

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



PROYECTO FIN DE CARRERA
INGENIERÍA INDUSTRIAL

**ANÁLISIS TIEMPO-FRECUENCIA DE LA
SEÑAL DE VIBRACIÓN DE UN CAMBIADOR
DE TOMAS EN CARGA**

AUTORA: Begoña Moya Ignacio

TUTOR: Edwin Rivas Trujillo

Leganés, octubre de 2009

*A M^a Teresa Ignacio Pacín
y Concepción Pacín Blanco.
Siempre estaréis conmigo.*

AGRADECIMIENTOS.

En primer lugar deseo expresar mis agradecimientos a mi tutor, Edwin Rivas Trujillo, sin cuyos conocimientos y apoyo habría sido imposible desarrollar este proyecto.

A Susana, mi mejor amiga, por haber estado tanto en los buenos como en los malos momentos y no haberse quedado en el camino.

A Gerardo, Lorenzo y Pedro, por haberme hecho reír tanto y por los buenos momentos que hemos pasado todos juntos. Gracias por haber conseguido que dejase aparcados los problemas.

Muy especialmente a Joaquín, que a pesar de la distancia ha conseguido estar cerca en todo momento para darme ánimos (a ver si vuelves, que allí no tienen raciones “tan ricas” como las de “la Pepita” y aquí se te echa de menos...).

A “Guspa” y a “Chinín”, los recién llegados (aunque por supuesto no me olvido de todos los demás), por su compañía.

A Noni, por ser tan graciosa, aunque sólo sea en verano.

A mis sobrinos Álvaro, Valeria y Diego: a veces os ponéis un poquito pesados, pero a pesar de todo me hacéis pasar muy buenos ratos.

A mis padres, Emilio y Antonia, y mis hermanos, Emilio, Manuel y Antonio, por haberme apoyado y ayudado en todo momento, incluso en las épocas más difíciles. Sin vosotros habría sido imposible que llegara hasta aquí.

Y, por último, a Raúl. Gracias por soportarme todos y cada uno de los días (aunque sé que a veces te resultará difícil), por seguir conmigo a pesar de las dificultades (ya se resolverán todos los problemas), y por quererme.

Siempre os estaré agradecida.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVO	1
3. ESTADO DEL ARTE DEL ANÁLISIS TIEMPO-FRECUENCIA CON STFT	2
3.1. Evolución del análisis de señales de vibración	2
3.2. Estado del arte del análisis tiempo-frecuencia con STFT	3
4. FOURIER	5
4.1. Introducción	5
4.2. Transformadas de Fourier	6
4.2.1. Transformada de Fourier (FT)	6
4.2.2. Transformada de Fourier en tiempo discreto (DTFT)	7
4.2.3. Transformada discreta de Fourier (DFT)	8
4.2.4. Transformada rápida de Fourier (FFT)	9
4.3. Transformadas de Fourier en tiempo corto	10
4.3.1. Transformada de Fourier en tiempo corto (STFT)	10
4.3.2. Transformada discreta de Fourier en tiempo corto (STDFT)	11
4.4. Elección de ventanas	12
4.5. Algoritmo de análisis tiempo-frecuencia	16
5. TRATAMIENTO DE LA SEÑAL	21
5.1. Constitución de un cambiador de tomas en carga	21
5.2. Señales de vibración del CTC	22
5.3. Pre-procesado de la señal	23
5.3.1. Normalización	23
5.3.2. Sincronización	24
5.3.3. Transformada de Hilbert	26
5.3.3.1. Definición de la transformada de Hilbert	27
5.3.3.2. Cálculo de la transformada de Hilbert	30
5.3.3.3. Cálculo de la transformada discreta de Hilbert	31
5.3.3.4. Propiedades de la transformada de Hilbert	33
5.4. Transformada de Fourier	34
5.5. Transformada de Fourier en tiempo corto (STFT)	34
5.6. Detección de impulsos	34
6. INTERFAZ DE USUARIO	36
6.1. Introducción al entorno gráfico	36
6.2. Interfaz gráfica de usuario	39
7. RESULTADOS	58
7.1. Comparación de dos señales en buen estado	58
7.1.1. Comparación en el dominio de la frecuencia (FFT)	59
7.1.2. Comparación mediante análisis tiempo-frecuencia (STFT)	66
7.2. Comparación de una señal con avería y otra en buen estado	71
7.2.1. Comparación en el dominio de la frecuencia (FFT)	72

7.2.2. Comparación mediante análisis tiempo-frecuencia (STFT).....	78
8. CONCLUSIONES.....	91
8.1. Conclusiones.....	91
8.2. Aportaciones originales.....	92
9. FUTUROS TRABAJOS.....	93
10. BIBLIOGRAFÍA.....	94

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 4.1: Relación entre los dominios temporal y frecuencial.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 4.2: Explicación gráfica de la STFT.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 4.3: Mejoramiento de resolución espectral y reducción de pérdidas por ondulación con agregando ceros a la sucesión temporal.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 4.4: Diagrama de flujo para la parte inicial del algoritmo propuesto para el análisis de las señales mediante STFT.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 4.5: Diagrama de flujo para el cálculo de la transformada corta de Fourier.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 5.1: Proceso de análisis de la señal.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 5.2: Estructura básica de un CTC.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 5.3: Señal de vibración del cambiador en un cambio de toma.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 5.4: Ejemplo de normalización: señal original (a) y señal normalizada (b).....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 5.5: Señales de vibración normalizadas superpuestas (rosa: señal de referencia; azul: señal a comparar).....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 5.6: Señales de vibración normalizadas y sincronizadas superpuestas (rosa: señal de referencia; azul: señal a comparar).....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 5.7: Señal de vibración normalizada (a) y su transformada de Hilbert (b).....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 5.8: Ejemplos de la transformada de Hilbert y de la envolvente de varias señales.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 6.1: Ventana de inicio de GUIDE.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 6.2: Entorno de diseño de GUI.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 6.3: Herramientas de GUI.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 6.4: Ventana de presentación del interfaz.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 6.5: Ventana de introducción de datos de la señal de vibración.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 6.6: Ventana de diálogo para la selección de la señal de entrada.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 6.7: Ventana de selección de la señal de referencia.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 6.8: Ventana de selección del tipo de transformada de Fourier.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 6.9: Mensaje de error que aparece por no seleccionar correctamente el tipo de transformada de Fourier a aplicar.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 6.10: Ventana de selección de opciones de pre-procesado.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 6.11: Mensaje de error que aparecerá en caso de no hacer correctamente la selección de las opciones de pre-procesado de las señales.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 6.12: Selección del tipo de ventana.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 6.13: Mensaje de espera para cargar datos.....</i>	<i>44</i>

<i>Figura 6.14: Mensaje de aviso que aparece junto con la ventana de resultados seleccionando STFT.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 6.15: Mensaje de aviso que aparece junto con la ventana de resultados habiendo seleccionado FFT.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 6.16: Ventana de resultados.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 6.17: Tabla de resultados en la que la señal de vibración a comparar no presenta los impulsos 2 y 3.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 6.18: Ejemplo de cambio de color de uno de los botones de la tabla resumen de resultados tras ser presionado.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 6.19: Detalle de la presentación de los datos de desfase y correlación entre las señales en la ventana “Resultados”.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 6.20: Detalle de los botones de la ventana “Resultados”.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 6.21: Ventana de diálogo para guardar la tabla de resultados en formato Excel.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 6.22: Ventana para el cambio de la señal de vibración a comprar.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 6.23: Menú de opciones de la utilidad “Cursor gráficas”.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 6.24: Ventana de ayuda que aparece al pulsar “Cursor gráficas”.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 6.25: Representación de la transformada de Fourier de una señal en la que se han añadido cuadros de coordenadas.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 6.26: Menú “Archivo”.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 6.27: Menú “Editar”.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 6.28: Extracción en forma de figura de una de las gráficas para su edición.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 6.29: Menú “Ir a”.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 6.30: Menú “Señales de vibración”.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 6.31: Gráficas que se pueden seleccionar para cada una de las señales de vibración: a) señal de referencia; b) señal a comparar... </i>	<i>53</i>
<i>Figura 6.32: Gráficas disponibles para las envolventes de las señales.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 6.33: Gráficas correspondientes a la transformada de Fourier que se pueden seleccionar: a) señal de referencia; b) señal a comparar; c) superposición de las transformadas de ambas señales.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 6.34: Mensaje de aviso que aparece en caso de seleccionar una gráfica de transformada de Fourier de señales normalizadas y sincronizadas sin haber efectuado sincronización de las mismas.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 6.35: Gráficas correspondientes a la superposición de señales.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 6.36: Mensaje de aviso que aparece en caso de seleccionar una gráfica de superposición de señales sin haber efectuado sincronización de las mismas.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 6.37: Representación gráfica de la energía de una señal. En la parte derecha se puede ver el valor máximo de energía en cada uno de los impulsos.....</i>	<i>55</i>

<i>Figura 6.38: Menú “Impulsos”</i>	56
<i>Figura 6.39: Gráficas disponibles para la superposición de impulsos</i>	56
<i>Figura 6.40: Lista de espectrogramas que se pueden visualizar</i>	56
<i>Figura 6.41: Mensaje de error que aparecerá al no seleccionar correctamente el impulso que se desea ver</i>	57
<i>Figura 6.42: Mensaje de espera para procesar las gráficas seleccionadas</i>	57
<i>Figura 6.43: Ejemplo en el que se ha seleccionado la gráfica correspondiente a los impulsos de las señales sincronizadas</i>	57
<i>Figura 7.1: Señal de vibración 7_8_9_1 (referencia)</i>	58
<i>Figura 7.2: Señal de vibración 7_8_9_3 (a comparar)</i>	59
<i>Figura 7.3: Superposición de las señales de entrada (rosa: señal de referencia; azul: señal a comparar)</i>	59
<i>Figura 7.4: Tiempos entre impulsos: señal de referencia (azul); señal a comparar (rosa)</i>	60
<i>Figura 7.5: Energía de la señal de vibración de referencia</i>	61
<i>Figura 7.6: Energía de la señal de vibración a comparar</i>	62
<i>Figura 7.7: Transformada de Fourier de la señal de referencia</i>	62
<i>Figura 7.8: Transformada de Fourier de la señal a comparar</i>	63
<i>Figura 7.9: Superposición de las transformadas de Fourier de las señales de entrada (señal de referencia: rosa; señal a comparar: azul)</i>	63
<i>Figura 7.10: Superposición de las señales de vibración normalizadas y sincronizadas (señal de referencia: rosa; señal a comparar: azul)</i> ...	64
<i>Figura 7.11: Tiempos entre impulsos de las señales sincronizadas: señal de referencia (azul); señal a comparar (rosa)</i>	65
<i>Figura 7.12: Transformada de Fourier de la señal de referencia normalizada</i>	65
<i>Figura 7.13: Transformada de Fourier de la señal a comparar normalizada y sincronizada</i>	66
<i>Figura 7.14: Superposición de las envolventes de las señales de vibración normalizadas y sincronizadas (señal de referencia: rosa; señal a comparar: azul)</i>	67
<i>Figura 7.15: Superposición del impulso 5 de señales normalizadas y sincronizadas (rosa: señal de referencia; azul: señal a comparar)</i> ...	68
<i>Figura 7.16: Espectro correspondiente al impulso 5 de la señal de referencia normalizada y sincronizada</i>	68
<i>Figura 7.17: Espectro correspondiente al impulso 5 de la señal a comparar normalizada y sincronizada</i>	69
<i>Figura 7.18: Espectrograma del impulso 5 de las señales normalizadas y sincronizadas (a) señal de referencia; b) señal a comparar)</i>	70
<i>Figura 7.19: Señal de vibración 7_8_9_1 (referencia)</i>	71

<i>Figura 7.20: Señal de vibración 5-6-7-1 (a comparar)</i>	71
<i>Figura 7.21: Superposición de las señales de entrada (rosa: señal de referencia; azul: señal a comparar)</i>	72
<i>Figura 7.22: Tiempos entre impulsos: señal de referencia (rosa), señal a comparar (azul)</i>	73
<i>Figura 7.23: Energía de la señal de vibración de referencia</i>	73
<i>Figura 7.24: Energía de la señal de vibración a comparar</i>	74
<i>Figura 7.25: Transformada de Fourier de la señal de referencia</i>	75
<i>Figura 7.26: Transformada de Fourier de la señal a comparar</i>	75
<i>Figura 7.27: Superposición de la transformada de Fourier de ambas señales (rosa: señal patrón; azul: señal a comparar)</i>	76
<i>Figura 7.28: Superposición de las señales de vibración normalizadas y sincronizadas (señal de referencia: rosa; señal a comparar: azul)</i> ...	77
<i>Figura 7.29: Tiempos entre impulsos de las señales sincronizadas: señal de referencia (azul); señal a comparar (rosa)</i>	77
<i>Figura 7.30: Superposición de la transformada de Fourier de ambas señales (rosa: señal patrón; azul: señal a comparar)</i>	68
<i>Figura 7.31: Superposición de las señales de entrada sincronizadas (rosa: señal de referencia; azul: señal a comparar)</i>	79
<i>Figura 7.32: Superposición de las señales de entrada sincronizadas y normalizadas (rosa: señal de referencia; azul: señal a comparar)</i> ...	79
<i>Figura 7.33: Superposición de las envolventes de las señales de entrada sincronizadas y normalizadas (rosa: señal de referencia; azul: señal a comparar)</i>	80
<i>Figura 7.34: Superposición del impulso 2 de las señales normalizadas y sincronizadas (rosa: señal de referencia; azul: señal a comparar)</i> ..	81
<i>Figura 7.35: Espectro del impulso 2 de la señal de referencia normalizada</i>	82
<i>Figura 7.36: Espectro del impulso 2 de la señal a comparar normalizada y sincronizada</i>	82
<i>Figura 7.37: Espectrograma del impulso 2 de la señal de referencia normalizada</i>	83
<i>Figura 7.38: Espectrograma del impulso 2 de la señal a comparar normalizada y sincronizada</i>	83
<i>Figura 7.39: Superposición del impulso 3 de las señales normalizadas y sincronizadas (rosa: señal de referencia; azul: señal a comparar)</i> ..	84
<i>Figura 7.40: Espectro del impulso 3 de la señal de referencia normalizada</i>	85
<i>Figura 7.41: Espectro del impulso 3 de la señal a comparar normalizada y sincronizada</i>	85
<i>Figura 7.42: Espectrograma del impulso 3 de la señal de referencia normalizada</i>	86

<i>Figura 7.43: Espectrograma del impulso 3 de la señal a comparar normalizada y sincronizada</i>	<i>86</i>
<i>Figura 7.44: Superposición del impulso 5 de las señales normalizadas y sincronizadas (rosa: señal de referencia; azul: señal a comparar)..</i>	<i>87</i>
<i>Figura 7.45: Espectro del impulso 5 de la señal de referencia normalizada.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 7.46: Espectro del impulso 5 de la señal a comparar normalizada y sincronizada</i>	<i>88</i>
<i>Figura 7.47: Espectrograma del impulso 5 de la señal de referencia normalizada</i>	<i>89</i>
<i>Figura 7.48: Espectrograma del impulso 5 de la señal a comparar normalizada y sincronizada</i>	<i>89</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 4.1: Reducción de los cálculos con el uso de FFT frente a DFT.....</i>	<i>9</i>
<i>Tabla 4.2: Índices comparativos entre ventanas para un N de 5 muestras</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 4.3: Índices comparativos entre ventanas para un N de 15 muestras</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 4.4: Índices comparativos entre ventanas para un N de 150 muestras</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 4.5: Índices comparativos entre ventanas para un N de 1500 muestras</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 7.1: Valores de amplitud de la FFT para cada una de las frecuencias predominantes</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 7.2: Valores de amplitud de la FFT para cada una de las frecuencias predominantes (señales normalizadas y sincronizadas) ..</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 7.3: Valores de amplitud de la FFT para cada una de las frecuencias predominantes</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 7.4: Valores de amplitud de la FFT para cada una de las frecuencias predominantes (señales normalizadas y sincronizadas)</i>	<i>78</i>

RESUMEN.

Un cambiador de tomas en carga (CTC) u OLTC por sus siglas en inglés “On-Load Tap Changer”) es la única parte con movimiento en un transformador. Su función es realizar la operación de cambio de una toma a otra del devanado de regulación (modifica el número de espiras en uno de los devanados), en respuesta a un cambio de tensión en la red debido a variaciones en la carga. El CTC mantiene constante la tensión de salida del transformador sin interrumpir la corriente de la carga.

De acuerdo a una encuesta internacional se analiza que el 40% de los fallos del transformador se producen en el CTC. Es por ello que es uno de los elementos del transformador con un mayor índice de fallos. Para asegurar la fiabilidad del transformador es importante valorar el estado del mismo.

Existen distintos métodos de mantenimiento predictivo sin descargo. Uno de los métodos de diagnóstico del estado del CTC es el análisis de vibraciones.

Basándose en registros de vibraciones existentes, se implementó un método capaz de detectar automáticamente el número de impulsos, los tiempos de inicio y fin de los mismos, y el intervalo transcurrido entre dos impulsos consecutivos, así como de determinar, en caso de la no presencia de alguno de los impulsos, de qué impulso se trata. La detección de impulsos se ha basado en el cálculo de la energía de la señal y en su comparación con un valor umbral.

A las señales de vibración se le aplicaron técnicas de pre-procesado de señales consistentes en la normalización, sincronización y cálculo de la envolvente mediante la transformada de Hilbert. Posteriormente, para efectuar el análisis propiamente dicho se han utilizado tanto técnicas frecuenciales (transformada rápida de Fourier) como técnicas de análisis tiempo-frecuencia (transformada de Fourier en tiempo corto).

En este proyecto fin de carrera se ha desarrollado una interfaz de usuario gracias a la cual es posible realizar el análisis (tanto en tiempo como en frecuencia) de señales y establecer comparaciones entre las mismas (siendo una de ellas una señal de referencia). Para el desarrollo de esta interfaz ha sido necesario modificar, depurar y mejorar un algoritmo existente que efectuaba el análisis de señales. Debido a la sencillez y facilidad de manejo de esta interfaz, el análisis de señales se hace más cómodo. Además, al tener numerosas opciones a disposición del usuario, los análisis también ganan en rapidez.

ABSTRACT.

On-load tap changer (OLTC) or CTC (in Spanish) is the only moving part in a power transformer. Its function is to perform a change operation takes another winding regulation (changing the number of turns in one of the windings) in response to a voltage change in the network due to variations in load. The CTC maintains a constant output voltage of the transformer without interrupting the load current.

According to an international survey is analyzed that 40% of power transformer failures occur in the CTC. That is why one of the elements of the transformer with a higher failure rate. To ensure the reliability of the transformer is important to assess the status.

Several methods of predictive maintenance without rebuttal. One method of diagnosing the state of the CTC vibration analysis.

Vibration based on existing records, is implemented a method capable of automatically detecting the number of impulses, the onset and end of the period, and the interval between two consecutive impulses and to determine if the non-presence one of the drives, what is momentum. The impulse detection was based on the calculation of the energy of the signal and then compared with a threshold value.

A vibration signals were applied pre-processing techniques consisting of signal standardization, synchronization and envelope calculation using the Hilbert transform. Subsequently, to perform the proper analysis techniques have been used both frequency (fast Fourier transform) techniques as time-frequency analysis (short-time Fourier transform).

In this final year project has developed a user interface through which you can perform the analysis (both in time and frequency) signals and make comparisons between them (one being a reference signal). For the development of this interface has been necessary to modify, refine and improve an existing algorithm to perform the analysis of signals. Due to the simplicity and ease of operation of this interface, signal analysis becomes more comfortable. In addition, having many options available to the user, the analysis also gain in speed.

1.- INTRODUCCIÓN.

Un cambiador de tomas en carga (CTC) u OLTC por sus siglas en inglés “On-Load Tap Changer”) es la única parte con movimiento en un transformador. Su función es realizar la operación de cambio de una toma a otra del devanado de regulación (modifica el número de espiras en uno de los devanados), en respuesta a un cambio de tensión en la red debido a variaciones en la carga. El CTC mantiene constante la tensión de salida del transformador sin interrumpir la corriente de la carga [5].

De acuerdo a una encuesta internacional se analiza que el 40% de los fallos del transformador se producen en el CTC [50]. Es por ello que es uno de los elementos del transformador con un mayor índice de fallos.

El estado de algunos de los elementos del cambiador (resistencias de conmutación, contactos, etc.) puede ser evaluado mediante inspecciones periódicas. Sin embargo estas inspecciones requieren tener el transformador fuera de servicio, un tiempo relativamente prolongado; esto supone un gasto considerable y requiere de un equipo de técnicos y operarios cualificados. Además, algunas de las partes de un CTC (contactos del selector, preselector, etc.) no pueden ser inspeccionadas debido a su localización dentro de la cuba del transformador.

Durante la última década se han realizado esfuerzos considerables para desarrollar un nuevo método de diagnóstico eficiente de cambiador de tomas en carga en servicio, sin afectar su operación normal. Un método para indicar el estado de un cambiador de tomas es el análisis de vibraciones [51].

El diagnóstico por análisis de vibraciones, consiste en la obtención de la señal de vibración de una operación del cambiador de tomas (cambio de una toma a otra) y en la comparación de esta señal de vibración frente una señal patrón o de referencia obtenida en otro periodo de tiempo.

Existen diversos métodos para realizar el análisis de las señales de vibración. Así, se pueden encontrar técnicas exclusivamente frecuenciales como la transformada rápida de Fourier (FFT, “Fast Fourier Transform”), y técnicas basadas en el análisis tiempo-frecuencia de las mismas, como la transformada de Fourier en tiempo corto (STFT, “Short-Time Fourier Transform”) y la transformada Wavelet.

En este proyecto fin de carrera se ha aplicado FFT y STFT al análisis de la señal de vibración de un CTC con el fin de diagnosticar el estado del mismo.

2.- OBJETIVO.

El objetivo principal del presente proyecto fin de carrera, es realizar una interfaz gráfica de usuario que facilite el proceso de diagnóstico del estado de un CTC basado en el análisis de la señal de vibración, utilizando para ello técnicas puramente frecuenciales (FFT) o técnicas tiempo-frecuencia (STFT). Lo más relevante es que el usuario no requiere tener grandes conocimientos de las técnicas de análisis tiempo-frecuencia de señales.

3.- ESTADO DEL ARTE DEL ANÁLISIS TIEMPO-FRECUENCIA CON STFT.

Al realizar un cambio de una toma a otra toma correlativa, en un cambiador de tomas en carga [33] se produce una señal de vibración consistente en una serie de transitorios bien definidos. La naturaleza armónica y no estacionaria de este tipo de señales hace que el análisis con técnicas frecuenciales tradicionales no sean totalmente efectivo para caracterizarlas.

Con la finalidad de caracterizar y predecir mejor los posibles fallos, las distribuciones tiempo-frecuencia [34] fueron desarrolladas desde los años 40, y han sido aplicadas en las áreas de procesamiento y análisis de señales no estacionarias. A partir de esta aplicación se motivó el desarrollo del espectrograma de sonido usando los conceptos de la transformada de Fourier de corto tiempo (STFT).

Posteriormente surgieron nuevas distribuciones basadas en los conceptos de familias de funciones afines, por lo que son lineales, como es el caso de la transformada de "Wavelets", que permite un análisis de resolución múltiple.

3.1.- Evolución del análisis de señales de vibración.

A principios del siglo XIX, Joseph Fourier formuló su teoría de análisis de frecuencia, ahora conocida como Síntesis de Fourier [42], y considerada la base del análisis moderno de señales.

En el año 1965, se gesta el desarrollo de una implementación computacional para la Transformada de Fourier [43], denominada Transformada Rápida de Fourier (FFT), que permitió la primera aplicación del análisis espectral en tiempo real [44]. La FFT mejoró la eficiencia computacional de la transformada de Fourier de una señal discreta.

A pesar de su fácil implementación práctica, existen muchas desventajas asociadas a la técnica de la FFT. La primera de ellas, es que no proporciona ninguna información acerca del dominio del tiempo de la señal, omitiendo detalles valiosos del fenómeno físico en estudio. Esto genera un gran problema a la hora de evaluar señales de naturaleza no estacionaria, donde es particularmente beneficioso obtener una correlación entre el dominio de la frecuencia y el dominio del tiempo.

Para resolver las limitaciones de la FFT, en los últimos años se han desarrollado otras técnicas suplementarias para el análisis de señales no estacionarias, entre ellas, la Transformada Corta de Fourier [45], y la Distribución Wigner-Ville (WVD) [46]. Estos métodos realizan la transformación de una señal unidimensional, a una función de dos dimensiones de tiempo y frecuencia, a través de la multiplicación de la señal a analizar por una función ventana. Sin embargo, cada uno de estos métodos de análisis tiempo-frecuencia presenta diversos problemas.

La principal desventaja de la STFT es que posee una resolución limitada para el dominio del tiempo y de la frecuencia, ya que se utiliza el mismo ancho de ventana durante el análisis de la señal entera. Esto origina que la resolución sea constante, y significa que, si se desea obtener un resultado con una buena resolución en frecuencia

utilizando ventanas amplias (para el análisis de señales con componentes de baja frecuencia), la resolución en el tiempo no es la mejor (ventanas estrechas).

La WVD es una combinación de la transformada rápida de Fourier (FFT) y el método de correlación, que proporciona una distribución de la energía de la señal en dominio del tiempo y de la frecuencia. Su problema radica en que, generalmente, produce solapes en el espectro y errores en los cálculos de energía, especialmente para valores negativos. Por tanto, la WVD es difícil de interpretar en ciertas ocasiones.

Con la finalidad de resolver tales inconvenientes, se han propuesto nuevos métodos, como la distribución Choi-Williams (CWD) y la distribución Cone-Shaped (CSD), entre otras [48]. Sin excepción, al eliminar alguna desventaja de anteriores formulaciones, se produce la pérdida de otras facultades. Por ejemplo, la reducción de algunos términos que producen la interferencia en la WVD, ocasiona la pérdida de concentración de información en el plano tiempo-frecuencia [47].

El análisis Wavelet proporciona un análisis de resolución múltiple (en tiempo y frecuencia), a diferentes escalas y resoluciones, siendo especialmente útil para la diagnosis de defectos. Sin embargo, debido a que es una técnica reciente, y aunque en los últimos años se ha hecho un gran esfuerzo por darle todo el rigor matemático que tiene la transformada de Fourier y unificar métodos y notaciones, el ritmo de aparición de publicaciones sobre el tema hace que no sea tarea fácil. Además, no permite realizar algunos cálculos como los relacionados con la convolución o la modulación de una señal.

3.2.- Estado del arte del análisis tiempo-frecuencia con STFT.

A continuación se pretende dar una idea de cómo han utilizado distintos autores las técnicas de análisis tiempo-frecuencia de las señales de vibración mediante la transformada de Fourier en tiempo corto (STFT).

En 2004 Silva et al. [35] comparan distintas representaciones tiempo-frecuencia (entre las que se encuentra la transformada de Fourier en tiempo corto) para la simulación y análisis de fallos en sistemas engranados.

En el 2004 Belsak et al. [40] proponen el diagnóstico de fallos en unidades de engranajes mediante el análisis de señales de vibración utilizando la STFT.

En el 2007 E.G. Florez et al. [36] utilizan la transformada de Fourier en tiempo corto (STFT) y la transformada continua Wavelet (CWT) para mejorar la detección y caracterización de fallos en el contacto rueda-carril de las líneas existentes de los Ferrocarriles Metropolitanos de Barcelona.

En el 2007 Hernández Montero et al. [37] utilizan distintas técnicas de análisis de vibraciones, entre las que se encuentra la transformada de Fourier en tiempo corto, para detectar desperfectos en los cojinetes de rodamientos.

En el 2007 Danisor et al. [38] proponen la transformada de Fourier en tiempo corto, así como la distribución Wigner-Ville, como métodos para el análisis de señales sísmicas con la finalidad de detectar y encontrar el epicentro de sismos submarinos.

En el 2007 Moreno et al. [39] comparan diferentes tipos de modelos de diagnóstico de fallos: modelos basados en estadísticos de prueba, modelos basados en la transformada de Fourier (entre los que se encuentra la STFT) y modelos basados en la transformada conjunta Hilbert-Wavelet. Para ello utilizan un banco de engranajes que permite operar en un amplio rango de velocidad.

En 2008 Lima et al. [41] analizan las señales de impactos y vibraciones de un manipulador robótico. Estas señales son tratadas con la transformada rápida de Fourier (FFT) y con la transformada de Fourier en tiempo corto (STFT). El estudio experimental que presentan proporciona resultados válidos que pueden ayudar en el diseño de un sistema de control para minimizar los efectos indeseables de las vibraciones.

Referente al análisis tiempo-frecuencia de un CTC, la mayor parte de las publicaciones hacen referencia a la utilización de la transformada Wavelet. A la fecha sólo se ha encontrado el trabajo Doctoral del 2009 reportado Rivas [5]. Éste presenta la STFT conjuntamente con la transformada Wavelet como método para el análisis tiempo-frecuencia de las señales de vibración de un CTC. Concluye en su estudio que es más fácil de programar la transformada Wavelet que la STFT, para hallar indicadores de diagnóstico.

En este proyecto fin de carrera se ha combinado la STFT con métodos basados en el cálculo de la energía almacenada en la señal, aunque esto puede provocar la aparición de solapamientos en el espectro; sin embargo, escogiendo adecuadamente la ventana a utilizar, los resultados que se obtienen son bastante aceptables. Con la finalidad de poder emplear la ventana más adecuada en cada caso, el interfaz de usuario dispone de una lista desplegable con un total de 13 tipos de ventanas, entre las cuales se encuentran Hamming, rectangular, Gauss, Kaiser,...; gracias a ella se puede escoger la ventana a utilizar en cada análisis.

4.- FOURIER.

4.1.- Introducción.

Para analizar señales es necesario acudir al dominio del tiempo o al dominio de la frecuencia. El dominio tiempo muestra la variación de la amplitud de la señal respecto del tiempo (Figura 4.1(b)). En este dominio se consigue una perspectiva natural de la señal, pero es difícil determinar sus componentes fundamentales, razón por la cual se torna al dominio de la frecuencia. En este dominio se representa la amplitud en función de la frecuencia, apreciándose las componentes de la señal; a manera de ejemplo, en la Figura 4.1(c) se aprecia las componentes fundamentales correspondientes a dos picos verticales bien diferenciados. A esta representación de la señal en el dominio de la frecuencia (Figura 4.1(c)) se le denomina espectro de frecuencia [22].

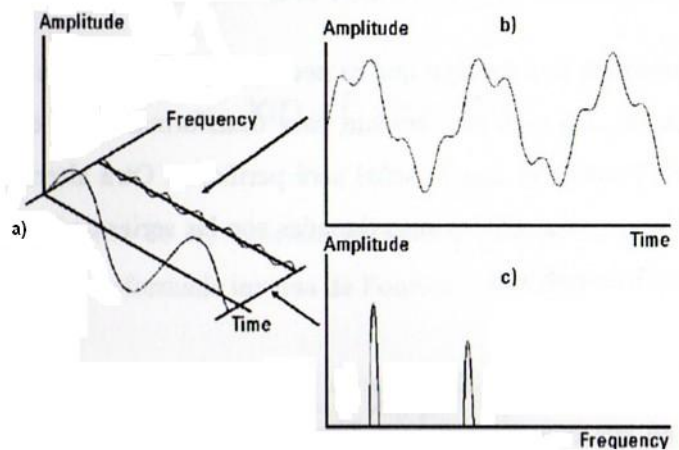


Figura 4.1: Relación entre los dominios temporal y frecuencial.

Una de las herramientas matemáticas más importantes para llevar a cabo la transformación de señales del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia es la transformada de Fourier.

Dado que el alcance de la transformada de Fourier es muy amplio, se pueden distinguir distintos tipos de transformada dependiendo del tipo de señal al que se le aplique (continua o discreta) y del tipo de respuesta que se espere tras realizarse la transformación (espectro continuo o discreto).

En este capítulo se hará una breve introducción a los principales tipos de transformada de Fourier.

4.2.- Transformadas de Fourier.

4.2.1.- Transformada de Fourier (FT).

La transformada de Fourier (FT) es el método más popular [14] utilizado para el procesamiento de señales en multitud de campos por su simplicidad y por su claro significado físico. Especialmente para señales estacionarias, cuyo espectro no varía con el tiempo, FT presenta una buena representación descomponiendo la señal en series de señales sinusoidales. Sin embargo, para algunos tipos de señales que no son estacionarias, y para algunas frecuencias específicas, las amplitudes de las componentes de la señal varían con el tiempo, por lo que el análisis con la FT se vuelve ineficiente.

La base matemática sobre la que se construye la transformada de Fourier son las series de Fourier, mediante las cuales se puede descomponer una función $x(t)$ periódica (con periodo T) y continua [10] en una serie de componentes armónicas de la forma:

$$x(t) = a_0 + a_1 \cos \frac{2\pi t}{T} + a_2 \cos \frac{4\pi t}{T} + \dots + b_1 \sen \frac{2\pi t}{T} + b_2 \sen \frac{4\pi t}{T} + \dots \quad (4.1)$$

o, en notación más compacta,

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos \frac{2\pi kt}{T} + b_k \sen \frac{2\pi kt}{T} \right) \quad (4.2)$$

donde a_0 , a_k y b_k son los coeficientes de Fourier, que vienen dados por:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{T} \int_T x(t) dt \\ a_k &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos \frac{2\pi kt}{T} dt \quad \text{con } k \geq 1 \\ b_k &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sen \frac{2\pi kt}{T} dt \quad \text{con } k \geq 1 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Con el propósito [11] de trabajar con una notación más compacta, se definen las siguientes relaciones:

$$\theta_k = \arctg \frac{b_k}{a_k} \quad (4.4)$$

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad (4.5)$$

Por tanto, se podrían redefinir los coeficientes a_k y b_k como

$$a_k = A_k \cos \theta_k \quad (4.6)$$

$$b_k = A_k \sen \theta_k \quad (4.7)$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación (4.2) correspondiente a la serie de Fourier, se llega a:

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \cos \frac{2\pi kt}{T} - \theta_k) \quad (4.8)$$

Dada su mayor utilidad, se puede escribir la serie de Fourier en forma compleja teniendo en cuenta la fórmula de De Moivre (ecuación 4.9) y las relaciones de Euler (ecuaciones 4.10 y 4.11) [12], [14] y [21].

$$e^{i\phi} = \cos \phi + i \operatorname{sen} \phi \quad (4.9)$$

$$\cos\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) = \frac{1}{2} \left(e^{\frac{i2\pi kt}{T}} + e^{\frac{-i2\pi kt}{T}} \right) \quad (4.10)$$

$$\operatorname{sen}\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) = \frac{1}{2i} \left(e^{\frac{i2\pi kt}{T}} - e^{\frac{-i2\pi kt}{T}} \right) \quad (4.11)$$

Por último, definiendo

$$X_k = \frac{1}{2} (a_k - i b_k) \quad (4.12)$$

se obtiene la serie de Fourier en forma compleja:

$$x(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} X_k e^{i \frac{2\pi kt}{T}} dt \quad (4.13)$$

$$X_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{i \frac{2\pi kt}{T}} dt \quad (4.14)$$

Teniendo en cuenta que

$$\omega_k = \frac{2\pi k}{T} \quad (4.15)$$

la transformada de Fourier $X(\omega)$ de una función $x(t)$ se define como

$$X(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt \quad (4.16)$$

siendo por tanto la transformada inversa de Fourier

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (4.17)$$

4.2.2.- Transformada de Fourier en tiempo discreto (DTFT).

La DTFT es una de las herramientas más poderosas para llevar a cabo el análisis frecuencial de señales. Así, y como se mencionó anteriormente, a partir de señales en tiempo discreto y aperiódico se obtiene un espectro con frecuencia continua y periódica.

Este tipo de transformada de Fourier [29] viene representada por la ecuación 4.18, en la que $x(n)$ es la señal discreta y no periódica, ω la frecuencia y $X(\omega)$ la transformada obtenida (ya en el dominio de la frecuencia).

$$X(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) \cdot e^{-j\omega n} \quad (4.18)$$

$$x(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(\omega) e^{j\omega n} d\omega \quad (4.19)$$

Sin embargo, y a pesar de las buenas cualidades de la DTFT, se utiliza poco a nivel computacional debido a que necesitaría, para entregar un espectro continuo y periódico, que la señal a transformar estuviera presente en todo el tiempo. Esto implicaría la necesidad de poseer un número de muestras infinito, lo cual no es posible debido a la limitada capacidad de los computadores.

4.2.3.- Transformada discreta de Fourier (DFT).

En los procesos reales de adquisición de datos normalmente la señal a analizar no suele ser continua, sino que la adquisición de las medidas experimentales se lleva a cabo mediante técnicas digitales, por lo que se realiza un muestreo de la misma en unos instantes equiespaciados un tiempo Δt , denominado intervalo de muestreo, durante un tiempo T , denominado tiempo de muestreo. Todo esto implica que, con el fin de aplicar la transformada de Fourier a esta nueva señal (discreta) y llevar a cabo su análisis espectral, es necesario modificar dicha transformada, hablando entonces de lo que se conoce como transformada discreta de Fourier (DFT).

