



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

## **TESIS DOCTORAL**

# **DETECCION DE AVERIAS EN CAMBIADORES DE TOMAS EN CARGA DE TRANSFORMADORES BASADO EN EL PATRON DE VIBRACIONES**

Autor:

**Edwin Rivas Trujillo**

Directores

**Dr. Juan Carlos Burgos Díaz**

**Dr. Juan Carlos García Prada**

DEPARTAMENTOS DE INGENIERIA ELECTRICA E INGENIERIA  
MECANICA

Leganés, junio de 2009





---

# TESIS DOCTORAL

## DETECCION DE AVERIAS EN CAMBIADORES DE TOMAS EN CARGA DE TRANSFORMADORES BASADO EN EL PATRON DE VIBRACIONES

Autor:

**Edwin Rivas Trujillo**

Directores

**Dr.Juan Carlos Burgos Díaz**

**Dr.Juan Carlos García Prada**

Firma del tribunal calificador

Firma

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Secretario:

Calificación

Leganés, de de 2009









---

*Niégate a suponer y pensar que eres menos de lo que realmente eres o que no puedes lograr grandes objetivos. Muchos logros meritorios y grandes hechos históricos fueron conseguidos por personas comunes y corrientes que se esforzaron, que tenían confianza, que activaron y potenciaron su capacidad creativa, que eran conscientes de todo el potencial que tenían en su interior, perseveraron y lo lograron.*





---

## *Agradecimientos*

En primer lugar quiero expresar mis agradecimientos a mis directores de tesis Juan Carlos Burgos Díaz y Juan Carlos García Prada, por todo el tiempo dedicado en el asesoramiento de esta tesis, por sus reprimendas, halagos y sus palabras de ánimo en momentos difíciles.

A Unión Fenosa distribución por ceder el cambiador de tomas en carga.

Al ministerio de ciencia y tecnología de España (MCYT) el cual financio este tesis doctoral, con el proyecto No DPI2005-09039-C02-01 del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica

A Edwin. Laniado por su asesoramiento en MES, y por los cafés compartidos que permitían tener tertulia y posiciones encontradas con los amigos Yimy, Alex, Jaime, Gabriel

A Maria, por todo su cariño a pesar de la distancia. A mi madre Juana María, a mi Hermana Luz Marina y a mi sobrina Evelyn por su apoyo incondicional y por sus palabras de aliento constante. A mi hija Natalia por todo el tiempo que en esta etapa de mi estancia en España no he podido compartir con ella.

A todos mis compañeros del departamento de Ingeniería Eléctrica, especialmente a Eva y Mari-Mar por su sonrisa constante a Gabriel, Miguel, Keyla, por su apoyo y ánimo incondicional desde el principio; pero también para aquellos que han llegado al final (Sandra, Diego, Jaime, Mónica.). A Carlos Gallardo por compartir momentos de ocio que nos desconectaban de la rutina académica.

A mis amigos Esther y Fernando Benítez, por estar hay siempre cuando los necesite y por último a todas aquellas personas que de una u otra forma han contribuido con la realización de esta tesis.





---

## *Resumen*

Un cambiador de tomas en carga (OLTC, en inglés "On-Load Tap Changer", o CTC en español) o regulador es la única parte con movimiento en un transformador. Su función es realizar la operación de cambio de una toma del arrollamiento de regulación a otra, permitiendo regular la tensión de salida del transformador a los niveles requeridos sin la interrupción de la corriente de carga. La valoración del estado electro-mecánico (buen estado o con avería) de un cambiador de tomas en carga es importante para asegurar la fiabilidad del transformador y por lo tanto del sistema de transmisión de energía eléctrica al cual se encuentre conectado.

En la presente tesis doctoral se ha desarrollado sistema de detección de averías en cambiadores de tomas en carga basado en el análisis de la señal de vibraciones de un cambiador de tomas en carga.

Para caracterizar la señal de vibración de cada una de las averías del cambiador se ha llevado a cabo un programa de ensayos en cambiadores de tomas en carga en buen estado y con averías simuladas.

Con base en los registros de vibraciones obtenidos se implementó una metodología para automatizar el proceso de hallar los principales indicadores de diagnóstico (el número de impulsos de vibración, la amplitud de los impulsos de vibración y el tiempo entre los impulsos de vibración).

Para obtener los principales indicadores de diagnóstico se aplicaron técnicas de pre-procesamiento (normalización, sincronización y transformada Hilbert), al igual que técnicas de procesamiento de datos tanto en el dominio de la frecuencia (Transformada rápida de Fourier), como en el dominio tiempo-frecuencia (Transformada corta de Fourier y Transformada discreta de Wavelet), así como aplicación de umbrales a la señal de vibración.

Se analizaron metodologías de diagnóstico, con base en diferentes indicadores (existencia o no de un impulso, tiempo de duración del impulso, contenido de energía de impulso y banda de frecuencia asociada al impulso).



---

El número de impulsos presentes en la señal de vibración y el tiempo entre impulsos son los indicadores de diagnóstico que permiten identificar un mayor número de averías internas. Se efectuó un estudio estadístico que permitió establecer las variaciones de tiempo entre impulsos en un cambiador de tomas en carga en buen estado y con siete tipos de averías al realizar transiciones idénticas.

Se ha desarrollado una red neuronal artificial denominada Mapa Auto-Organizado (SOM) como herramienta de diagnóstico de la condición del cambiador de tomas en carga.

En la tesis se propone, además, un nuevo modelo de elementos finitos en 3D para la simulación del patrón de vibración del selector del cambiador de tomas en carga sin averías y con una avería tipo, con el fin de complementar los registros de datos obtenidos en pruebas de campo.



---

## *ABSTRACT*

On-Load Tap Changer (OLTC) or CTC (in Spanish) is the only moving part of a power transformer. Its function is to perform the changeover operation of a tapping from one to another winding of regulation, allowing regulating the output voltage of the transformer to the required levels without interrupting the load current. The assessment of the electro-mechanical state (good or failure) of a load tap changer is important to ensure transformer reliability, and therefore the electric power transmission which is connected.

In this doctoral thesis has developed system for detecting faults on load tap changers based on vibration signal analysis of tap changers.

To characterize the vibration signal from each of the tap changer faults has been carried out a test program with the tap changer in good condition and with simulated faults.

Based on records obtained, a vibration analysis methodology have been implemented to automate the process finding the main diagnostic indicators (number of pulses of vibration, the amplitude of vibration impulses and the time between impulses of vibration)

For the main indicators of diagnostic techniques were applied pre-processing (standardization, synchronization and Hilbert transform), as well as data processing techniques in the frequency domain (Fast Fourier Transform), as in the time domain -frequency (short Fourier transform and discrete wavelet transform), and application of thresholds to the vibration signal.

Diagnostic methods were analyzed, based on various indicators (presence or absence of an impulse, impulse duration, impulse energy content and frequency band associated with the impulse).

The number of impulses in the vibration signal and the time between impulses are diagnostic indicators that can identify a greater number of internal failures. We carried out a statistical study that allows variations of time between pulses in a



---

load tap changer in good condition and consider seven types of failures to perform the same transitions.

We have developed an artificial neural network called Self-Organized Map (SOM) as a tool for diagnosing the condition of the load tap changer.

