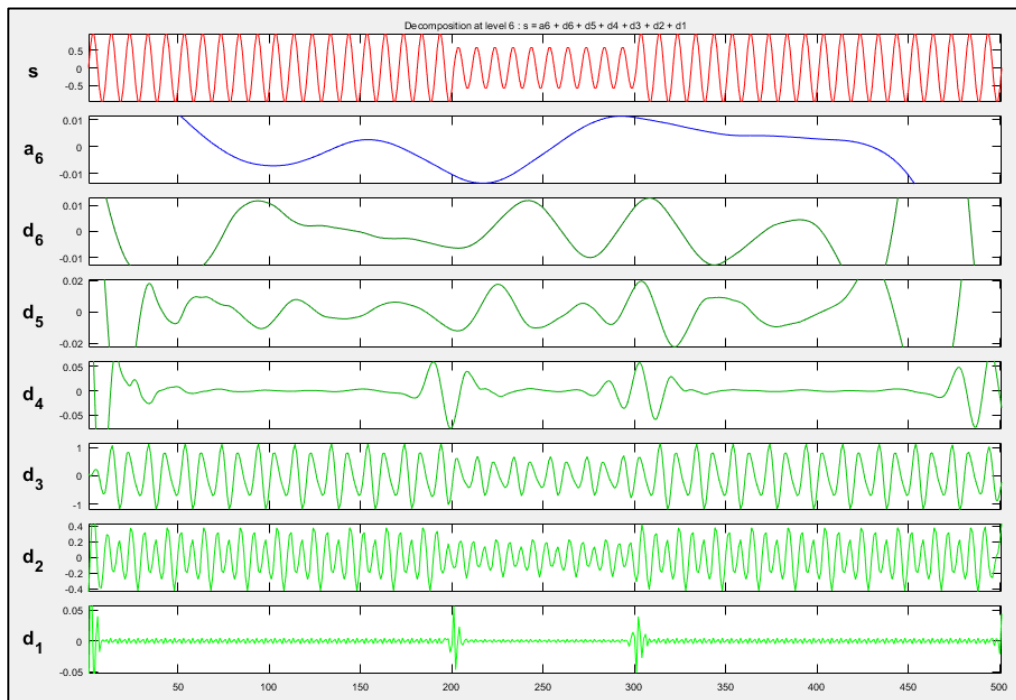


Figura 9. 7 Modo de visualización de la descomposición. Fuente: Matlab®

de estudio, centrándose en eventos específicos para dar un óptimo resultado en el desarrollo de los clasificadores de perturbaciones de la calidad de la energía.

En la figura 9.7, se evidencia la visualización que por defecto el que aparecerá será el modo de "descomposición completa", en el que se mostrará la señal de aproximación del último nivel, en este caso, hasta el 6º nivel (a6), y el coeficiente Información detallada para todos los niveles (d1, d2, d3 ... d8).

La herramienta también le permite ver los resultados de diferentes formas a través de la ventana Modo de visualización (Display Mode). En el modo separado, la información detallada y los valores aproximados se muestran en columnas separadas.