Si la serie temporal continua $x(t)$ de la ecuación 4.14 fuera desconocida [10] y no se dispusiera más que de valores muestra uniformemente espaciados representados por la sucesión discreta x_r , con $r=0,1,2,\dots,N-1$, donde N fuera el número de muestras, $t=k\Delta t$ y $\Delta t=T/N$, se podría aproximar

$$X_k = \frac{1}{T} \sum_{r=0}^{N-1} x_r e^{-i(2\pi k/T)(r\Delta t)\Delta t} \quad (4.20)$$

Sustituyendo $T=N\Delta t$ en (4.20) se llega a la definición formal de la transformada discreta de Fourier

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} x_r e^{-i(2\pi kr/N)} \quad \text{con } k=0,1,2,\dots,N-1 \quad (4.21)$$

y de la transformada inversa discreta de Fourier

$$x_r = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{i(2\pi kr/N)} \quad \text{con } k=0,1,2,\dots,N-1 \quad (4.22)$$

Definiendo [15] $\omega_k = 2\pi k/N$, se puede redefinir la DFT quedando por tanto definida por la ecuación (4.23).

$$X(\omega_k) = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} x_r e^{-i(\omega_k r)} \tag{4.23}$$

Por ende, y dado que no se puede tener un número infinito de muestras de la señal, con la DFT no es posible obtener un espectro continuo en frecuencia.

4.2.4.- Transformada rápida de Fourier (FFT).

La transformación matemática de señales [16] se aplica con la finalidad de obtener información adicional que no resulta fácil de obtener con las señales originales, siendo probablemente la transformada de Fourier, y como ya se ha comentado con anterioridad, la más popular.

Uno de los mayores inconvenientes que presenta la transformada discreta de Fourier vista en el apartado anterior, reside en el elevado número de operaciones que debe realizarse para su cálculo. Si se revisa la expresión de la citada transformada (ecuación 4.21) se comprueba que se deberían de realizar un total de N multiplicaciones del término

$$(x_r e^{-i(2\pi kr / N)}) \tag{4.24}$$

para cada uno de los N valores de x_r , lo que supone un total de N^2 multiplicaciones.

Para superar esta dificultad [17], en 1965 Cooley y Tukey desarrollaron un nuevo algoritmo, más rápido y relativamente sencillo, denominado transformada rápida de Fourier (FFT) que permite reducir considerablemente el número de operaciones a efectuar. El funcionamiento básico de la FFT consiste en subdividir la serie X_k en un conjunto de sucesiones de menor número de elementos. Una vez efectuada la subdivisión, se calcula la DFT a cada subconjunto y se combinan entre sí obteniendo finalmente la transformada de la serie original.

De este modo se consigue reducir sustancialmente el número de operaciones a realizar, mejorando por tanto el rendimiento de los procesadores a la hora de llevar a cabo el cálculo de la DFT. Si [10] con la DFT era necesario realizar (para una serie de N valores) N^2 multiplicaciones, con la FFT se reduce este valor a uno de, aproximadamente, $N \cdot \log_2 N$, lo que lleva a una reducción como la mostrada en la Tabla 4.1.

Número de elementos (N)	Relación entre DFT y FFT $\frac{N^2}{N \cdot \log_2 N}$
4	2
16	4
64	10.7
256	32
1024	102.4
4096	341.3
16384	1170.3

Tabla 4.1: Reducción de los cálculos con el uso de FFT frente a DFT.

4.3.- Transformadas de Fourier en tiempo corto.

4.3.1.- Transformada de Fourier en tiempo corto (STFT).

Debido al muestreo de la señal con un periodo finito [2] se presentan una serie de limitaciones y distorsiones en el análisis mediante la FT. Con el fin de eliminar la independencia temporal de la transformada de Fourier y eliminar de este modo algunas de sus limitaciones, en 1946 Gabor definió lo que hoy en día se conoce como transformada de Fourier en tiempo corto (STFT).

La STFT resuelve el problema del análisis de señales no estacionarias mediante la transformada de Fourier, ya que básicamente consiste en dividir la señal en diferentes partes donde se puede asumir que la señal es estacionaria.

Para este propósito, la señal se multiplica por una función ventana, que inicialmente estará localizada al inicio de la señal ($t=0$), cuya anchura debe ser igual a la parte de la señal que se quiere considerar estacionaria. Asumiendo que la anchura de la ventana es de T segundos, esta función se solapará con la señal para los primeros $T/2$ segundos. La función ventana y la señal se multiplican entonces de esta forma solamente los primeros $T/2$ segundos que han sido escogidos de la señal. El resultado de todo esto es una nueva señal producto de la función ventana y de la señal original a la que se le aplica la transformada de Fourier.

El resultado de esta transformación es la transformada de Fourier de los primeros $T/2$ segundos de la señal original y, si esta parte de la señal es estacionaria, quiere decir que los resultados obtenidos mostrarán la representación en frecuencia exacta de los primeros $T/2$ segundos.

El siguiente paso consistirá en desplazar esta ventana a una nueva localización a la que de nuevo se le aplicará la transformada de Fourier. De esta forma, se irá moviendo la ventana a lo largo del tiempo hasta que se haya recorrido toda la señal.

Todo lo anterior [18] se puede resumir en la ecuación

$$STFT_x^w(t', f) = \int_t [x(t) \cdot w^*(t - t')] e^{-j2\pi ft} dt \quad (4.25)$$

en la que

- $x(t)$: señal original.
- w^* : función ventana conjugada.
- f : frecuencia.
- t : tiempo.

En cada instante de tiempo t' y frecuencia f se calcula un nuevo coeficiente de la transformada de Fourier.

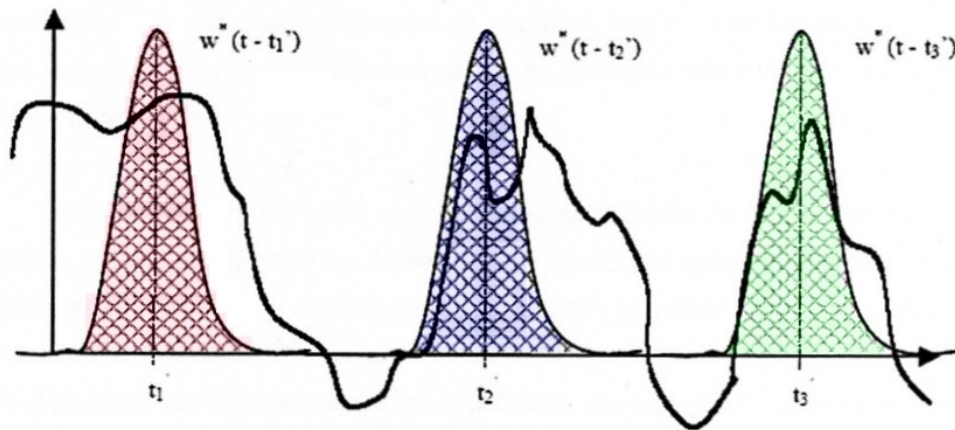


Figura 4.2: Explicación gráfica de la STFT.

En la Figura 4.2 [1] se muestra un ejemplo de una función ventana de tipo Gaussiana. La primera función (roja) tiene la ventana localizada en $t=t_1'$, la segunda (azul) en $t=t_2'$ y la tercera (verde) en $t=t_3'$. Estas ventanas corresponden a tres transformadas de Fourier en tiempos distintos. Por lo tanto, se obtendrá una buena representación tiempo-frecuencia de la señal de entrada.

Además [1], hay que hacer constar que la función ventana está caracterizada por ser real, simétrica (la transformada de Fourier clásica es simétrica y, la STFT, al ser una modificación de esta, también lo es) y de duración finita (esto es un inconveniente ya que, al aplicarse la ventana tan sólo a una parte de la señal, se causa una disminución de la resolución en frecuencia).

Con todo esto se podría llevar a cabo una representación de la STFT de la señal en tres dimensiones (tiempo, frecuencia y amplitud) denominada espectrograma, con la que no sólo se conocerían las componentes de frecuencia de la señal, sino también su localización en el tiempo.

4.3.2.- Transformada discreta de Fourier en tiempo corto (STDFT).

La transformada discreta de Fourier en tiempo corto (STDFT) no es más que la DFT, pero con una ventana de selección. De esta forma, se obtiene un mejor comportamiento a la hora de llevar a cabo un análisis tiempo-frecuencia de las señales.

Mediante la correcta selección de la ventana a utilizar, teniendo en cuenta su duración (resolución temporal), el efecto de truncación y la resolución frecuencial, es posible obtener más ventajas en el análisis tiempo-frecuencia de señales que con otro tipo de transformada de Fourier.

La transformada discreta de Fourier en tiempo corto se utiliza [13] para el análisis tiempo-frecuencia de señales no estacionarias, donde el uso de la transformada de Fourier se hace inadecuado. La STDFT descompone la señal variante en el tiempo en las componentes correspondientes en el dominio tiempo-frecuencia. Por lo tanto, proporciona una penetración en la evolución en el tiempo de cada componente de la señal.

Dada una señal $x(n)$, la STDFT en un tiempo n se define como

$$X_n(e^{j\omega_k}) = \sum_m x(m) \omega(n-m) e^{-j\omega_k m} \quad (4.26)$$

donde

$$\omega_k = \frac{2\pi k}{N} \quad \text{con } k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (4.27)$$

es la frecuencia en radianes; N es el número de muestras; $\omega(m)$ es la ventana simétrica seleccionada, de longitud L , y LON si se necesita la reconstrucción de la señal. El objetivo de la utilización de ventanas consiste en capturar una pequeña parte de la señal durante un periodo de tiempo ΔT , representado por un número de muestras N .

Dado que, como se indicó anteriormente, la STDFT no es más que la DFT con una ventana de selección, si se aplica la DFT a la selección efectuada con la ventana, el espectro resultante contendrá un total de N frecuencias equiespaciadas $\omega = 2\pi k \Delta T$, es decir, una resolución frecuencial $f_{min} = 1/\Delta T$.

4.4.- Elección de ventanas.

El objetivo de una ventana es hacer una selección temporal de la señal a analizar. Mas esta elección no puede realizarse se forma aleatoria debido a los distintos inconvenientes que se presentan a nivel espectral, como pueden ser las pérdidas por ondulación o efecto picket-fence [23]. Una de las formas de minimizar estos inconvenientes del uso de las ventanas consiste en escoger la ventana que presente un “mejor” desempeño.

Dado que no existe una forma exacta en la que se pueda definir qué ventana de selección temporal es la más adecuada para cada aplicación, cabe resaltar que los objetivos principales en las ventanas (a nivel espectral) son:

- Disminución en mayor medida de la fuga espectral. Se logra al realizar una transición suave entre el pico máximo de la ventana y 0, lo que reduce la amplitud de los lóbulos secundarios.
- Tener un ancho de lóbulo principal reducido ya que esto hace posible la identificación de componentes espectrales próximas entre si.

Existen numerosas ventanas, de las cuales sólo se han seleccionado aquellas con un buen índice de desempeño y con implementación propia en Matlab. Las ventanas escogidas son:

- Barlett
- Blackman
- Dolph- Chebyshev
- Flat top
- Gauss- Weierstrass
- Hamming
- Kaiser- Bessel
- Rectangular
- Von Hann

Algunos de los parámetros en función de los cuales se puede evaluar el desempeño de una ventana son:

- *Ganancia coherente (GC)*: da idea del peso entre muestras.
- *ABRE (ancho de banda de ruido equivalente)*: da idea del error que se comete en la estimación de la amplitud en frecuencia de la ventana.
- *Ganancia de procesamiento (GP)*: mide la reducción de las muestras a nivel temporal de la señal original hacia los extremos de la ventana.
- *Pérdidas por ondulación (PO)*: mide las disminuciones de amplitud debidas al muestreo espectral.
- *Porcentaje de dispersión*: mide la cantidad de potencia contenida por los lóbulos laterales de la ventana.
- *Amplitud del 1^{er} lóbulo*: muestra cómo es de grande el lóbulo principal con respecto a los lóbulos laterales.
- *AB de -3db*: es una medida de que tan próximos pueden estar dos componentes espectrales para que puedan llegar a afectar la medida de la frecuencia (da la resolución espectral de la ventana).

En las tablas 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5 se muestran los valores que presentan cada una de las ventanas para estos parámetros.

Tipo de ventana	GC (veces)	ABRE (Muestras)	GP (db)	PO (db)	% De dispersión	Amplitud del 1^{er} lóbulo	AB de -3db (mHZ)
Barlett	0,400	1,875	-5,460	2,851	Nan	Nan	363,62778
Blackman	0,336	2,181	-6,774	3,730	Nan	Nan	410,4264
Dolph	0,535	1,364	-2,694	2,074	0,000	-100,0	258,068112
Flat top	0,178	6,355	-16,062	16,146	99,690	Nan	997,03584
Gauss 2,5	0,401	1,773	-4,972	2,834	Nan	Nan	328,441224
Gauss 5,0							
Gauss 7,5							
Hamming	0,448	1,590	-4,030	2,474	Nan	Nan	297,158724
Kaiser 0,5	0,970	1,001	-0,006	1,400	7,170	-12,6	179,836836
Kaiser 1,5	0,800	1,041	-0,349	1,552	2,060	-17,4	196,003632
Kaiser 2,5	0,633	1,197	-1,558	1,811	0,070	-29,4	230,689668
Rectangular	1,000	1,000	0,000	1,380	8,240	-12,0	179,836836
Von Hann	0,400	1,875	-5,600	2,851	Nan	Nan	363,62778

Tabla 4.2: Índices comparativos entre ventanas para un N de 5 muestras.

Tipo de ventana	GC (veces)	ABRE (Muestras)	GP (db)	PO (db)	% De dispersión	Amplitud del 1 ^{er} lóbulo	AB de -3db (mHZ)
Barlett	0,467	1,443	-3,186	1,251	0,420	-25,3	89,893392
Blackman	0,392	1,850	-5,344	1,332	0,000	-58,8	117,271836
Dolph	0,386	1,865	-5,413	1,338	0,000	-100,0	117,12168
Flat top	0,201	4,041	-12,129	1,817	98,560	0,0	265,876224
Gauss 2,5	0,465	1,533	-3,709	1,259	0,000	-46,8	93,8475
Gauss 5,0	0,234	3,022	-9,607	1,647	Nan	Nan	187,695
Gauss 7,5	0,156	4,535	-13,132	2,200	Nan	Nan	281,29224
Hamming	0,509	1,431	-3,115	1,227	0,040	-39,0	89,893392
Kaiser 0,5	0,977	1,000	-0,004	1,043	8,400	-13,5	58,610892
Kaiser 1,5	0,844	1,025	-0,215	1,077	3,820	-16,7	62,565
Kaiser 2,5	0,705	1,115	-0,943	1,125	0,870	-22,4	70,373112
Rectangular	1,000	1,000	0,000	1,038	9,290	-13,1	58,610892
Von Hann	0,467	1,607	-4,121	1,265	0,050	-31,5	101,655612

Tabla 4.3: Índices comparativos entre ventanas para un N de 15 muestras.

Tipo de ventana	GC (veces)	ABRE (Muestras)	GP (db)	PO (db)	% De dispersión	Amplitud del 1 ^{er} lóbulo	AB de -3db (mHZ)
Barlett	0,497	1,342	-2,557	1,020	0,290	-26,5	8,308632
Blackman	0,417	1,738	-4,803	1,042	0,000	-58,1	10,711128
Dolph	0,369	1,951	-5,806	1,052	0,000	-100,0	122,12688
Flat top	0,214	3,796	-11,586	1,099	98,090	0,0	249,25896
Gauss 2,5	0,492	1,454	-3,249	1,026	0,010	-43,6	8,7941364
Gauss 5,0	0,249	2,840	-9,066	1,079	0,000	-130,2	17,568252
Gauss 7,5	0,166	4,260	-12,588	1,108	0,000	-270,6	26,02704
Hamming	0,537	1,369	-2,731	1,020	0,040	-42,6	8,308632
Kaiser 0,5	0,980	1,000	-0,003	0,965	8,540	-13,6	5,856084
Kaiser 1,5	0,860	1,020	-0,170	0,976	4,380	-16,4	5,50572
Kaiser 2,5	0,733	1,090	-0,749	0,992	1,320	-21,1	6,50676
Rectangular	1,000	1,000	0,000	0,963	9,370	-13,3	5,50572
Von Hann	0,497	1,510	-3,580	1,030	0,050	-31,5	9,284646

Tabla 4.4: Índices comparativos entre ventanas para un N de 150 muestras.

Tipo de ventana	GC (veces)	ABRE (Muestras)	GP (db)	PO (db)	% De dispersión	Amplitud del 1 ^{er} lóbulo	AB de -3db (mHZ)
Barlett	0,500	1,334	-2,505	0,997	0,280	-26,5	0,75078
Blackman	0,420	1,728	-4,750	1,010	0,000	-58,1	0,75078
Dolph	0,370	1,942	-5,764	1,015	0,000	-100,0	0,75078
Flat top	0,215	3,773	-11,533	1,036	97,600	0,0	2,00208
Gauss 2,5	0,495	1,446	-3,206	1,001	0,020	-43,3	0,50052
Gauss 5,0	0,251	2,823	-9,014	1,027	0,000	-128,8	1,7067732
Gauss 7,5	0,167	4,234	-12,536	1,036	0,000	-267,8	2,602704
Hamming	0,540	1,364	-2,693	0,998	0,040	-42,7	0,50052
Kaiser 0,5	0,980	1,000	-0,003	0,964	8,520	-13,6	0,50052
Kaiser 1,5	0,862	1,019	-0,165	0,971	4,390	-16,3	0,50052
Kaiser 2,5	0,735	1,088	-0,731	0,981	1,350	-21,0	0,650676
Rectangular	1,000	1,000	0,000	0,963	9,290	-13,3	0,50052
Von Hann	0,500	1,501	-3,528	1,004	0,050	-31,5	0,900936

Tabla 4.5: Índices comparativos entre ventanas para un N de 1500 muestras.

Al hacer el análisis comparativo entre las ventanas [5], se pueden apreciar que la mayoría de los resultados mejoran a medida que se aumenta la longitud N , también se observa la inexistencia de una ventana que en todos los aspectos sea mejor que las demás, así que se presentan las siguientes conclusiones:

- La Ganancia Coherente debería estar cerca de 0,5 ya que daría pesos próximos entre las muestras dando así una pendiente mas suave, con lo que en teoría mejora el porcentaje de dispersión y disminuye la amplitud de los lóbulos laterales, en cuyo caso las mejores ventanas en este aspecto son Barlett, Gauss-Weierstrass (alfa 2,5), Hamming y Von Hann
- El ABRE es mejor entre menor sea ya que con esto disminuye el error en la estimación de la amplitud en frecuencia de la ventana. Por tanto, el mejor comportamiento en este sentido lo presentan las ventanas Kaiser y rectangular con valores de una muestra.
- La GP, en teoría es mejor entre más cercana a cero se encuentre; la mejor respuesta la presenta la ventana Kaiser.
- En cuanto a las PO, la mejor ventana sería aquella cuyas pérdidas por ondulación fueran lo más pequeñas posibles. Por ende, la ventana regular sería la mejor.
- Con respecto al porcentaje de dispersión, el mejor de los casos es aquel en que menor valor presente. En este caso, la estimación espectral será mejor ya que la frecuencia central, ubicada en el lóbulo principal, tendrá la mayor cantidad de

potencia de la ventana. Las mejores ventanas en este sentido son Barlet, Hamming, Gauss-Weierstrass y Von Hann

- Si se tiene un lóbulo principal muy grande con respecto a los lóbulos laterales, se tiene una mejor estimación del espectro debido a que se reduce el error en la estimación de las frecuencias que no corresponden a la frecuencia central. Las ventanas de Gauss-Weierstrass, Dolph- Chebyshev y Hamming son respectivamente las mejores en este ámbito.
- Por último, y como es de suponerse, se desea la ventana que mejor resolución espectral presente. Por ello será mejor tener un AB de -3dB lo menor posible. En esta ocasión las ventanas Kaiser, Hamming y rectangular son las que mejor se acomodan al parámetro en cuestión.

4.5.- Algoritmo de análisis tiempo-frecuencia.

Para la estimación espectral sobre señales de vibración se propone usar la transformada de Fourier en tiempo corto. En primer lugar se propone hacer la selección de un tramo de la señal a estudiar, que se subdividirá a su vez en varios tramos de señal. Para realizar la selección del primer tramo, se propone usar la ventana rectangular por las siguientes razones:

- Al tener una ganancia coherente igual a la unidad, no afecta la ganancia coherente de los tramos de señal que pueden ser seleccionados con otro tipo de ventana. El mismo efecto tiene el ancho de banda de ruido equivalente, ya que este también tiene un valor de uno.
- Por su fácil implementación y por su correlación con la transformada de Fourier
- Tiene una ganancia de procesamiento igual a cero, es decir que las muestras de la señal cercanas a los extremos de la ventana (n_0+n y n_0+N-1), no se ven doblemente ponderadas, ya que posteriormente se hace otra subdivisión del tramo.

Aunque presenta una dispersión alta y una mala atenuación de los lóbulos laterales, la ventana de selección rectangular resulta ser la mejor candidata para la primera “selección temporal” de la señal, debido a que da libertad a la siguiente subdivisión temporal que se hace sobre la señal ya que no modifica las muestras de la señal original.

En cuanto a la subdivisión del tramo, las mejores ventanas que se pueden utilizar son:

- La ventana de Gauss-Weierstrass por tener una atenuación relativa de lóbulos laterales elevada; como inconvenientes tiene una menor resolución espectral y mayor ABRE.
- La selección hecha por Hamming presenta un porcentaje de dispersión muy pequeño con una atenuación de lóbulos laterales elevada (aprox. -43 dB) además de tener PO pequeñas y ser una de las mejores en resolución espectral.
- La ventana Kaiser-Bessel, (sin contar con la ventana rectangular), presenta el mejor desempeño en cuanto al ABRE se refiere, tiene una GP y PO optimas,

pero la atenuación relativa de los lóbulos laterales es ineficiente en comparación con otras ventanas.

Finalmente se ha dejado a elección del usuario el tipo de ventana a utilizar para el análisis de señales con la finalidad de conseguir una respuesta lo más óptima posible en cada caso. La elección se realizará siguiendo los pasos que se indicarán en el capítulo 6 dedicado al interfaz de usuario.

Después de seleccionar el sub-tramo de la señal, y para mejorar la resolución espectral, se extiende la longitud de éste agregando ceros a la secuencia (*padding de ceros*). Habrá que agregar ceros hasta llegar al número potencia de dos más próximo al número de muestras, pero superior a él (si, por ejemplo, el tramo tiene un total de 820 muestras, se añadirán ceros hasta llegar a una longitud de 1024 muestras). De esta forma se mejora la velocidad de cálculo. El efecto de agregar ceros a la hora de hacer la FFT se puede apreciar en la Figura 4.3, en la que se observa cómo al incrementar las frecuencias de análisis se reducen las pérdidas por ondulación.

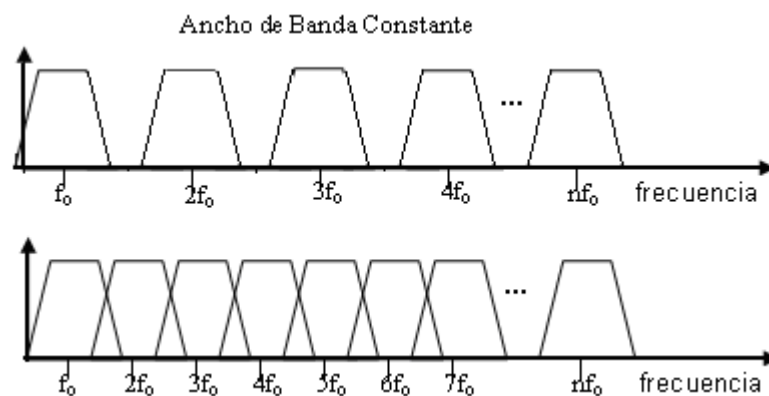


Figura 4.3: Mejoramiento de resolución espectral y reducción de pérdidas por ondulación con agregando ceros a la sucesión temporal

Una vez efectuada la FFT al sub-tramo seleccionado, se van cargando los resultados en una variable denominada “*etga*” y se establecen los tiempos de inicio y fin del siguiente sub-tramo. De esta forma se irán analizando la totalidad de los sub-tramos en que está dividido el tramo seleccionado de la señal.

Como ya se ha mencionado anteriormente, para hacer el calculo en Matlab y usar la FFT de la mejor forma posible se agregan ceros a la señal de vibración hasta que la longitud de ésta sea un numero potencia de dos. De esta forma se trata de obtener una respuesta más rápida dado que el algoritmo que usa Matlab utiliza una implementación altamente eficiente de raíz de dos, dando como resultado un número de operaciones del orden $N \cdot \log_2 \cdot N$ (siendo N el número de muestras) que es mucho menor al numero de operaciones que se tendrían con la longitud original de la señal de vibración ($N^2, N^2/2, N^2/3, N^2/4, \dots$).

Además, el hecho de agregar ceros a las señal original también mejora la “resolución” espectral de la misma, debido a que si se tienen N muestras equiespaciadas en la frecuencia, el delta inicial de frecuencia Δf es igual al rango completo de frecuencias a mostrar sobre el numero de muestras de la señal. De esta manera, al aumentar el numero de muestras de la señal se disminuye el Δf mejorando con esto la

resolución espectral, dado que si se considera el mismo tiempo de observación de la señal, el efecto de agregar muestras no significativas no afecta en nada la señal en el tiempo, pero sí mejora la visualización de la señal en la frecuencia ya que es como si se aumentara la frecuencia de muestreo pero con la diferencia de que la frecuencia máxima sigue siendo la misma. De esta manera se mantiene el teorema de muestreo de Nyquist [30].

Con todo lo expuesto, el algoritmo propuesto para el análisis tiempo-frecuencia de las señales es el mostrado en las figuras 4.4 y 4.5. Con él se conseguirá obtener una ventana tridimensional en la que se representen las variaciones de las distintas señales en el dominio tanto del tiempo como de la frecuencia, y teniendo además una representación de la amplitud de las mismas.

En la primera parte (Figura 4.4) se lleva a cabo la selección de la señal a analizar y el preprocesado de la misma. Una vez seleccionado el tipo de ventana a utilizar se calcula el número de ventanas necesarias para cubrir la totalidad del tramo seleccionado y se calculan los tiempos de inicio y fin de cada ventana. Seguidamente se añaden los ceros necesarios para llegar al número potencia de dos más próximo pero superior al número de muestras.

Una vez efectuado todo este proceso se lleva a cabo la aplicación de la FFT a cada una de las ventanas y se van guardando los resultados en una variable. De esta forma se va realizando el análisis a la totalidad del tramo seleccionado. El algoritmo utilizado se expone en la Figura 4.5.

Además hay que hacer constar que no es posible (al menos actualmente) efectuar este análisis a la señal en su totalidad debido a las enormes necesidades de memoria que supondría.

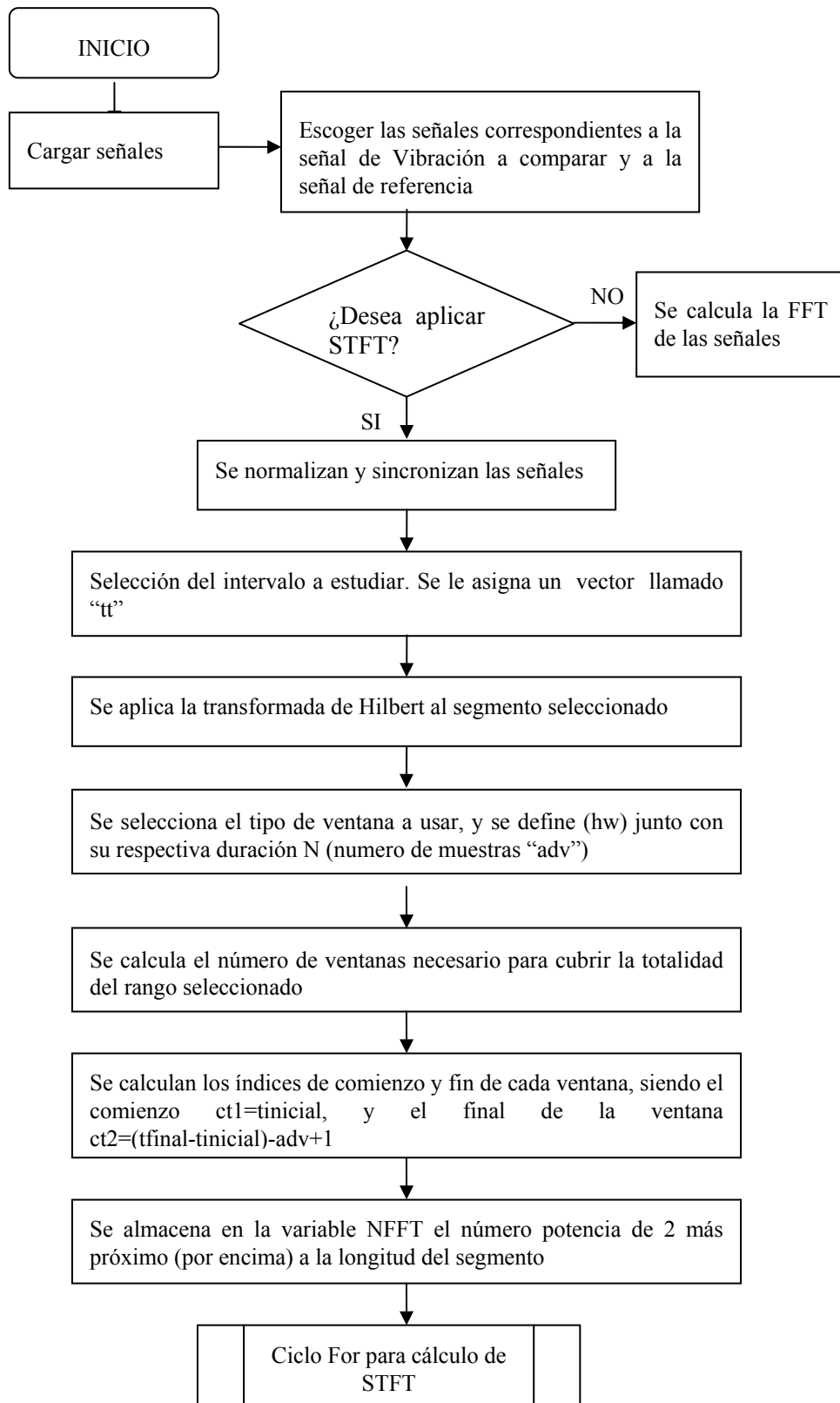


Figura 4.4: Diagrama de flujo para la parte inicial del algoritmo propuesto para el análisis de las señales mediante STFT.

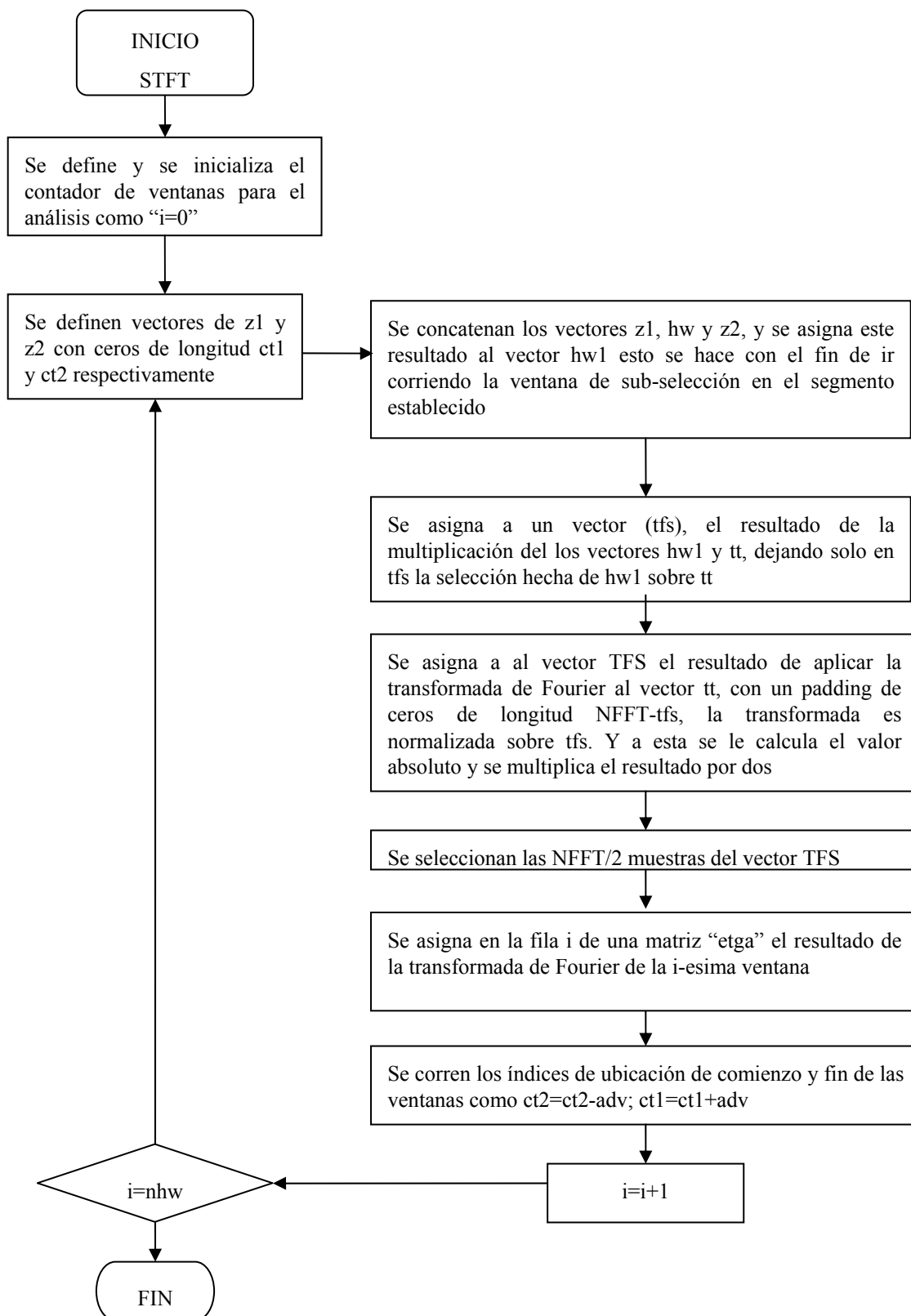


Figura 4.5: Diagrama de flujo para el cálculo de la transformada corta de Fourier.

5.- TRATAMIENTO DE LA SEÑAL.

Para el tratamiento de las señales [5] (el análisis se llevará a cabo con una señal de referencia y con una señal a comparar) se han empleado las técnicas que aparecen en la Figura 5.1. Implementando las mismas con Matlab se trata de hacer una lectura automática de los principales parámetros de las señales como son el número de impulsos de cada señal y el tiempo que transcurre entre dos impulsos consecutivos.

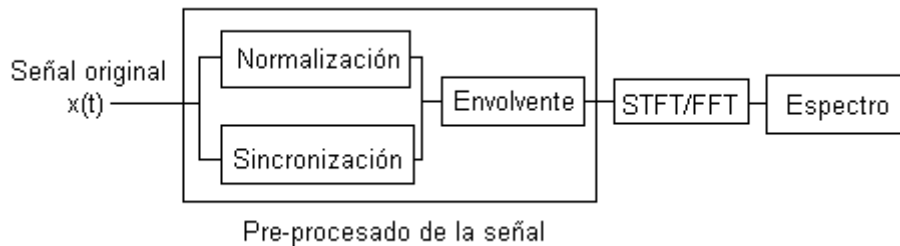


Figura 5.1: Proceso de análisis de la señal.

5.1.- Constitución de un cambiador de tomas en carga.

La estructura básica de un cambiador de tomas en carga (Figura 5.2) consta de los siguientes elementos [5]:

1. Armario de accionamiento y mando
2. Mecanismo de transmisión
3. Selector de tomas (Selector Switch)
4. Cabeza del CTC
5. Conmutador o ruptor (Diverter Switch)



Figura 5.2: Estructura básica de un CTC.

1. Armario de accionamiento y mando.

Se encuentra situado en uno de los laterales exteriores del transformador, y contiene los elementos de mando y maniobra del CTC (contactores de arranque del motor, pulsadores de mando, motor eléctrico, etc.).

2. Mecanismo de transmisión.

Para realizar cambios de una toma a otra, el cambiador de tomas en carga es movido por un mecanismo de accionamiento motorizado, a través de los ejes de transmisión vertical y horizontal y cajas de reenvío en ángulo, al cual se le denomina mecanismo de transmisión.

Un funcionamiento anómalo de cualquiera de los elementos de la transmisión puede provocar una desregulación, es decir, una situación en la que la posición real del CTC no corresponde con la posición indicada en el armario de mando.

3. Selector de tomas.

El selector conduce la corriente de carga de la toma en servicio y selecciona la próxima toma a conectar. Puede contener un preselector o inversor el cual conecta el devanado principal con el devanado de regulación de forma aditiva o de forma sustractiva, permitiendo con ello duplicar las n posiciones.

El selector sólo permite el cambio desde una determinada toma a la toma siguiente o a la precedente, pero nunca el cambio entre dos tomas no correlativas.

El selector es movido por un sistema mecánico sincronizado con el conmutador.

4. Cabeza del CTC.

Se trata de un receptáculo metálico situado en la parte superior del cambiador de tomas en carga al que sirve de soporte.

En su interior se encuentran los mecanismos acumuladores de energía y el accionamiento del selector.