In this thesis, a novel finite element model for 3D simulation of the vibration signal of the selector load tap changer without fault and with a failure rate in order to supplement the data records obtained in field trials.



## Índice general

Capítulo 1 .....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del problema .....	3
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Justificación e importancia del tema.....	4
1.4. Estructura de la tesis.....	5
Capítulo 2 .....	6
CONSTITUCION DE UN CAMBIADOR DE TOMAS EN CARGA.....	6
2.1. El cambiador de tomas en carga.....	6
2.2. Designación de un cambiador de tomas en carga.....	9
2.3. Estructura general de un cambiador de tomas en carga.....	10
2.3.1. Armario de accionamiento y mando.....	11
2.3.2. Mecanismo de transmisión.....	11
2.3.3. Cabeza del cambiador.....	12
2.3.4. Selector de tomas(Selector Switch) .....	13
2.3.5. Conmutador o ruptor (Diverter Switch).....	15
2.4. Modos de fallo de un cambiador de tomas en carga .....	16
Capítulo 3 .....	23
ESTADO DEL ARTE EN TECNICAS DE DIAGNOSTICO DE UN OLTC.....	23
3.1. Técnicas de diagnóstico .....	24
3.1.1. Diagnóstico con base en gases disueltos en el aceite.....	24
3.1.2. Medida de la temperatura .....	28
3.1.3. Medida de la resistencia dinámica de contacto .....	29
3.1.4. Medida del par del motor de arrastre .....	31
3.2. Medida de Vibración.....	33
3.2.2. Estado del arte de las redes neuronales artificiales con base en el análisis de vibraciones. aplicadas a cambiadores de tomas en carga.....	37
Capítulo 4 .....	41
ESTUDIO EXPERIMENTAL.....	41
4.1. Cambiador de tomas utilizado .....	41
4.2. Sistema de medida.....	42
4.2.2. Hardware .....	43
4.2.3. Software.....	43



4.3. Denominación de los registros de vibraciones .....	44
4.4. Acelerómetros.....	45
4.4.1. Disposición de acelerómetros.....	45
4.5. Análisis de la señal de vibración.....	47
4.5.1. Proceso de cambio de toma con actuación del selector.....	48
4.5.2. Análisis de la señal de vibración en un cambio de tomas con actuación del selector.....	50
4.5.3. Proceso de cambio de toma sin actuación del selector.....	51
4.5.4. Proceso de conmutación.....	52
4.6. Metodología de los ensayos.....	58
4.7. Simulación experimental de averías .....	58
4.7.1. Simulación de averías en el selector: Las averías simuladas fueron:.....	59
4.7.2. Simulación de averías en conmutador.....	62
4.7.3. Otras averías simuladas.....	62
Capítulo 5 .....	64
MODELADO Y SIMULACION .....	64
5.1. Modelado .....	65
5.2. Elementos finitos.....	67
5.3. Simulación en ALGOR™ .....	67
5.3.1. Pre-procesado del modelo de selector .....	68
5.3.1.1. Definición de la geometría objeto del estudio.....	68
5.3.1.2. Asignación de las propiedades físicas de los materiales.....	69
5.3.1.3. Asignación de las condiciones de contorno .....	69
5.3.1.4. Aplicación de las cargas.....	70
5.3.1.5. Movimientos y desplazamientos: .....	71
5.3.1.6. Mallado de la geometría .....	72
5.3.1.7. Resolución del problema y análisis de la solución .....	72
5.3.2. Etapa de procesamiento .....	73
5.3.2.1. Desarrollo matemático de un impacto en ALGOR™ MES: .....	74
5.3.3. Etapa de post-procesamiento .....	75
5.4. Validación del modelo.....	76
5.5. Simulación de averías en el cambiador de tomas en carga .....	79
5.5.1. Efecto de una avería en los muelles ( $k'=2k$ y $k'=k/2$ ).....	80
5.5.2. Señal simulada con cambiador de tomas en buen estado frente a la señal simulada con averías en el contacto fijo.....	82
5.5.3. Señal simulada con en cambiador de tomas en carga en buen estado frente a la señal simulada con averías en el contacto fijo y en los muelles $k'=2k$ y $k'=k/2$ . ...	85
Capítulo 6 .....	89



TRATAMIENTO DE LA SEÑAL DE VIBRACIÓN .....	89
6.1. Pre-procesado de la señal.....	91
6.1.1. Normalización de la señal de vibración .....	91
6.1.2. Sincronización de la señal de vibración .....	92
6.1.3. La transformada de Hilbert .....	93
6.2. Técnicas frecuenciales: La transformada de Fourier .....	95
6.3. Técnicas tiempo-frecuencia .....	96
6.3.1. Transformada de Fourier en Tiempo Corto (STFT) .....	96
6.3.2. Transformada Wavelet .....	98
6.3.2.1. La transformada Wavelet Continua (CWT).....	99
6.3.2.2. La transformada Wavelet Discreta (DWT) .....	100
Capítulo 7 .....	112
RESULTADOS ESTUDIO EXPERIMENTAL.....	112
7.1. Análisis de frecuencias.....	113
7.2. Análisis tiempo-frecuencia utilizando la transformada de Fourier en tiempo corto (STFT) .....	119
7.3. Análisis tiempo-frecuencia utilizando la transformada Wavelet.....	136
7.3.1. Aplicación de Wavelets .....	136
7.3.2. Aplicación de Umbrales .....	138
7.4. Detección escala-tiempo de los impulsos presentes en la señal de vibración con actuación del selector.....	147
7.5. Análisis tiempo frecuencia para la etapa de conmutación.....	151
7.6. Comparativa entre las metodologías empleadas en el análisis.....	153
Capítulo 8 .....	156
REDES NEURONALES ARTIFICIALES-MAPAS AUTO-ORGANIZADOS.....	156
8.1. Elementos constitutivos de una Red Neuronal Artificial .....	157
8.2. Mapa auto-organizado (SOM).....	159
8.3. Parámetros del mapa auto-organizado .....	164
8.3.1. Tipos de inicialización de modelos: Existen dos tipos de inicialización, aleatoria y lineal.....	164
8.3.2. Duración del entrenamiento.....	164
8.3.3. Algoritmos de entrenamiento: .....	164
8.3.4. Error mínimo de cuantización ( <i>Minimum Quantisation Error, MQE</i> ) .....	165
8.3.5. Matriz unificada de distancias .....	166
8.4. RED NEURONAL DESARROLLADA.....	169
8.4.1. Grupos de diagnóstico .....	171
8.5. Medidas de eficiencia del SOM.....	172
8.6. Determinación del tamaño del SOM .....	173



---

8.7. Resultados de entrenamiento SOM [16 15].....	174
8.8. Visualización del SOM .....	176
Capítulo 9 .....	180
Conclusiones y aportaciones originales .....	180
9.1. CONCLUSIONES .....	180
9.2. Aportaciones originales.....	185
9.3. Propuesta de Trabajos futuros:.....	186
9.4. Publicaciones derivadas de la tesis .....	188
Apendice I. ....	190
A.I.1. Cálculo de la fuerza $F$ de los mecanismos de presión.....	190
A.I.1.2. Simplificación de los muelles por una fuerza equivalente: .....	191
Apendice II. ....	193
A.II.1. Cálculo de la velocidad constante de rotación .....	193
Apendice III. ....	194
<i>BIBLIOGRAFIA</i> .....	197