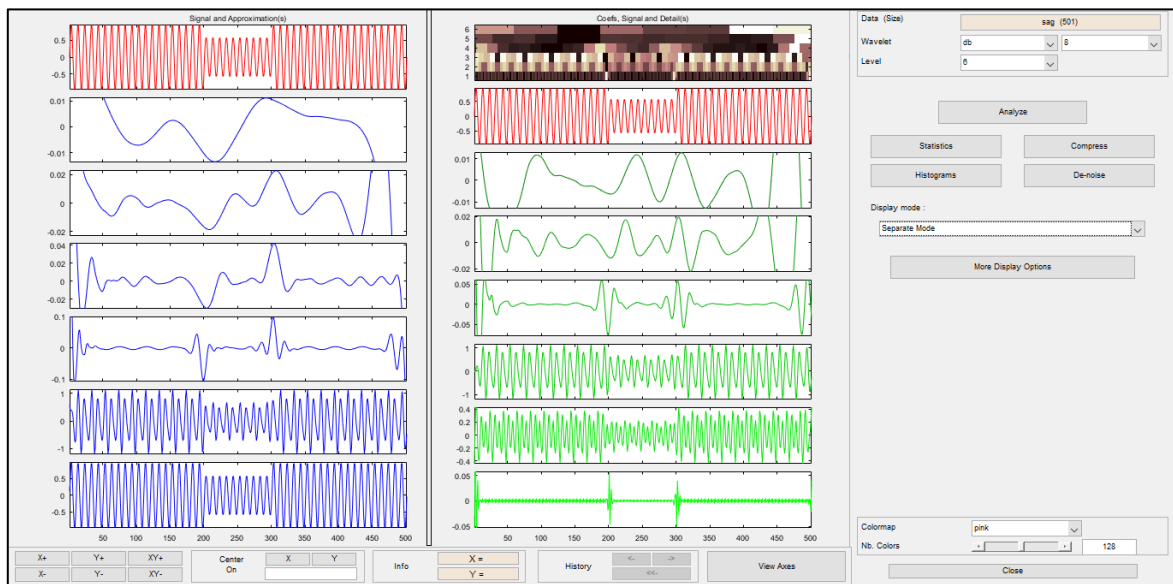


Figura 9.8 Modo separado para la señal. Fuente: Matlab®

Dependiendo del modo de visualización seleccionado, se puede acceder a otras opciones de visualización. Estas opciones incluyen la capacidad de suprimir múltiples componentes y seleccionar si mostrar la señal original, así como detalles y valores aproximados.

Para el caso de la señal cargada en la Wavelet Toolbox, se selecciona como modo de visualización el modo separado como modo de visualización para observar y analizar la evolución de la descomposición de la señal en todas las aproximaciones y niveles de detalle.

- I. El primer nivel de detalle (d_1) observado en la Figura 9.9 es el coeficiente con el valor de frecuencia más alto de la señal, por lo que se puede observar claramente cuál es el punto de ruptura de la señal. Esto también se puede ver con relativa claridad en el coeficiente de detalle 2 (d_2).