5. Conmutador o ruptor.

Realiza la conmutación, es decir, pasa de una toma a otra sin interrumpir el servicio; para ello utiliza unas resistencias transitorias que limitan la corriente cuando éste opera cortocircuitando dos tomas temporalmente durante el cambio.

El conmutador está inmerso en un depósito de aceite el cual es independiente de la cuba del transformador.

5.2.- Señales de vibración del CTC.

Las señales de vibración del cambiador de tomas en carga al realizar un cambio de toma [49] han sido registradas mediante un acelerómetro colocado en la cabeza del conmutador, calculando las vibraciones verticales (eje y). A modo de ejemplo, en la Figura 5.3 se muestra una señal de vibración del CTC en un cambio de toma.

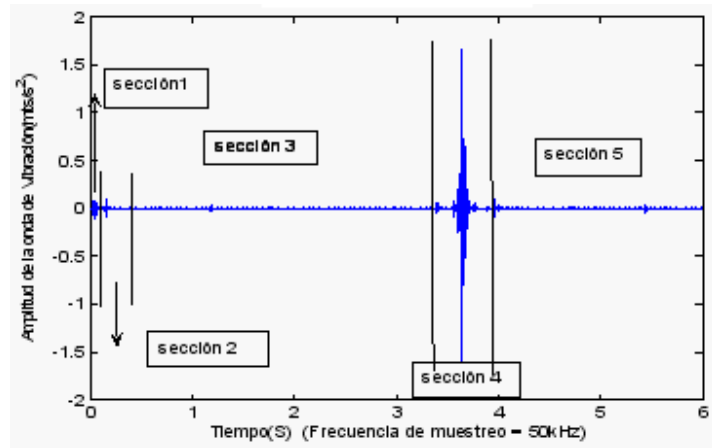


Figura 5.3: Señal de vibración del cambiador en un cambio de toma.

En la Figura 5.3 la señal se ha dividido en cinco secciones:

1. Arranque del motor de accionamiento.
2. Operación de los contactos auxiliares del armario de control
3. Cambio de tomas (conecta la posición de operación seleccionada)
4. Proceso de conmutación
5. Parada del accionamiento a motor

5.3.- Pre-procesado de la señal.

Antes de realizar el análisis de la señal, se efectúa un pre-procesamiento de esta y de una señal elegida como patrón de referencia para propósitos de comparación. En la etapa de pre-procesado se realizan las siguientes fases:

- Normalización de la señal.
- Sincronización de la señal.
- Obtención de la envolvente de la señal mediante la transformada de Hilbert.

5.3.1.- Normalización.

Dividiendo el valor de cada uno de los elementos de la señal entre el valor eficaz de la misma, se obtiene una señal normalizada representada mediante la ecuación 5.1, con lo cual se obtiene una representación menos sensible a las variaciones de amplitud y a las pequeñas variaciones temporales de la señal [27] y [32].

$$señal_norm[n] = \frac{señal[n]}{RMS_{señal}} = \frac{señal[n]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (señal[i])^2}} \quad (5.1)$$

donde

$señal_norm[n]$: Señal normalizada.

$señal[n]$: Señal original.

N : Número de muestras totales de la señal original.

A manera de ejemplo, en la Figura 5.4 se ilustra el proceso de normalización.

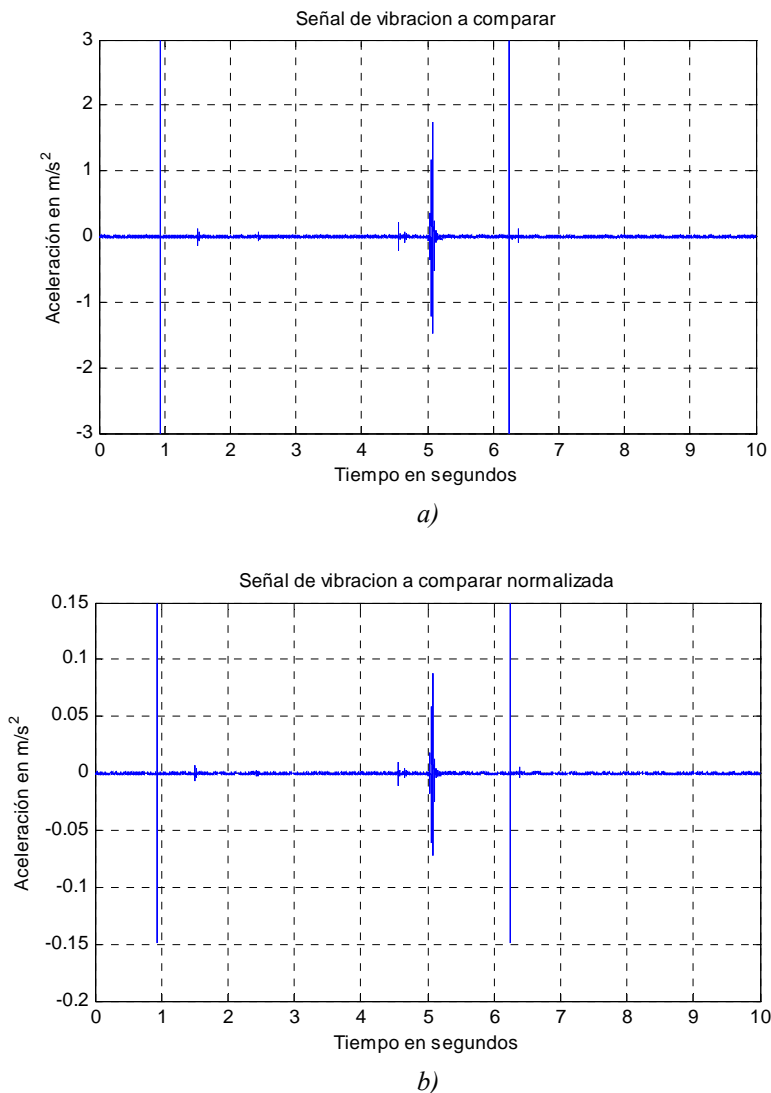


Figura 5.4: Ejemplo de normalización: señal original (a) y señal normalizada (b).

5.3.2.- Sincronización.

La sincronización de señal se efectúa desplazando el eje de tiempo de la señal a analizar con respecto a la señal de referencia o patrón. El tiempo a desplazar, es aquel valor que maximiza el coeficiente de correlación de Pearson entre las dos señales.

El coeficiente de correlación de Pearson (r) [26] es un índice estadístico que mide la relación lineal entre dos variables cuantitativas. A diferencia de la covarianza, la correlación de Pearson es independiente de la escala de medida de las variables.

El cálculo del coeficiente de correlación lineal se realiza dividiendo la covarianza por el producto de las desviaciones estándar de ambas variables (ecuación 5.2).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (señal_1[i] - \overline{señal_1[i]})(señal_2[i] - \overline{señal_2[i]})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (señal_1[i] - \overline{señal_1[i]})^2 (señal_2[i] - \overline{señal_2[i]})^2}} \quad (5.2)$$

donde

$señal_1[i]$: Señal normalizada de vibración “1”.

$señal_2[i]$: Señal normalizada de vibración “2”.

$\overline{señal_1[i]}$: Valor medio de la señal de vibración “1”.

$\overline{señal_2[i]}$: Valor medio de la señal de vibración “2”.

N : Número de muestras de la señal de vibración.

El valor del índice de correlación varía en el intervalo $[-1, +1]$:

- Si $r = 0$, no existe relación lineal. Pero esto no necesariamente implica una independencia total entre las dos variables, es decir, que la variación de una de ellas puede influir en el valor que pueda tomar la otra, pudiendo haber relaciones no lineales entre las dos variables.
- Si $r = 1$, existe una correlación positiva perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables denominada *relación directa*: cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace en idéntica proporción.
- Si $0 < r < 1$, existe una correlación positiva.
- Si $r = -1$, existe una correlación negativa perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables llamada *relación inversa*: cuando una de ellas aumenta, la otra disminuye en idéntica proporción.
- Si $-1 < r < 0$, existe una correlación negativa.

En las figuras 5.5 y 5.6 se muestran un ejemplo de sincronización entre dos señales de vibración normalizadas. Así, en la Figura 5.5 en la que todavía no se ha llevado a cabo el proceso de sincronización, se puede ver claramente que entre las señales normalizadas existe un cierto desfase (0.087 segundos). Además, su coeficiente de correlación es muy bajo (0.000218). Sin embargo, una vez efectuada su sincronización (Figura 5.6), la señal a comparar (azul) sufre un desplazamiento de su eje de tiempos de manera que el índice de correlación entre ambas señales se haga máximo (0.01436).

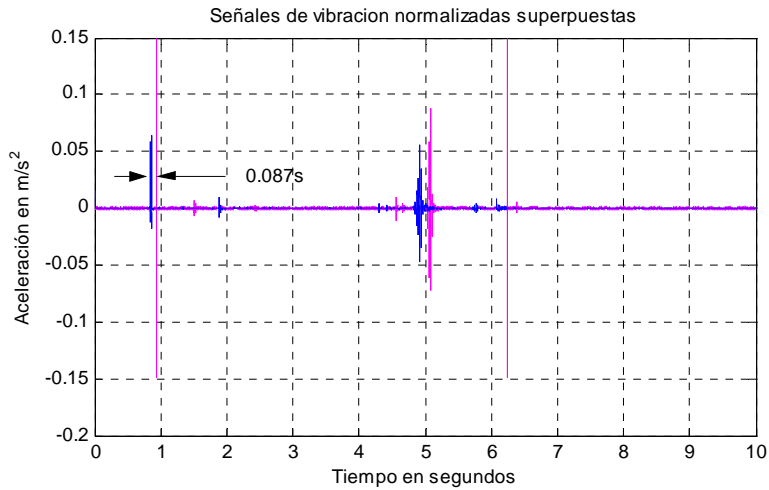


Figura 5.5 Señales de vibración normalizadas superpuestas (rosa: señal de referencia; azul: señal a comparar).

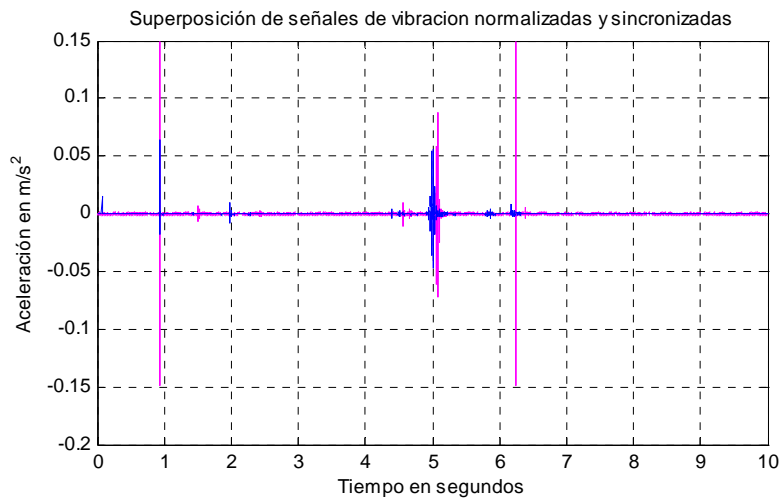
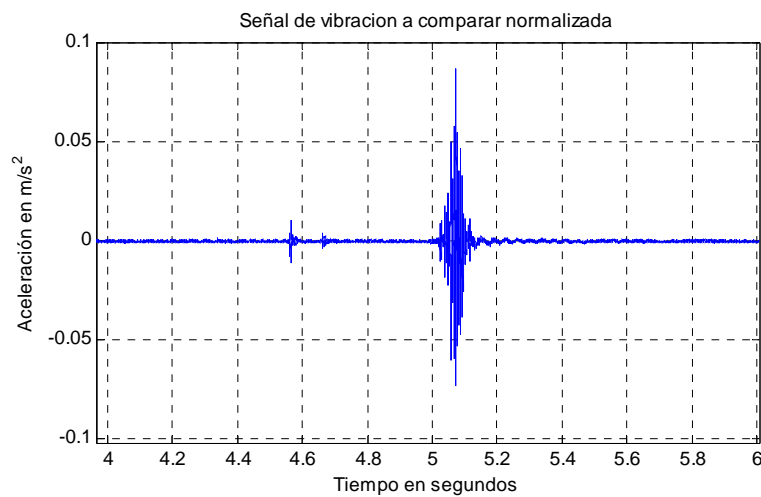


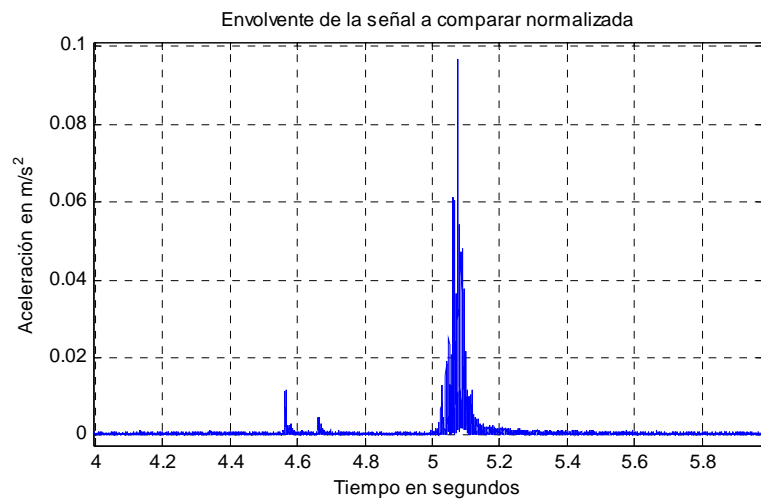
Figura 5.6: Señales de vibración normalizadas y sincronizadas superpuestas (rosa: señal de referencia; azul: señal a comparar).

5.3.3.- Transformada de Hilbert.

Se ha validado [27] que el análisis de la envolvente de una señal hace más sencilla la interpretación de la misma. Por este motivo, una vez efectuada la normalización y sincronización de las señales de vibración se les ha aplicado la transformada de Hilbert, consiguiendo extraer de esta forma su envolvente (Figura 5.7).



a)



b)

Figura 5.7: Señal de vibración normalizada (a) y su transformada de Hilbert (b).

5.3.3.1.- Definición de la transformada de Hilbert.

La transformada de Hilbert [11] puede definirse de tres modos diferentes:

- como integral de convolución.
 - como sistema de cambio de fase.
 - como parte imaginaria de una señal analítica.
- *Definición como integral de convolución.*

La transformada de Hilbert de una función $x(t)$ real en el intervalo $-\infty < t < \infty$ es una función de valores reales $\tilde{x}(t)$ definida como la convolución de $x(t)$ y $(1/\pi t)$, que en forma de ecuación puede expresarse como:

$$\tilde{x}(t) = x(t) \cdot \left(\frac{1}{\pi t} \right) \quad (5.3)$$

o, en forma integral:

$$\tilde{x}(t) = H[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(u)}{\pi(t-u)} du \quad (5.4)$$

A partir de la ecuación integral, se puede definir la transformada inversa de Hilbert como:

$$x(t) = H^{-1}[\tilde{x}(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\tilde{x}(u)}{\pi(t-u)} du \quad (5.5)$$

- *Definición como sistema de cambio de fase.*

Supóngase que $X(f)$ es la transformada de Fourier de $x(t)$, y que viene dada por la ecuación 5.6:

$$X(f) = \int x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (5.6)$$

Si $\tilde{X}(f)$ es la transformada de Fourier de $\tilde{x}(t)$

$$\tilde{X}(f) = F[\tilde{x}(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{x}(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (5.7)$$

y además se tiene en cuenta que la definición del producto de convolución es

$$\tilde{x}(t) = x(t) \cdot \left(\frac{1}{\pi t} \right) \quad (5.8)$$

y que la transformada de Fourier de $(1/\pi t)$ se puede expresar como

$$F\left[\frac{1}{\pi t}\right] = -j \cdot \text{sgn } f = \begin{cases} -j & \text{para } f > 0 \\ 0 & \text{para } f = 0 \\ j & \text{para } f < 0 \end{cases} \quad (5.9)$$

se puede concluir que $\tilde{X}(f)$ es el resultado de multiplicar $X(f)$ por la transformada de Fourier de $(1/\pi t)$ [24]:

$$\tilde{X}(f) = (-j \cdot \text{sgn } f) \cdot X(f) \quad (5.10)$$

La variable compleja $\tilde{X}(f)$ no es la transformada de Hilbert de la variable compleja $X(f)$. Además, la relación existente entre $\tilde{X}(f)$ y $\tilde{x}(t)$ consiste en que esta última es la transformada inversa de Fourier de $\tilde{X}(f)$:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) \cdot e^{j2\pi ft} \cdot df \quad (5.11)$$

La transformada de Fourier de $(1/\pi t)$, $(-j \operatorname{sgn} f)$, puede ser representada como $B(f)$:

$$B(f) = -j \cdot \operatorname{sgn} f = \begin{cases} e^{-j\frac{\pi}{2}} & \text{para } f > 0 \\ 0 & \text{para } f = 0 \\ e^{j\frac{\pi}{2}} & \text{para } f < 0 \end{cases} \quad (5.12)$$

Esto es, $B(f)$ es un sistema de cambio de fase de $(\pi/2)$, donde

$$\begin{aligned} |B(f)| &= 1 && \text{para todo } f \neq 0 \\ \phi_b(f) &= \begin{cases} \frac{\pi}{2} & \text{para todo } f > 0 \\ -\frac{\pi}{2} & \text{para todo } f < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (5.13)$$

Expresando $X(f)$ como

$$X(f) = |X(f)| \cdot e^{-j\phi_x(f)} \quad (5.14)$$

se podría decir que

$$\tilde{X}(f) = |\tilde{X}(f)| \cdot e^{-j\tilde{\phi}_x(f)} = |X(f)| \cdot e^{-j[\phi_x(f) + \phi_b(f)]} \quad (5.15)$$

Como resumen de todo lo anterior, se llega a la conclusión de que la transformada de Hilbert consiste en pasar $x(t)$ a través de un sistema que deja la magnitud de $X(f)$ inalterada, pero cambia la fase de $\phi_x(f)$ a $[\phi_x(f) + \phi_b(f)]$. Entonces, si se utilizan los valores de $\phi_b(f)$ anteriormente citados en la ecuación 5.13, resulta que:

$$\begin{aligned} \phi_x(f) &\Rightarrow \phi_x(f) + \left(\frac{\pi}{2}\right) && \text{para } f > 0 \\ \phi_x(f) &\Rightarrow \phi_x(f) - \left(\frac{\pi}{2}\right) && \text{para } f < 0 \end{aligned} \quad (5.16)$$

Es decir, se efectúa un cambio de fase de $(\pi/2)$ para frecuencias positivas, y de $(-\pi/2)$ para frecuencias negativas.

La transformada inversa de Hilbert para este tipo de definición se puede expresar como:

$$x(t) = F^{-1} \left[(j \cdot \operatorname{sgn} f) \cdot \tilde{X}(f) \right] \quad (5.17)$$

- *Definición como parte imaginaria de una señal analítica.*

Se define una señal analítica $z(t)$ como un número complejo, con parte real $x(t)$ y con parte compleja la transformada de Hilbert $\tilde{x}(t)$, expresada mediante la ecuación 5.18:

$$z(t) = x(t) + j \cdot \tilde{x}(t) = A(t) \cdot e^{j\theta(t)} \quad (5.18)$$

donde

$$A(t) = \sqrt{x^2(t) + \tilde{x}^2(t)} \quad (5.19)$$

se denomina *señal envolvente* de $x(t)$ y

$$\theta(t) = \tan^{-1} \left[\frac{\tilde{x}(t)}{x(t)} \right] = 2\pi \cdot f_0 \cdot t \quad (5.20)$$

se denomina *señal de fase instantánea* de $x(t)$.

La frecuencia instantánea f_0 viene dada por

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (5.21)$$

Considerando que $Z(f)$ es la transformada de Fourier de $z(t)$,

$$Z(f) = F[z(t)] = F[x(t) + j\tilde{x}(t)] = F[x(t)] + j \cdot F[\tilde{x}(t)] = X(f) + j \cdot \tilde{X}(f) \quad (5.22)$$

y la transformada inversa de Fourier de $Z(f)$ entonces será:

$$z(t) = F^{-1}[Z(f)] = x(t) + j \cdot \tilde{x}(t) \quad (5.23)$$

donde

$$\tilde{x}(t) = H[x(t)] = \text{Im}[z(t)] \quad (5.24)$$

5.3.3.2.- Cálculo de la transformada de Hilbert.

Una vez definida la transformada de Hilbert, el siguiente paso consiste en determinar el modo en el cual se puede calcular.

Empleando las definiciones de la transformada de Hilbert como sistema de cambio de fase (ecuación 5.10) y como parte imaginaria de una señal analítica, se llega a la expresión 5.25:

$$Z(f) = X(f) + j \cdot \tilde{X}(f) = (1 + \text{sgn } f) \cdot X(f) = B_1(f) \cdot X(f) \quad (5.25)$$

en la que los valores de $B_1(f)$ serán:

$$B_1(f) = \begin{cases} 2 & \text{para } f > 0 \\ 1 & \text{para } f = 0 \\ 0 & \text{para } f < 0 \end{cases} \quad (5.26)$$

Como conclusión, se aprecia que mediante una transformación muy simple, se puede obtener $Z(f)$ a partir de $X(f)$. Es decir, en primer lugar se calcularía $X(f)$ para todo f y después se definiría $Z(f)$ como

$$Z(f) = \begin{cases} 2 \cdot X(f) & \text{para } f > 0 \\ X(0) & \text{para } f = 0 \\ 0 & \text{para } f < 0 \end{cases} \quad (5.27)$$

Desde un punto de vista eminentemente práctico, la forma más recomendable de calcular la transformada de Hilbert sería obtener la transformada inversa de Fourier de $Z(f)$, lo cual daría el valor de $z(t)$ y, a partir de éste y mediante la definición de la transformada de Hilbert como parte imaginaria de una señal analítica, obtener la misma empleando la ecuación $\tilde{x}(t) = H[x(t)] = \text{Im}[z(t)]$.

Todo lo expuesto anteriormente puede resumirse con las ecuaciones siguientes:

$$x(t) = \text{Re} \left[2 \int_0^{\infty} X(f) \cdot e^{j2\pi ft} df \right] \quad (5.28)$$

$$\tilde{x}(t) = \text{Im} \left[2 \int_0^{\infty} X(f) \cdot e^{j2\pi ft} df \right] \quad (5.29)$$

5.3.3.3.- Cálculo de la transformada discreta de Hilbert.

Una vez calculada la transformada, se debe obtener una expresión que permita operar con señales discretas obtenidas a partir del muestreo de la señal temporal. Para ello, se parte como base de la expresión de la transformada de Fourier inversa discreta:

$$x_n = x(n \cdot \Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{i(2\pi kn/N)} \quad \text{con } n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (5.30)$$

Realizando las transformaciones pertinentes en las ecuaciones 5.28 y 5.29 se obtiene, para $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$:

$$x(n \cdot \Delta t) = 2 \cdot \Delta f \cdot \text{Re} \left[\sum_{k=0}^{\frac{N}{2}} X(k \cdot \Delta f) \cdot e^{j \frac{2\pi kn}{N}} \right] \quad (5.31)$$

$$\tilde{x}(n \cdot \Delta t) = 2 \cdot \Delta f \cdot \text{Im} \left[\sum_{k=0}^{\frac{N}{2}} X(k \cdot \Delta f) \cdot e^{j \frac{2\pi kn}{N}} \right] \quad (5.32)$$

en las que

$$\Delta f = \frac{1}{N \cdot \Delta t} \quad (5.33)$$

y

$$X(k \cdot \Delta f) = \Delta t \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x(n \cdot \Delta t) \cdot e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (5.34)$$

Debido al criterio de Nyquist, los valores de $X(k \cdot \Delta f)$ necesarios para obtener los valores discretos de $x(n \cdot \Delta t)$ y de la transformada de Hilbert $\tilde{x}(n \cdot \Delta t)$ van desde $k=0$ hasta $k=N/2$ [11]. Por tanto, es posible expresar analíticamente la envolvente discreta de la señal $x(t)$ mediante la ecuación 5.35:

$$A(n \cdot \Delta t) = \sqrt{x^2(n \cdot \Delta t) + \tilde{x}^2(n \cdot \Delta t)} \quad (5.35)$$

A continuación, y a modo de ejemplo, en la Figura 5.8 se representan varias señales junto con sus transformadas $\tilde{x}(t)$ y sus envolventes.


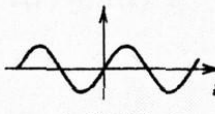
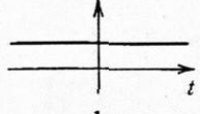
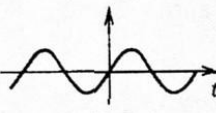
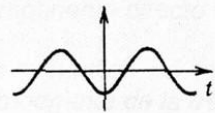

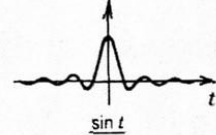
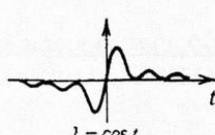
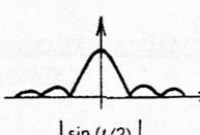
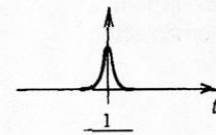
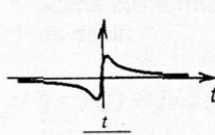
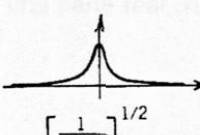
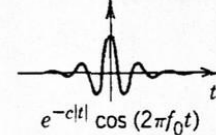
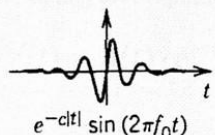
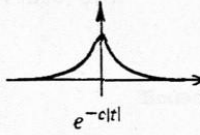
$x(t)$	$\tilde{x}(t)$	$A(t)$
 $\cos(2\pi f_0 t)$	 $\sin(2\pi f_0 t)$	 1
 $\sin(2\pi f_0 t)$	 $-\cos(2\pi f_0 t)$	 1
 $\frac{\sin t}{t}$	 $\frac{1 - \cos t}{t}$	 $\left \frac{\sin(t/2)}{(t/2)} \right $
 $\frac{1}{1+t^2}$	 $\frac{t}{1+t^2}$	 $\left[\frac{1}{1+t^2} \right]^{1/2}$
 $e^{-c t } \cos(2\pi f_0 t)$	 $e^{-c t } \sin(2\pi f_0 t)$	 $e^{-c t }$

Figura 5.8: Ejemplos de la transformada de Hilbert y de la envolvente de varias señales.

5.3.3.4.- Propiedades de la transformada de Hilbert.

Algunas de las propiedades de la transformación de Hilbert [5] son:

- La transformación de Hilbert conserva la energía de la señal.
- La transformación de Hilbert de una señal deja el valor de las componentes armónicas de la señal inalteradas pero cambia su desfase en $\pi/2$.
- Definiendo $F(\omega)$ como la transformada de Fourier de $x(t)$, la transformada de Fourier de $\tilde{x}(t)$ es $j \cdot \text{sgn}(\omega)F$. Debido a esto, una función y su transformada de Hilbert son ortogonales, luego

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \int_{-r}^r x \cdot \tilde{x} \, du = 0 \quad (5.36)$$

5.4.- Transformada de Fourier.

Una de las herramientas más importantes para el análisis y procesamiento de señales es la transformada de Fourier, sobre todo cuando se aplica a señales estacionarias. Se define como:

$$F[x(t)] = X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (5.37)$$

Esta transformada, como ya se comentó a lo largo del capítulo 4.2.1, proporciona el contenido de frecuencias de las señales. Sin embargo, mientras que para señales periódicas este contenido permanece invariante, para señales no estacionarias cualquier cambio brusco en el dominio del tiempo de la señal se hace extensivo también a todo el dominio de frecuencia, por lo que muchos de los aspectos temporales de la señal, tales como el comienzo y fin de la señal, así como los instantes de aparición de singularidades no pueden analizarse adecuadamente con este tipo de transformada [28].

Como ya se dedicó un apartado a la transformada de Fourier, para profundizar más en este tema se recomienda consultar el apartado 4.2 junto con las referencias que aparecen en él.

5.5.- Transformada de Fourier en tiempo corto (STFT).

En aras de eliminar los inconvenientes que se presentan con la transformada de Fourier para el caso de señales no estacionarias, sobre 1946 Gabor definió la transformada de Fourier en tiempo corto (STFT), que se basa en la utilización de ventanas temporales en las que se puede suponer que la señal es estacionaria. Este tipo de transformada se puede expresar mediante la ecuación 5.38:

$$STFT_x^w(t', f) = \int_t [x(t)w^*(t-t')] e^{-j2\pi ft} \cdot dt \quad (5.38)$$

Dado que ya se dedicó un apartado específico para las transformadas de Fourier en tiempo corto (4.3), y en concreto para la STFT (4.3.1), así como para la elección de las ventanas temporales (4.4), para una mayor profundización en el tema se insta al lector a consultar los mencionados apartados así como las referencias que aparecen en los mismos.

5.6.- Detección de impulsos.

Para un correcto análisis de señales de vibración se hace imprescindible conocer, el número de impulsos, los tiempos de inicio y fin de cada uno de los impulsos presentes en la señal y la duración de los mismos. El número de impulsos de un cambiador de tomas en buen estado depende del tipo de fabricante y el modelo del cambiador; para este estudio en particular el cambiador de tomas en carga la señal en buen estado presentaba un total de 6 impulsos.

Con el objetivo de hallar estos tiempos, en primer lugar se procederá a calcular la energía de la señal que, para el caso de señales continuas, es:

$$E = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T x^2(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt \quad (5.39)$$

en la que

$x(t)$: señal a la que se calcula la energía.

T : periodo de la señal.

Dado que la mayoría de las señales que se encuentran no son realmente continuas, se hace necesario expresar esta energía en forma discreta [31] según la ecuación 5.40

$$E = T_s \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=-N}^N |x^2(n)| = \frac{1}{F_s} \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=-N}^N |x^2(n)| \quad (5.40)$$

siendo T_s el tiempo entre espaciamento de las muestras y, por tanto, F_s la frecuencia de muestreo.

Una vez efectuado el cálculo de energía, se procede a fijar un umbral. La elección de éste se basa en la captura del mayor porcentaje de energía de la señal, con el fin de preservar el mayor número de impulsos (incluso los de menor contenido energético como son el 2, 3 y 4), pero asegurándose de no tener en cuenta los posibles espurios (o señales indeseadas que parecen impulsos) presentes en la señal. De esta forma, en cada tramo en que la energía supere dicho valor umbral se entenderá que existe un impulso de la señal, estableciendo así los tiempos de inicio y fin de cada uno de los impulsos.

6.- INTERFAZ DE USUARIO.

Con el fin de realizar un análisis tiempo-frecuencia de las señales de vibración de un CTC de forma fácil, se ha implementado una interfaz de usuario utilizando el entorno de programación en MATLAB denominado GUIDE.

6.1.- Introducción al entorno gráfico.

Para iniciar la herramienta GUIDE, se ejecuta el comando “*guide*” en la ventana de comandos de MATLAB, o en su defecto se presiona sobre el icono correspondiente de la barra de herramientas del citado programa.

Una vez realizada alguna de estas dos acciones, se presenta la siguiente pantalla de inicio (Figura 6.1):

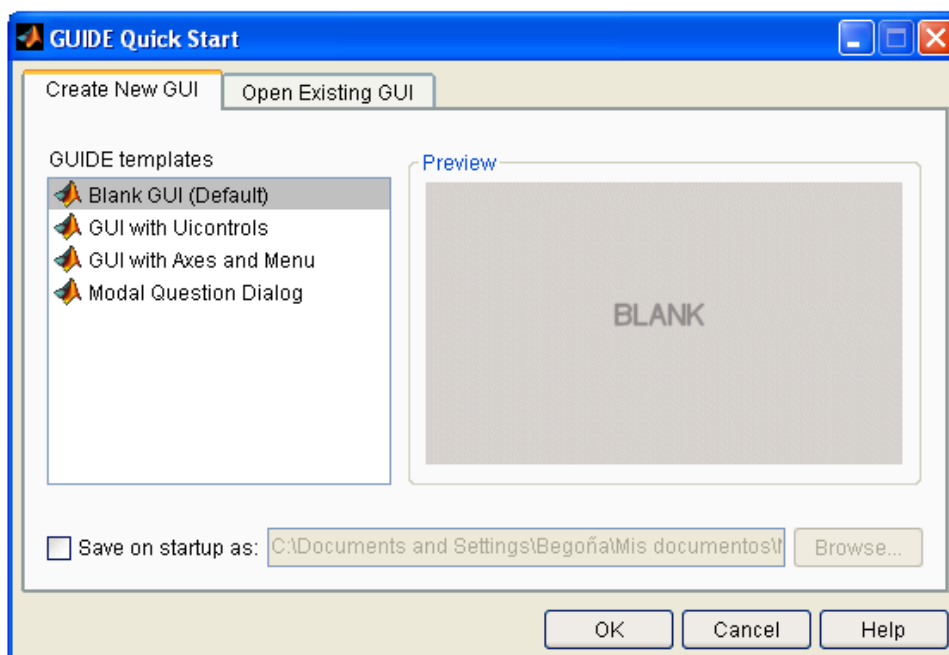


Figura 6.1: Ventana de inicio de GUIDE.

En ella se elige entre abrir una interfaz gráfica existente para modificarla (Open Existing GUI) o crear una nueva (Create New GUI). Dentro de esta última pestaña se presentan las siguientes opciones:

a) Blank GUI (Default).

Con la opción de interfaz gráfica de usuario en blanco (viene predeterminada), se presenta un formulario nuevo en el que se puede diseñar el programa (esta ha sido la opción elegida para diseñar las distintas ventanas que componen la interfaz para el análisis de las señales de vibración del CTC).

b) GUI with Uicontrols.

Esta opción presenta un ejemplo con controles que se puede ejecutar, obteniendo así resultados.

c) *GUI with Axes and Menu.*

Esta opción es otro ejemplo en el que se puede encontrar un menú y un cuadro gráfico.

d) *Modal Question Dialog.*

Con esta opción se muestra en la pantalla un cuadro de diálogo común, el cual consta de una pequeña imagen, una etiqueta y dos botones *Yes* y *No*. Dependiendo del botón que se presione el GUI retorna el texto seleccionado (la cadena de caracteres 'Yes' o 'No').

Al seleccionar crear una nueva interfaz partiendo de un área de trabajo en blanco aparece la siguiente ventana (Figura 6.2):

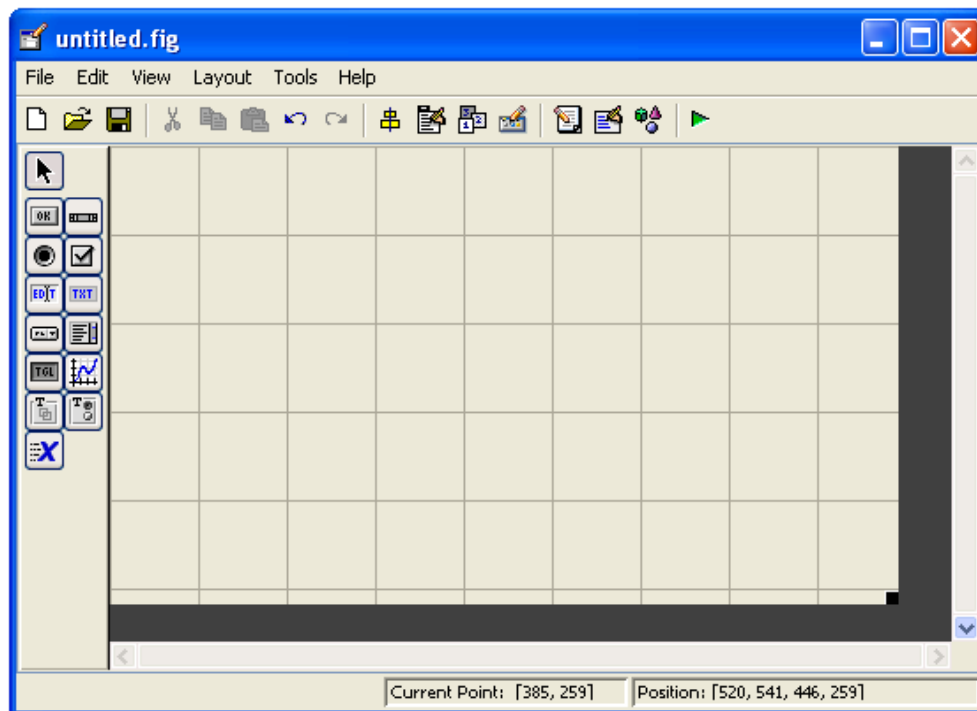











Figura 6.2: Entorno de diseño de GUI.

En ella se puede comprobar cómo además de los componentes habituales de la barra de herramientas (nuevo, abrir, guardar, cortar, copiar, pegar,...), existen una serie de componentes especiales (Figura 6.3) que ayudan a diseñar la interfaz mediante la edición y personalización de las propiedades de los distintos objetos que se vayan añadiendo, y el alineamiento y ordenación de los mismos.

	Alinear objetos.
	Editor de menú.
	Editor de orden de etiqueta.
	Editor del M-file.
	Propiedades de objetos.
	Navegador de objetos.
	Grabar y ejecutar (ctrl. + T).

Figura 6.3: Herramientas de GUI.