## Índice de tablas

Tabla 2.1.	Disposición de arrollamientos en el autotransformador .....	9
Tabla 2.2.	Defectos o fallos típicos y modo de fallos de un cambiador de tomas en carga. Conmutador parte I: fallos dieléctricos .....	20
Tabla 2.3.	Defectos o fallos típicos y modo de fallos de un cambiador de tomas en carga. Conmutador parte II: fallos eléctricos y mecánicos.....	21
Tabla 2.4.	Defectos o averías típicas y modo de fallos del Selector de un cambiador de tomas en carga .....	22
Tabla 3.1.	Gases típicos de la combustión .....	25
Tabla 3.2.	Significado de las zonas N, X1, X3, D1, T2 y T3.....	27
Tabla 4.1.	Eventos de un cambiador de tomas en carga (el símbolo V indica existencia del impulso, mientras que el símbolo x significa ausencia del impulso).....	52
Tabla 4.2.	Repercusión de cada una de las averías del selector simuladas en el patrón de vibraciones. ....	61
Tabla 4.3.	Repercusión de las averías del mecanismo acumulador de energía en el patrón de vibraciones del cambiador de tomas en carga.....	63
Tabla 5.1.	Número de piezas modeladas del puente de contactos del selector .....	66
Tabla 5.2.	Muestra un resumen de las diferentes señales simuladas. ....	86
Tabla 6.1.	Intervalos temporales de los impulsos de la señal de vibración .....	89
Tabla 6.2.	Índices de comparación señal 4_5_1 y su envolvente (10 escales) .....	105
Tabla 6.3.	Pseudo frecuencias asociadas a Bior 3.3.....	106
Tabla 7.1.	Detección de averías en cambiadores de tomas en carga basada en el análisis de las frecuencias dominantes presentes en la señal de vibración en buen estado y con averías.....	118
Tabla 7.2.	Detección de averías en cambiadores de tomas en carga basada en el análisis de los impulsos presentes en la señal de vibración en buen estado y con averías. La presencia o no de impulsos fue determinada mediante la transformada de Fourier de tiempo corto .....	135
Tabla 7.3.	Numero de coeficientes para descomposición wavelet nivel 3 de una señal de 500.000 datos.....	137
Tabla 7.4.	Detección de averías en cambiadores de tomas en carga basada en el análisis de la descomposición wavelet de la señal de vibración en buen estado y con averías. ....	146
Tabla 7.5.	Señal de vibración en buen estado .....	148
Tabla 7.6.	Estudio estadístico de la diferencia temporal.....	149



---

Tabla 7.7.	Propuesta de metodología de detección de averías basada en la desaparición de impulsos y en el tiempo entre impulsos. ....	150
Tabla 8.1.	Parámetros de clasificación para un grupo de diferentes especies animales .....	167
Tabla 8.2.	Porcentajes de clasificación correcta para SOMs de diversas dimensiones .....	174
Tabla 8.3.	Resultados entrenamientos SOM [16 15].....	175
Tabla 8.4.	Comparación entre resultados entrenamiento supervisado y no supervisado del SOM .....	178
Tabla A.I.1.	Cálculo de la constante de elasticidad $k$ .....	191
Tabla A.III.1.	Holgura en el anclaje de la barra del selector a la estructura.....	194
Tabla A.III.2.	Contacto flojo del selector .....	194
Tabla A.III.3.	Muelles del selector sin la tensión adecuada .....	194
Tabla A.III.4.	Barra de anclaje de llegada inexistente .....	194
Tabla A.III.5.	Barra de anclaje de partida inexistente .....	195
Tabla A.III.6.	Contactos fijos del selector desgastados.....	195
Tabla A.III.7.	Contactos del selector erosionados .....	195
Tabla A.III.8.	Elementos amortiguados en el conmutador.....	195
Tabla A.III.9.	Elementos amortiguados en el conmutador.....	196

## *Índice de figuras*

Figura 2.1. Tomas de un cambiador de tomas en carga .....	7
Figura 2.2. Impedancias entre tomas de un cambiador de tomas en carga.....	7
Figura 2.3. a) Sin preselector; b) Inversor; c) Gran escalón .....	7
Figura 2.4. Devanados del preselector tipo inversor .....	8
Figura 2.5. Designación de un cambiador de tomas en carga .....	10
Figura 2.6. Esquema básico de conexiones de un cambiador de tomas en carga.....	10
Figura 2.7. Armario de accionamiento y mando [2] .....	11
Figura 2.8. Mecanismo de Transmisión [3]. .....	12
Figura 2.9. Cabeza del regulador .....	13
Figura 2.10. Selector de tomas .....	13
Figura 2.11. Cambiador de tomas en carga externo.....	14
Figura 2.12. Boca de hombre para la inspección del selector en cambiadores de tomas internos. ....	14
Figura 2.13. Conmutador .....	15
Figura 2.14. Contactos colapsados debido a mal sincronismo .....	17
Figura 2.15. Capa de carbón cubriendo toda la superficie de la cabeza del regulador ....	18
Figura 3.1. Triangulo clásico de Duval.....	26
Figura 3.2. Triangulo 2 de Duval .....	27
Figura 3.3. Registro de corriente durante la medida de la resistencia dinámica durante el cambio de una toma a la siguiente. ....	29
Figura 3.4. Detalle del registro de corriente durante la medida de la resistencia dinámica de contacto en el margen completo de regulación. ....	30
Figura 3.5. Medida simultánea de la resistencia de contacto de las tres fases del transformador .....	31
Figura 3.6. Corriente en una fase del motor de accionamiento del OLTC (parte superior) correspondiente a la señal vibración durante una transición entre dos tomas consecutivas (parte inferior). ....	32
Figura 3.7. Variaciones en la potencia consumida por el accionamiento a motor pueden ser indicativo de rozamiento excesivo del eje o desgaste en algunos elementos del accionamiento a motor .....	32
Figura 3.8. Registro de vibraciones durante la actuación del cambiador de tomas.....	33
Figura 3.9. Señal de vibración del proceso de conmutación dividida en zonas.....	36
Figura 4.1. Cambiador de tomas en carga utilizado en los ensayos .....	42