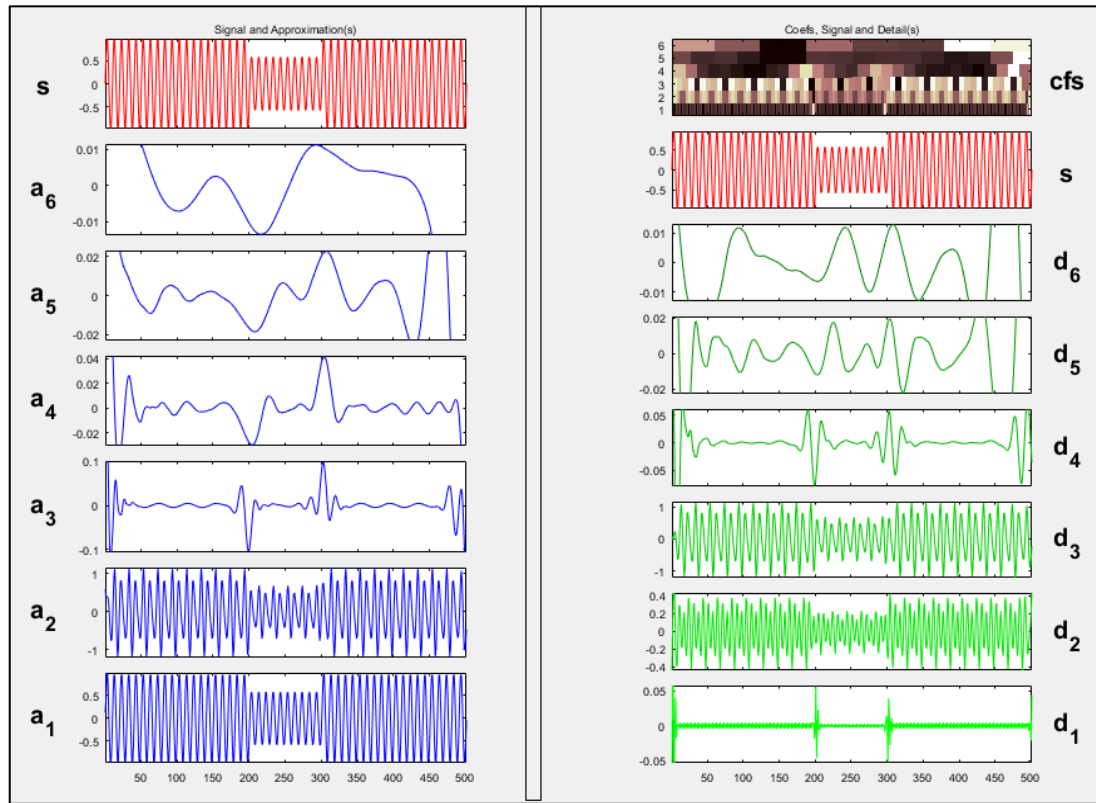
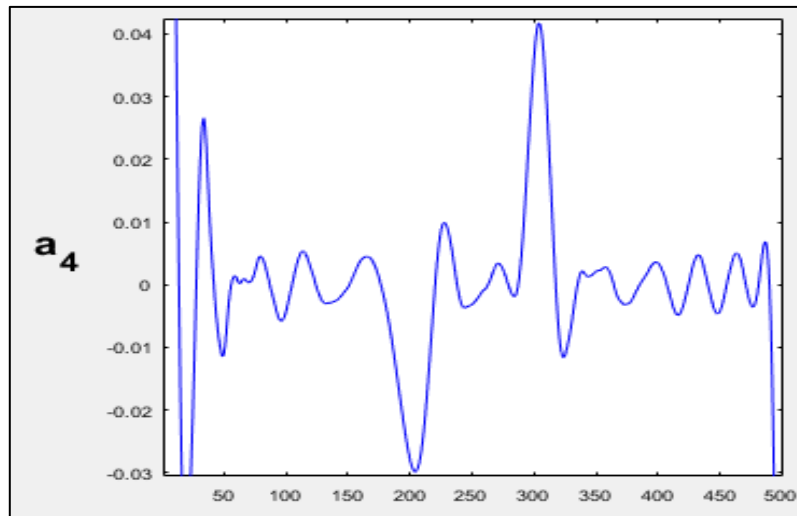
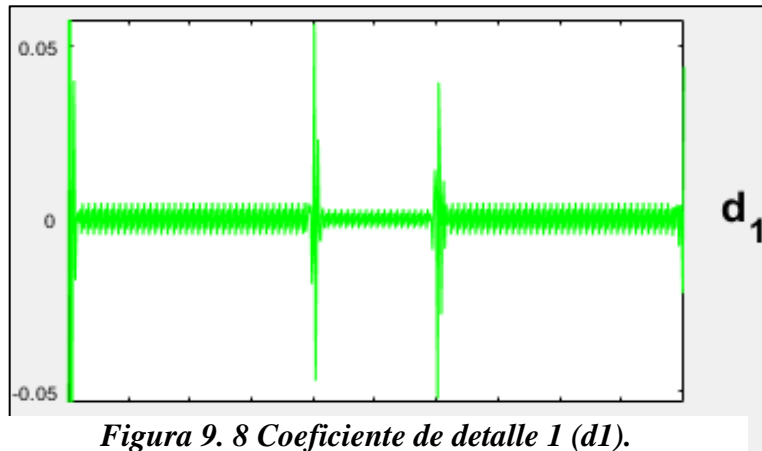


Figura 9. 7 Visualización de la señal en modo separado. Fuente Matlab[©]

- II. En los primeros tres coeficientes de detalle, se puede observar cómo han ido actuando los filtro Wavelet llevándose los componentes de frecuencia más altos. También se puede observar como los componentes de la señal de baja frecuencia se pueden tener de forma más o menos clara y separada en la aproximación de nivel 4 (a_4).
- III. Esto todavía se puede ver en el coeficiente de aproximación 5. A partir del nivel de descomposición 6 (inclusive), se puede observar que parte de la

señal de baja frecuencia comienza a perder su forma característica, por lo que para esta señal, el nivel de descomposición 5 es suficiente.

Una vez visualizados los resultados, se puede concluir que entre los distintos coeficientes de aproximación y coeficientes de detalle, los coeficientes que mejor caracterizan a la señal son el coeficiente de detalle 1 (d_1) y el coeficiente aproximado 4 (a_4), ya que el primero muestra claramente el punto de ruptura de frecuencia y el segundo la componente de la señal en baja frecuencia.