Del mismo modo, se presentan una serie de botones (se pueden ver en la parte izquierda de la Figura 6.2, junto al área de diseño) cuya finalidad es ayudar en la inserción los elementos que formarán parte del interfaz; para insertar los distintos elementos bastará con presionar sobre cualquiera de estos botones y arrastrar el ratón sobre el área de trabajo. Así, los controles utilizados para la elaboración de la interfaz del presente proyecto son los siguientes:

- *Check box*: Representado por el símbolo  indica el estado de una opción o atributo (activado o desactivado).
- *Editable text*: Su símbolo es  y se trata de una caja para editar texto, de forma que se pueda escribir en ella con el fin de introducir datos necesarios para el análisis. También se puede utilizar para presentar resultados.
- *List box*: El botón que representa este control es , y muestra una lista deslizable mediante la cual se permite la selección de una de las distintas opciones que se presentan.
- *Push button*: Se trata de un botón que, tras ser presionado, invoca un evento inmediatamente. Su símbolo es .
- *Radio button*: Indica una opción que puede ser seleccionada, y se representa mediante .
- *Static text*: Representado por  muestra una cadena de texto en una caja. Se puede utilizar, bien para ubicar un texto fijo en una ventana, o bien para presentar resultados.
- *Panel button*: Agrupa distintos elementos formando un único conjunto. El botón que lo representa es .
- *Button group*: Su representación es , y agrupa varios radio buttons permitiendo la exclusividad de selección entre ellos (de todos los que formen el grupo, tan sólo se permite que pueda haber un radio button seleccionado).
- *Toggle button*: Es un botón que posee dos estados según esté presionado o no: “on” y “off”. Cada vez que se haga presión sobre él su estado cambiará. Se representa por .

Cada uno de estos elementos de GUIDE tiene un conjunto de opciones a las que es posible acceder presionando el botón derecho del ratón, y que habrá que ir modificando para lograr programar correctamente el interfaz. Entre las opciones más importantes se encuentran:

- *Value*: establece el valor inicial del control; 0 indica que está desactivado y 1 que está activado.
- *Enable*: indica si se permite al usuario interactuar o no con el elemento; sus valores son *on* (permitido) y *off* (no permitido).

- *Tag*: es la opción más importante de todas las que se presentan ya que se trata de la etiqueta con la que se identifica (de forma unívoca) a cada uno de los elementos de la ventana.
- *String*: cadena de texto que aparece con cada elemento.
- *Visible*: establece si el elemento aparece o no en la ventana; en caso de poder ser visto por el usuario su valor será *on*; en caso contrario su valor será *off*.

Por último, una aplicación GUIDE consta de dos archivos asociados: *.m* y *.fig*. Así, mientras el archivo *.m* contiene el código con las correspondencias de los botones de control de la interfaz (subrutinas que se ejecutarán cuando se realice una determinada acción sobre cada uno de los elementos que la componen), el archivo *.fig* es el que contiene los elementos gráficos. De este modo, cada vez que se añada un nuevo elemento gráfico en la interfaz, se generará automáticamente un código asociado a dicho elemento en el archivo *.m* correspondiente.

6.2.- Interfaz gráfica de usuario.

Para comenzar a utilizar la aplicación es necesario teclear “*interfaz*” en la ventana de comandos de MATLAB. Seguidamente aparece la ventana de presentación del interfaz (Figura 6.4), en la que se muestra el título del programa y un botón de entrada a la aplicación (será necesario presionar dicho botón para comenzar con el programa).

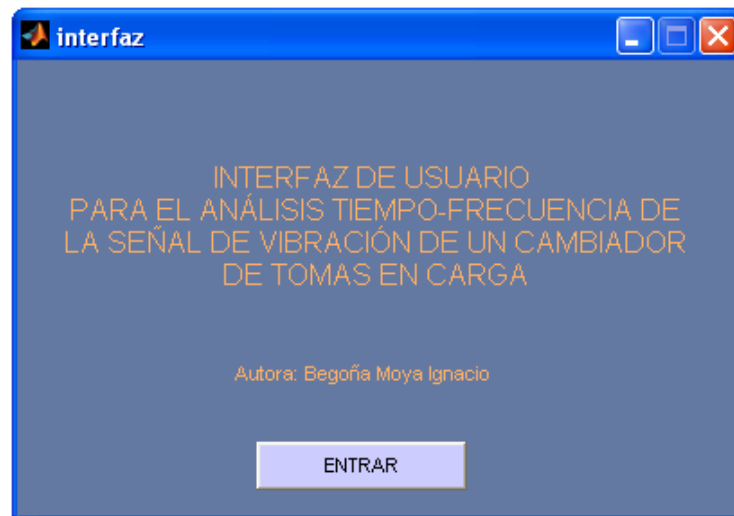


Figura 6.4: Ventana de presentación del interfaz.

Una vez dentro de la aplicación, la ventana que aparece es “*Entrada_datos*” (Figura 6.5). En ella, y mediante una caja de texto editable, se debe introducir manualmente (tecleándola) la frecuencia de muestreo (en Hz) que se quiera utilizar en el análisis. Además, hay que seleccionar, con ayuda de los dos radio buttons que aparecen, el tipo de extensión que tiene la señal de vibración que se va a comparar (se puede elegir entre **.mat* o **.txt*).

Marcando cualquiera de las dos opciones posibles aparecerá una ventana de diálogo (Figura 6.6) con el fin de poder elegir, de entre todos los archivos con la

extensión que se haya seleccionado previamente que se encuentren en la carpeta correspondiente, la señal de vibración a comparar.

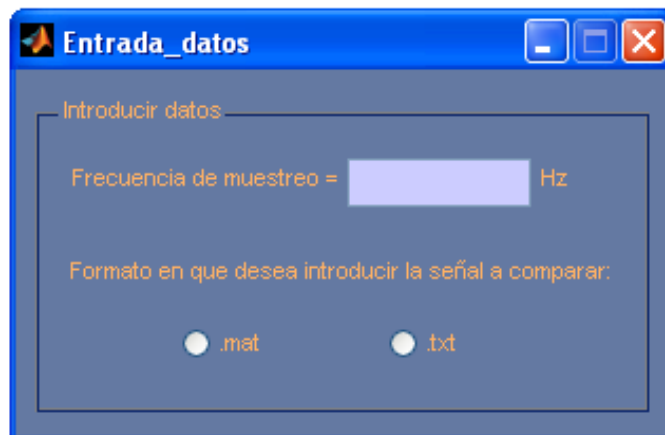


Figura 6.5: Ventana de introducción de datos de la señal de vibración.

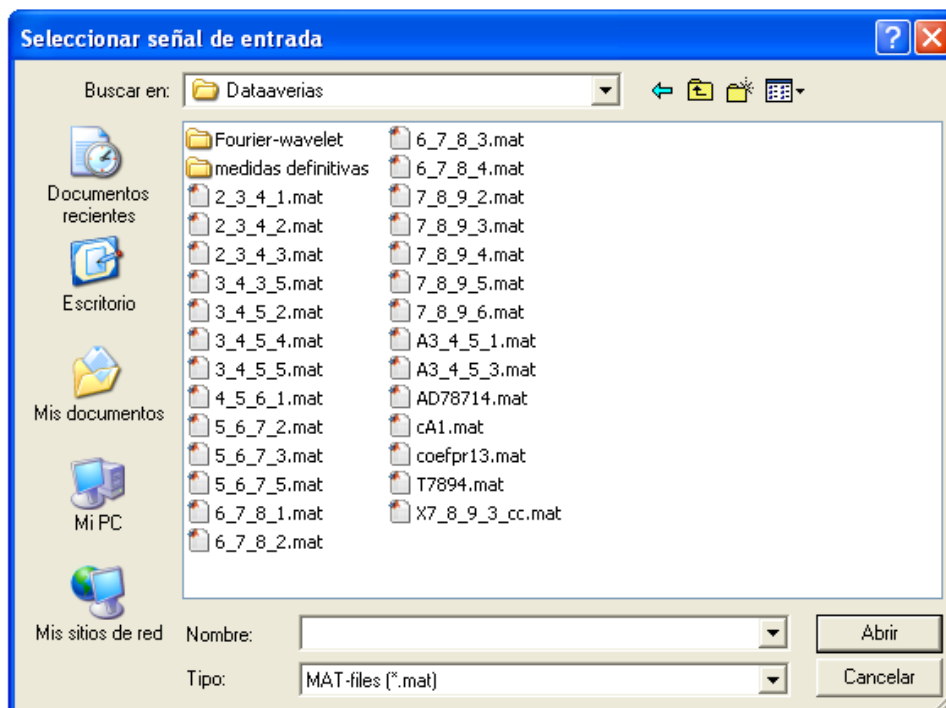


Figura 6.6: Ventana de diálogo para la selección de la señal de entrada.

Una vez que se ha seleccionado la señal de vibración del CTC que se quiere estudiar, hay que elegir la señal de vibración de referencia con el fin de poder llevar a cabo su comparación. Para ello, al igual que sucedía anteriormente con la señal de vibración a comparar, aparece una ventana mediante la cual se selecciona el tipo de extensión que posee la señal de referencia que se quiere utilizar (Figura 6.7).

Seguidamente, y del mismo modo que con la señal objeto de estudio, una vez seleccionado el tipo de extensión (*.mat o *.txt) aparece en pantalla un cuadro de diálogo mediante el cual se elige la señal de referencia que será utilizada en el análisis.

Además, y caso de ser necesario, presionando el botón “Anterior” se pueden modificar los datos introducidos hasta el momento volviendo a la ventana “Entrada_datos”.

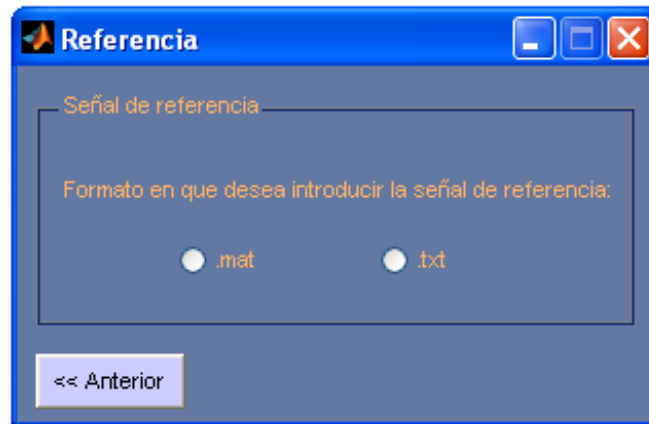


Figura 6.7: Ventana de selección de la señal de referencia.

El siguiente paso consiste en seleccionar el tipo de transformada de Fourier que se va a aplicar a las señales de vibración elegidas previamente. Así, en la ventana “Transformada_Fourier” (Figura 6.8) presentan dos opciones de entre las cuales habrá que decidirse por una:

- FFT si lo que se quiere es aplicar la transformada rápida de Fourier. El análisis en este caso se centrará en el estudio frecuencial de las señales de vibración (señales de entrada y señales normalizadas y sincronizadas), en su comparación y en el estudio de la energía de cada una, pero no será posible verlas impulso a impulso, ni ver su envolvente.
- STFT si lo que se desea es aplicar la transformada corta de Fourier. En esta ocasión el análisis de las señales incluirá el estudio de sus envolventes y de cada uno de los impulsos de las mismas, además de su comparación y de los espectros y espectrogramas correspondientes.



Figura 6.8: Ventana de selección del tipo de transformada de Fourier.

Conjuntamente, y según se puede observar en la Figura 6.8, se han incluido dos botones con el fin de poder retroceder al paso anterior (seleccionar la señal de referencia) o pasar al siguiente (en este último caso, una vez que se haya hecho la selección del tipo de transformada a aplicar, ya que en caso contrario aparecerá un mensaje de error como el mostrado en la Figura 6.9).

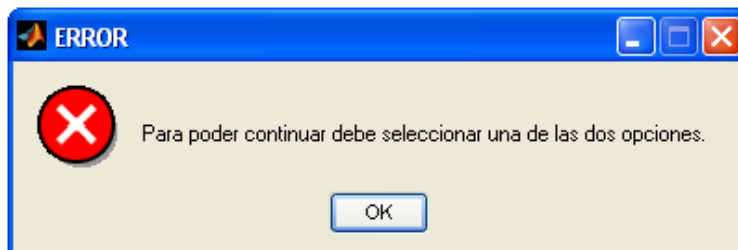


Figura 6.9: Mensaje de error que aparece por no seleccionar correctamente el tipo de transformada de Fourier a aplicar.

A continuación se debe decidir el tipo de pre-procesado que se aplicará a las señales de vibración de entrada (las opciones que se seleccionen se aplicarán por igual tanto a la señal de vibración de referencia como a la señal de vibración a comparar). Para ello, y gracias a la ventana “*Seleccionar_opciones*” que se muestra en la Figura 6.10, se puede determinar si se quiere llevar a cabo su normalización, su sincronización (si se decide sincronizar las señales se podrá ver, además de las señales superpuestas, el desfase existente entre las mismas, así como su correlación antes y después del proceso de sincronización), y si se desea aplicarles la transformada de Hilbert.

En caso de haber seleccionado aplicar la transformada rápida de Fourier a las señales no estarán disponibles las opciones correspondientes a la transformada de Hilbert.

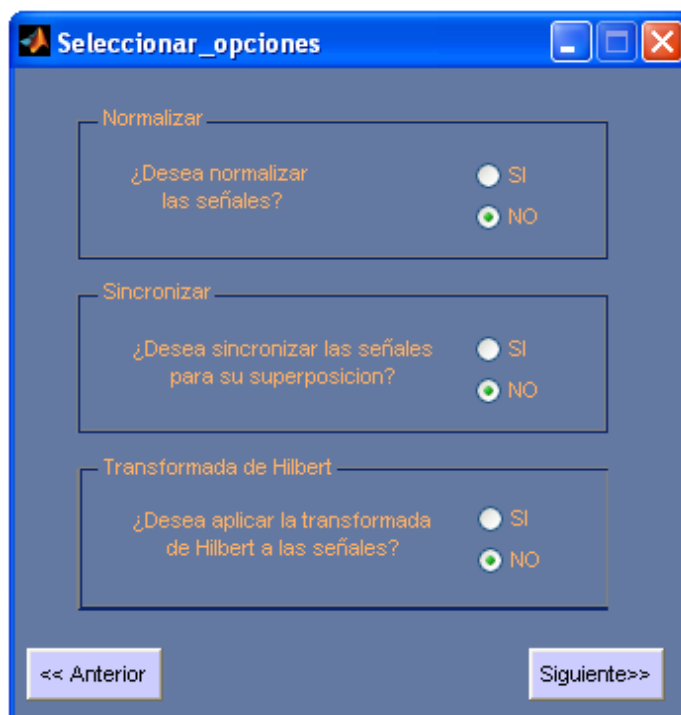


Figura 6.10: Ventana de selección de opciones de pre-procesado.

Del mismo modo que con la ventana de selección de la transformada de Fourier, en esta ocasión también existen dos botones con la finalidad de poder retroceder al paso anterior (pulsando “Anterior”) o de pasar a la siguiente ventana (pulsando “Siguiete”).

También es importante, y habrá que tener en cuenta, que hay que marcar una de las posibles respuestas para cada una de las tres opciones de pre-procesado que se presentan, ya que en caso de no realizar correctamente la selección aparecerá un aviso de error como el mostrado en la Figura 6.11.

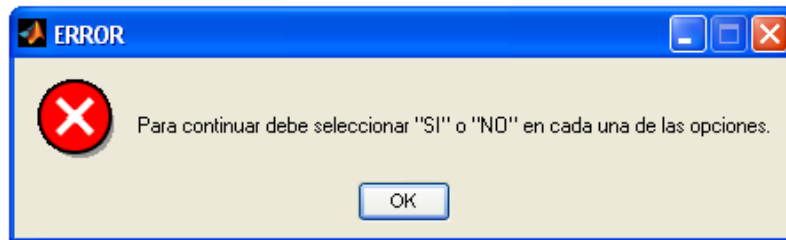


Figura 6.11: Mensaje de error que aparecerá en caso de no hacer correctamente la selección de las opciones de pre-procesado de las señales.

Una vez elegidas las opciones de pre-procesado de las señales de vibración se debe seleccionar, únicamente en caso de haber seleccionado aplicar la STFT a las señales, el tipo de ventana que se va a utilizar para realizar la selección temporal de las señales a analizar (si se opta por aplicar FFT a las señales esta opción no estará disponible). Para ello, el programa diseñado cuenta con la ventana “Seleccionar_tipo_ventana” (Figura 6.12). En ella aparecen reflejados en un listbox, del que se deberá seleccionar una de las opciones posibles, los principales tipos de ventanas que se pueden utilizar para el análisis (Hamming, Gauss, Kaiser, rectangular,...).



Figura 6.12: Selección del tipo de ventana.

Al igual que en los dos pasos anteriores, esta ventana de selección se ha dotado de dos botones con el fin de retroceder en el proceso o continuar con el mismo. Sin

embargo, y dado que siempre habrá un tipo de ventana marcado por defecto (en este caso el primero de la lista), no es necesaria la aparición de mensajes de error por la falta de cumplimentación de alguna de las opciones.

Tras presionar el botón “*Siguiente*” de la pantalla de selección de ventana aparecerá un aviso de espera (Figura 6.13) mientras se cargan todos los datos que se han ido escogiendo para la realización del análisis, y hasta la aparición de la ventana de resultados.

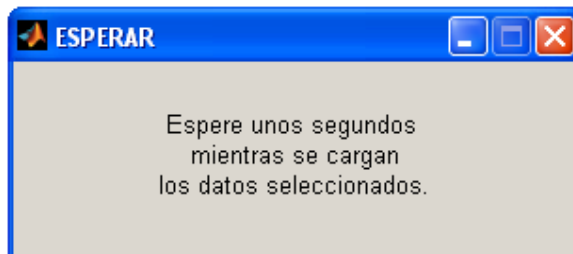


Figura 6.13: Mensaje de espera para cargar datos.

Finalmente aparece la ventana correspondiente a la presentación de resultados, denominada “*Resultados*” (Figura 6.16). Junto con ella también se presenta un mensaje de aviso que variará en función del tipo de transformada de Fourier que se haya aplicado en el análisis. Si se seleccionó STFT, surgirá un aviso como el de la Figura 6.14, con el fin de informar al usuario de los pasos a seguir para ver las gráficas correspondientes a los impulsos de las señales (para una correcta visualización será necesario presionar el botón con el número de impulso que se quiere ver además de seleccionar el tipo de gráfica del menú “*Impulsos*”). Si por el contrario se eligió aplicar la FFT a las señales, el aviso que aparecerá tendrá la forma del mostrado en la Figura 6.15. En él se informa de que es necesario seleccionar las señales que se deseen ver mediante el menú “*Señales de vibración*”.

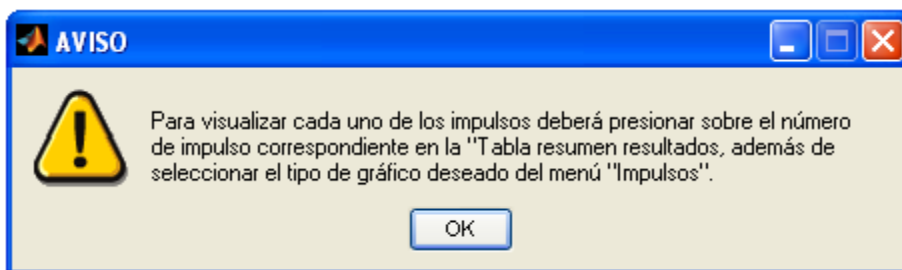


Figura 6.14: Mensaje de aviso que aparece junto con la ventana de resultados seleccionando STFT.

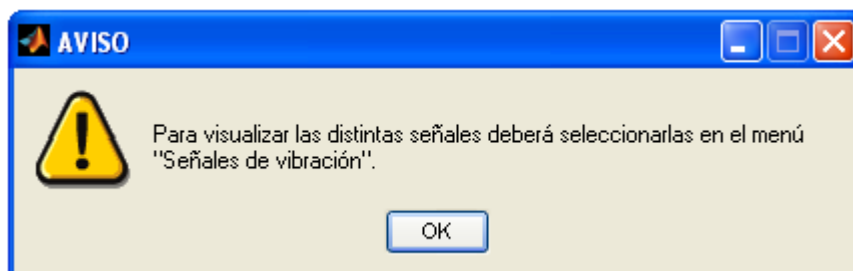


Figura 6.15: Mensaje de aviso que aparece junto con la ventana de resultados habiendo seleccionado FFT.

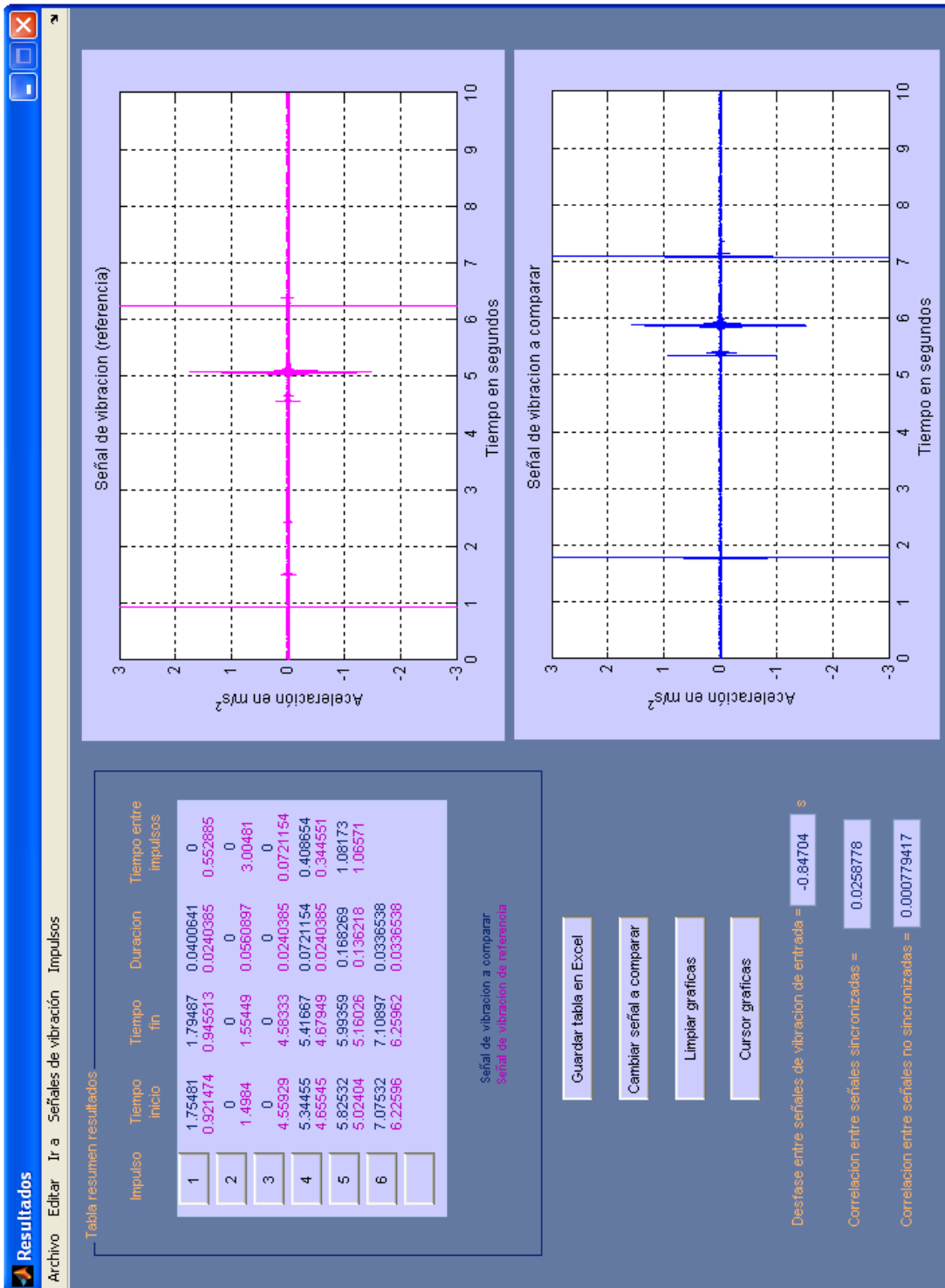


Figura 6.16: Ventana de resultados.

La ventana de resultados se ha dotado de dos áreas para la presentación de los distintos gráficos que se vayan solicitando, tanto de la señal de vibración de referencia como de la señal de vibración objeto de estudio.

Además, y como también se puede observar en la Figura 6.16, se ha diseñado una tabla resumen con los tiempos de inicio y fin de cada uno de los impulsos, junto con su duración (diferencia entre el tiempo de finalización e inicio del impulso) y la diferencia de tiempo entre dos impulsos consecutivos (diferencia de tiempo entre el tiempo de finalización de un impulso y el comienzo del siguiente impulso, siendo ambos consecutivos). Dependiendo de las opciones que se hayan ido seleccionando a lo largo del proceso y de las gráficas que se vayan solicitando, los tiempos que aparecen en la tabla irán cambiando automáticamente. Así, si se selecciona una gráfica en la que haya sincronización de las señales, los tiempos que se mostrarán en la tabla se corresponderán con los de los impulsos de la señal tomada como patrón y los de la señal a comparar sincronizadas. En caso contrario (si no se solicita una gráfica en la que haya sincronización de señales) los tiempos serán los de los impulsos de las señales de entrada.

En caso de que no exista alguno de los impulsos en la señal de vibración estudiada, esos espacios aparecerán rellenos con ceros, modificándose por tanto también la diferencia entre dos impulsos consecutivos del resto de los impulsos presentes. A modo de ejemplo, en la Figura 6.17 se puede comprobar cómo se redistribuyen los espacios de la tabla en caso de la no aparición de alguno de los impulsos en la señal a comparar.

Impulso	Tiempo inicio	Tiempo fin	Duracion	Tiempo entre impulsos
1	1.75481 0.921474	1.79487 0.945513	0.0400641 0.0240385	0 0.552885
2	0 1.4984	0 1.55449	0 0.0560897	0 3.00481
3	0 4.55929	0 4.58333	0 0.0240385	0 0.0721154
4	5.34455 4.65545	5.41667 4.67949	0.0721154 0.0240385	0.408654 0.344551
5	5.82532 5.02404	5.99359 5.16026	0.168269 0.136218	1.08173 1.06571
6	7.07532 6.22596	7.10897 6.25962	0.0336538 0.0336538	

Señal de vibracion a comparar
Señal de vibracion de referencia

Figura 6.17: Tabla de resultados en la que la señal de vibración a comparar no presenta los impulsos 2 y 3.

Como peculiaridad de la tabla resumen de resultados, cabe destacar que los números de los impulsos son en realidad botones mediante los cuales se podrá

seleccionar el número de impulso que se desea ver graficado (en caso de haber elegido aplicar FFT a las señales esta opción no estará disponible). Con la finalidad de saber en todo momento qué impulso es el que se muestra en las gráficas, al presionar cualquiera de los botones se producirá un cambio en el color del mismo (Figura 6.18).

Tabla resumen resultados

Impulso	Tiempo inicio	Tiempo fin	Duración	Tiempo entre impulsos
1	1.75481 0.921474	1.79487 0.945513	0.0400641 0.0240385	0 0.552885
2	0 1.4984	0 1.55449	0 0.0560897	0 3.00481
3	0 4.55929	0 4.58333	0 0.0240385	0 0.0721154
4	5.34455 4.65545	5.41667 4.67949	0.0721154 0.0240385	0.408654 0.344551
5	5.82532 5.02404	5.99359 5.16026	0.168269 0.136218	1.08173 1.06571
6	7.07532 6.22596	7.10897 6.25962	0.0336538 0.0336538	

Señal de vibración a comparar
Señal de vibración de referencia

Figura 6.18: Ejemplo de cambio de color de uno de los botones de la tabla resumen de resultados tras ser presionado.

En la esquina inferior izquierda de la ventana de presentación de resultados aparecen, únicamente si se escogió la opción de sincronizar las señales, los datos de desfase original entre las señales (en segundos) y la correlación entre ellas antes y después del proceso de sincronización (ver detalle en la Figura 6.19).

Desfase entre señales de vibración de entrada = -0.84704 s

Correlacion entre señales sincronizadas = 0.0258778

Correlacion entre señales no sincronizadas = 0.000779417

Figura 6.19: Detalle de la presentación de los datos de desfase y correlación entre las señales en la ventana "Resultados".

Además de todos los espacios destinados a la presentación de gráficos, datos y resultados, se han dispuesto, en la parte izquierda de la ventana, cuatro botones (Figura 6.20) con finalidades distintas.

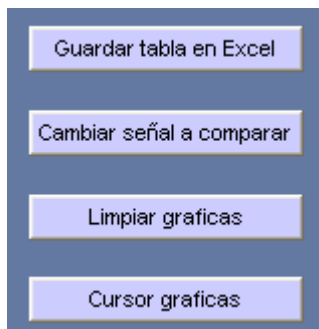


Figura 6.20: Detalle de los botones de la ventana “Resultados”.

Así, presionando el botón que se encuentra en la parte superior, denominado “*Guardar tabla en Excel*”, se consigue guardar los datos que aparecen en ese momento en la tabla resumen de resultados en una hoja de Excel. Nada más presionar el botón aparece en pantalla una ventana de diálogo (Figura 6.21) mediante la que se puede introducir el nombre con el que guardar el archivo correspondiente y seleccionar la ubicación del mismo.

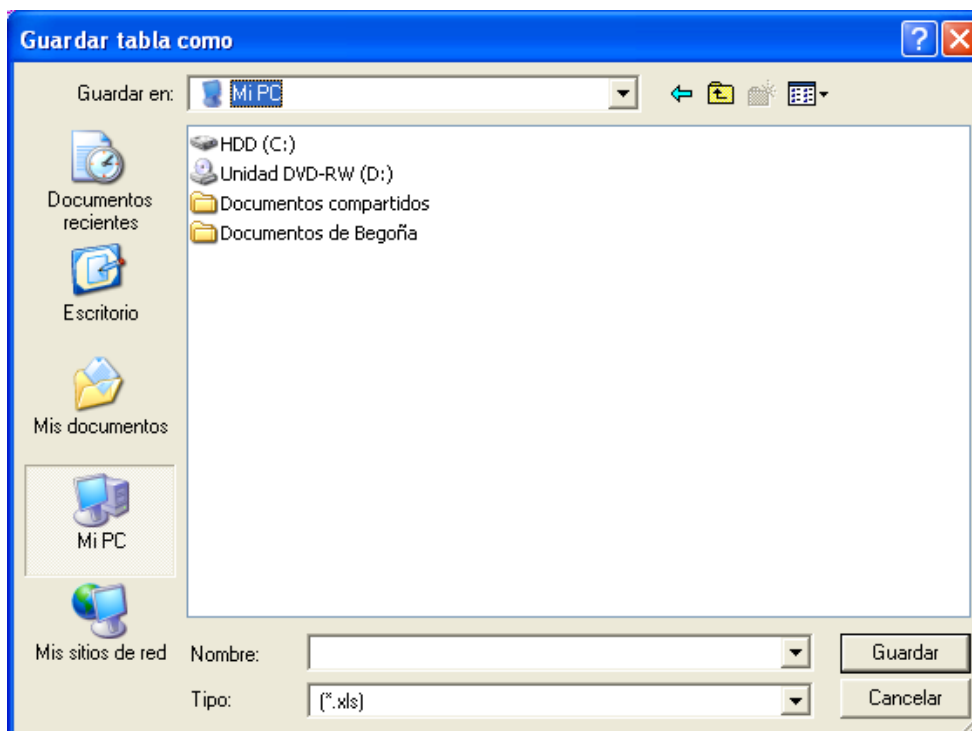


Figura 6.21: Ventana de diálogo para guardar la tabla de resultados en formato Excel.

El botón “*Cambiar señal a comparar*” será muy útil en caso de querer cambiar la señal de vibración a comparar sin modificar las opciones de análisis ni la señal tomada como patrón. Presionando este botón surge la ventana “*Cambiar_entrada*” (Figura 6.22) en la que, como sucedía en los primeros pasos de la aplicación, se debe seleccionar el tipo de extensión que tiene la nueva señal a comparar. Elijiendo una de las dos opciones se muestra una ventana de diálogo como la presentada en la Figura 6.6 en aras de elegir la nueva señal de vibración a comparar. En el supuesto de no querer hacer modificaciones en la señal después de haberse presentado la ventana de cambio de señal, se puede regresar a la ventana de resultados presionando el botón “*Volver a Resultados*”.

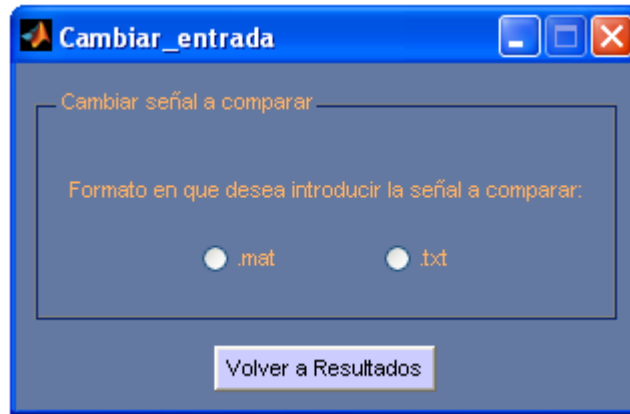


Figura 6.22: Ventana para el cambio de la señal de vibración a comparar.

En cuanto al botón denominado “*Limpiar gráficas*”, pulsándolo se reiniciará la ventana de resultados, limpiando de este modo los espacios reservados a las gráficas, reestableciendo el color a los botones de los impulsos de forma que ninguno quede resaltado, y eliminando las marcas de selección de opciones que se presenten en la barra de menús.

En último lugar aparece “*Cursor gráficas*”. Seleccionando esta opción aparecerá un cursor mediante el que se podrá ver, presionando sobre cualquier punto de las gráficas, las coordenadas del punto correspondiente. Asimismo, pulsando el botón derecho del ratón, aparecerá un menú con las distintas opciones que ofrece esta utilidad (Figura 6.23), siendo las más importantes:

- *Create New Datatip*: con esta opción se podrán colocar tantos cuadros de coordenadas como sean necesarios en cualquiera de las gráficas que se muestren en pantalla.
- *Delete Current Datatip*: en caso de querer borrar el último cuadro de coordenadas que se haya colocado habrá que elegir esta opción.
- *Delete All Datatips*: seleccionando esta opción desaparecerán todos los cuadros de coordenadas que se hayan colocado en las gráficas.

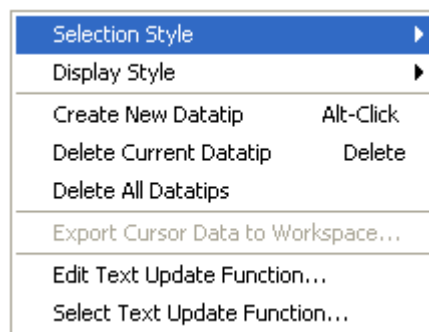


Figura 6.23: Menú de opciones de la utilidad “*Cursor gráficas*”.

Para ayudar con el manejo de esta utilidad, al presionar el botón de aparición del cursor se mostrará en pantalla una ventana de ayuda (Figura 6.24) explicando muy brevemente cómo efectuar las principales acciones con el cursor.

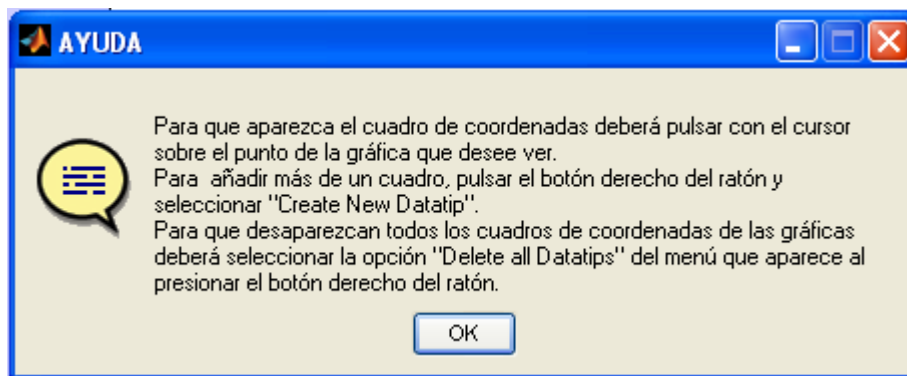


Figura 6.24: Ventana de ayuda que aparece al pulsar “Cursor gráficas”.

Habrà que tener en cuenta que la utilidad de mostrar el cursor estarà activa mientras el botón “Cursor gráficas” permanezca presionado. A modo de ejemplo, en la Figura 6.25 se muestra la representación de la transformada de Fourier de una señal a la que se le han añadido las coordenadas en los puntos donde se encuentran algunas de las frecuencias predominantes.