Figura 4.2. Detalle del selector, mostrando la barra rota de la toma número 5 .....	42
Figura 4.3. Sistema de medida .....	42
Figura 4.4. Acelerómetro en la tapa del regulador .....	45
Figura 4.5. Acelerómetro. debajo de las cruces de malta.....	46
Figura 4.6. Acelerómetro. en la pletina del conmutador aladaña a las cruces de malta..	46
Figura 4.7. Pruebas para la ubicación del acelerómetro: Registro de vibraciones del acelerómetro conectado en la tapa del regulador.....	46
Figura 4.8. Pruebas para la ubicación del acelerómetro: Registro de vibraciones del acelerómetro conectado debajo de las cruces de malta.....	47
Figura 4.9. Pruebas para la ubicación del acelerómetro. Registro de vibraciones del acelerómetro conectado sobre una pletina interna del conmutador aladaña a las cruces de malta.....	47
Figura 4.10. Disposición esquemática del conjunto selector-conmutador.....	48
Figura 4.11. Registro de vibración durante un cambio de tomas con actuación del selector .....	50
Figura 4.12. Secuencia de operación de las cruces de malta (Tiempo de operación 3,33 segundos).....	51
Figura 4.13. Señal de vibración sin actuación del selector .....	52
Figura 4.14. Posiciones y giro de la biela para cambios ascendentes (Cambio 1_2_3) ....	53
Figura 4.15. Posiciones y giro de la biela para cambios descendentes (cambio3_2_1) ...	53
Figura 4.16. Detalle de actuación de la biela. ....	55
Figura 4.17. Cabeza insertable del conmutador .....	55
Figura 4.18. Esquema del conmutador .....	56
Figura 4.19. Eventos de actuación del conmutador visto monofásicamente.....	57
Figura 4.20. Detalle del proceso de Conmutación (Impulso 5).....	57
Figura 4.21. Proceso de conmutación (Tiempo de conmutación = $16.200 - 15.867 = 33$ ms). ....	58
Figura 4.22. Holgura en el anclaje de las barras del selector a la estructura.....	59
Figura 4.23. Contacto fijo flojo del selector. ....	59
Figura 4.24. Muelles de los contactos móviles del selector sin la tensión adecuada .....	60
Figura 4.25. Barra de anclaje del selector partida .....	60
Figura 4.26. Contactos fijos del selector desgastados .....	60
Figura 4.27. Contactos del selector erosionados debido a la acción del arco eléctrico ...	60
Figura 4.28. Amortiguación al final del recorrido del carro superior.....	63
Figura 4.29. Amortiguación en la leva y en el sistema de enclavamiento. ....	63
Figura 5.1. Detalle del selector del cambiador de tomas en carga.....	65
Figura 5.2. Selector.....	66
Figura 5.3. Detalle del modelado de los contactos móviles.....	67
Figura 5.4. Piezas del modelo simulado en ALGOR™ .....	69

Figura 5.5. Condiciones de contorno del contacto fijo: Empotramiento .....	70
Figura 5.6. Condiciones de contorno del puente de contactos: rotación solo en Z .....	70
Figura 5.7. Fuerzas $F$ aplicadas sobre los nodos del modelo .....	70
Figura 5.8. Introducción de parámetros de un momento de rotación en ALGOR™ .....	71
Figura 5.9. Parámetros de velocidad inicial .....	72
Figura 5.10. Ventana de selección de los parámetros del análisis .....	73
Figura 5.11. (a) Señal de vibración experimental de los impulsos 1 y 2 (b) Señal de vibración simulada en buen estado.....	77
Figura 5.12. Entrada del contacto fijo en los contactos móviles (a) (izquierda). Acoplamiento de los contactos móviles en el contacto fijo (b) (derecha) ..	77
Figura 5.13. FFT de la señal de vibración experimental de los impulsos 3 y 4 (a) FFT de la señal de vibración simulada en buen estado (b).....	78
Figura 5.14. Ampliación de la señal experimental del CTC (a). Ampliación de la señal simulada del CTC en buen estado (b).....	79
Figura 5.15. Señal de vibración simulada en buen estado (a) (arriba), Señal de vibración simulada con muelle $k'=2k$ (b) (en medio), Señal de vibración simulada con muelle $k'=k/2$ (c) (abajo) .....	81
Figura 5.16. FFT de la señal de vibración simulada en buen estado (a) (arriba), FFT de la señal de vibración simulada con avería en los muelles $k'=2k$ (b) (en medio), FFT de la señal de vibración simulada con avería en los muelles $k'=k/2$ (c) (abajo).....	82
Figura 5.17. Contacto fijo inicial (a) contacto fijo con defecto(b) .....	83
Figura 5.18. Señal de vibración simulada en buen estado (a) (arriba), señal de vibración simulada con defecto en el contacto fijo (b) (abajo).....	83
Figura 5.19. FFT de la señal de vibración simulada en buen estado (a) (arriba), FFT de la señal de vibración simulada con defecto en contacto fijo (b) (abajo) .....	84
Figura 5.20. Señal de vibración simulada en buen estado (a) (arriba), Señal de vibración simulada con defecto en el contacto fijo y muelles $k'=2k$ (b) (en medio), Señal de vibración simulada con defecto en el contacto fijo y muelles $k'=k/2$ (c) (abajo).....	85
Figura 5.21. FFT de la señal de vibración simulada en buen estado (a) (arriba), FFT de la señal de vibración simulada con defecto en el contacto fijo y muelles $k'=2k$ (b) (en medio), FFT de la señal de vibración simulada con defecto en el contacto fijo y muelles $k'=k/2$ (c) (abajo) .....	87
Figura 5.22. FFT de la señal de vibración simulada en buen estado (a) (arriba), FFT de la señal de vibración simulada con defecto en el contacto fijo y muelles $k'=2k$ (b) (en medio), FFT de la señal de vibración simulada con defecto en el contacto fijo y muelles $k'=k/2$ (c) (abajo).....	88
Figura 6.2. Proceso de análisis de la señal de vibración .....	90
Figura 6.3. Diferencias temporales y de amplitud en la señal de vibración al realizar un cambio de toma dos veces .....	91
Figura 6.4. Señal de vibración (detalle) después del proceso de normalización (a) y después del proceso de sincronización (b).....	93



Figura 6.5. Señal de vibración conmutación del OTLC y transformada de Hilbert .....	95
Figura 6.6. Esquema de descomposición y reconstrucción <i>wavelet</i> de segundo nivel ..	103
Figura 6.7. Esquema de descomposición y reconstrucción <i>wavelet packet</i> de segundo nivel .....	103
Figura 6.8. Wavelet Bior 3.3 (Azul) and associated pseudofrequency (Roja) .....	106
Figura 6.9. Energía preservada (línea verde) y MSE en función del umbral .....	110
Figura 7.1. Registro de vibraciones en un cambio de tomas en el que no actúa el selector (a) y en un cambio de tomas en el que actúa el selector (b).....	113
Figura 7.2. Buen estado.....	116
Figura 7.3. Holgura en el anclaje de las barras del selector a la estructura.....	116
Figura 7.4. Contactos fijos del selector flojos .....	116
Figura 7.5. Muelles del selector sin la tensión adecuada .....	116
Figura 7.6. Barra de anclaje de llegada inexistente .....	116
Figura 7.7. Barra de anclaje de partida inexistente .....	117
Figura 7.8. Contactos fijos del selector desgastados .....	117
Figura 7.9. Contactos fijos del selector erosionados .....	117
Figura 7.10. Amortiguamiento recorrido carro superior del conmutador.....	117
Figura 7.11. Amortiguamiento leva de arrastre carro superior del conmutador .....	117
Figura 7.12. Procesamiento de la señal .....	119
Figura 7.13. Envoltura normalizada de la señal de vibración .....	119
Figura 7.14. Escala-tiempo- frecuencia del impulso 1: arranque del accionamiento a motor: .....	122
Figura 7.15. Escala-tiempo frecuencia del impulso 2: inicio actuación cruces de malta	122
Figura 7.16. Escala-tiempo frecuencia del impulso 3: actuación del selector .....	122
Figura 7.17. Escala-tiempo frecuencia del impulso 4: finaliza actuación cruces de malta .....	122
Figura 7.18. Escala-tiempo frecuencia del impulso 5: proceso de conmutación.....	122
Figura 7.19. Escala-tiempo frecuencia del impulso 6: parada accionamiento a motor.	123
Figura 7.20. Escala-tiempo frecuencia del impulso 1: arranque accionamiento a motor .....	124
Figura 7.21. Escala-tiempo frecuencia del impulso 2: inicio actuación cruces de malta	124
Figura 7.22. Escala-tiempo frecuencia del impulso 3: actuación del selector .....	124
Figura 7.23. Escala-tiempo frecuencia del impulso 5: proceso de conmutación.....	124
Figura 7.24. Escala-tiempo frecuencia del impulso 6: parada accionamiento a motor	124
Figura 7.24. Contactos fijos del selector flojos .....	125
Figura 7.25. Escala-tiempo frecuencia del impulso 1: arranque accionamiento a motor .....	125
Figura 7.26. Escala-tiempo frecuencia del impulso 2: inicio actuación cruces de malta	125