En la figura 9.12 se puede observar haciendo zoom de una forma más clara el punto de ruptura de la señal original, y la forma de la señal de alta frecuencia en el nivel de detalle 1 (d1).

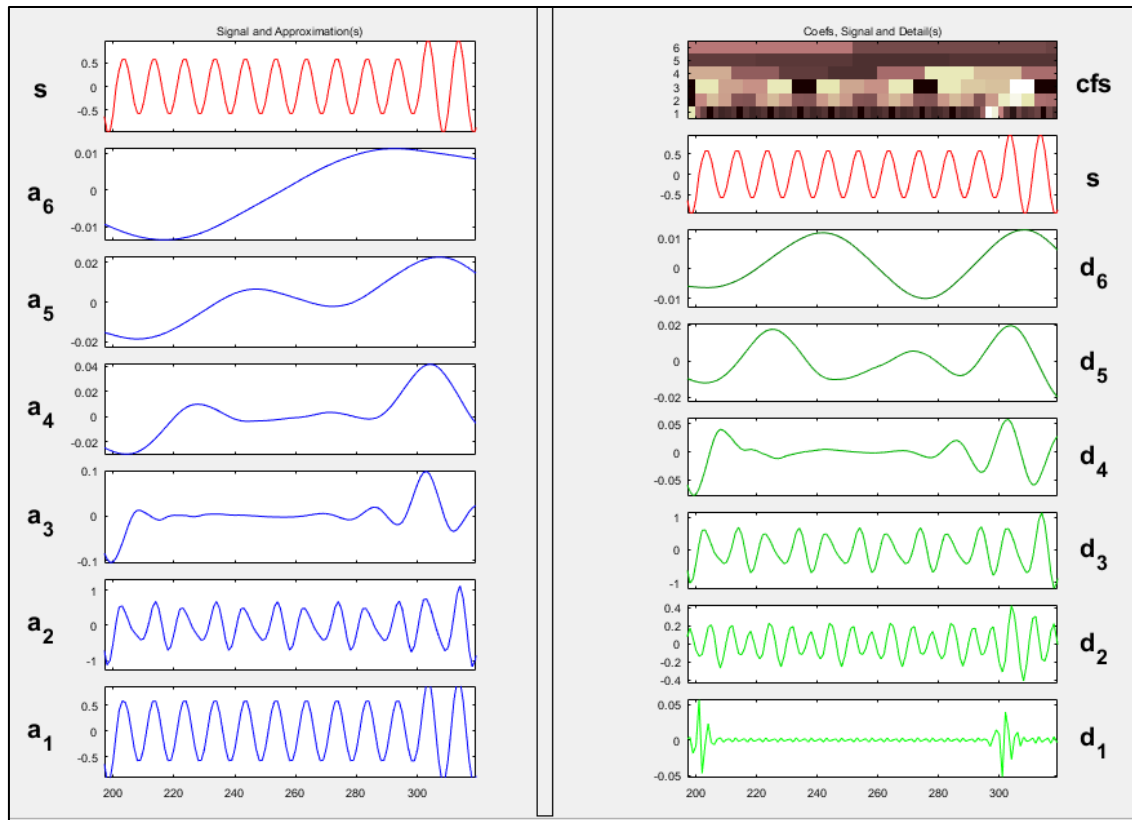


Figura 9. 10 Ampliación de la señal y de los coeficientes de aproximación. Fuente: Matlab[®]

A partir de la metodología realizada, se puede apreciar que el método seleccionado en este caso, la transformada wavelet permite la extracción de características para clasificar eventos transitorios de calidad de la energía. Por lo tanto, para la simulación se utiliza el software Matlab, en el que se realiza un análisis multiresolución para la extracción de características sobre la perturbación generada que posteriormente son los datos de entrada para alimentar a un método basado en inteligencia artificial como una red neuronal que clasificará el tipo de perturbación. Cabe resaltar que este es, el trabajo inicial para complementar trabajos futuros donde se tenga la certeza del uso del método basado en inteligencia artificial ya sea redes neuronales, máquina de soporte vectorial, algoritmo genético o lógica difusa para implementar en el monitoreo y clasificación de eventos de calidad de la energía.