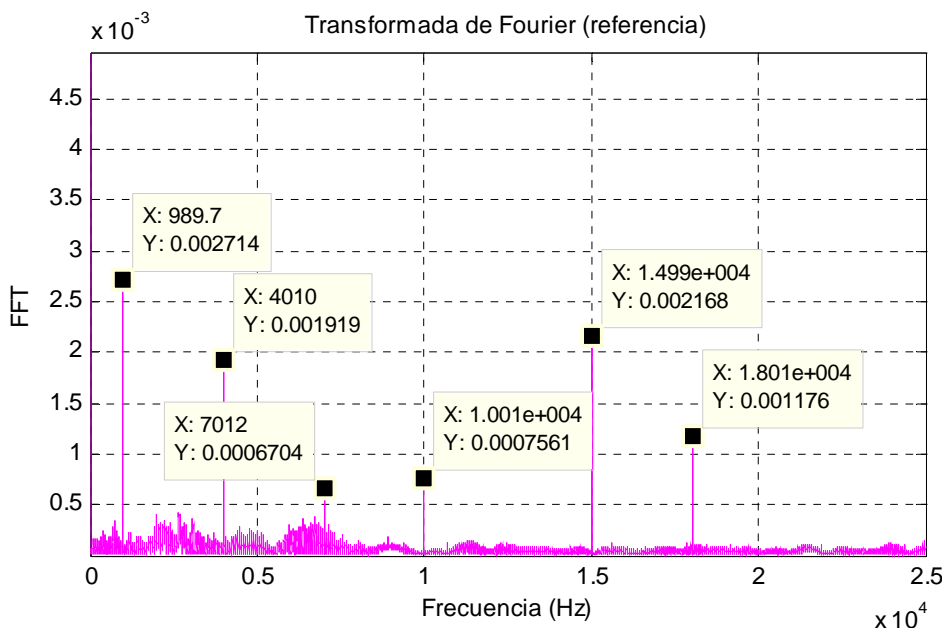


Figura 6.25: Representación de la transformada de Fourier de una señal en la que se han añadido cuadros de coordenadas.

Finalmente, a la ventana “Resultados” se le ha dotado de una barra, ubicada en la parte superior, compuesta por cinco menús desplegables: “Archivo”, “Editar”, “Ir a”, “Señales de vibración” e “Impulsos”.

En el menú “Archivo” (Figura 6.26) se han incluido cuatro opciones:

- *Nuevo*: crea un nuevo proyecto volviendo a la pantalla “Entrada_datos” y borrando absolutamente todas las opciones y datos que se hayan introducido.
- *Imprimir pantalla*: con esta opción se podrá imprimir la ventana de resultados al completo.

- *Vista previa*: utilidad para configurar las opciones de página (márgenes, orientación,...) y tener una vista previa de la ventana que se va a imprimir.
- *Salir*: opción para salir de la aplicación.

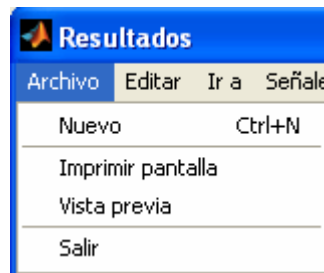


Figura 6.26: Menú "Archivo".

Con el menú "Editar" (Figura 6.27) se puede extraer cualquiera de las gráficas o la tabla resumen en forma de figura, de forma que se pueda editar, insertar leyendas, imprimir, copiar, guardar, importar,... Como ejemplo de esta utilidad se muestra la Figura 6.28.

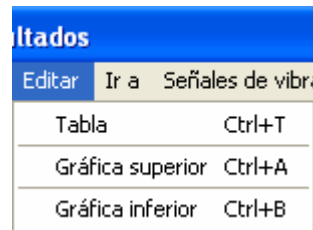


Figura 6.27: Menú "Editar".

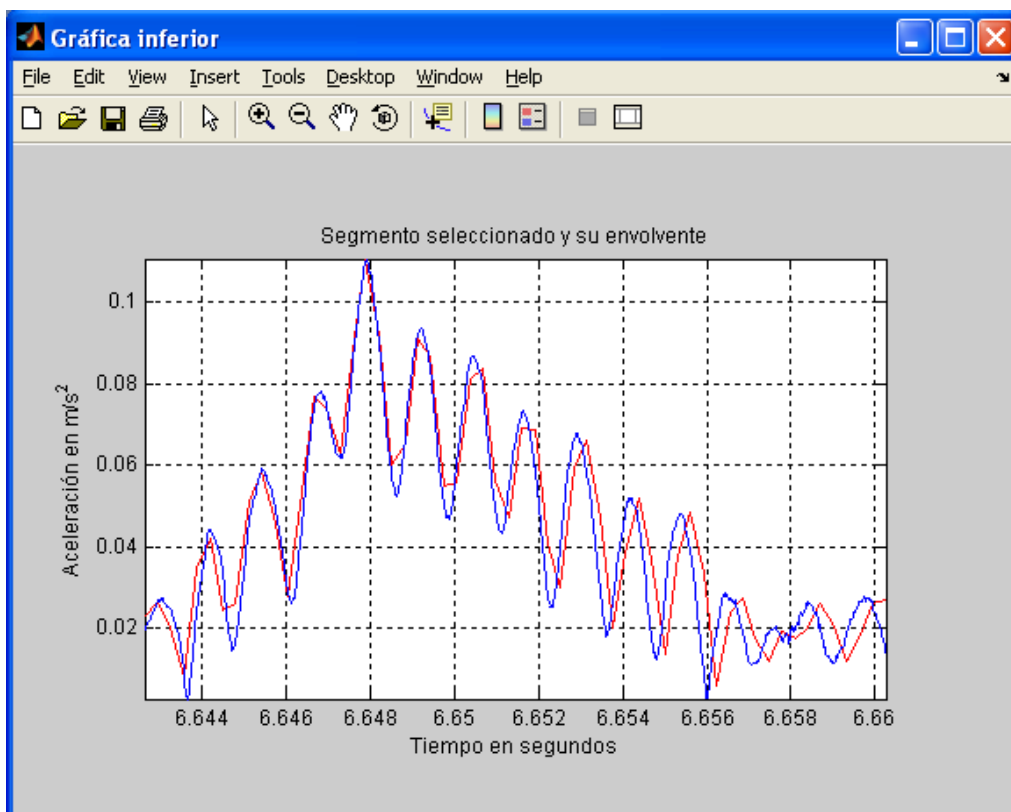


Figura 6.28: Extracción en forma de figura de una de las gráficas para su edición.

Este menú consta de tres posibles opciones:

- *Tabla*: extrae la tabla resumen en forma de figura para su edición.
- *Gráfica superior*: extrae la gráfica que se esté mostrando en ese momento en el espacio superior para su edición.
- *Gráfica inferior*: extrae la gráfica que se esté mostrando en ese momento en el espacio inferior para su edición.

Cabe destacar que, tanto a las tres opciones de este menú como a la opción “Nuevo” del menú “Archivo”, se les ha dotado de un acceso rápido mediante la presión de “Ctrl+letra”.

Mediante el menú “Ir a” (Figura 6.29) se podrá volver a cualquiera de las ventanas que componen la aplicación y cambiar así los datos o las opciones que se seleccionaron previamente.

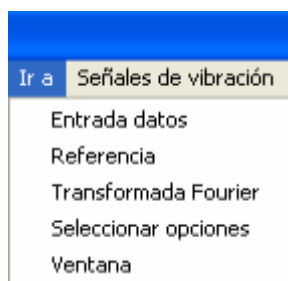


Figura 6.29: Menú “Ir a”.

Uno de los menús más importantes es “Señales de vibración” (Figura 6.30), ya que con él se podrán ir seleccionando las distintas gráficas de las señales de vibración que irán apareciendo en los espacios reservados para tal fin.

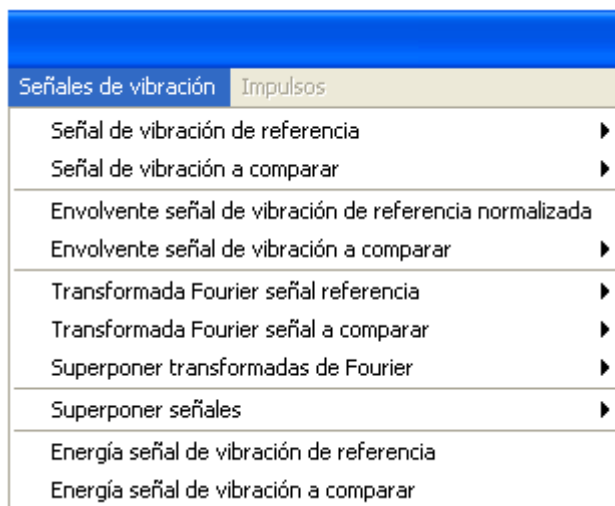
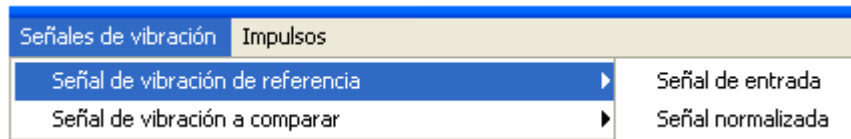


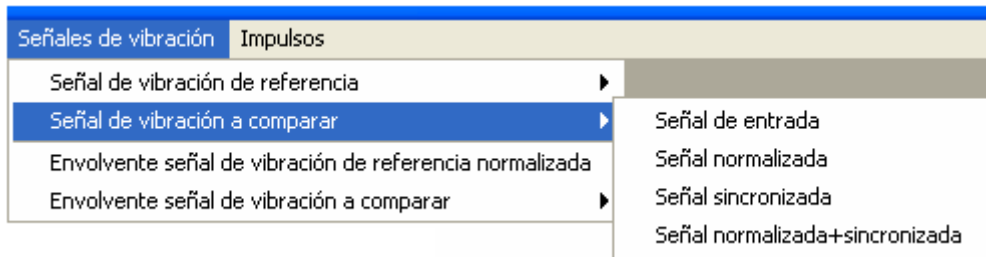
Figura 6.30: Menú “Señales de vibración”.

Se encuentra dividido en cinco grupos: señales de vibración, envolventes, transformadas de Fourier, superposición de señales y energía. En el primero de ellos se encuentran las gráficas correspondientes a las señales de vibración de entrada,

normalizadas, sincronizadas, y normalizadas y sincronizadas (estas dos últimas gráficas sólo se muestran para la señal de vibración a comparar, ya que es la que modifica su eje de tiempos). Las opciones (submenús) que se presentan para cada una de las señales se muestran en la Figura 6.31.



a)



b)

Figura 6.31: Gráficas que se pueden seleccionar para cada una de las señales de vibración: a) señal de referencia; b) señal a comparar.

En el grupo correspondiente a las envolventes, se presentan las gráficas correspondientes a las envolventes de las señales normalizadas y, en el caso de la señal a comparar, también la envolvente normalizada y sincronizada con la señal tomada como patrón de referencia. En la Figura 6.32 se muestran todas las opciones que es posible graficar.

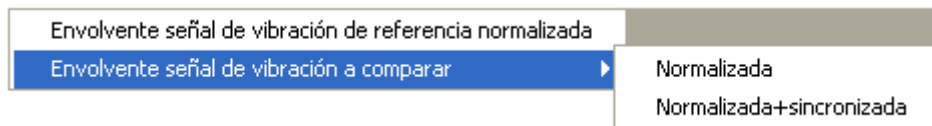


Figura 6.32: Gráficas disponibles para las envolventes de las señales.

En tercer lugar se encuentra el grupo de gráficas correspondiente a las transformadas de Fourier, que únicamente estará activo si previamente se seleccionó aplicar FFT a las señales. Con las opciones incluidas en este grupo se podrán ver las gráficas correspondientes a la transformada de Fourier de la señal de referencia, de la señal a comparar, y la superposición de ambas transformadas. En los tres casos se podrá elegir entre ver la transformada correspondiente a las señales de entrada o a las señales después de su pre-procesado. En la Figura 6.33 se muestran todas las opciones de representación de las transformadas de Fourier.

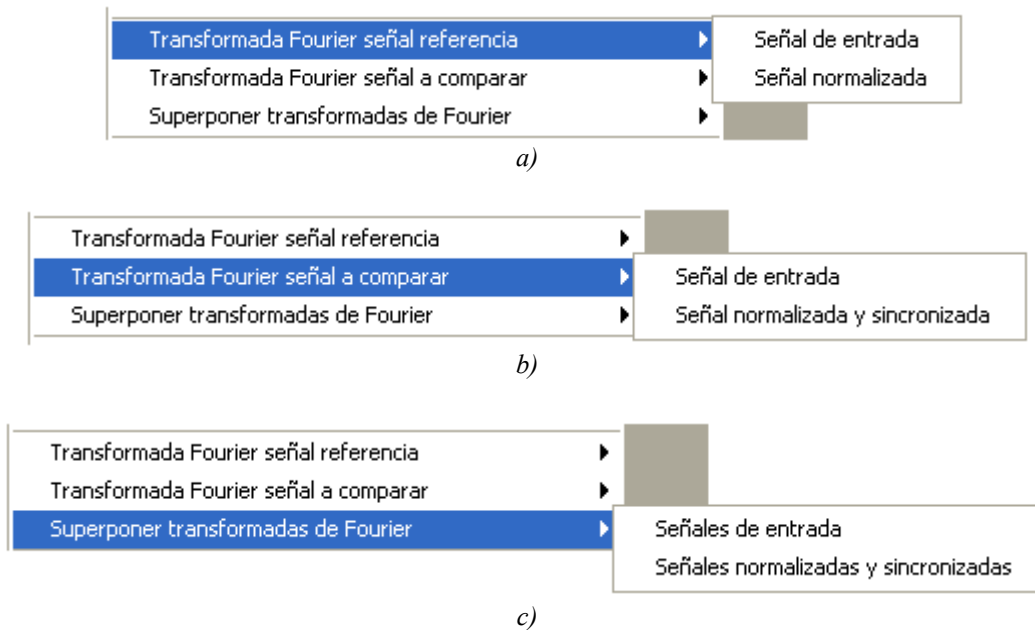


Figura 6.33: Gráficas correspondientes a la transformada de Fourier que se pueden seleccionar: a) señal de referencia; b) señal a comparar; c) superposición de las transformadas de ambas señales.

Si previamente se decidió no proceder a la sincronización de señales, las transformadas correspondientes a las señales normalizadas y sincronizadas se llevarán a cabo, pero sin que exista sincronización. En ese supuesto aparecerá en pantalla un mensaje de aviso como el mostrado en la Figura 6.34.

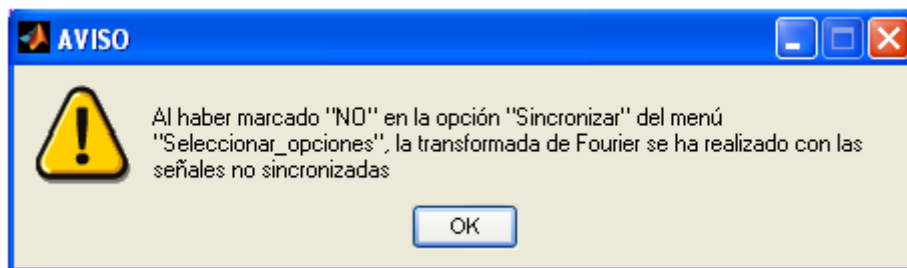


Figura 6.34: Mensaje de aviso que aparece en caso de seleccionar una gráfica de transformada de Fourier de señales normalizadas y sincronizadas sin haber efectuado sincronización de las mismas.

A continuación se encuentran las gráficas correspondientes a la superposición de señales (Figura 6.35). Se han dispuesto tres opciones posibles: superponer las señales de entrada, las señales normalizadas y las envolventes. En caso de haber elegido sincronizar la señal objeto de estudio con la señal tomada como patrón, la superposición se realizará con las señales sincronizadas. En caso contrario, la superposición se llevará a cabo, pero con las señales no sincronizadas. Con la finalidad de avisar al usuario de este hecho, al seleccionar alguna de las gráficas de superposición sin haber solicitado previamente la sincronización de señales aparecerá en pantalla un mensaje como el mostrado en la Figura 6.36.

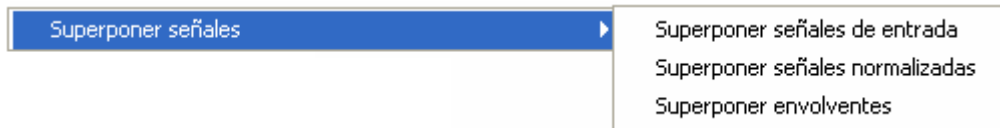


Figura 6.35: Gráficas correspondientes a la superposición de señales.

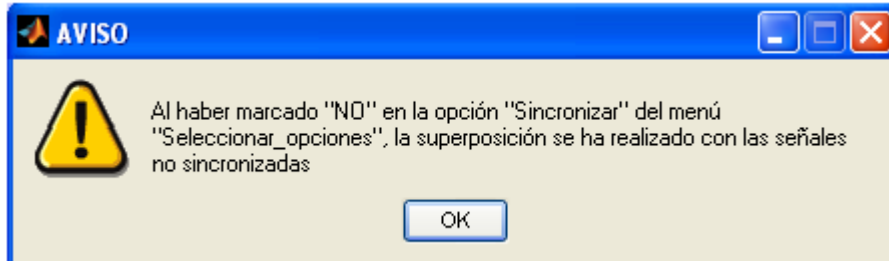


Figura 6.36: Mensaje de aviso que aparece en caso de seleccionar una gráfica de superposición de señales sin haber efectuado sincronización de las mismas.

En último lugar se encuentran las gráficas correspondientes a la energía de las señales. Junto con la representación gráfica aparecerá el valor máximo de energía en cada uno de los impulsos de la señal (como ejemplo se muestra la Figura 6.37).

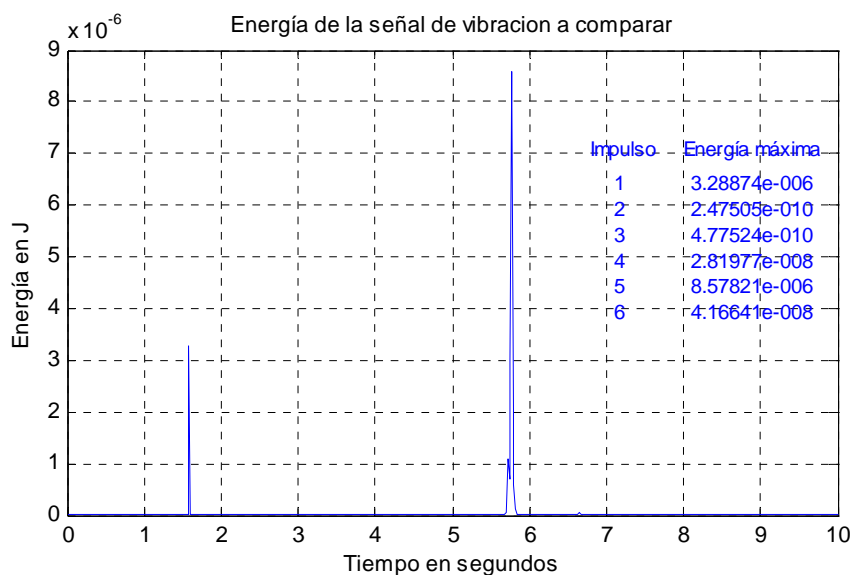


Figura 6.37: Representación gráfica de la energía de una señal. En la parte derecha se puede ver el valor máximo de energía en cada uno de los impulsos.

Dentro del menú “Impulsos” (Figura 6.38) se pueden encontrar las gráficas correspondientes a los impulsos de las señales (este menú sólo estará habilitado si se selecciona aplicar STFT a las señales de vibración). Así, será posible ver los impulsos de las señales, las envolventes, la superposición de impulso y envolvente, el espectro, la superposición de los impulsos de ambas señales y los espectrogramas correspondientes. Para cada una de estas opciones, y según se ve en las figuras 6.38, 6.39 y 6.40, existen distintas posibilidades dependiendo de lo que desee ver el usuario (impulsos de las señales originales, normalizadas, sincronizadas o normalizadas y sincronizadas).

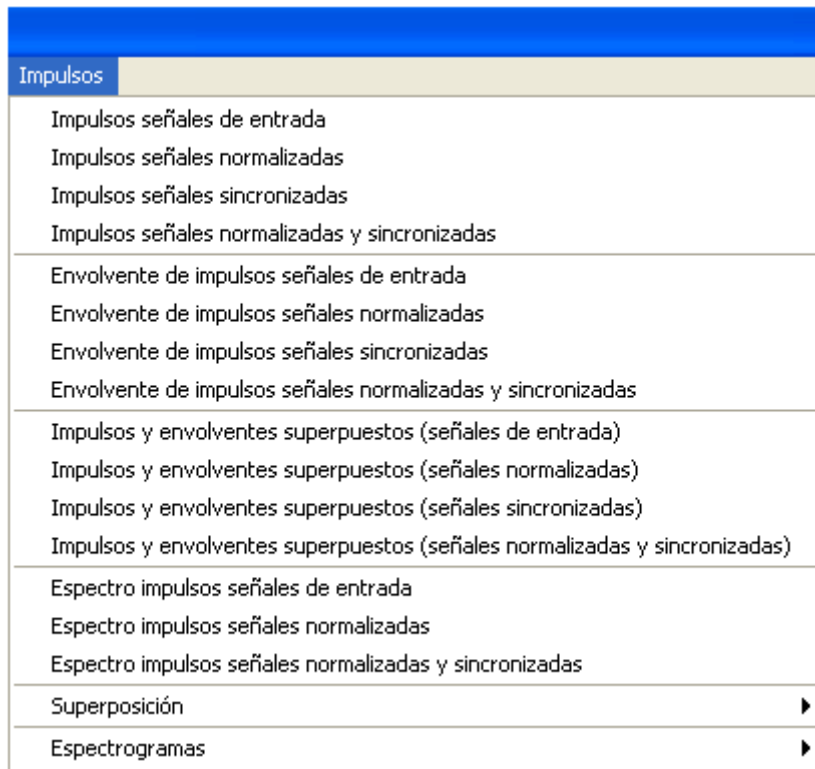


Figura 6.38: Menú “Impulsos”.



Figura 6.39: Gráficas disponibles para la superposición de impulsos.



Figura 6.40: Lista de espectrogramas que se pueden visualizar.

En cuanto a la superposición de impulsos, al igual que sucedía con las gráficas de las señales, en caso de haber decidido no realizar la sincronización y seleccionar alguna de estas gráficas, aparecerá un mensaje como el que se mostró en la Figura 6.36 en aras de avisar al usuario de que la superposición se efectuará pero sin que exista sincronización (en este caso de los impulsos).

Además, en caso de no seguir las instrucciones que se mostraban con el mensaje de aviso representado en la Figura 6.14 y que aparece con la apertura de la ventana “Resultados”, al seleccionar alguna de las opciones de este menú sin haber presionado previamente algún botón con el número de impulso, aparecerá un mensaje de error como el de la Figura 6.41.

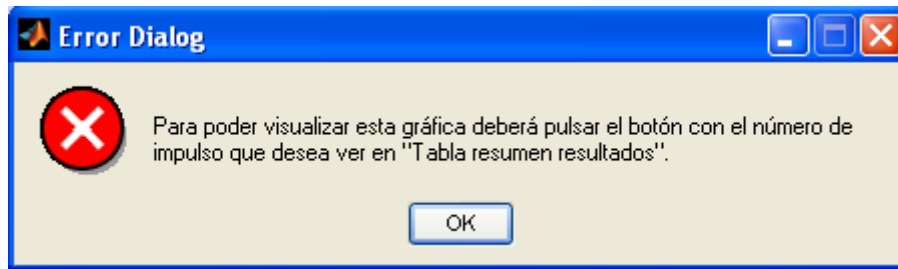


Figura 6.41: Mensaje de error que aparecerá al no seleccionar correctamente el impulso que se desea ver.

Una vez seleccionada correctamente la gráfica del impulso que se quiere ver, aparece un mensaje de espera como el de la Figura 6.42 mientras se procesan los datos, y hasta que aparecen las gráficas solicitadas.

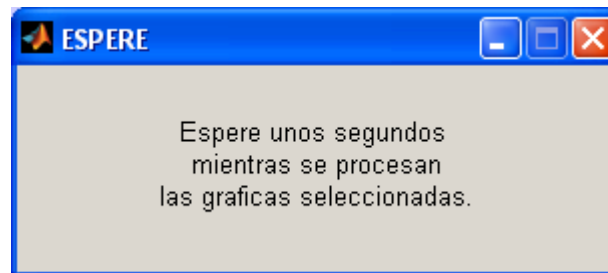


Figura 6.42: Mensaje de espera para procesar las gráficas seleccionadas.

Finalmente cabe resaltar que, con la finalidad de conocer en todo momento qué gráficas son las que se están mostrando en pantalla, cada vez que se seleccione un tipo de gráfica de los menús la opción correspondiente queda marcada como se muestra en la Figura 6.43. Además, dependiendo de las opciones que hayan sido elegidas con las ventanas “Transformada_Fourier” y “Seleccionar_opciones”, se habilitarán o deshabilitarán las gráficas correspondientes a la transformada de Fourier, normalización, sincronización y superposición de señales e impulsos.

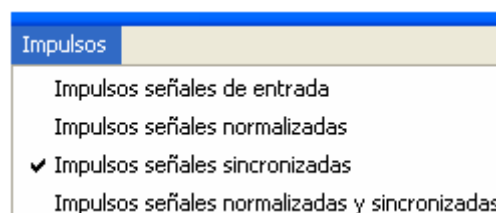


Figura 6.43: Ejemplo en el que se ha seleccionado la gráfica correspondiente a los impulsos de las señales sincronizadas.

7.- RESULTADOS.

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos con la comparación de dos señales de vibración de un cambiador de tomas en carga utilizando como herramienta la interfaz gráfica descrita en el capítulo 6.

La finalidad de realizar una comparación entre dos señales, siendo una de ellas una señal patrón o de referencia y la otra una señal cualquiera, es poder llevar a cabo la detección de posibles averías en el cambiador de tomas en carga.

7.1.- Comparación de dos señales en buen estado.

En este apartado se van a comparar dos señales en buen estado, lo que implica que cada una de ellas presenta los seis impulsos característicos de la señal de vibración del cambiador de tomas en carga bajo estudio.

Como patrón de referencia se ha elegido la señal 7_8_9_1 (Figura 7.1); la señal a comparar es la 7_8_9_3 (Figura 7.2).

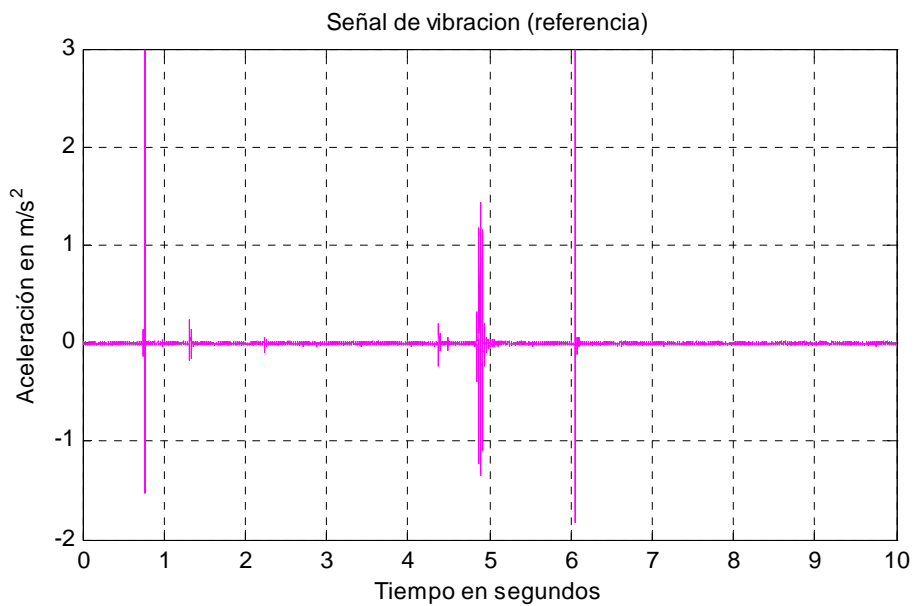


Figura 7.1: Señal de vibración 7_8_9_1 (referencia).

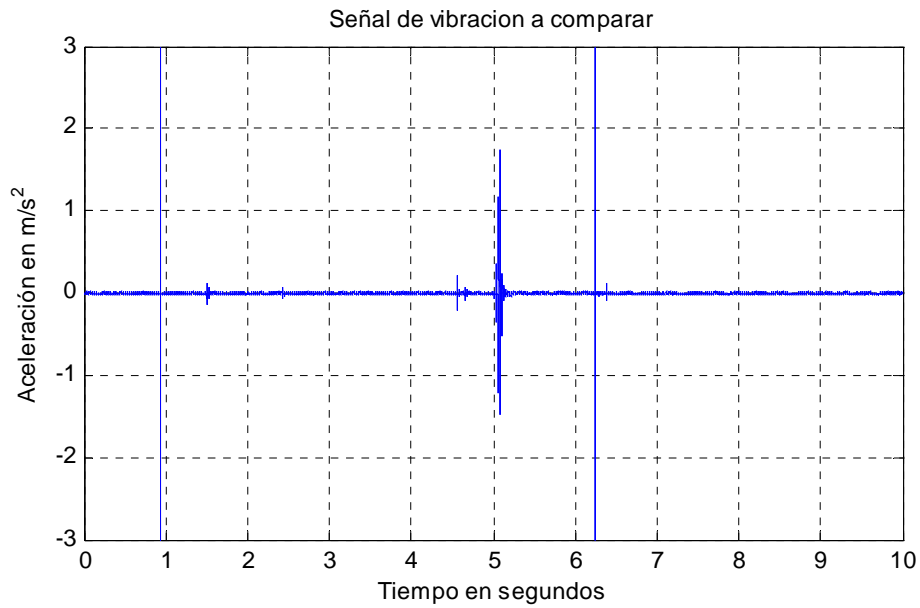


Figura 7.2: Señal de vibración 7_8_9_3 (a comparar).

En primer lugar se realiza una comparación en el dominio de la frecuencia (utilizando FFT) y posteriormente se comparan las señales utilizando la STFT (análisis tiempo-frecuencia). La frecuencia de muestreo de las señales es de 50000Hz.

7.1.1.- Comparación en el dominio de la frecuencia (FFT).

En primer lugar se va a efectuar la comparación de las señales sin normalizar ni sincronizar. Es decir, se va a estudiar el comportamiento en frecuencia de las señales de entrada. La Figura 7.3 corresponde a la superposición de las señales de entrada. En ella se muestra el desfase existente entre las dos señales (0.17586 segundos).

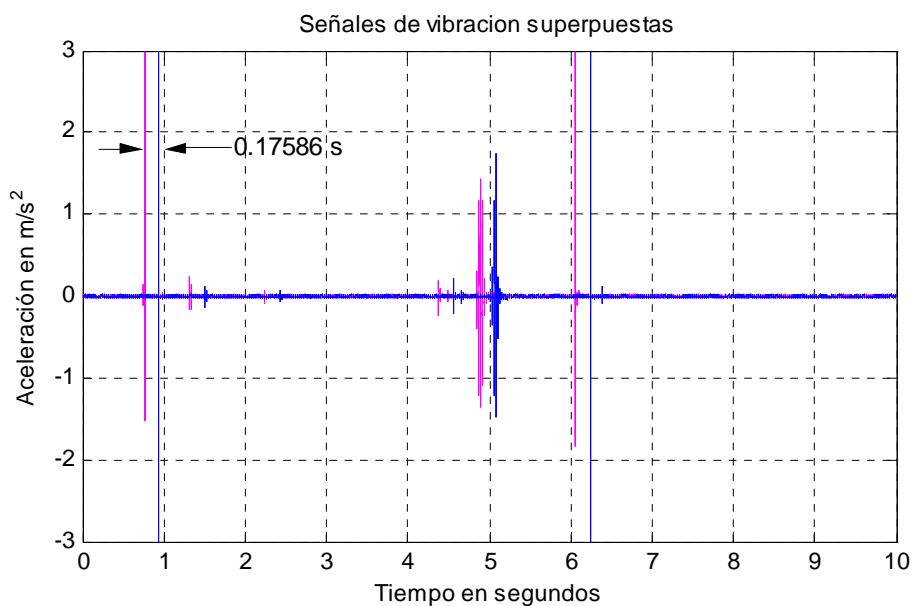


Figura 7.3: Superposición de las señales de entrada (rosa: señal de referencia; azul: señal a comparar).

En la Figura 7.4, se muestra para cada uno de los seis impulsos presentes en la señal de referencia (rosa) y en la señal a comparar (azul), el tiempo de inicio, el tiempo de finalización, la duración y el tiempo entre impulsos.

Tabla resumen resultados

Impulso	Tiempo inicio	Tiempo fin	Duración	Tiempo entre impulsos
1	0.921474 0.745192	0.945513 0.769231	0.0240385 0.0240385	0.552885 0.536859
2	1.4984 1.30609	1.55449 1.36218	0.0560897 0.0560897	3.00481 3.00481
3	4.55929 4.36699	4.58333 4.39103	0.0240385 0.0240385	0.0721154 0.088141
4	4.65545 4.47917	4.67949 4.50321	0.0240385 0.0240385	0.344551 0.328526
5	5.02404 4.83173	5.16026 4.98397	0.136218 0.152244	1.06571 1.06571
6	6.22596 6.04968	6.25962 6.06731	0.0336538 0.0176282	

Señal de vibración a comparar
Señal de vibración de referencia

Figura 7.4: Tiempos entre impulsos: señal de referencia (azul); señal a comparar (rosa).

La duración de un impulso quedará definida por la diferencia existente entre el tiempo de finalización y el tiempo de inicio de dicho impulso. Por su parte, el tiempo entre impulsos se define como el intervalo de tiempo que transcurre entre la finalización de un impulso y el comienzo del siguiente, siendo éstos dos impulsos consecutivos. Por tanto, para un impulso i estos tiempos serán:

$$\begin{aligned} \text{Duración } (i) &= \text{Tiempo fin } (i) - \text{Tiempo inicio } (i) \\ \text{Tiempo entre impulsos} &= \text{Tiempo inicio } (i+1) - \text{Tiempo fin } (i) \\ i &= \text{impulso} \end{aligned}$$

A manera de ejemplo, para la señal a comparar (azul) se muestra el cálculo de la duración del impulso 5 y del tiempo entre los impulsos 5 y 6:

$$\begin{aligned} \text{Duración } (5) &= \text{Tiempo fin } (5) - \text{Tiempo inicio } (5) \\ \text{Duración } (5) &= 5.16026 - 5.02404 = 1.36218 \text{ s.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tiempo entre impulsos 5 y 6} &= \text{Tiempo inicio } (6) - \text{Tiempo fin } (5) \\ \text{Tiempo entre impulsos 5 y 6} &= 6.22596 - 5.16026 = 1.06571 \text{ s.} \end{aligned}$$

Los tiempos de inicio y fin de cada uno de los impulsos han sido hallados con base en un umbral de energía (apartado 5.5). Este umbral ha sido fijado en un 0,3% de la energía máxima de la señal, con el fin de captar todos los impulsos de las señales y excluir los posibles espurios que pudieran presentarse.

En las figuras 7.5 y 7.6 se muestran la energía máxima asociada a cada uno de los impulsos correspondientes a la señal de referencia (Figura 7.5) y la señal a comparar (Figura 7.6). A manera de ejemplo el impulso número 5 tiene un valor de $9,08672 \cdot 10^{-6}$ J (señal de referencia), mientras que para la señal a comparar la energía máxima es de $6,87272 \cdot 10^{-6}$ J. Por tanto, el valor umbral en cada uno de los casos es igual a:

Señal de referencia:

$$\text{umbral} = 0,003 \cdot \text{energía máxima} = 0,003 \cdot 9,08672 \cdot 10^{-6} = 2,726 \cdot 10^{-8} \text{ J}$$

Señal a comparar:

$$\text{umbral} = 0,003 \cdot \text{energía máxima} = 0,003 \cdot 6,87272 \cdot 10^{-6} = 2,0618 \cdot 10^{-8} \text{ J}$$

Dado que la energía máxima de los impulsos tanto de la señal de referencia, como la señal a comparar supera el umbral correspondiente ($2,726 \cdot 10^{-8}$ J para la señal de referencia y $2,0618 \cdot 10^{-8}$ J para la señal a comparar), queda establecida la existencia de seis impulsos en cada una de las señales.

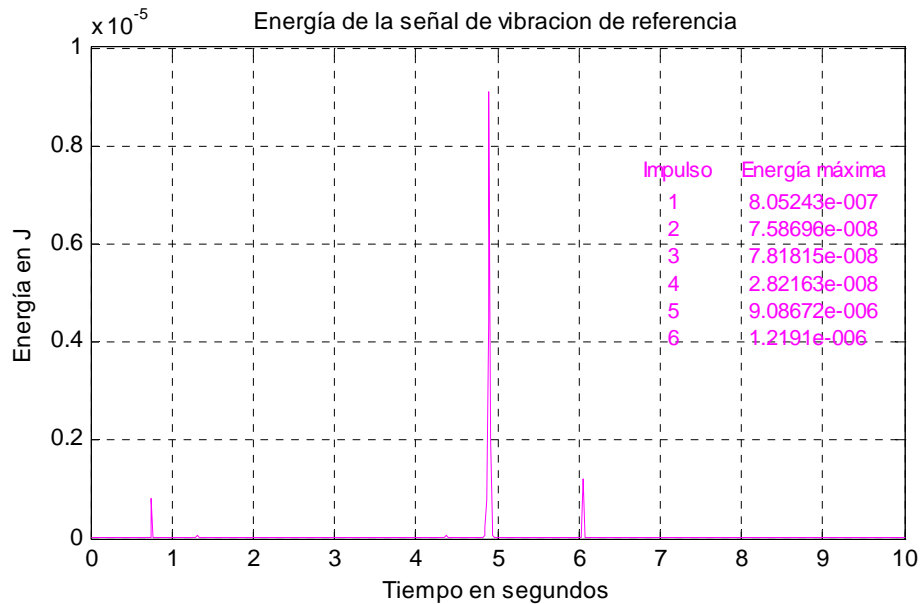


Figura 7.5: Energía de la señal de vibración de referencia.