---

Figura 7.27. Escala-tiempo frecuencia del impulso 4: finaliza actuación cruces de malta .....	125
Figura 7.28. Escala-tiempo frecuencia del impulso 5: proceso de conmutación .....	125
Figura 7.29. Escala tiempo –frecuencia del impulso 6: parada accionamiento motor...	125
Figura 7.30. Escala-tiempo frecuencia del impulso 1: arranque accionamiento motor	126
Figura 7.31. Escala-tiempo frecuencia del impulso 4: finaliza actuación cruces de malta .....	126
Figura 7.32. Escala-tiempo frecuencia del impulso 5: proceso de conmutación .....	126
Figura 7.33. Figura Escala-tiempo frecuencia del impulso 6: parada accionamiento a motor.....	126
Figura 7.34. Escala-tiempo frecuencia del impulso 1: arranque accionamiento a motor .....	127
Figura 7.35. Escala-tiempo frecuencia del impulso 2: inicio actuación cruces de malta	127
Figura 7.36. Escala-tiempo frecuencia del impulso 5: proceso de conmutación .....	127
Figura 7.37. Escala-tiempo frecuencia del impulso 6: parada accionamiento a motor.	127
Figura 7.38. Escala-tiempo frecuencia del impulso 1: arranque accionamiento a motor .....	128
Figura 7.39. Escala-tiempo frecuencia del impulso 4: finaliza actuación cruces de malta .....	128
Figura 7.40. Escala-tiempo frecuencia del impulso 5: proceso de conmutación .....	128
Figura 7.41. Escala-tiempo frecuencia del impulso 6: parada accionamiento a motor.	128
Figura 7.42. Escala-tiempo frecuencia del impulso 1: arranque accionamiento motor	129
Figura 7.43. Escala-tiempo frecuencia del impulso 2: inicio actuación cruces de malta	129
Figura 7.44. Escala-tiempo frecuencia del impulso 3: actuación del selector .....	129
Figura 7.45. Escala-tiempo frecuencia del impulso 4: finaliza actuación de cruces de malta.....	129
Figura 7.46. Escala-tiempo frecuencia del impulso 5: proceso de conmutación .....	129
Figura 7.47. Escala-tiempo frecuencia del impulso 6: parada accionamiento motor ...	130
Figura 7.48. Escala-tiempo frecuencia del impulso 1: arranque accionamiento motor	131
Figura 7.49. Escala-tiempo frecuencia del impulso 2: inicio actuación cruces de malta	131
Figura 7.50. Escala-tiempo frecuencia del impulso 4: finaliza actuación cruces de malta .....	131
Figura 7.51. Escala-tiempo frecuencia del impulso 5: proceso de conmutación .....	131
Figura 7.52. Escala-tiempo frecuencia del impulso 6: parada accionamiento a motor	131
Figura 7.53. Escala-tiempo frecuencia del impulso 1: arranque accionamiento a motor .....	132
Figura 7.54. Escala-tiempo frecuencia del impulso 4: finaliza actuación cruces de malta .....	132
Figura 7.55. Escala-tiempo frecuencia del impulso 5: proceso de conmutación .....	132



Figura 7.56. Escala-tiempo frecuencia del impulso 6: parada accionamiento a motor .	132
Figura 7.57. Escala-tiempo frecuencia del impulso 1: arranque accionamiento a motor .....	133
Figura 7.58. Escala-tiempo frecuencia del impulso 4: finaliza actuación cruces de malta .....	133
Figura 7.59. Escala-tiempo frecuencia del impulso 5: proceso de conmutación.....	133
Figura 7.60. Escala-tiempo frecuencia del impulso 6: parada accionamiento a motor .	133
Figura 7.61. Procesamiento de la señal .....	136
Figura 7.62. Descomposición wavelet discreta de nivel 3 con wavelet madre Biortogonal 3.3 .....	137
Figura 7.63. Coeficientes de aproximación de nivel 3(izquierda); Escalograma(derecha) .....	138
Figura 7.64. Señal reconstruida con 33.284 muestras .....	138
Figura 7.65. Algoritmo de detección de impulsos.....	139
Figura 7.66. Coeficientes absolutos para 8 escalas.....	140
Figura 7.67. Grupo 1, Operación normal del cambiador de tomas en carga (Sin averías). .....	141
Figura 7.68. Grupo 2, Holguras en el anclaje .....	141
Figura 7.69. Grupo 2, Contactos fijos del selector flojos .....	142
Figura 7.70. Grupo 2, Muelles sin la tensión adecuada .....	142
Figura 7.71. Grupo 2, barra de llegada inexistente.....	143
Figura 7.72. Grupo 2, barra de partida inexistente.....	143
Figura 7.73. Grupo 3, contactos erosionados .....	144
Figura 7.74. Grupo 3, contactos desgastados .....	144
Figura 7.75. Grupo 4, amortiguamiento recorrido carro superior del conmutador .....	145
Figura 7.76. Grupo 4, amortiguamiento leva carro superior del conmutador .....	145
Figura 7.77. Envoltente original (roja) y envoltente suavizada (azul) mediante wavelet de tercer nivel.....	152
Figura 7.78. Envoltente original (roja) y envoltente suavizada (azul) mediante wavelet de tercer nivel e interpolación cubica spline.....	152
Figura 8.1. Diagrama de bloques de una red neuronal artificial.....	158
Figura 8.2. Clasificación de las redes neuronales artificiales .....	159
Figura 8.3. Topologías presentes en un mapa auto-organizado de siete filas por seis columnas, donde se muestra la ubicación de las neuronas .....	160
Figura 8.4. Ejemplo de vecindades topológicas .....	162
Figura 8.5. Ejemplo de clasificación de especies mediante un <i>SOM</i> . .....	167
Figura 8.6. U-matriz de distancias de la clasificación de las especies listadas en la Tabla 8.1. Los límites de las regiones de clasificación se encuentran demarcados mediante matices oscuros.....	168