10. CONCLUSIONES

- En el desarrollo del trabajo se han expuesto las ventajas que brindan los métodos matemáticos relacionados con la inteligencia artificial. Se observó que en comparación con técnicas más clásicas como la transformada de Fourier, la transformada Wavelet pueden detectar eventos relacionados con las alteraciones a la forma de onda sinusoidal con mucha precisión, mientras que técnicas más clásicas como la transformada de Fourier están limitadas y no permiten la detección de todo tipo de evento.
- La transformada wavelet procesa la forma de onda de voltaje generando coeficientes wavelet. Con estos datos, los eventos de calidad de la energía se pueden identificar fácilmente, extrayendo las características como parámetros de entrada para la clasificación con metodologías basadas en inteligencia artificial (IA). Para diferentes condiciones de operación, la efectividad de este método se ha verificado mediante diversas investigaciones realizadas en este campo de estudio.
- La detección de transitorios mediante el análisis con la transformada Wavelet permite arrojar óptimos resultados debido a su eficacia al detectar singularidades en señales y como filtro para la extracción de características de la perturbación.
- Los métodos basados en inteligencia artificial, en conjunción con métodos basados en procesamiento de señales como la transformada Wavelet, son herramientas de alto potencial y eficacia en el campo de la clasificación de perturbaciones en señales eléctricas en las que a pesar de existir numerosas investigaciones y aplicaciones en la actualidad permiten mejorar la eficacia en los resultados de clasificación.
- No existe un modelo único que pueda evaluar los problemas de calidad de la energía en identificarlos y clasificarlos correctamente. Los métodos de identificación automática existentes requieren mejoras en la versatilidad, confiabilidad y precisión del uso de herramientas de inteligencia artificial para clasificar eventos de calidad de energía.

- Se desarrolló una metodología en la que se abordaron los diferentes métodos comúnmente utilizados para clasificar eventos de calidad energética con la ayuda de herramientas de inteligencia artificial. Además se diseñó un algoritmo que se enfocó en los principales problemas y desafíos clave relacionados con estas técnicas, considerando su eficacia en la clasificación automática de los problemas de perturbaciones de calidad de la energía.
- La transformada Wavelet tiene una tasa de utilización bastante alta debido a su eficacia en la clasificación de diferentes eventos de calidad de la energía. Este método se determinó en base a la información extraída de investigaciones que se han realizado en este campo de estudio previamente, determinando que el método de transformada de Wavelet utilizado en el procesamiento de señales funciona mejor en la detección, identificación y clasificación de eventos transitorios y de señales no estacionarias.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Mishra, «Power quality disturbance detection and classification using signal processing and soft computing techniques: A comprehensive review», *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 29, n.º 8, pp. 1-46, 2019.
- [2] F. Gil Montoya, P. Asociado, y B. Predoctoral, «Power Quality Research Technique: Advantages and Disadvantages», vol. 79, pp. 66-74, 2012.
- [3] E. Vega García, Profesor cátedra, E. Antonio Duarte Gualdrón, Profesor Asistente, y G. Ordoñez Plata Ingeniero Electricista, «Detección e identificación de eventos de localización de la energía eléctrica utilizando la transformada Wavelet Discreta y Redes Neuronales», 2006.
- [4] H. Erişti y Y. Demir, «A new algorithm for automatic classification of power quality events based on wavelet transform and SVM», *Expert Syst. Appl.*, vol. 37, n.º 6, pp. 4094-4102, jun. 2010.
- [5] P. Sebastian, Francisco, «Detección y Clasificación de Perturbaciones de Calidad del Producto Técnico Basado en Procesamiento de Señales Y Máquinas de Soporte Vectorial», *Tesis*, 2018.
- [6] D. Marcelo De Yong, «Detección, clasificación y localización de eventos de calidad de energía utilizando técnicas avanzadas de procesamiento de señales e inteligencia artificial.», 2016.
- [7] F. de I. C. S. J. del R. MARCO a. Rodriguez Guerrero(Centro Nacional de Metrología), Rene Carranza Lopez Padilla, (CA Mecatronica, «A novel methodology for modeling waveforms for power quality».
- [8] I. S. Association, *Ieee Standard 1159 - 1995*. 1995.
- [9] M. Mishra, «Power quality disturbance detection and classification using signal processing and soft computing techniques: A comprehensive review», *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 29, n.º 8, 2019.
- [10] P. Khetarpal y M. M. Tripathi, «A critical and comprehensive review on power quality disturbance detection and classification», *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, vol. 28. Elsevier Inc., 01-dic-2020.
- [11] M. Mishra, «Power quality disturbance detection and classification using signal processing and soft computing techniques: A comprehensive review», 2019.
- [12] I. G. Math H. Bollen, «Signal Processing of Power Quality Disturbances. Origin of Power Quality Events», 2006.
- [13] U. Profesional, A. López Mateos, y A. S. M. J. L. T. Villagran, «Factores que afectan la calidad de la energía y su solución».
- [14] M. Dolores y B. Talavera, «Contribuciones a la Calidad de la Señal Eléctrica basadas en Wavelets e Inteligencia Artificial Tesis Doctoral», 2016.
- [15] F. Hussain, «A Novel Method for Analysis of Power Quality Transient Disturbances», pp. 265-268, 2017.
- [16] D. Cuevas Bravo, «Calidad de la Energía en los Sistemas Eléctricos de