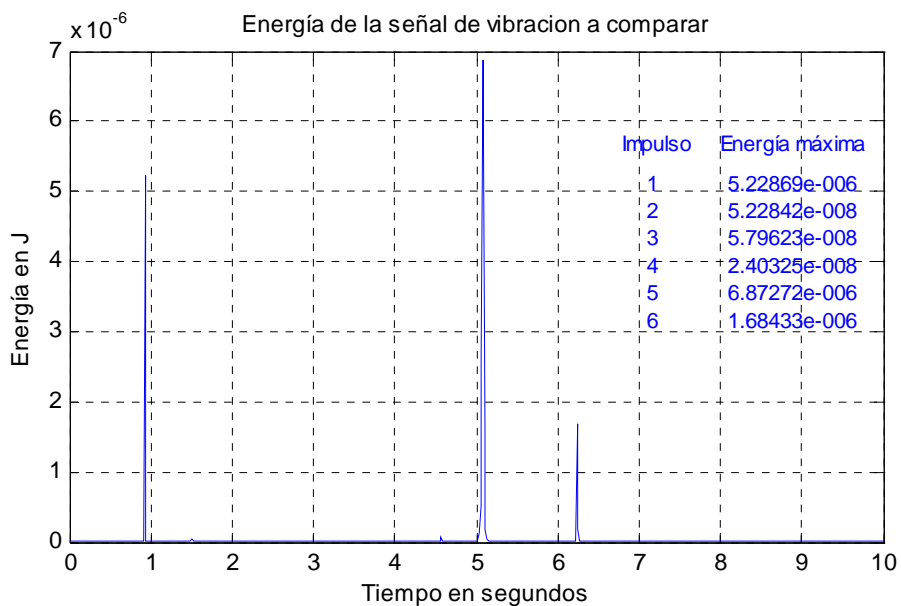


Figura 7.6: Energía de la señal de vibración a comparar.

En las figuras 7.7 (señal de referencia) y 7.8 (señal a comparar) se muestra el espectro al aplicar FFT, al comparar visualmente los espectros no se aprecian diferencias significativas. Al superponer las transformadas (Figura 7.9) se aprecian ligeras diferencias de amplitud, que al ser tan pequeñas, no implican que alguna de las señales presente una avería.

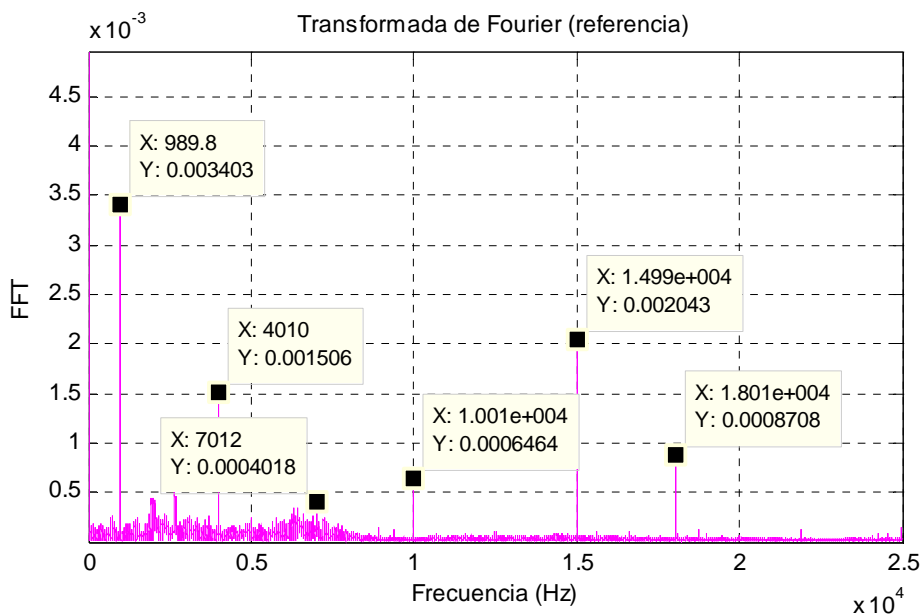


Figura 7.7: Transformada de Fourier de la señal de referencia.

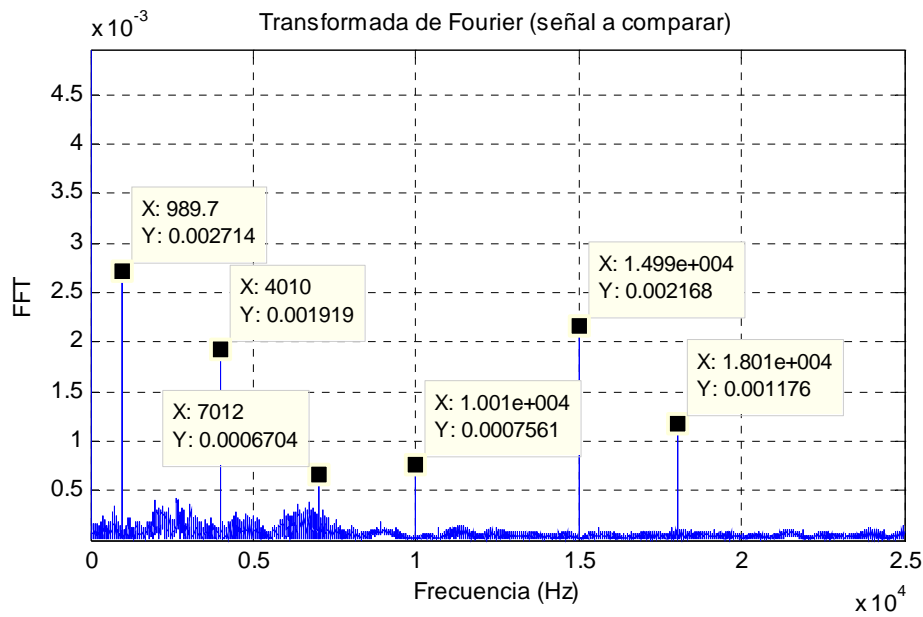


Figura 7.8: Transformada de Fourier de la señal a comparar.

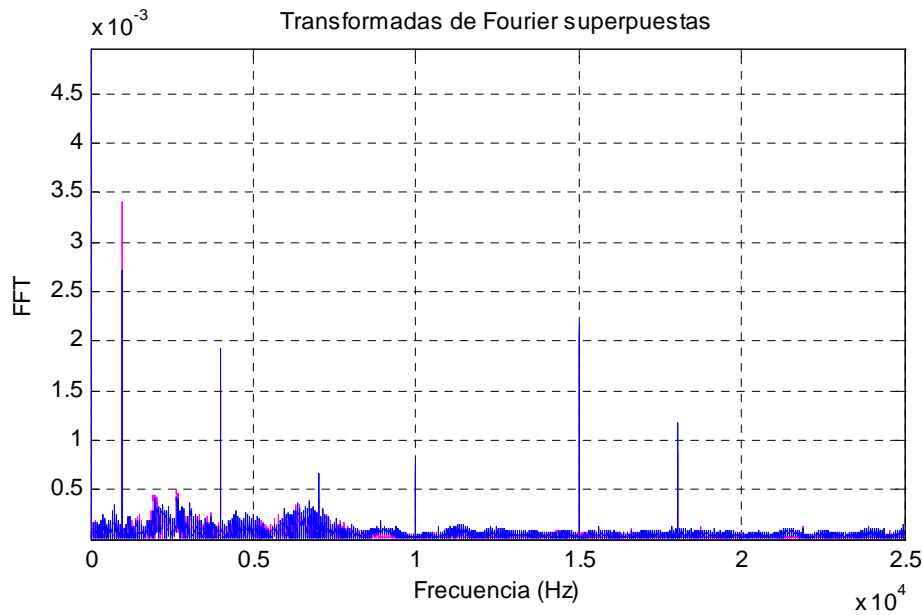


Figura 7.9: Superposición de las transformadas de Fourier de las señales de entrada (señal de referencia: rosa; señal a comparar: azul).

Las frecuencias predominantes tanto para la señal de referencia como para la señal que se está comparando son 1kHz, 4kHz, 7kHz, 10kHz, 15kHz y 18kHz.

En la Tabla 7.1 se muestra, para cada una de las frecuencias y para cada una de las señales, el valor que toma la FFT. Y, a tenor de los resultados, se puede decir que las diferencias existentes entre ambas señales no son significativas.

		Frecuencias					
		1kHz	4kHz	7kHz	10kHz	15kHz	18kHz
Amplitud FFT	Señal de referencia	0.0034	0.0015	0.0004	0.00064	0.002	0.00087
	Señal a comparar	0.0027	0.0019	0.00067	0.00075	0.0021	0.0011

Tabla 7.1: Valores de amplitud de la FFT para cada una de las frecuencias predominantes.

Después de comparar en el dominio de la frecuencia las señales de entrada, se procede a efectuar una comparación (también mediante FFT) de las señales una vez normalizadas y sincronizadas, con el fin de comprobar si se producen diferencias con respecto al análisis anterior.

Una vez realizado el pre-procesado de las señales se comprueba (Figura 7.10) que el desfase inicial existente ha desaparecido. Además, y según los datos obtenidos con el interfaz, el grado de correlación entre las señales ha aumentado: pasa de 0.0034 (señales no sincronizadas) a 0.097 (señales sincronizadas).

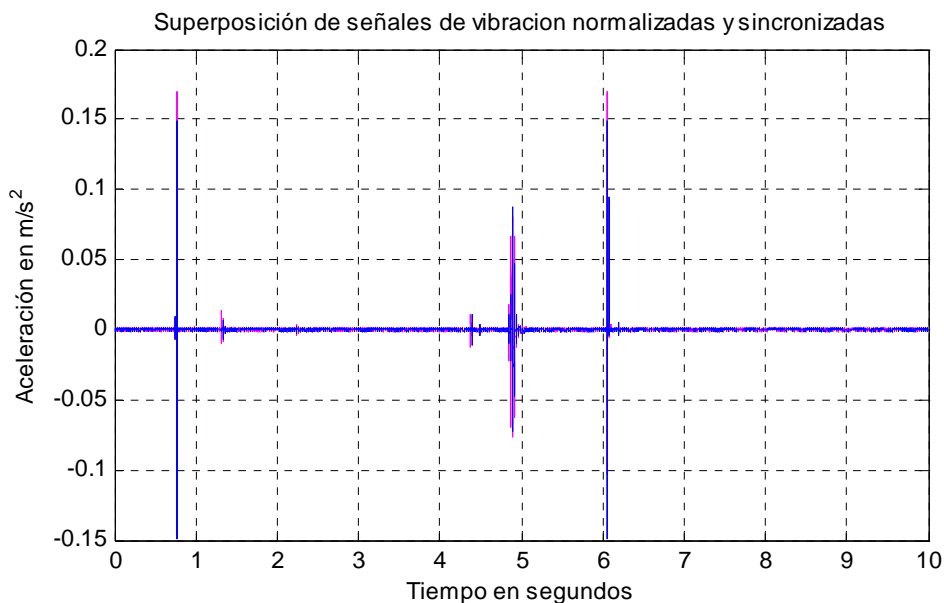


Figura 7.10: Superposición de las señales de vibración normalizadas y sincronizadas (señal de referencia: rosa; señal a comparar: azul).

Con los procesos de normalización y sincronización no se producen variaciones en la energía de las señales, por lo que los umbrales para la detección de impulsos no han variado.

Sin embargo, al trasladar el eje de tiempos de la señal a comparar (azul) para realizar la sincronización, los tiempos de inicio y fin de cada uno de los impulsos de ésta sufren variaciones. Este hecho se observa en la Figura 7.11, en la que se presentan los tiempos de inicio y fin de cada impulso, así como la duración y el tiempo entre impulsos (calculados siguiendo la metodología expuesta en el caso de señales no sincronizadas).

Otro hecho que se comprueba comparando las figuras 7.4 y 7.11 es que, al sincronizar dos señales, no se producen modificaciones en la duración de los impulsos ni en el tiempo que transcurre entre dos impulsos consecutivos (sólo hay variaciones en los tiempos de inicio y fin de los impulsos de la señal que se compara).

Tabla resumen resultados

Impulso	Tiempo inicio	Tiempo fin	Duración	Tiempo entre impulsos
1	0.745614 0.745192	0.769653 0.769231	0.0240385 0.0240385	0.552885 0.536859
2	1.32254 1.30609	1.37863 1.36218	0.0560897 0.0560897	3.00481 3.00481
3	4.38343 4.36699	4.40747 4.39103	0.0240385 0.0240385	0.0721154 0.088141
4	4.47959 4.47917	4.50363 4.50321	0.0240385 0.0240385	0.344551 0.328526
5	4.84818 4.83173	4.9844 4.98397	0.136218 0.152244	1.06571 1.06571
6	6.0501 6.04968	6.08376 6.06731	0.0336538 0.0176282	

Señal de vibración a comparar
Señal de vibración de referencia

Figura 7.11: Tiempos entre impulsos de las señales sincronizadas: señal de referencia (azul); señal a comparar (rosa).

Las transformadas de Fourier de las señales normalizadas y sincronizadas se muestran en las figuras 7.12 y 7.13.

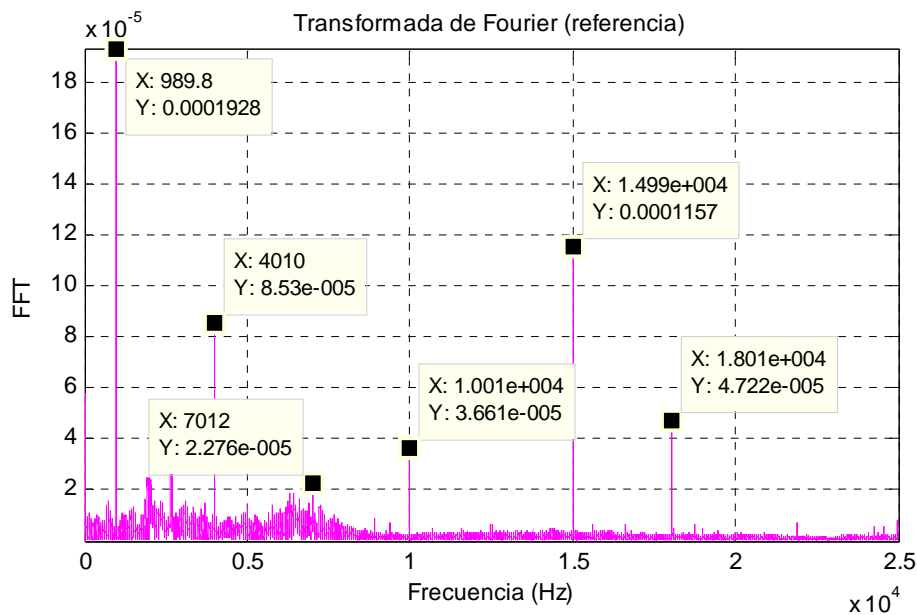


Figura 7.12: Transformada de Fourier de la señal de referencia normalizada.

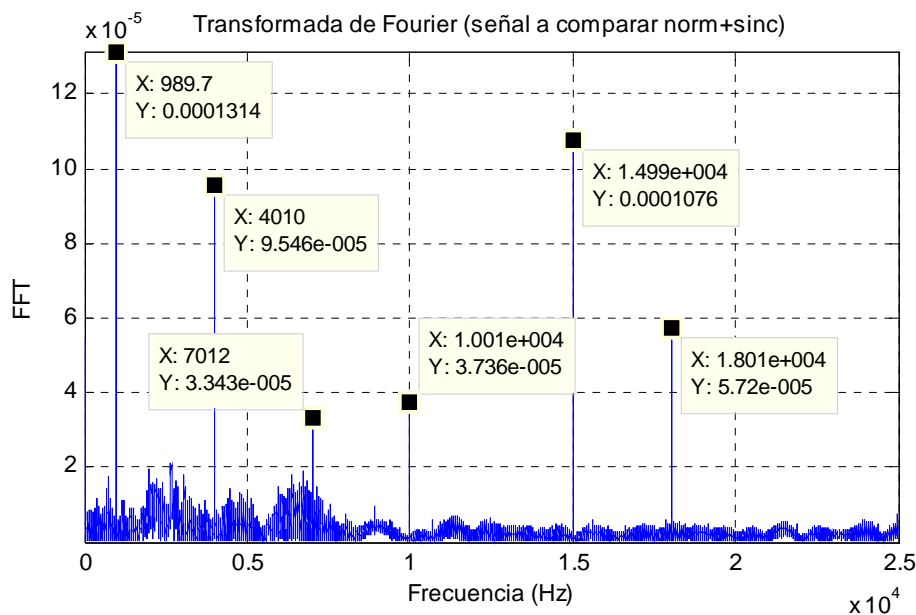


Figura 7.13: Transformada de Fourier de la señal a comparar normalizada y sincronizada.

A tenor de las gráficas obtenidas (Figura 7.12 correspondiente a la transformada de Fourier de la señal de referencia y Figura 7.13 correspondiente a la transformada de Fourier de la señal a comparar) y del resumen expuesto en la Tabla 7.2, al normalizar y sincronizar las señales las frecuencias fundamentales no sufren variaciones. Sin embargo, la amplitud del espectro se ve considerablemente disminuida y las diferencias de amplitud a simple vista parecen mayores. Mas estas diferencias de amplitud tampoco son significativas ya que se trata de valores realmente bajos (del orden de 10^{-5}).

		Frecuencias					
		1kHz	4kHz	7kHz	10kHz	15kHz	18kHz
Amplitud FFT	Señal de referencia	0.00019	8.53e-5	2.27e-5	3.66e-5	0.00011	4.72e-5
	Señal a comparar	0.00013	9.54e-5	3.34e-5	3.73e-5	0.0001	5.72e-5

Tabla 7.2: Valores de amplitud de la FFT para cada una de las frecuencias predominantes (señales normalizadas y sincronizadas).

7.1.2.- Comparación mediante análisis tiempo-frecuencia (STFT).

La comparación de señales en el dominio de la frecuencia no proporciona indicadores de diagnóstico de averías demasiado precisos. Los análisis tiempo-frecuencia permiten obtener mejores indicadores para el diagnóstico de fallos que las técnicas únicamente frecuenciales.

Antes de aplicar la transformada corta de Fourier a las señales, se les realiza un pre-procesado consistente en la normalización, sincronización y cálculo de la envolvente mediante la transformada de Hilbert. Este proceso fue descrito en el capítulo 5.

El resultado de todo este proceso se muestra en la Figura 7.14. En ella se puede ver la superposición de las envolventes de las señales normalizadas y sincronizadas (en rosa se muestra la correspondiente a la señal de referencia y en azul la de la señal a comparar). Los tiempos de inicio y fin de cada uno de los impulsos de las señales después de todo este proceso no sufren variaciones con respecto a los que se mostraron en la Figura 7.11.

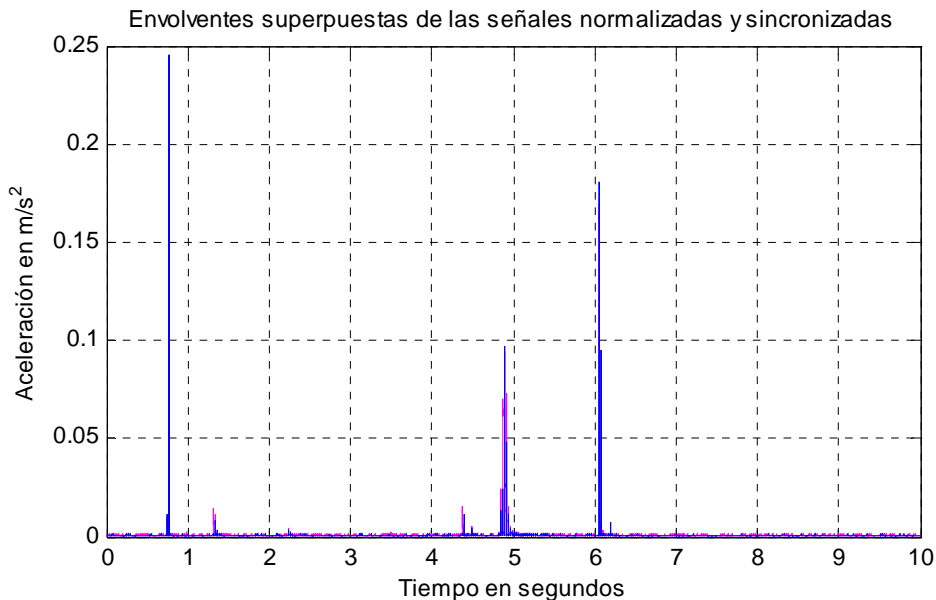


Figura 7.14: Superposición de las envolventes de las señales de vibración normalizadas y sincronizadas (señal de referencia: rosa; señal a comparar: azul).

Por tratarse de dos señales en buen estado, no se presentan diferencias significativas a la hora de llevar a cabo la comparación entre impulsos. Por ese motivo a continuación, y a modo de ejemplo, tan sólo se va a realizar un cotejamiento de los resultados obtenidos para el impulso número 5 de ambas señales.

En la Figura 7.15 se muestra la superposición del impulso 5 de ambas señales una vez normalizadas y sincronizadas. Se comprueba que existe un pequeño desfase entre el impulso 5 de una y otra señal. Sin embargo estas pequeñas diferencias no son lo bastante significativas como para que indujeran a pensar en la existencia de una avería.

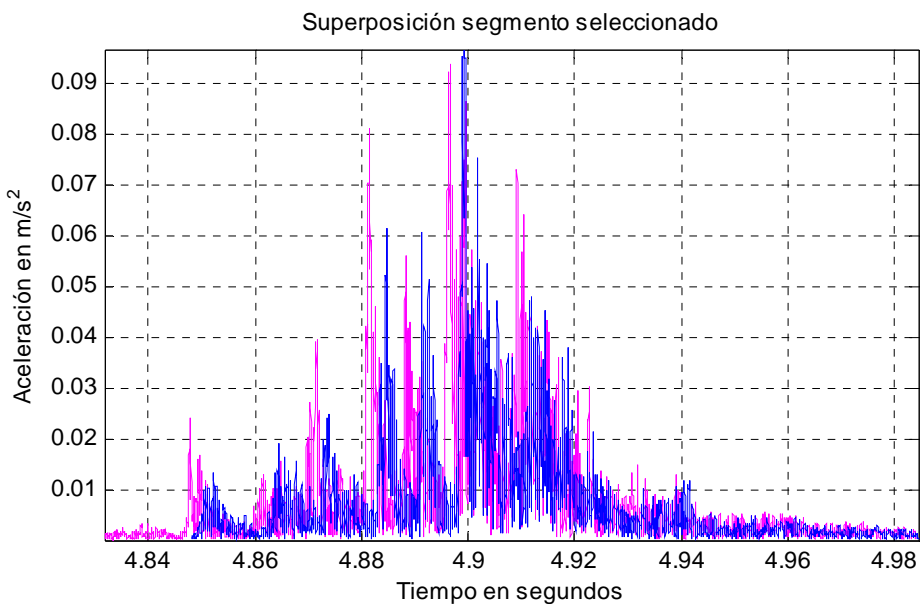


Figura 7.15: Superposición del impulso 5 de señales normalizadas y sincronizadas (rosa: señal de referencia; azul: señal a comparar).

De igual forma, en las figuras 7.16 y 7.17 correspondientes a los espectros en frecuencia (o transformada de Fourier) de la señal tomada como patrón de referencia (Figura 7.16) y a la señal a comparar (Figura 7.17), no se aprecian grandes diferencias.

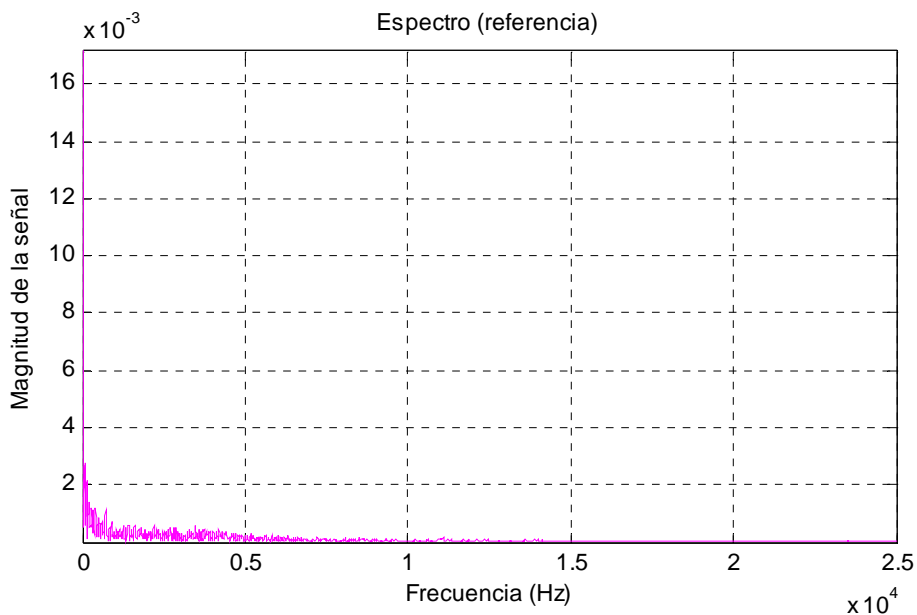


Figura 7.16: Espectro correspondiente al impulso 5 de la señal de referencia normalizada y sincronizada.

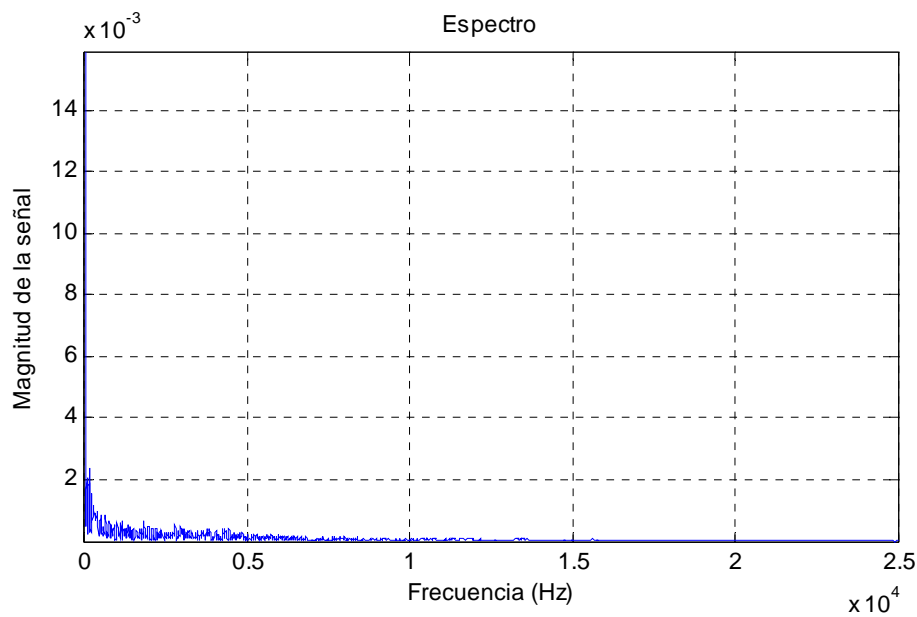
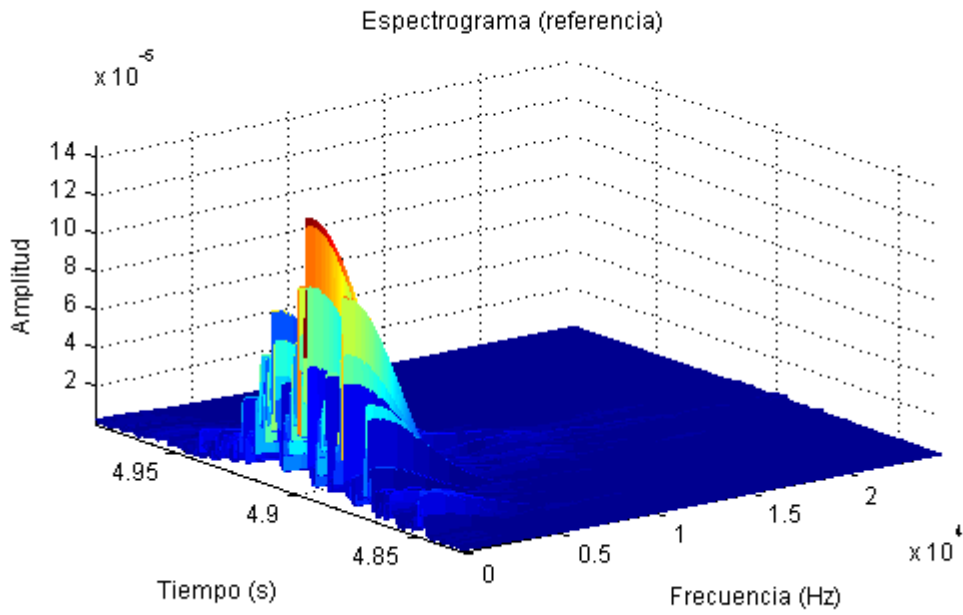


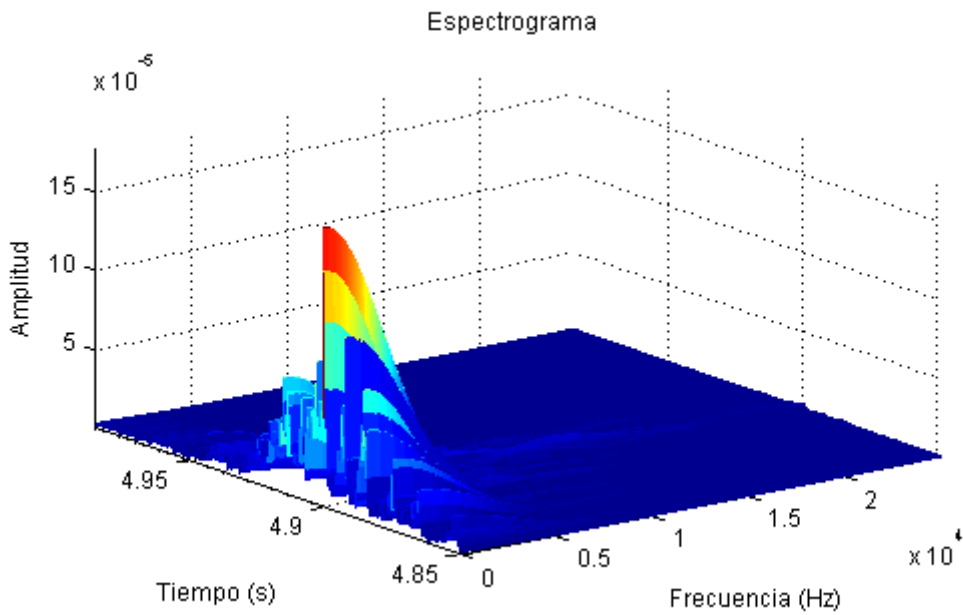
Figura 7.17: Espectro correspondiente al impulso 5 de la señal a comparar normalizada y sincronizada.

Finalmente, y como era de esperar, en la Figura 7.18 en la que se muestran los espectrogramas correspondientes al impulso 5 de ambas señales tampoco se aprecian diferencias significativas entre una y otra señal.

Por tanto, a tenor de los resultados obtenidos se puede concluir que no existe ningún tipo de avería en las señales comparadas (ambas son señales en buen estado).



a)



b)

Figura 7.18: Espectrograma del impulso 5 de las señales normalizadas y sincronizadas (a) señal de referencia; b) señal a comparar).

7.2.- Comparación de una señal con avería y otra en buen estado.

A continuación se compara una señal en buen estado con otra que presenta algún tipo de avería. La señal en buen estado tomada como patrón de referencia será, al igual que en el apartado 7.1, la 7_8_9_1 (Figura 7.19), mientras que la señal que se va a comparar es la 5-6-7-1 (Figura 7.20).

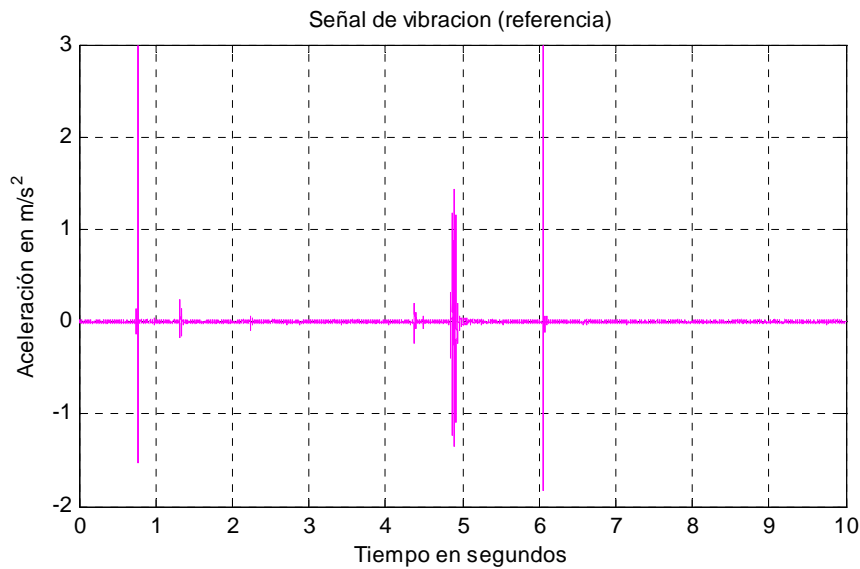


Figura 7.19: Señal de vibración 7_8_9_1 (referencia).

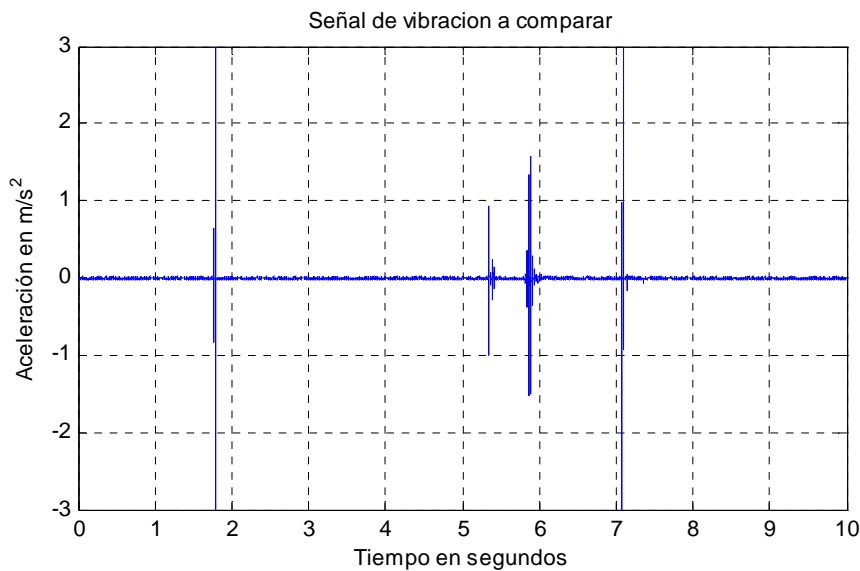


Figura 7.20: Señal de vibración 5-6-7-1 (a comparar).

La frecuencia de muestreo para ambas señales es de 50000Hz.

7.2.1.- Comparación en el dominio de la frecuencia (FFT).

Inicialmente se va a estudiar el comportamiento frecuencial de las señales de entrada (sin pasar por la etapa de pre-procesado). La Figura 7.21 corresponde a la superposición de las señales de entrada. El desfase inicial existente entre ambas es de 1,02312 segundos.

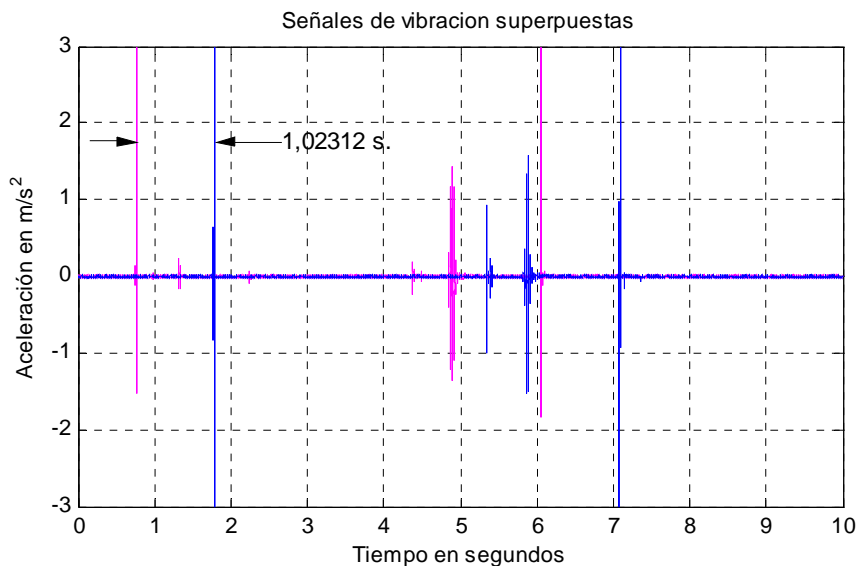


Figura 7.21: Superposición de las señales de entrada (rosa: señal de referencia; azul: señal a comparar).