---

Figura 8.7. U-matriz de distancias resultante para el SOM [16 15] supervisado;.....	176
<i>Epochs</i> Fase Ordenamiento: 100; <i>Epochs</i> Fase Ajuste: 500.....	176
Figura 8.8. Clasificación resultante de señales para el SOM [16 15] supervisado. <i>Epochs</i> Fase Ordenamiento: 100; <i>Epochs</i> Fase Ajuste: 500 .....	177
Figura 8.9. Trayectoria de clasificación para el SOM [16 15] supervisado. <i>Epochs</i> Fase Ordenamiento: 100; <i>Epochs</i> Fase Ajuste: 500.....	178
Figura 8.10. U-matriz de distancias resultante para el SOM [16 15] no supervisado. <i>Epochs</i> Fase Ordenamiento: 100; <i>Epochs</i> Fase Ajuste: 500) .....	179
Figura 8.11. Trayectoria de clasificación para el SOM [16 15] no supervisado. <i>Epochs</i> Fase Ordenamiento: 100; <i>Epochs</i> Fase Ajuste: 500; Radio Final Ajuste = 0.1 ....	179
Figura A.I.1. Mecanismo de presión de un contacto móvil del selector.....	190
Figura A.I.2. Guía redonda para obtener K experimentalmente .....	190
Figura A.I.3. Cálculo de $x_0$ con el contacto móvil del selector sin conectar.....	192
Figura A.I.4. Cálculo de $x_1$ con el contacto móvil conectado al contacto fijo del selector .....	192
Figura A.II.1. Ventana del desplazamiento prescrito .....	193





## *Capítulo 1*

# **INTRODUCCIÓN.**

El mantenimiento predictivo es una metodología de diagnóstico del estado de los equipos, que permite pronosticar el momento de falta de un elemento en una máquina, de tal forma que dicho componente pueda reemplazarse, justo antes de que falle, maximizando la calidad del servicio y la fiabilidad y minimizando el coste global de operación (incluidas penalizaciones) y mantenimiento. Existen técnicas de mantenimiento predictivo que pueden ser utilizadas con el equipo sin descargo (en servicio) o con descargo (fuera de servicio).

En los equipos muy costosos está justificado el utilizar un sistema de monitorización continua. Con el uso del sistema de monitorización en continuo, es posible detectar averías en cada uno de los elementos constitutivos del cambiador de tomas en carga en una etapa temprana y diferir el mantenimiento cuando el sistema de monitorización muestra un desgaste reducido.

Un regulador o un cambiador de tomas en carga (OLTC, por sus iniciales en inglés "On-Load Tap Changer", o CTC por sus iniciales en español) es la única parte con movimiento en un transformador. Su función es realizar la operación de cambio de una toma a otra del arrollamiento de regulación, permitiendo regular la tensión de salida del transformador a los niveles requeridos, lo cual se consigue modificando el número de espiras en uno de los arrollamientos del transformador sin la interrupción de la corriente de la carga. La valoración del estado de un cambiador de tomas en carga es importante para asegurar la fiabilidad de un transformador.

El cambiador de tomas en carga es un elemento sometido a grandes sollicitaciones mecánicas (actuación en pocos milisegundos), térmicas (conducen altas corrientes) y eléctricas (necesidad de interrumpir la corriente en un circuito inductivo en un tiempo muy breve y, en ocasiones, existencia de elementos con grandes diferencias de potencial en un espacio reducido), es por ello uno de los elementos del transformador con mayor índice de fallos. De acuerdo a una



encuesta internacional [9], el 40% de los fallos de un transformador se producen en el cambiador de tomas en carga.

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 en descargo un tiempo relativamente prolongado; esto implica un gasto considerable y requiere de un equipo de técnicos y operarios cualificados. Además, algunas de las partes de un cambiador de tomas en carga (contactos del selector, preselector, etc.) no pueden ser inspeccionadas debido a su localización dentro de la cuba del transformador.

El método de mantenimiento predictivo sin descargo más clásico, es la medida de los gases disueltos en el aceite del cambiador de tomas en carga; sin embargo, este procedimiento no es válido para detectar un elevado número de defectos incipientes hasta que éstos han derivado en averías más o menos importantes. Hoy en día existen métodos más eficientes de diagnóstico de cambiadores de tomas con el transformador en descargo [30].

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 indicador particularmente interesante para indicar el estado de un cambiador de tomas es el análisis de vibraciones [36].

Un cuerpo vibra cuando se mueve, de manera oscilante en cualquier dirección del espacio, con respecto a una determinada posición de referencia. La técnica de diagnóstico por medida de vibración, consiste en la obtención de la señal de vibración de una operación del cambiador de tomas (cambio de una toma a otra) y la comparación de esta señal de vibración frente una señal patrón o de referencia obtenida en otro periodo de tiempo o con una unidad gemela.

Sin embargo, la vibración que tiene lugar de cuando dos objetos chocan es un fenómeno que tiene una cierta componente aleatoria (o, si se prefiere, que depende de fenómenos de difícil cuantificación), por lo que si se realiza un cambio de tomas entre una cierta toma (llamémosle A) a otra B y se repite de nuevo ese cambio, los registros de vibración son más o menos distintos, con lo cual cambian las amplitudes y los tiempos entre estallidos de vibración. Por ello,



el diagnóstico del estado de un cambiador de tomas en carga es una tarea difícil incluso para un experto en mantenimiento.

### **1.1. Planteamiento del problema**

Como se ha indicado anteriormente, el análisis de las vibraciones de un cambiador de tomas en carga, puede ser utilizado para el diagnóstico de fallos en el mismo o para fines de diseño, control de calidad o para fines de mantenimiento predictivo (monitorización en línea). Sin embargo, la tarea no es sencilla, puesto que las vibraciones de un sistema tan complejo como el cambiador de tomas en carga no son exactamente repetibles al realizar la misma maniobra dos veces.

Por tanto, para evaluar la condición de un cambiador de tomas en carga, es necesario usar métodos y técnicas adecuadas, extraer la información relevante y desechar la información no útil para lograr la interpretación apropiada de las señales de vibración.

Además de conocer si existen averías internas en un cambiador de tomas en carga, es importante en la medida de lo posible determinar en qué elemento del cambiador de tomas (acumulador de energía, contactos del selector, etc) se encuentra dicha avería, ya que ello contribuiría a reducir el tiempo para la reparación del cambiador.

### **1.2. Objetivos.**

El objetivo principal de la presente tesis doctoral, es desarrollar una metodología de detección automática de averías, basado en el análisis de las vibraciones, registradas durante el proceso de conmutación de un cambiador de tomas en carga.

Para alcanzar este objetivo principal se requiere:

- Estudio y conocimiento detallado del modo de funcionamiento de un cambiador de tomas en carga, y del patrón de vibraciones del mismo, así cómo se modifica el patrón de vibraciones ante diferentes averías presentes en el cambiador de tomas.



- Llevar a cabo un programa de ensayos para obtener el patrón de vibraciones del cambiador de tomas sin averías y con determinadas averías simuladas.
- Aplicar técnicas de pre-procesamiento y procesamiento de señales con el fin de extraer indicadores de diagnóstico de los registros de vibraciones obtenidos.
- Analizar las ventajas e inconvenientes que presentan diferentes indicadores de diagnóstico de forma que se puedan diferenciar el mayor número de averías posibles.
- Obtener un modelo por elementos finitos del cambiador de tomas en carga que permita mediante simulación reproducir el patrón de vibración que este genera de forma que no se precise realizar un elevado número de ensayos.