- Potencia», *Tesis*, n.º Facultad de Ingeniería, 2011.
- [17] M. Angel y S. Cortés, «Instituto Tecnológico de Puebla Calidad de la Energía Eléctrica», p. 464, 2009.
- [18] H. Imtiaz y T. F. Sanam, «Frequency domain feature extraction for power quality disturbance classification», *2013 Int. Conf. Informatics, Electron. Vision, ICIEV 2013*, pp. 0-4, 2013.
- [19] D. J. M. Malo, «Análisis de la teoría de ondículas orientada a las aplicaciones en ingeniería eléctrica», *Dpt. Ing. Eléctrica*.
- [20] S. Roy y S. Nath, «Classification of Power Quality Disturbances Using Features of Signals», *Int. J. Sci. Res. Publ.*, vol. 2, n.º 11, pp. 18-21, 2012.
- [21] F. Gil Montoya, P. Asociado, y B. Predoctoral, «Power Quality Research Techniques: Advantages and Disadvantages», vol. 79, pp. 66-74, 2012.
- [22] C. Sidney Burrus, R. A. Gopinath, y H. Guo, «Introduction to Wavelets and Wavelet Transform», *C. Sidney Burrus. Rise Univ.*, n.º March, p. 288, 1997.
- [23] J. González Sanchez, I. Isaac, H. Cardona Agudelo, A. Díez, D. Jiménez, y G. López Jiménez, «Aplicación de la transformada de wavelet para el análisis de transitorios debidos a la conmutación de bancos de condensadores», *Investig. Apl.*, vol. 4, n.º 1, pp. 33-45, 2010.
- [24] P. Hariramakrishnan y S. Sendilkumar, «Data Mining Based Power Quality Disturbance Detection Using Wavelet Transform», vol. 7, pp. 550-555, 2018.
- [25] A. Echeverría, «Procedimiento para el análisis de calidad de potencia basado en Wavelets y Redes Neuronales; Evaluation method for Power Quality Analysis wavelets and Neural Networks based», *Ing. Energética*, vol. 31, n.º 2, pp. 32 a la 43-43, 2011.
- [26] O. P. Mahela, A. G. Shaik, y N. Gupta, «A critical review of detection and classification of power quality events», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, pp. 495-505, 2015.
- [27] A. Mohamed, M. Abdol, y M. Fuad, «Power Quality Disturbance Detection and Source Prediction Using Advanced Signal Processing Techniques», *Model. Simul. Identif.*, pp. 1-22, 2010.
- [28] M. J. Afroni, D. Sutanto, y D. Stirling, «Analysis of nonstationary power-quality waveforms using iterative hilbert huang transform and sax algorithm», *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, n.º 4, pp. 2134-2144, 2013.
- [29] R. Shilpa y P. S. Puttaswamy, *Application of Hilbert – Huang Transform and SVM Classifier to Monitor the Power Quality Disturbances*. Springer Singapore.
- [30] D. Saxena y K. Verma, «Wavelet transform based power quality events classification using artificial neural network and SVM», *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 4, n.º 1, pp. 87-96, 2012.
- [31] M. Janani, S. Shipra, S. Karthikeyan, S. Muralidharan, y B. Sathyabama, «Research Article Classification of Power Disturbances Using Multinivel Support Vector Machine», 2013.