Los tiempos de inicio y fin de cada uno de los impulsos presentes en las señales, así como su duración y el tiempo transcurrido entre dos impulsos consecutivos, se muestran en la Figura 7.22 (en rosa se muestran los tiempos correspondientes a la señal de referencia, mientras que en azul aparecen los tiempos correspondientes a la señal a comparar).

Tabla resumen resultados

Impulso	Tiempo inicio	Tiempo fin	Duracion	Tiempo entre impulsos
1	1.75481 0.745192	1.79487 0.769231	0.0400641 0.0240385	0 0.536859
2	0 1.30609	0 1.36218	0 0.0560897	0 3.00481
3	0 4.36699	0 4.39103	0 0.0240385	0 0.088141
4	5.34455 4.47917	5.41667 4.50321	0.0721154 0.0240385	0.408654 0.328526
5	5.82532 4.83173	5.99359 4.98397	0.168269 0.152244	1.08173 1.06571
6	7.07532 6.04968	7.10897 6.06731	0.0336538 0.0176282	

Señal de vibracion a comparar
Señal de vibracion de referencia

Figura 7.22: Tiempos entre impulsos: señal de referencia (rosa), señal a comparar (azul).

La señal de referencia (rosa) presenta 6 impulsos, mientras que la señal a comparar (azul) presenta sólo 4 impulsos (los impulsos 2 y 3 han desaparecido). Este hecho hace indicar que la señal que se está comparando presenta algún tipo de avería.

Al igual que para la comparación de dos señales en buen estado, los tiempos de inicio y fin de cada uno de los impulsos han sido hallados con base en un umbral de energía fijado en un 0,3% de la energía máxima de la señal, con el fin de captar todos los impulsos de las señales y excluir los posibles espurios que pudieran presentarse.

En la Figura 7.23 se muestra la gráfica correspondiente a la energía de la señal de referencia, mientras que la Figura 7.24 muestra la energía de la señal a comparar.

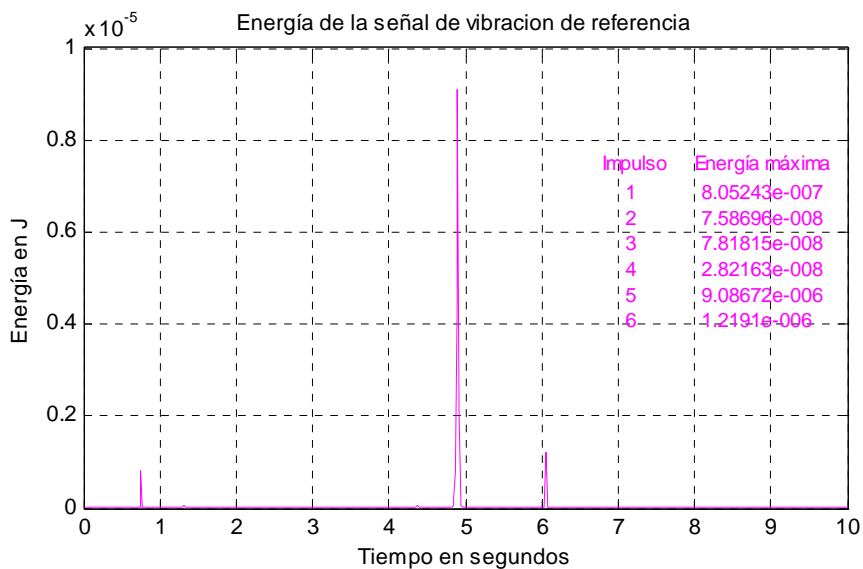


Figura 7.23: Energía de la señal de vibración de referencia.

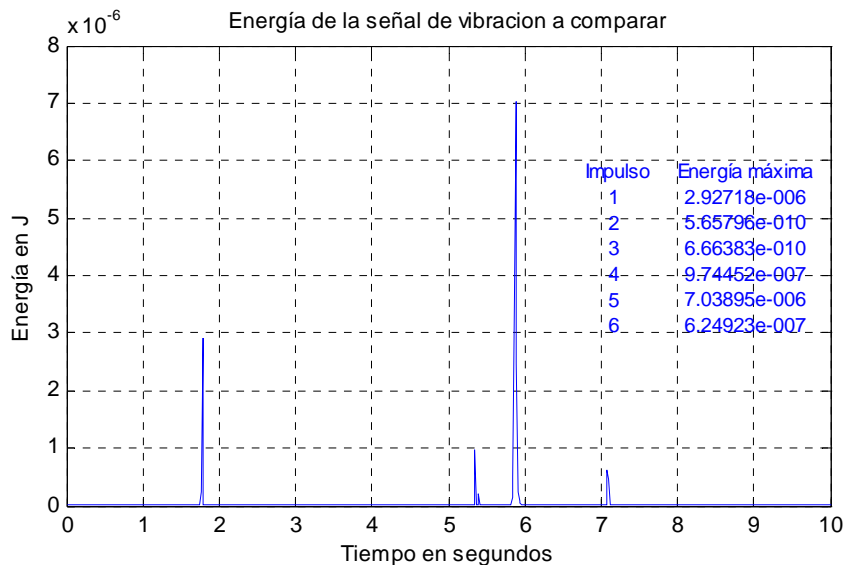


Figura 7.24: Energía de la señal de vibración a comparar.

Para ambas señales el impulso 5 es el que presenta la máxima energía. En el caso de la señal de referencia, el valor máximo de energía es de $9,08672 \cdot 10^{-6}$ J, mientras que para la señal a comparar es igual a $7,03895 \cdot 10^{-6}$ J. Por tanto, los umbrales para una y otra señal serán:

Señal de referencia:

$$\text{umbral} = 0,003 \cdot \text{energía máxima} = 0,003 \cdot 9,08672 \cdot 10^{-6} = 2,726 \cdot 10^{-8} \text{ J}$$

Señal a comparar:

$$\text{umbral} = 0,003 \cdot \text{energía máxima} = 0,003 \cdot 7,03895 \cdot 10^{-6} = 2,112 \cdot 10^{-8} \text{ J}$$

En la parte derecha de las figuras 7.23 y 7.24 se expone el valor máximo de energía para cada uno de los impulsos y se puede comprobar que, en el caso de la señal que se está comparando (Figura 7.24), el contenido energético en el segmento que corresponde al impulso 2 cuya energía es $5,65796 \cdot 10^{-10}$ J y el impulso 3, que presenta una energía de $6,66383 \cdot 10^{-10}$ J, es inferior al umbral fijado para esta señal ($2,112 \cdot 10^{-8}$ J), quedando establecido por tanto que dichos impulsos no están presentes en la señal.

En la Figura 7.25 se muestra la transformada de Fourier de la señal tomada como patrón de referencia, mientras que en la Figura 7.26 se puede ver la transformada de Fourier de la señal a comparar.

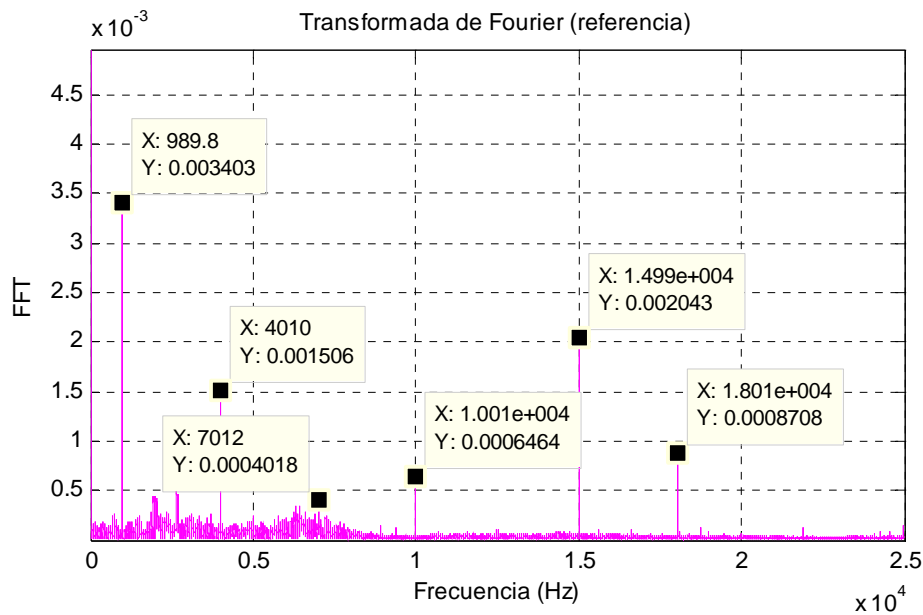


Figura 7.25: Transformada de Fourier de la señal de referencia.

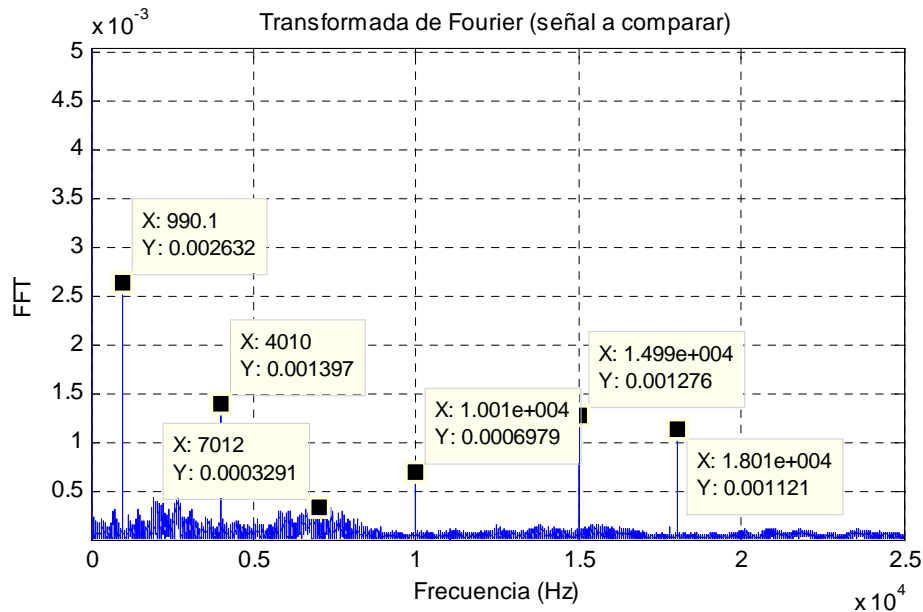


Figura 7.26: Transformada de Fourier de la señal a comparar.

A simple vista no se aprecian grandes diferencias ya que las transformadas de Fourier de una y otra señal son muy parecidas. Además, en los dos casos las frecuencias predominantes son 1kHz, 4kHz, 7kHz, 10kHz, 15kHz y 18kHz.

Sin embargo, al superponer las transformadas (Figura 7.27) se pueden apreciar diferencias de amplitud en varias de las frecuencias predominantes (las mayores diferencias se presentan para 1kHz y 15kHz), lo que podría indicar que existe algún tipo de avería en la señal que se está comparando.

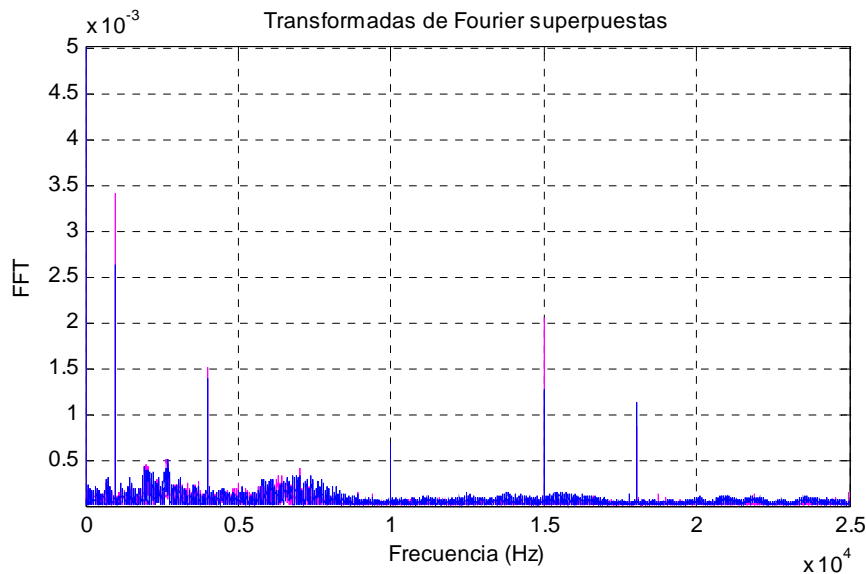


Figura 7.27: Superposición de la transformada de Fourier de ambas señales (rosa: señal patrón; azul: señal a comparar).

En la Tabla 7.3 se muestra el valor de la FFT para cada frecuencia y para cada una de las señales.

		Frecuencias					
		1kHz	4kHz	7kHz	10kHz	15kHz	18kHz
Amplitud FFT	Señal de referencia	0.0034	0.0015	0.0004	0.00064	0.002	0.00087
	Señal a comparar	0.0026	0.0013	0.00032	0.00069	0.0012	0.0011

Tabla 7.3: Valores de amplitud de la FFT para cada una de las frecuencias predominantes.

Con el fin de realizar una mejor comparación, se somete a la señal a la etapa de pre-procesamiento (normalización y sincronización); con este tratamiento se tratan de minimizar los efectos indeseables de las vibraciones.

Después de las etapas de normalización y sincronización el desfase inicial entre las dos señales desaparece; además, el grado de correlación aumenta, pasando de 0,0006 a 0,0382.

En la Figura 7.28 se representa la superposición de las señales una vez normalizadas y sincronizadas.

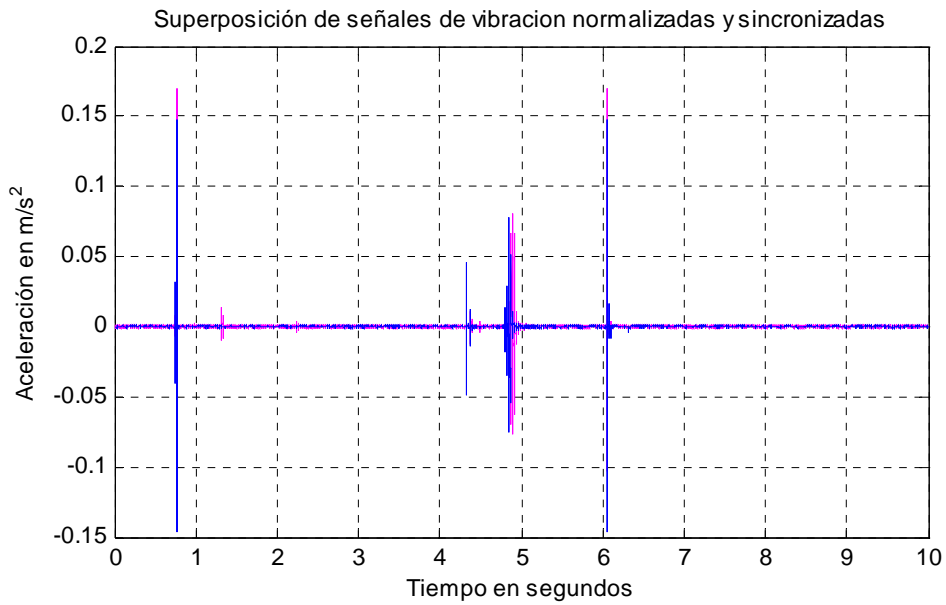


Figura 7.28: Superposición de las señales de vibración normalizadas y sincronizadas (señal de referencia: rosa; señal a comparar: azul).

Tras la etapa de pre-procesado, y como ya se comentó con anterioridad, no se producen variaciones en la energía de las señales, luego los umbrales de detección de impulsos no sufren modificaciones ($2,726 \cdot 10^{-8} \text{J}$ para la señal de referencia y $2,112 \cdot 10^{-8} \text{J}$ para la señal a comparar).

Los tiempos de inicio y fin de los impulsos de las señales (así como su duración y el intervalo transcurrido entre impulsos consecutivos) una vez realizada la sincronización se muestran en la Figura 7.29.

Tabla resumen resultados

Impulso	Tiempo inicio	Tiempo fin	Duración	Tiempo entre impulsos
1	0.731688	0.771752	0.0400641	0
	0.745192	0.769231	0.0240385	0.536859
2	0	0	0	0
	1.30609	1.36218	0.0560897	3.00481
3	0	0	0	0
	4.36699	4.39103	0.0240385	0.088141
4	4.32143	4.39355	0.0721154	0.408654
	4.47917	4.50321	0.0240385	0.328526
5	4.8022	4.97047	0.168269	1.08173
	4.83173	4.98397	0.152244	1.06571
6	6.0522	6.08585	0.0336538	
	6.04968	6.06731	0.0176282	

Señal de vibración a comparar
Señal de vibración de referencia

Figura 7.29: Tiempos entre impulsos de las señales sincronizadas: señal de referencia (azul); señal a comparar (rosa).

Las transformadas de Fourier superpuestas, una vez realizada la normalización y sincronización de señales, se muestran en la Figura 7.30.

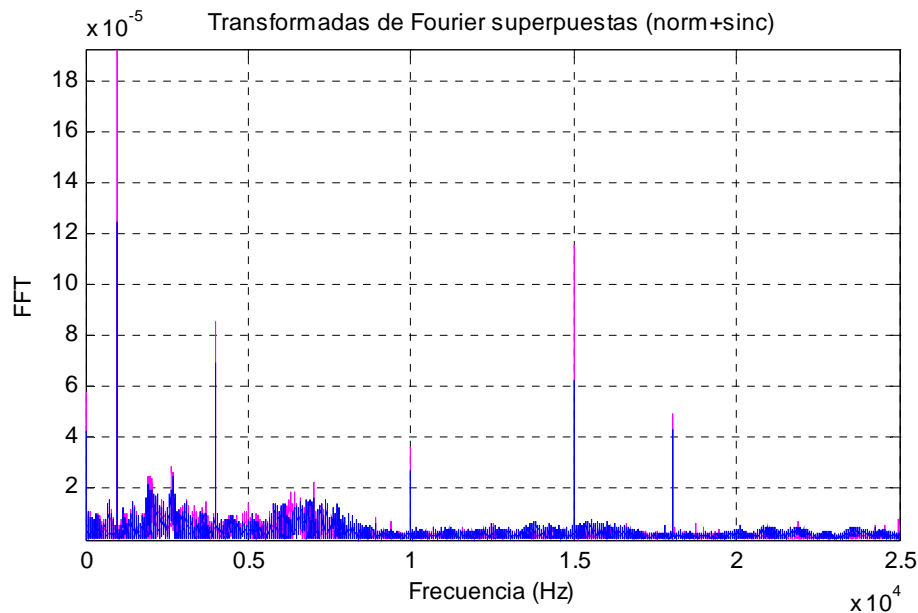


Figura 7.30: Superposición de la transformada de Fourier de ambas señales (rosa: señal patrón; azul: señal a comparar).

En la Figura 7.30 se puede observar que las pequeñas diferencias de amplitud que se apreciaban con las señales antes de su pre-procesado se han acentuado considerablemente. En la Tabla 7.4 se muestra un resumen con los valores de amplitud de la FFT en cada una de las frecuencias predominantes y para cada una de las señales, y se comprueba que existen importantes diferencias de amplitud para la mayor parte de frecuencias.

		Frecuencias					
		1kHz	4kHz	7kHz	10kHz	15kHz	18kHz
Amplitud FFT	Señal de referencia	0.00019	8.53e-5	2.27e-5	3.66e-5	0.00011	4.72e-5
	Señal a comparar	0.00012	6.98e-5	1.613e-5	2.709e-5	6.258e-5	4.369e-5

Tabla 7.4: Valores de amplitud de la FFT para cada una de las frecuencias predominantes (señales normalizadas y sincronizadas).

Por tanto, a partir del análisis frecuencial desarrollado y de la no presencia de los impulsos 2 y 3 de la señal que se está comparando, se puede decir que existe algún tipo de avería en dicha señal. Aún así, y con la finalidad de realizar una comparación más amplia entre las señales, a continuación se procede a realizar un análisis tiempo-frecuencia de las mismas.

7.2.2.- Comparación mediante análisis tiempo-frecuencia (STFT).

En un principio se procede a normalizar, sincronizar y hallar la envolvente de las señales según se describió en el capítulo 5. Este proceso se muestra en las figuras 7.31 a 7.33. Así, en la Figura 7.31 se muestra la superposición de de las señales de entrada sincronizadas. En la Figura 7.32 se puede ver la superposición de las señales una vez

normalizadas y sincronizadas. En la Figura 7.33 se muestra la superposición de las envolventes de las señales normalizadas y sincronizadas.

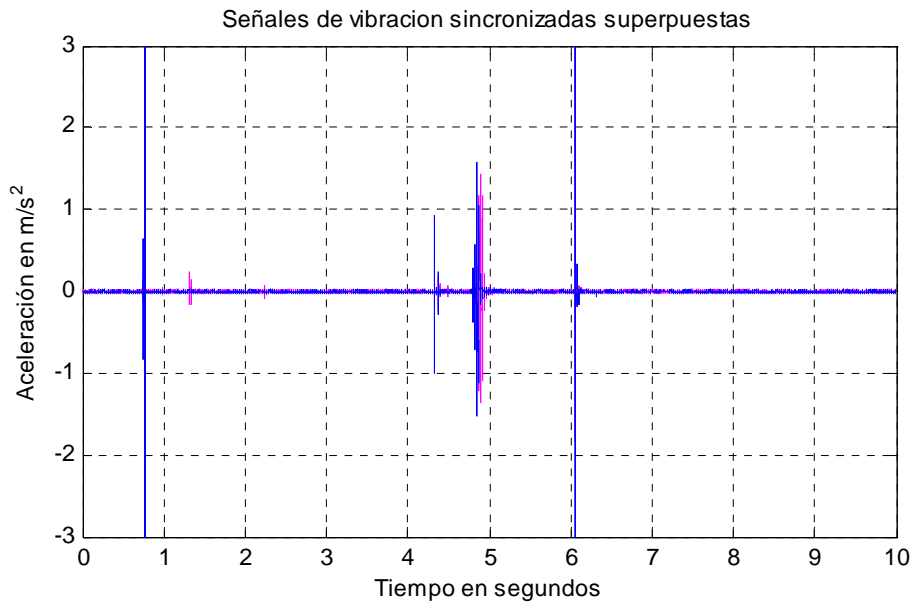


Figura 7.31: Superposición de las señales de entrada sincronizadas (rosa: señal de referencia; azul: señal a comparar).

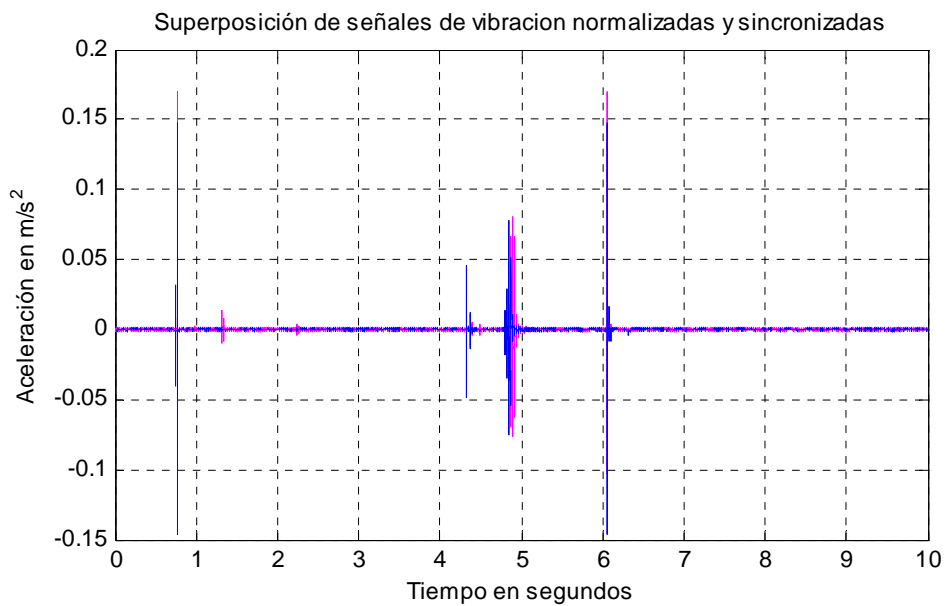


Figura 7.32: Superposición de las señales de entrada sincronizadas y normalizadas (rosa: señal de referencia; azul: señal a comparar).

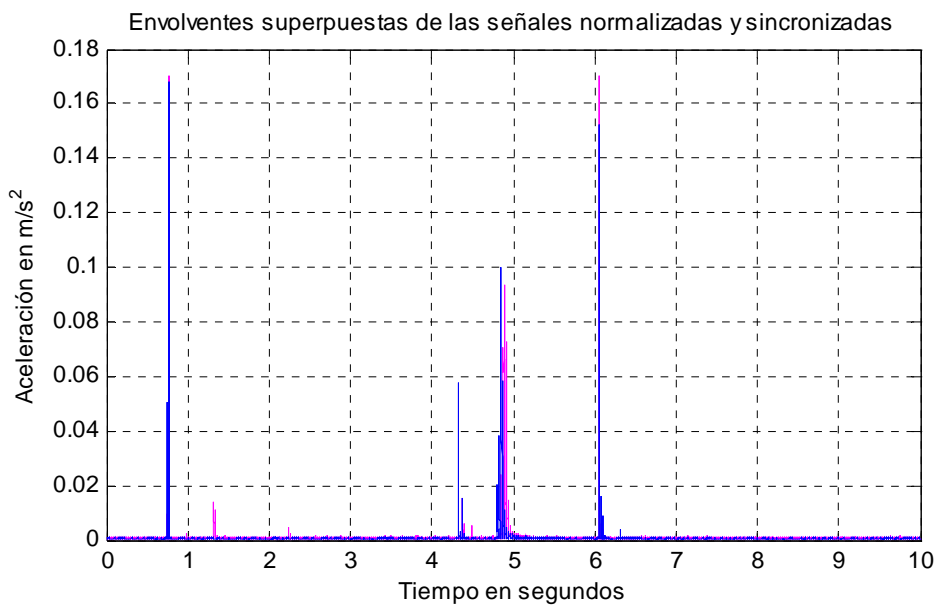


Figura 7.33: Superposición de las envolventes de las señales de entrada sincronizadas y normalizadas (rosa: señal de referencia; azul: señal a comparar).

A partir de las figuras 7.31, 7.32 y 7.33 se pueden comprobar las diferencias temporales existentes entre los impulsos de las dos señales a pesar de la sincronización. También se comprueba la no presencia de los impulsos 2 y 3 de la señal a comparar.

Los tiempos de los impulsos de las dos señales no sufren modificaciones con respecto a los mostrados en la Figura 7.29.

Dado que los impulsos más conflictivos de la señal a comparar son el 2 y el 3, se va a efectuar una comparación más exhaustiva de éstos con los correspondientes de la señal de referencia. Además, se estudiará también el impulso 5 de las señales.

En la Figura 7.34 se muestra la superposición del impulso 2 de ambas señales normalizadas y sincronizadas. En ella se observa claramente que, mientras en la señal de referencia (rosa) se produce el impulso, la señal a comparar (azul) no sufre ninguna variación tan abrupta, manteniéndose en un valor bastante bajo (el valor medio de la señal a comparar normalizada y sincronizada en este tramo es de $0,0003m/s^2$). Por tanto, queda demostrada la no existencia del impulso 2 en la señal a comparar.

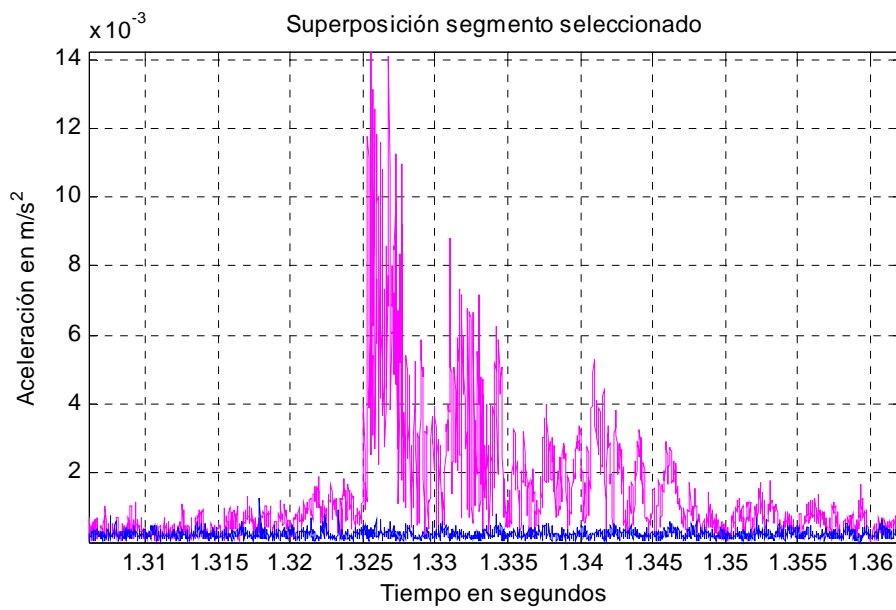


Figura 7.34: Superposición del impulso 2 de las señales normalizadas y sincronizadas (rosa: señal de referencia; azul: señal a comparar).

En la Figura 7.35 se expone el espectro correspondiente al impulso 2 de la señal de referencia, mientras que la Figura 7.36 muestra el espectro correspondiente al impulso 2 de la señal a comparar. En ellas se aprecian diferencias bastante significativas tanto en la magnitud de la transformada (las amplitudes de la señal a comparar son 10 veces menores que las presentes en la señal de referencia) como en las componentes frecuenciales (la señal de referencia posee mayores componentes tanto a altas como a bajas), lo cual confirma la existencia de algún tipo de avería.

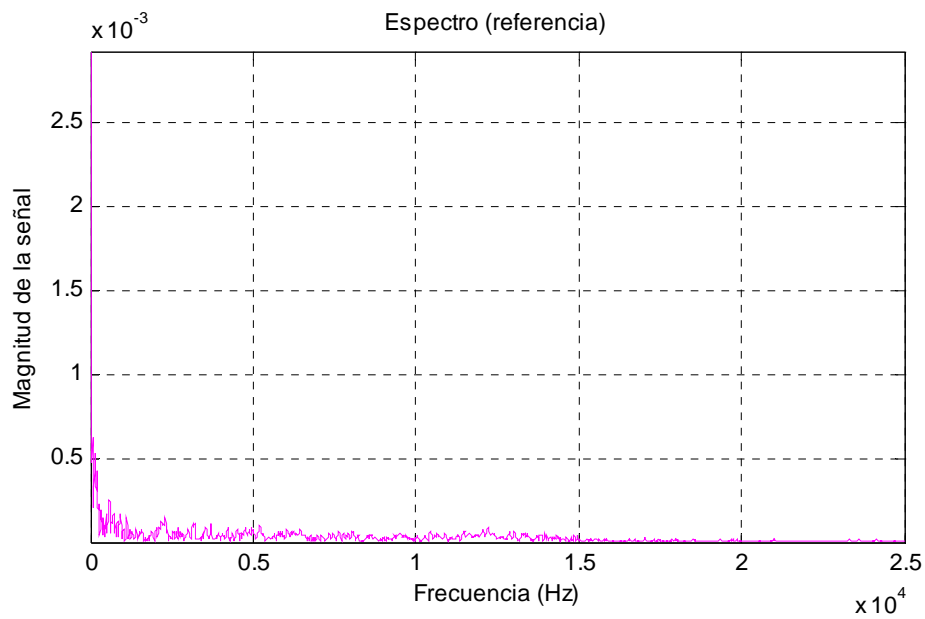


Figura 7.35: Espectro del impulso 2 de la señal de referencia normalizada.

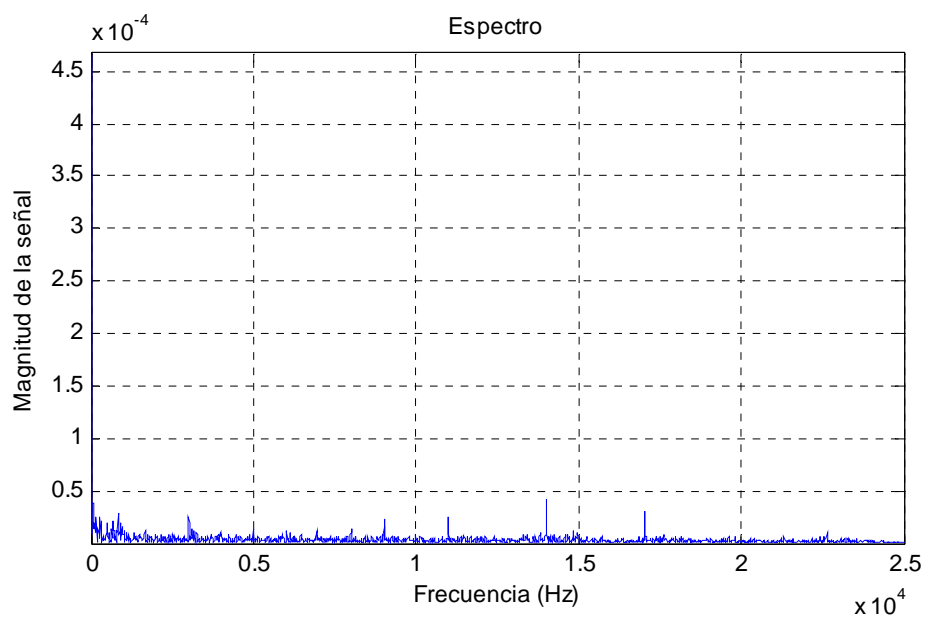


Figura 7.36: Espectro del impulso 2 de la señal a comparar normalizada y sincronizada.

Estas diferencias existentes entre el impulso 2 de una y otra señal se hacen todavía más patentes en los espectrogramas mostrados en las figuras 7.37 (espectrograma del impulso 2 de la señal de referencia normalizada) y 7.38 (espectrograma del impulso 2 de la señal a comparar normalizada y sincronizada).

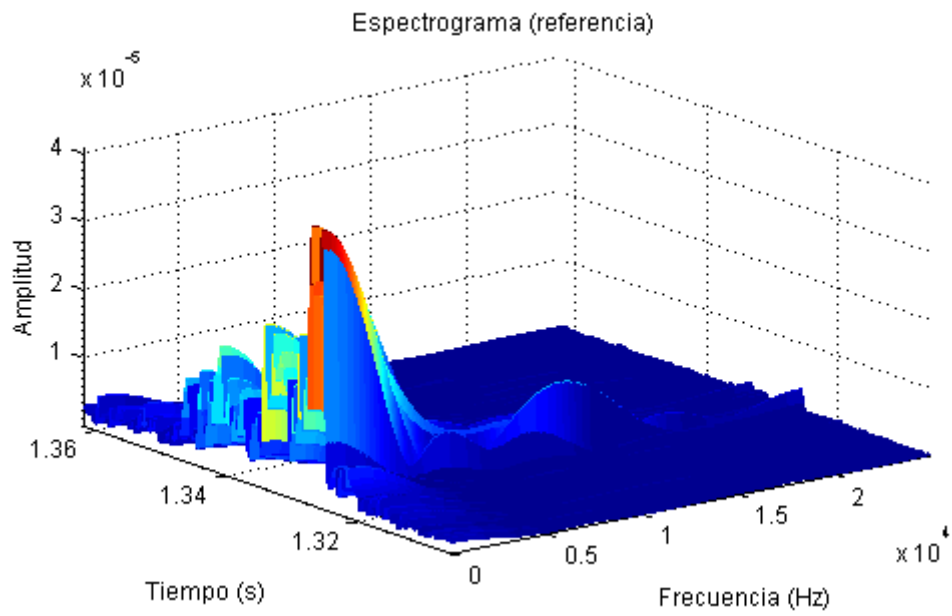


Figura 7.37: Espectrograma del impulso 2 de la señal de referencia normalizada.

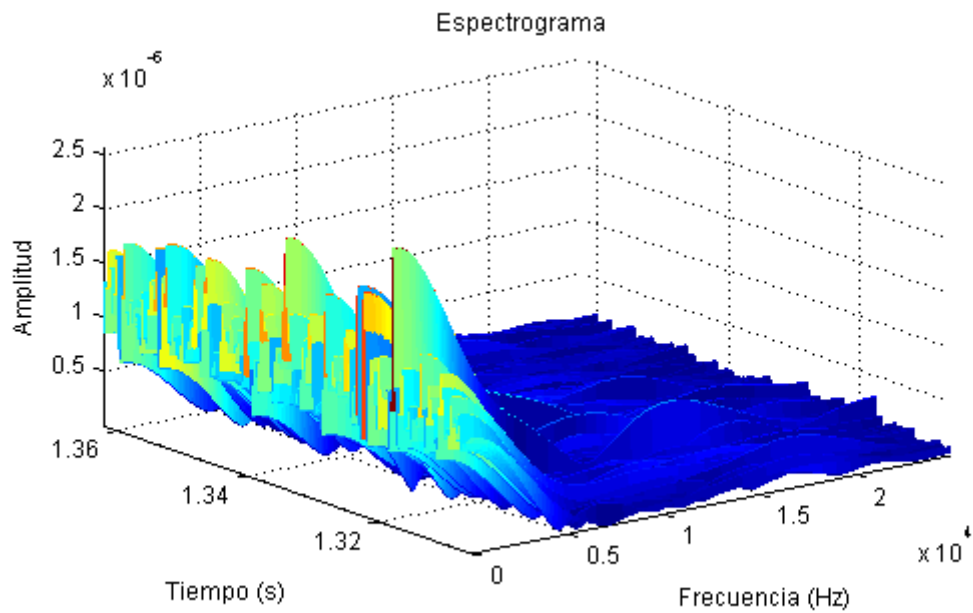


Figura 7.38: Espectrograma del impulso 2 de la señal a comparar normalizada y sincronizada.