### **1.3. Justificación e importancia del tema.**

La monitorización en tiempo real o en línea (“on line”) de la vibración es una técnica eficaz no destructiva que puede ser usada para evaluar el estado de los contactos del conmutador, del selector de tomas y del motor que acciona el cambiador de tomas en carga.

Detectar y clasificar el tipo de avería, o defecto en tiempo real, proporcionaría un avance significativo en este campo, ya que permitiría además de reducir costes de operación y mantenimiento, minimizar los tiempos de descargo del transformador. Así, por ejemplo, si se conoce que en un cambiador de tomas existe un defecto en una determinada toma, es posible continuar trabajando con el transformador sin que el cambiador de tomas en carga trabaje o incluso trabajando el cambiador de tomas en un margen restringido (sin utilizar la toma averiada). Además, con la información obtenida del estudio de vibraciones se podrían realizar estudios del comportamiento dinámico de cada uno de los elementos, lo que llevaría a mejorar los diseños y la fiabilidad de estos.



#### 1.4. Estructura de la tesis

La tesis está estructurada en nueve capítulos y tres apéndices. En el primer capítulo se introduce la problemática que origina un cambiador de tomas en carga de un transformador y se establecen los objetivos de esta tesis. En el segundo capítulo se define el propósito, la estructura, los tipos y los modos de fallos de un cambiador de tomas en carga. En el capítulo tercero se presenta el estado del arte en técnicas de diagnóstico de cambiadores de tomas en carga, haciendo énfasis en la técnica de medida de vibración por ser la elegida en esta tesis, y se presenta un resumen de los principales trabajos en vibraciones referentes a cambiadores de tomas en carga. En el capítulo 4 se expone el estudio experimental realizado sobre el cambiador de tomas en carga. En el capítulo 5 se presenta el modelado del selector del cambiador de tomas en carga y la simulación del patrón de vibración que origina cuando éste actúa. En el capítulo 6 se presentan las diferentes técnicas que pueden ser aplicadas a la señal de vibración, con el fin de hallar indicadores de diagnóstico. En el capítulo 7 se presentan los resultados obtenidos al aplicar las técnicas expuestas en el capítulo 6. En el capítulo 8 se presenta el desarrollo de una red neuronal artificial con base en la *SOM* Toolbox ejecutándose sobre MATLAB versión 7.0 (R14) para el diagnóstico de averías en cambiadores de tomas en carga. La variable de entrada a la red neuronal artificial son los coeficientes de aproximación de tercer nivel obtenidos en la descomposición wavelet de la señal de vibración en buen estado y con avería (apartado 7.3) utilizando wavelet madre: Biortogonal 3.3

Finalmente en el capítulo 9 se presenta un resumen del trabajo realizado, se destacan las conclusiones más relevantes, las aportaciones originales y las publicaciones derivadas de esta tesis así como una propuesta de trabajos futuros.



## Capítulo 2

# CONSTITUCION DE UN CAMBIADOR DE TOMAS EN CARGA

### 2.1. El cambiador de tomas en carga

El propósito general de un cambiador de tomas en carga (por sus siglas en inglés OLTC; por sus siglas en español CTC), es modificar la relación de transformación del transformador, en respuesta a un cambio de tensión en el sistema, manteniendo constante la tensión de salida del transformador [1].

Con este fin, en uno de los arrollamientos del transformador, denominado arrollamiento de regulación<sup>1</sup> (frecuentemente conectado en serie con el arrollamiento de alta tensión), se realizan unas conexiones o “tomas” que conectarán con la borna de salida del transformador mediante el cambiador de tomas. Si durante el cambio de una toma a la siguiente existe un instante en el cual ninguna toma queda conectada a la borna de salida, la línea de salida queda sin tensión, lo cual no es deseable, pues produciría un hueco de tensión. Si por el contrario el cambiador de tomas en carga toca dos tomas simultáneamente, se produce un cortocircuito en un cierto número de espiras (Figura 2.1), originando una corriente de circulación importante. La solución es conectar una impedancia (frecuentemente una resistencia) entre los tomas que están siendo cortocircuitadas para limitar la corriente de cortocircuito (Figura 2.2).

---

<sup>1</sup> En transformadores dotados de cambiador de tomas sobre tapa (esto es, “en vacío” o sin tensión) el número de tomas del transformador es reducido, y las derivaciones se practican sobre uno de los arrollamientos principales que a este fin está dividido en varias partes galvánicamente aisladas.

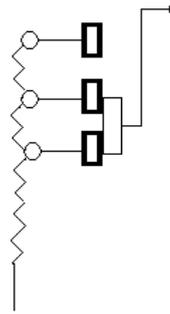


Figura 2.1. Tomas de un cambiador de tomas en carga

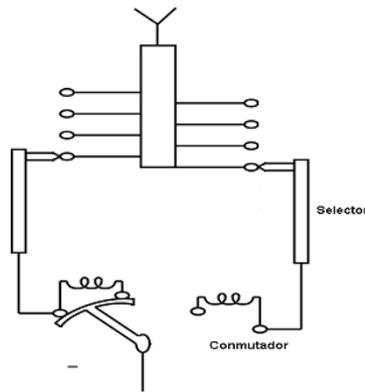


Figura 2.2. Impedancias entre tomas de un cambiador de tomas en carga

Para reducir el número de tomas que se realizan en el arrollamiento y con ello abaratar costos del transformador se puede utilizar un preselector. El preselector puede ser de dos tipos: inversor y gran escalón (Figura 2.3).

**Inversor:** conecta en serie el devanado de regulación de forma aditiva o de forma sustractiva con el devanado principal (Figura 2.3b).

**Gran Escalón (G):** conecta el comienzo del devanado de regulación al extremo del devanado principal o bien a un punto intermedio del mismo (Figura 2.3c).

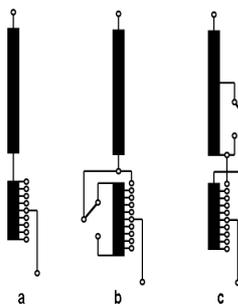
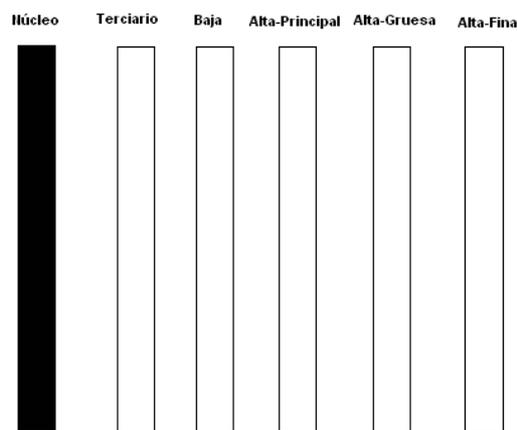


Figura 2.3. a) Sin preselector; b) Inversor; c) Gran escalón

La principal ventaja de alternativa gran escalón es que presenta una reducción en las pérdidas en el cobre del transformador en las posiciones de menor tensión respecto a las de un transformador con inversor. Sin embargo, en un transformador tiene que haber una simetría axial entre las corrientes de los diferentes arrollamientos para que los esfuerzos axiales sobre los arrollamientos sean en lo posible lo más reducido, y como en la solución gran escalón puede no circular corriente por una parte del arrollamiento, es preciso construir el arrollamiento como tres cilindros concéntricos: un cilindro corresponde al arrollamiento sin tomas, otro a la regulación gruesa y un tercero a la regulación fina. En este sentido, la alternativa inversor permite hacer los devanados algo más sencillos (Figura 2.4)[2].