- [32] S. Santoso, W. M. Grady, E. J. Powers, J. Lainoree, y S. C. Bhatf, «Characterization of distribution power quality events with fourier and wavelet transforms», *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 19, n.º 2, p. 48, 1999.
- [33] F. Hafiz, A. H. Chowdhury, y C. Shahnaz, «An approach for classification of power quality disturbances based on Hilbert Huang Transform and Relevance Vector Machine», *2012 7th Int. Conf. Electr. Comput. Eng. ICECE 2012*, n.º November 2017, pp. 201-204, 2012.
- [34] D. Saxena, K. Verma, y S. Singh, «Power quality event classification: an overview and key issues», *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 2, n.º 3, pp. 186-199, 2010.

12. ANEXO

12.1. INTERFAZ GRÁFICA

```
1. function varargout = interfaz2(varargin)
2. % INTERFAZ2 MATLAB code for interfaz2.fig
3. % INTERFAZ2, by itself, creates a new INTERFAZ2 or raises
   % the existing
4. % singleton*.
5. %
6. % H = INTERFAZ2 returns the handle to a new INTERFAZ2 or the
   % handle to
7. % the existing singleton*.
8. %
9. % INTERFAZ2('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the
   % local
10. % function named CALLBACK in INTERFAZ2.M with the given input
   % arguments.
11. %
12. % INTERFAZ2('Property','Value',...) creates a new INTERFAZ2 or
   % raises the
13. % existing singleton*. Starting from the left, property value
   % pairs are
14. % applied to the GUI before interfaz2_OpeningFcn gets called. An
15. % unrecognized property name or invalid value makes property
   % application
16. % stop. All inputs are passed to interfaz2_OpeningFcn via
   % varargin.
17. %
18. % *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows
   % only one
19. % instance to run (singleton)".
20. %
21. % See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
22. % Edit the above text to modify the response to help interfaz2

23. % Last Modified by GUIDE v2.5 16-Nov-2020 21:42:51

24. % Begin initialization code - DO NOT EDIT
25. gui_Singleton = 1;
26. gui_State = struct('gui_Name', mfilename, ...
27. 'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
28. 'gui_OpeningFcn', @interfaz2_OpeningFcn, ...
```

```

29.     'gui_OutputFcn', @interfaz2_OutputFcn, ...
30.     'gui_LayoutFcn', [] , ...
31.     'gui_Callback', []);
32.     if nargin && ischar(varargin{1})
33.         gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
34.     end

35.     if nargin
36.         [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
37.     else
38.         gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
39.     end

40.     % --- Executes just before interfaz2 is made visible.
41.     function interfaz2_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
        varargin)
42.     % Choose default command line output for interfaz2
43.     handles.output = hObject;

44.     % Update handles structure
45.     guidata(hObject, handles);
46.     function varargout = interfaz2_OutputFcn(hObject, eventdata,
        handles)
47.     % varargout cell array for returning output args (see
        VARARGOUT);
48.     % hObject handle to figure
49.     % eventdata reserved - to be defined in a future version of
        MATLAB
50.     % handles structure with handles and user data (see
        GUIDATA)

51.     % Get default command line output from handles structure
52.     varargout{1} = handles.output;

53.     % --- Executes on button press in b1.%%%%%%%%%
54.     function b1_Callback(hObject, eventdata, handles)
55.     if get(handles.popupmenu5, 'Value')==2
56.         val=get(handles.selector, 'Value');
57.         switch val
58.             case 1
59.                 t1=.4; t2=.6; a=0.4; A=1; t = [0:.002:1];
60.                 u = inline('t >= 0');