Si se observa la superposición del impulso 3 (Figura 7.39) se ven variaciones bruscas en ambas señales, pudiendo parecer por tanto que el tercer impulso está presente tanto en la señal de referencia como en la señal a comparar. Sin embargo, y teniendo en cuenta los tiempos de inicio y fin de cada impulso mostrados en la Figura 7.29, en realidad no se trata del tercer impulso de la señal a comparar, sino de parte de su impulso 4, que va desde 4,32s a 4,39s.

Por ende, en realidad se están poniendo de manifiesto las diferencias temporales existentes entre una y otra señal a pesar de haber realizado una sincronización de las mismas. Este hecho puede llevar a confusiones e inducir a una interpretación errónea de los resultados.

La señal a comparar no presenta el impulso 3; la superposición de la Figura 7.39 en realidad se corresponde con la superposición del impulso 3 de la señal tomada como patrón de referencia y parte del impulso 4 de la señal a comparar.

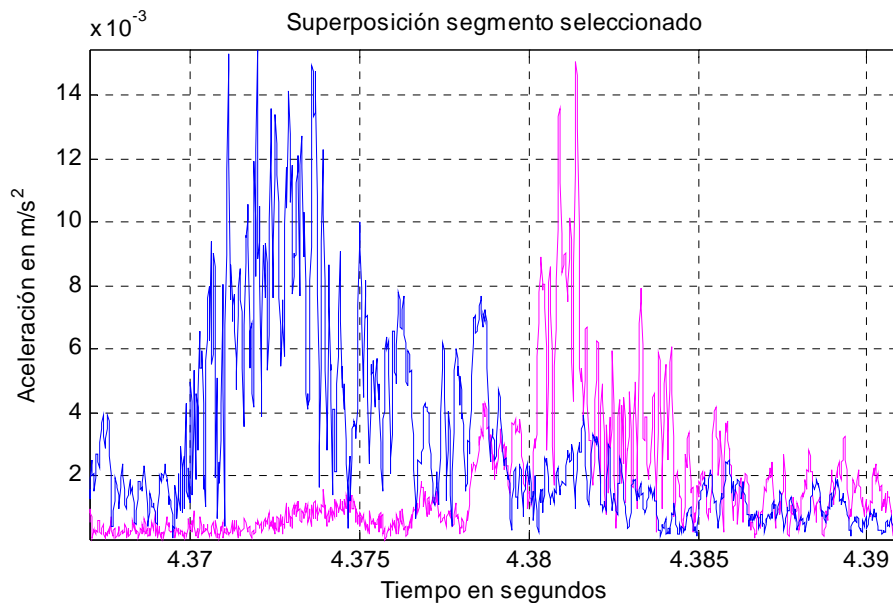


Figura 7.39: Superposición del impulso 3 de las señales normalizadas y sincronizadas (rosa: señal de referencia; azul: señal a comparar).

En las gráficas 7.40 y 7.41 se presentan los espectros en frecuencia (transformadas de Fourier) del impulso 3 de la señal de referencia (Figura 7.40) y de la señal a comparar (Figura 7.41). Debido a las diferencias temporales que se comentaron con anterioridad (el impulso 3 de la señal de referencia coincide temporalmente con el impulso 4 de la señal a comparar) no se aprecian diferencias demasiado significativas en los espectros de una y otra señal.

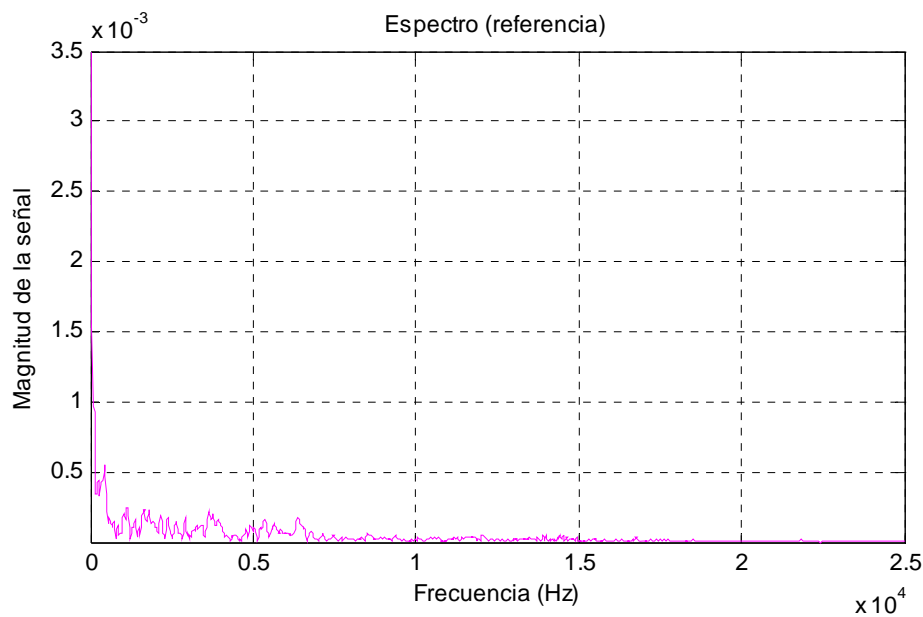


Figura 7.40: Espectro del impulso 3 de la señal de referencia normalizada.

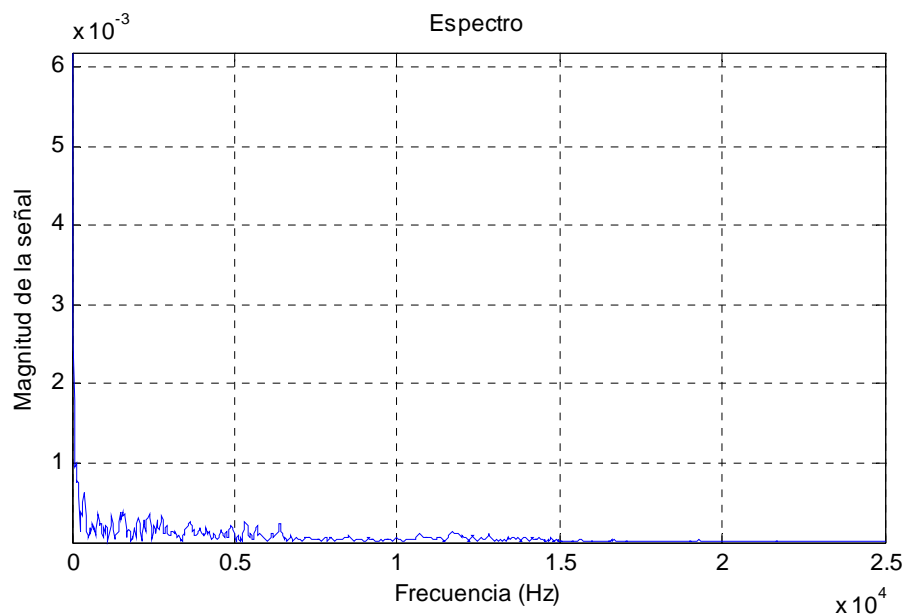


Figura 7.41: Espectro del impulso 3 de la señal a comparar normalizada y sincronizada.

En los espectrogramas correspondientes al impulso 3 de la señal de referencia normalizada (Figura 7.42) y de la señal a comparar normalizada y sincronizada (Figura 7.43) tampoco se aprecian diferencias importantes debido a este solapamiento de tiempos. Sin embargo, es evidente que existe una avería en la señal a comparar ya que, en caso de haber presentado el impulso 3, este solapamiento no se habría producido y las gráficas no inducirían a posibles interpretaciones erróneas.

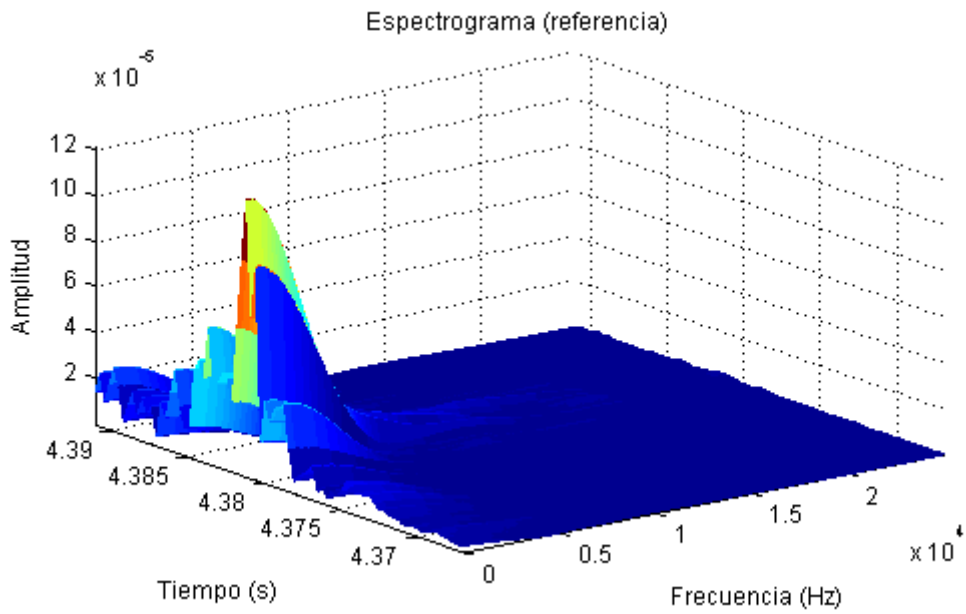


Figura 7.42: Espectrograma del impulso 3 de la señal de referencia normalizada.

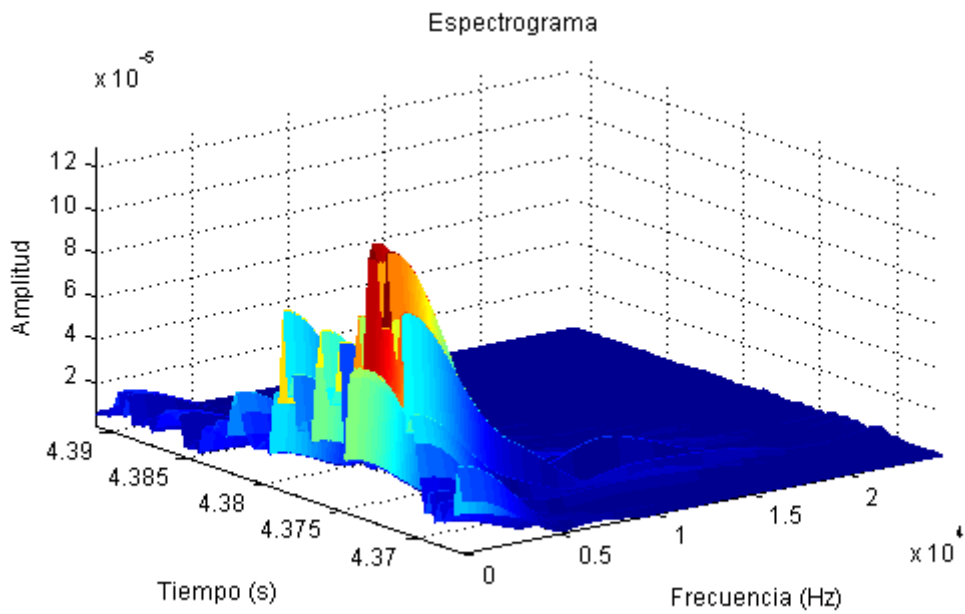


Figura 7.43: Espectrograma del impulso 3 de la señal a comparar normalizada y sincronizada.

Con respecto al impulso 5, mostrado en la Figura 7.44 (superposición del impulso 5 de las señales normalizadas y sincronizadas), se aprecia un cierto desplazamiento entre la señal tomada como patrón de referencia (rosa) y la señal a comparar con ella (azul), pero las variaciones y amplitudes dentro del impulso son bastante parecidas, por lo que a partir de la comparación de este impulso no se podría inferir la existencia de algún tipo de avería.

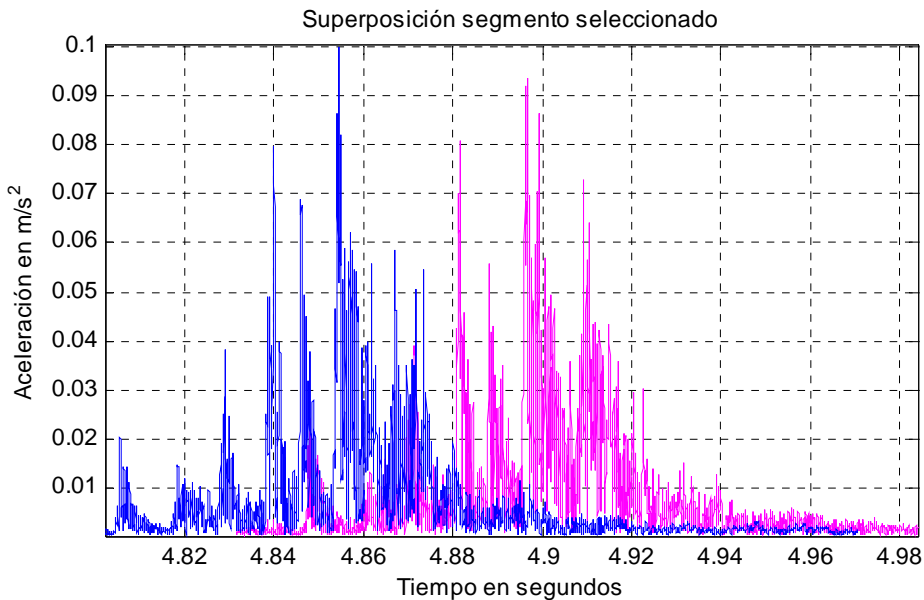


Figura 7.44: Superposición del impulso 5 de las señales normalizadas y sincronizadas (rosa: señal de referencia; azul: señal a comparar).

Finalmente, en las figuras 7.45 a 7.48 se muestran los espectros en frecuencia de las señales y los espectrogramas correspondientes al impulso 5. Así, la Figura 7.45 muestra el espectro del impulso 5 de la señal de referencia normalizada, mientras que la Figura 7.46 presenta el espectro del impulso 5 de la señal a comparar normalizada y sincronizada. En cuanto a los espectrogramas del impulso 5 de las señales, en la Figura 7.47 se muestra el correspondiente a la señal de referencia y en la Figura 7.48 el de la señal a comparar. Al tratarse de un impulso que en principio no presenta problemas, no se aprecian diferencias significativas al comparar las gráficas de una y otra señal.

El espectro de la señal de referencia (Figura 7.45) es prácticamente idéntico al obtenido para la señal comparada (Figura 7.46). Lo mismo sucede con los espectrogramas: únicamente se aprecia un ligero desfase en el tiempo entre el obtenido para la señal patrón (Figura 7.47) y el que se obtiene para la señal comparada (Figura 7.48); las componentes frecuenciales y la amplitud son muy parecidas.

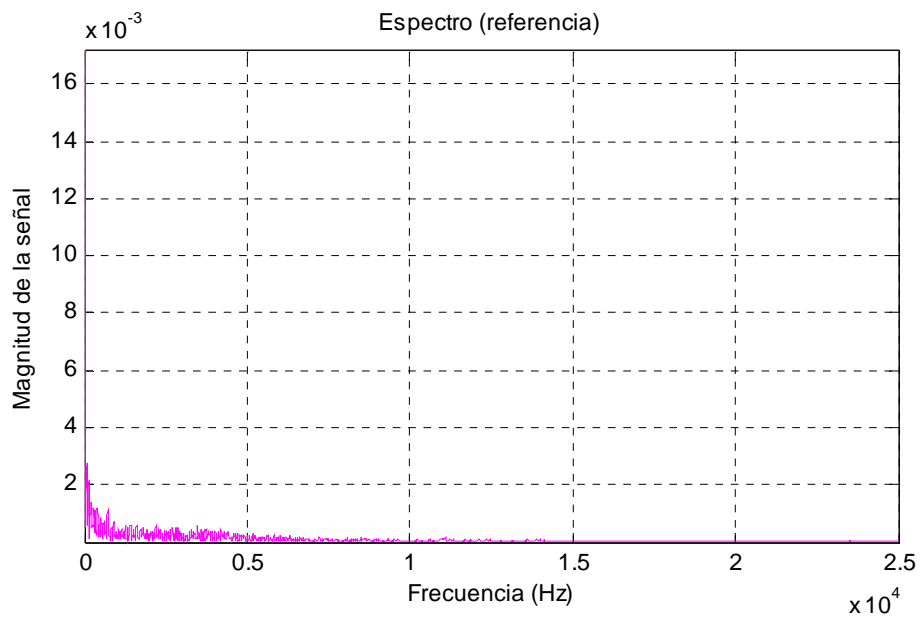


Figura 7.45: Espectro del impulso 5 de la señal de referencia normalizada.

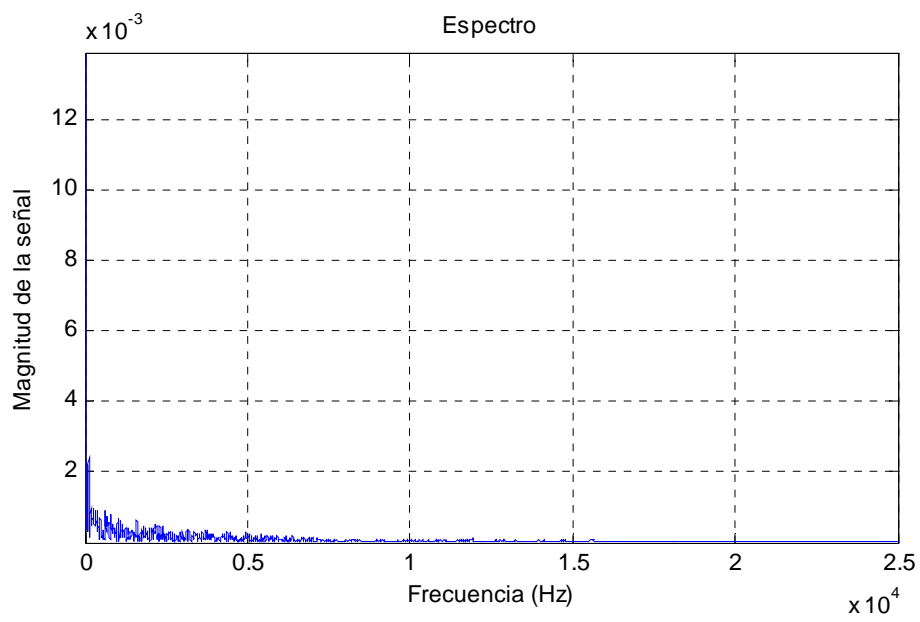


Figura 7.46: Espectro del impulso 5 de la señal a comparar normalizada y sincronizada.

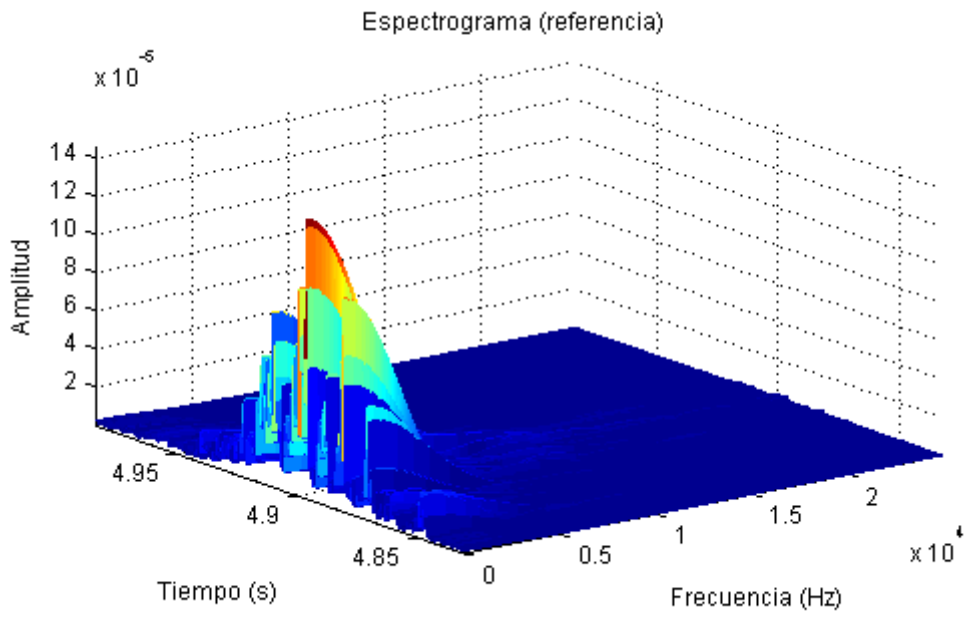


Figura 7.47: Espectrograma del impulso 5 de la señal de referencia normalizada.

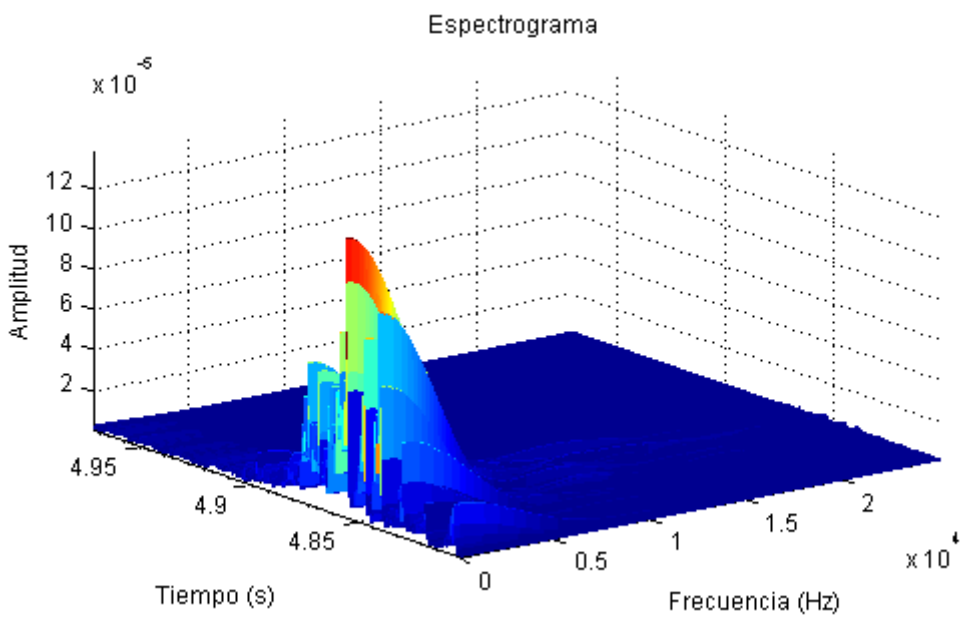


Figura 7.48: Espectrograma del impulso 5 de la señal a comparar normalizada y sincronizada.

Por tanto, y a partir de los resultados obtenidos mediante la representación tiempo-frecuencia de los distintos impulsos, se puede decir que el hecho de la existencia de una avería hace que el espectro de los impulsos afectados varíe. Además, si el número de impulsos presentes en la señal se ve modificado es probable que se trate de una avería grave. Esta modificación en el número de impulsos provoca variaciones en la representación de los mismos en el tiempo con respecto a los de una señal en buen estado, y puede ocasionar la aparición de solapamientos entre los tiempos de distintos impulsos de una y otra señal (como sucedía con el impulso 3 de las señales comparadas), lo cual puede llevar a una interpretación errónea de los resultados.

8.- CONCLUSIONES.

8.1.- Conclusiones.

En el presente proyecto se ha diseñado una interfaz gráfica de usuario que permite realizar de forma fácil y sencilla la comparación y análisis de señales, con el fin de facilitar el diagnóstico del estado del CTC. Para tal fin se han utilizado la transformada rápida de Fourier (FFT) y la transformada de Fourier en tiempo corto (STFT). El desarrollo de la interfaz se ha efectuado partiendo de un algoritmo existente utilizado para el análisis de señales, el cual ha sido modificado, ampliado y mejorado.

De la utilización de la FFT y de la STFT se puede concluir lo siguiente:

- *Transformada rápida de Fourier (FFT):*

La transformada rápida de Fourier aplicada a las señales de vibración del cambiador de tomas en carga no proporciona resultados que permitan la correcta comparación entre señales. Los espectros que se obtienen aun con dos señales muy distintas en el dominio del tiempo pueden ser semejantes, por lo que resulta difícil establecer a partir de los espectros grandes diferencias que impliquen la existencia de algún tipo de avería en alguna de las señales.

Se ha comprobado que el hecho de normalizar las señales hace que las diferencias de amplitud en el espectro se acentúen, consiguiendo así obtener un parámetro de comparación más fiable mientras que la sincronización de señales no provoca modificaciones en el espectro de las mismas.

- *Transformada de Fourier en tiempo corto (STFT):*

Este tipo de transformada permite realizar un análisis tiempo-frecuencia de las señales de vibración del cambiador de tomas en carga. Este método consiste en la segmentación de la señal utilizando una ventana (Hamming, Gauss, Kaiser,...); a cada uno de los segmentos se les aplica la transformada de Fourier y se calcula su energía. De esta forma se consiguen detectar los impulsos presentes, y cuáles han desaparecido. Asimismo se determinan los tiempos de inicio y fin de cada impulso, su duración y el tiempo transcurrido entre dos impulsos consecutivos. También es posible obtener el espectro de cada uno de los impulsos.

El principal indicador en el diagnóstico de averías y parámetro de comparación entre señales es el número de impulsos presentes en la señal. La no presencia de alguno de los impulsos indica que algún tipo de avería está afectando a la señal.

Comparando el espectro en frecuencias de los impulsos de una señal en buen estado con los de otra señal cualquiera también es posible determinar si esta última presenta algún defecto. Asimismo los espectrogramas son un buen método de comparación ya que se hacen notar simultáneamente las diferencias en amplitud, tiempo y frecuencia de cada uno de los impulsos de las señales.

Por tanto, el análisis de señales utilizando STFT proporciona una comparación entre señales más completa y efectiva, que la que se puede obtener utilizando

únicamente la FFT. Sin embargo, es aconsejable tener la posibilidad (como en el caso del interfaz desarrollado en este proyecto) de combinar ambos métodos para tener una visión más amplia y completa del estado de las señales y, por ende, del estado del CTC.

8.2.- Aportaciones originales.

La principal aportación original consiste en el diseño de una interfaz gráfica de usuario que permite el análisis frecuencial (FFT) o tiempo-frecuencia (STFT) de las señales de vibración de un cambiador de tomas en carga. Con ella es posible comparar una señal cualquiera con otra en buen estado para determinar la existencia o no de algún tipo de avería en la primera.

Se establece el análisis tiempo-frecuencia con STFT como método principal o complementario al análisis de las señales de vibración de un cambiador de tomas en carga. En la bibliografía consultada el principal método utilizado para el análisis de señales de CTC's es la transformada Wavelet.

Se ha dejado a elección del usuario el tipo de ventana a emplear en el análisis de forma que se puedan obtener los mejores resultados para cada aplicación. De igual forma el usuario escoge la frecuencia de muestreo de las señales.

Es posible cambiar la señal que se está comparando sin modificar el resto de los parámetros del análisis. Este hecho proporciona una mayor comodidad, simplicidad y rapidez durante los procesos de análisis y obtención de resultados.

9.- FUTUROS TRABAJOS.

Como futuros trabajos a desarrollar a partir de este proyecto fin de carrera se plantean los siguientes:

- Completar el análisis de señales efectuado con FFT y STFT utilizando la transformada Wavelet, cotejando así los resultados obtenidos con uno y otro método.
- Estudiar otros prototipos de señales procedentes de diferentes cambiadores de tomas en carga con el fin de parametrizar o estandarizar los distintos tipos de cambiadores; igualmente se podrían encontrar parámetros de detección de averías comunes.

10.- BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Arana López-Abad, M^a Soledad, *Interfaz gráfica para el cálculo de la dinámica longitudinal y prestaciones de un vehículo mediante la herramienta guide de Matlab*, Proyecto Fin de Carrera de la Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2004.
- [2] Braun, S. G., Ewins, D. J. y RAO, S. S., *Encyclopedia of Vibration*, London, Academic Press Inc., 2001.
- [3] Kahane, J. P., Lemarié, P.G., *Fourier series and wavelets*, Australia, Gordon and Breach Publishers, Studies in development of modern mathematics, 1995.
- [4] M. P. Norton, *Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers*, Cambridge, University Press, 1989.
- [5] Rivas Trujillo, E., *Detección de averías en cambiadores de tomas en carga de transformadores basado en el patrón de vibraciones*, Tesis doctoral de la Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2009.
- [6] Smith, Scott T., *Matlab advanced gui development*, Indianapolis, Dog Ear Publishing, 2006.
- [7] Programación con GUIDE de Matlab, <http://www.matpic.com/MATLAB>
- [8] Programación de GUIs con Matlab, <http://www.lawebdelprogramador.com/news>
- [9] The Mathworks, <http://www.mathworks.com>
- [10] D. E. Newland., *Vibraciones aleatorias y análisis espectral*, Madrid, Editorial AC, 1983.
- [11] Casasola Paredes, G. A., *Multianálisis frecuencial y estadístico de la vibración emitida por un elemento mecánico con fallo bajo diferentes estados de carga*, Proyecto Fin de Carrera de la Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2002.
- [12] Analysis, Encyclopedia Britannica. 2009. Encyclopedia Britannica Online. 17 Sept. 2009, <http://www.search.eb.com/eb/article-247690>
- [13] Francisco Jurado, José R. Saenz, *Comparison between discrete STFT and wavelets for the analysis of power quality events*, Electric Power Systems Research, 62, pp. 183-190, 2002.
- [14] Xiaohong Yuan, L. C., *Gearbox diagnosis using a modified Fourier series*, Proceedings of the 2003 IEEWASME, International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003), Hong Kong, China 2003.

- [15] Grindlay, J., *On an application of a generalization of the discrete Fourier transform to short time series*, Canadian Journal of Physics, May 2001, Vol. 79 Issue 5, p857, 12p..
- [16] N. Roy, P. Purkait and K. Bhattacharya, *Application of Wavelet and Fourier Transforms for Vibration Analysis of Motor*, IEEE Indicon 2005 Conference, Chennai, India, 11-13, 2005.
- [17] Oberst, Ulrich, *The Fast Fourier Transform*, SIAM Journal on Control & Optimization, 2007, Vol. 46 Issue 2, p1-45, 45p.
- [18] Lutfiye Durak, *Shift-invariance of short-time Fourier transform in fractional Fourier domains*, Journal of the Franklin Institute, 346, p136-146, 2009.
- [19] Ljubisa Stankovic, Tatiana Alieva, Martin J. Bastiaans, *Time-frequency signal analysis based on the windowed fractional Fourier transform*, Signal Processing, 83, p2459-2468, 2003.
- [20] Lutfiye Durak, *Short-Time Fourier Transform: Two Fundamental Properties and an Optimal Implementation*, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 51, N° 5, Mayo 2003.
- [21] D. S. G. Pollock, *A handbook of time-series analysis, signal processing and dynamics*, Academic Press, Cambridge, 1999.
- [22] Hewlett Packard, *The fundamentals of signal analysis*, Application Note 243.
- [23] Oppenheim, A. L., Schafer, R. W. and Buck, J. R., *Tratamiento de señales en tiempo discreto*, Prentice Hall, Segunda edición, 1999.
- [24] Ahmed I. Zayed, *Hilbert Transform Associated with the Fractional Fourier Transform*, IEEE Signal Processing Letters, Vol 5, N°8, Agosto 1998.
- [25] Fredric J. Harris, *On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the discrete Fourier Transform*, Proceedings of the IEEE, Vol. 66, N° 1, 1978.
- [26] Coeficiente de correlación de Pearson,
http://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_correlaci%C3%B3n_de_Pearson
- [27] Rivas, E., Burgos, J. C. and García-Prada, J. C., *Condition assessment of power OLTC by vibration analysis using wavelet transform*, Power Delivery, IEEE Transactions on 24 (2), pp. 687,694, 2009.
- [28] Rioul, O., Vetterli, M., *Wavelets and signal processing*, Signal Processing Magazine, IEEE, Vol. 8, N° 5, pp. 14-38, 1991.
- [29] Ambadar, A., *Procesamiento de señales analógicas y digitales*, Thomson Editores, Méjico, 2002.
- [30] Steven W. Smith, *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, California Technical Publishing, cap. 3, 1997-2006.

- [31] Steven A. Dimino, Russell J. Niederjohn, and James A. Heinen, *Estimating the energy contour of noise-corrupted speech signals by autocorrelation extrapolation*, International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, Proceedings of the IECON '93, vol. 3, pp. 2015-2018, 1993.
- [32] Pengju Kang and David Birtwhistle, *Condition assessment of power transformer On-Load Tap Changers using wavelet analysis and self-organizing map: field evaluation*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, N° 1, pp. 78-84, 2003.
- [33] P. Kang and D. Birtwhistle, *Characterisation of vibration signals using continuous wavelet transform for condition assessment of on-load tap-changers*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 17, Issue 3, pp. 561-577, 2002.
- [34] L. de Almeida, M. Fontana, F. A. Wegelin and L. Ferreira, *A new approach for condition assessment of on-load tap-changers using Discrete Wavelet transform*, Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2005, IMTC 2005, Proceedings of the IEEE 1, pp. 653-656.
- [35] A.A. Silva y M.A. Irmao, *Comparación de Representaciones Tiempo-Frecuencia Aplicadas en la Simulación y Análisis de Fallas en Sistemas Engranados*, Información Tecnológica, Vol. 15, N° 5, pp. 17-22, 2004.
- [36] Elkin G. Florez, Salvador Cardona y Lluisa Jordi Nebot, *Análisis en tiempo y frecuencia de señales de vibración tomadas al pie del carril durante el paso de un tren*, Ciencia et Technica Año XIII, N° 35, pp. 243-247, Universidad Tecnológica de Pereira , 2007.
- [37] F.E. Hernández Montero y V. Atxa Uribe, *Aplicación de técnicas clásicas y avanzadas de procesamiento de vibraciones al diagnóstico de cojinetes. Análisis experimental*, Ingeniería Mecánica, 1, pp. 71-82, 2007.
- [38] A. Danisor, K. O. Izet-Unsalan, D. Unsalan, *A new approach for the detection and processing of seismic signals*, Recent Advances in Space Technologies, 2007. RAST'07. 3rd International Conference on, pp. 698-703.
- [39] Moreno Sánchez R., Pintado Sanjuán, P., Alonso Sánchez, F. J., Chicharro Higuera, J. M., Morales Robredo, A. L., Nieto Quijorna, A. J., *Evaluación y comparación de modelos de diagnóstico de fallos en engranajes utilizando las señales de vibraciones mecánicas*, 8° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Cuzco, 23-25 de Octubre de 2007.
- [40] Belsak, A. and Flasker, J., *Failure diagnostics of a gear unit*, International Conference on Damage and Fracture Mechanics, N°8, Grece, 2004, pp. 255-264.
- [41] Miguel F. M. Lima, J. A. Tenreiro Machado and Manuel Crisóstomo, *Robotic Manipulators with Vibrations: Short Time Fourier Transform of Fractional*

- Spectra*, Intelligent Engineering Systems and Computational Cybernetics, I, Springer Netherlands, 2008.
- [42] Li, B., Chow, M. Y., Tipsuwan, Y. and Hung, J.C., *Neural-network based motor rolling bearing fault diagnosis*, IEEE Transactions on industrial electronics, 2000, Vol. 47, pp. 1060-1069.
- [43] Cooley, J. and Tukey, J., *An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series*, Mathematics of Computation, 1965, Vol. 19, pp. 297-301.
- [44] Cizek, V., *Methods of computation of discrete Fourier transform in anonymous discrete Fourier transform and their applications*, Bristol Adam Hilger Ltd. 1985, pp. 98-120.
- [45] Koo, I. and Kim, W., *Development of reactor coolant pump vibration monitoring and a diagnostic system in the nuclear power plant*, ISA Transactions, 2000, Vol. 39, pp. 309-316.
- [46] Ville, J., *Theory et application de la notion de signal analytique*, Cables et Transmissions, 1984, Vol. 20-A.
- [47] Francois, A., and Patrick, F., *Improving the readability of time-frequency and time-scale representations by the reassignment method*, IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, Vol. 43, pp. 1068-1089.
- [48] Graps, A., *An introduction to Wavelets*, IEEE Computational Science, 1995, Vol. 2, N° 2.
- [49] Rivas, E. y Laniado, E., *Metodología para determinar los modos de vibración del Modelo numérico de un CTC dentro de la señal del conmutador bajo operación*, Revista Tecnológica ESPOL – RTE, Vol. 21, N° 1, 2009.
- [50] CIGRE SC 12 WG 12.05, *An International Survey on Failures in Large Power Transformers in Service*, ELECTRA N° 88 (1983), PP. 2147.
- [51] P. Kang and D. Birtwhistle, *Condition assessment of power transformer on-load tap-changers using wavelet analysis and self-organizing map: Field evaluation*, Power Engineering Review, IEEE 22 (8), pp. 69-69, 2002.