```

```

61. x=A*(1-a*(u(t-t1)-u(t-t2))).*sin(2*pi*60.*t);
62. %figure, plot(x); title('x')
63. x1=x(:)
64. assignin('base','senal',x1)
65. %plot(t,x1);title('SAG')
66. case 2

67. t1=.4; t2=.6; a=0.3; A=1; t = [0:.002:1];
68. u = inline('t >= 0');
69. x=A*(1+a*(u(t-t1)-u(t-t2))).*sin(2*pi*60.*t);
70. x1=x(:);
71. assignin('base','senal',x1)
72. case 3
73. end

74. plot(x1)

75. plot(handles.axes1,t,x1)
76. end
77. % hObject handle to b1 (see GCBO)

78. function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)

79. % hObject handle to edit1 (see GCBO)
80. % eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
81. % handles empty - handles not created until after all
CreateFcns called

82. % --- Executes on selection change in selector.
83. function selector_Callback(hObject, eventdata, handles)
84. % --- Executes on button press in pushbutton3.
85. function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
86. wavemenu
87. % --- Executes on selection change in popupmenu4.
88. function popupmenu4_Callback(hObject, eventdata, handles)
89. % --- Executes on selection change in popupmenu5.
90. function popupmenu5_Callback(hObject, eventdata, handles)
91. %para tabla
92. val_2=get(handles.selector,'Value');
93. val_1=get(hObject,'Value');
94. efi=[100 98.67 36 95; 100 99.33 0 98];

```

```

95.     % val_1
96.     switch val_1
97.     case 1
98.         C={'Muy complejo','Excelente','Automática con
            IA','Factible','Excelente','Muy
            Buena','Escaso','Potente',efi(val_2,val_1)}
99.         C1={'Complejidad de cálculo', 'Detección de
            eventos','Clasificación de eventos','Estudio del origen del
            evento','Comprensión de datos','Detección de armónicos
            (Frecuencia)','Grado de utilización actual','Hardware para
            implementación en tiempo real','Eficiencia'};
100.    transS=[C1' C']
101.    set(handles.uitable2,'data',transS);
102.    case 2
103.        C={'Complejo','Muy Buena','Automatica con
            IA','Factible','Excelente','Muy
            Buena','Escaso','Potente',efi(val_2,val_1)}
104.        C1={'Complejidad de cálculo', 'Detección de
            eventos','Clasificación de eventos','Estudio del origen del
            evento','Comprensión de datos','Detección de armónicos
            (Frecuencia)','Grado de utilización actual','Hardware para
            implementación en tiempo real','Eficiencia'};
105.    transW=[C1' C']
106.    set(handles.uitable2,'data',transW);
107.    case 3
108.        C={'Muy Complejo','Muy Buena','Automatica con
            IA','Factible','Excelente','Muy
            Buena','Escaso','Potente',efi(val_2,val_1)}
109.        C1={'Complejidad de cálculo', 'Detección de
            eventos','Clasificación de eventos','Estudio del origen del
            evento','Comprensión de datos','Detección de armónicos
            (Frecuencia)','Grado de utilización actual','Hardware para
            implementación en tiempo real','Eficiencia'};
110.    transH=[C1' C']
111.    set(handles.uitable2,'data',transH);
112.    case 4
113.        %C=['Sencillo','Mínima','Nula','Nula','Buena','Muy
            Buena','Elevado','Muy Básico'];
114.        C={'Sencillo','Mínima','Nula','Nula','Buena','Muy
            Buena','Elevado','Muy Básico',efi(val_2,val_1)};
115.        C1={'Complejidad de cálculo', 'Detección de
            eventos','Clasificación de eventos','Estudio del origen del
            evento','Comprensión de datos','Detección de armónicos
            (Frecuencia)','Grado de utilización actual','Hardware para
            implementación en tiempo real','Eficiencia'};

```



```
116. transF=[C1' C']
117. set(handles.uitable2,'data',transF);
118. end

119. % hObject    handle to popupmenu5 (see GCBO)
    120. % eventdata reserved - to be defined in a future version of
        MATLAB
    121. % handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

    122. % Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns
        popupmenu5 contents as cell array
    123. %         contents{get(hObject,'Value')} returns selected
        item from popupmenu5

    124. % --- Executes during object creation, after setting all
        properties.
125. function popupmenu5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```