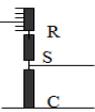
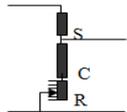
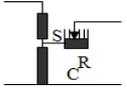
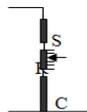
**Figura 2.4. Devanados del preselector tipo inversor**

Las resistencias que se insertan durante el cambio de toma suelen disponerse en un cilindro de fibra de vidrio, baquelita u otro material. Si las tomas del transformador se encontraran en el extremos de línea del arrollamiento, las resistencias (y otros elementos del cambiador de tomas) deberían aislarse para la plena tensión de la red. Sin embargo, en transformadores en estrella, uno de los extremos del arrollamiento del transformador está al potencial del neutro, con lo que el aislamiento de las resistencias se reduce considerablemente, reduciéndose a su vez considerablemente la probabilidad de averías. De hecho, la posibilidad de

disponer de las tomas en el extremo de neutro es una de las razones por las que los transformadores de red suelen tener arrollamientos en estrella<sup>2</sup>.

Un autotransformador es un transformador en el cual los arrollamientos primario y secundario tienen una parte común. En un autotransformador no es frecuente disponer de las tomas en el extremo del neutro, porque se varía simultáneamente el número de espiras de primario y secundario. En este caso existen diferentes alternativas aunque ninguna de ellas es enteramente satisfactoria (Tabla 2.1).

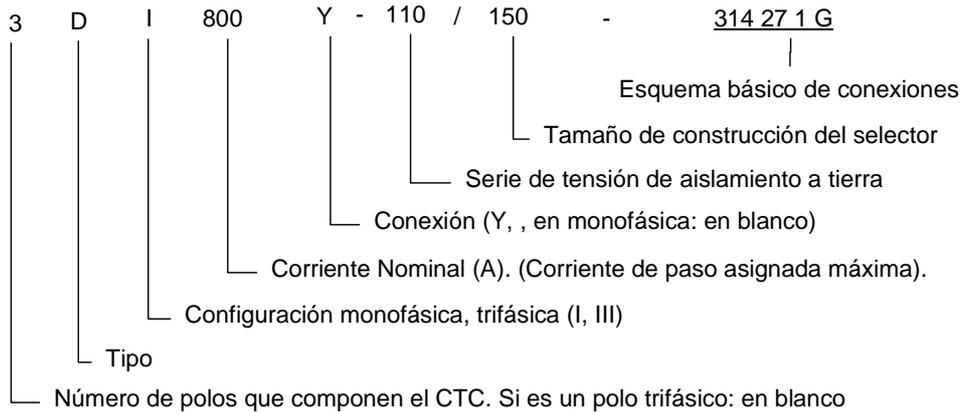
**Tabla 2.1. Disposición de arrollamientos en el autotransformador**

LUGAR	FIGURA	INCONVENIENTE
En el extremo de línea		Los elementos del regulador (conmutador, selector) están al potencial de la línea. Elementos en tensión poco separados físicamente
En el extremo de neutro		Al actuar el regulador varía la tensión de AT y la de BT Necesidad de aumentar el número de espiras eliminadas para una determinada variación en la relación de transformación
En serie con la salida de BT		Tomas diseñadas para soportar más corriente Encarece el regulador
En la unión entre el arrollamiento común y el arrollamiento serie		La corriente en las espiras de regulación cambia de valor en función de la toma seleccionada Dificultad para compensar axialmente los amperios vuelta entre arrollamientos

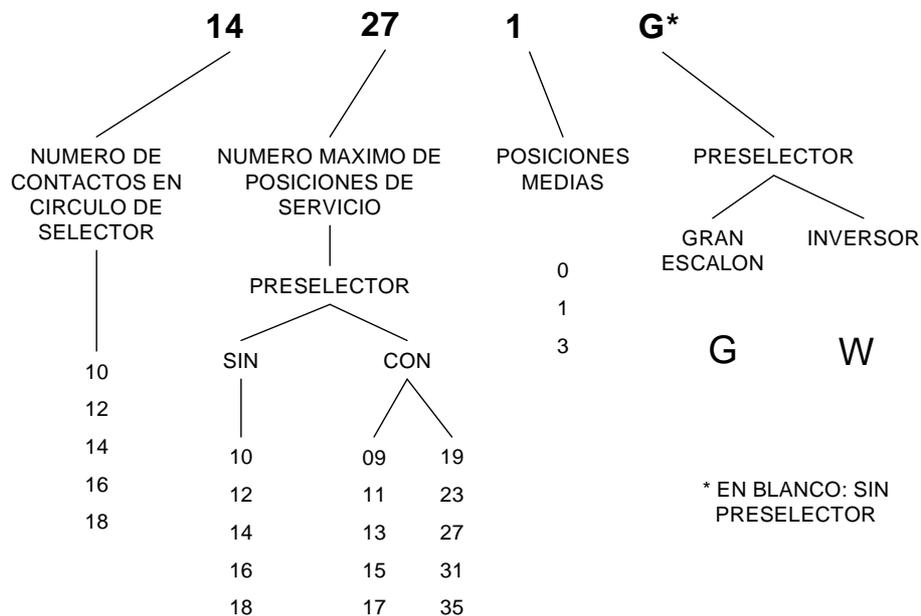
## 2.2. Designación de un cambiador de tomas en carga

Aunque la designación de un cambiador de tomas depende del tipo de fabricante, la estructura básica es prácticamente la misma para todos ellos. A título de ejemplo, la designación de los cambiadores de tomas en carga de uno de los fabricantes más importantes, MASCHINENFABRIK REINHAUSEN (MR), es alfanumérica (Figura 2.5) y su esquema básico de conexiones se ilustra en la Figura 2.6.

<sup>2</sup> Hay más razones, como son el mejor comportamiento ante sobretensiones de tipo impulso.



**Figura 2.5. Designación de un cambiador de tomas en carga**



**Figura 2.6. Esquema básico de conexiones de un cambiador de tomas en carga**

### 2.3. Estructura general de un cambiador de tomas en carga

La estructura básica de un cambiador de tomar en carga consta de los siguientes elementos esenciales:

- Armario de accionamiento y mando
- Mecanismo de transmisión
- Cabeza del cambiador
- Conmutador o ruptor (en notación inglesa diverter switch)
- Selector de tomas (selector switch) y preselector

### **2.3.1. Armario de accionamiento y mando**

El armario está situado en uno de los laterales exteriores del transformador (Figura 2.7), contiene los elementos de mando y maniobra del cambiador (contactores de arranque del motor, pulsadores de mando, motor eléctrico, etc.). Se encuentra equipado con una manivela de emergencia que permite accionar el cambiador cuando falla la fuente de alimentación auxiliar o se requiere sólo movimientos de prueba. Presenta un enclavamiento mecánico, al introducir la manivela se bloquea el funcionamiento eléctrico. Su funcionamiento puede ser automático (scada-pantam), manual (local-distancia) y emergencia (manivela).



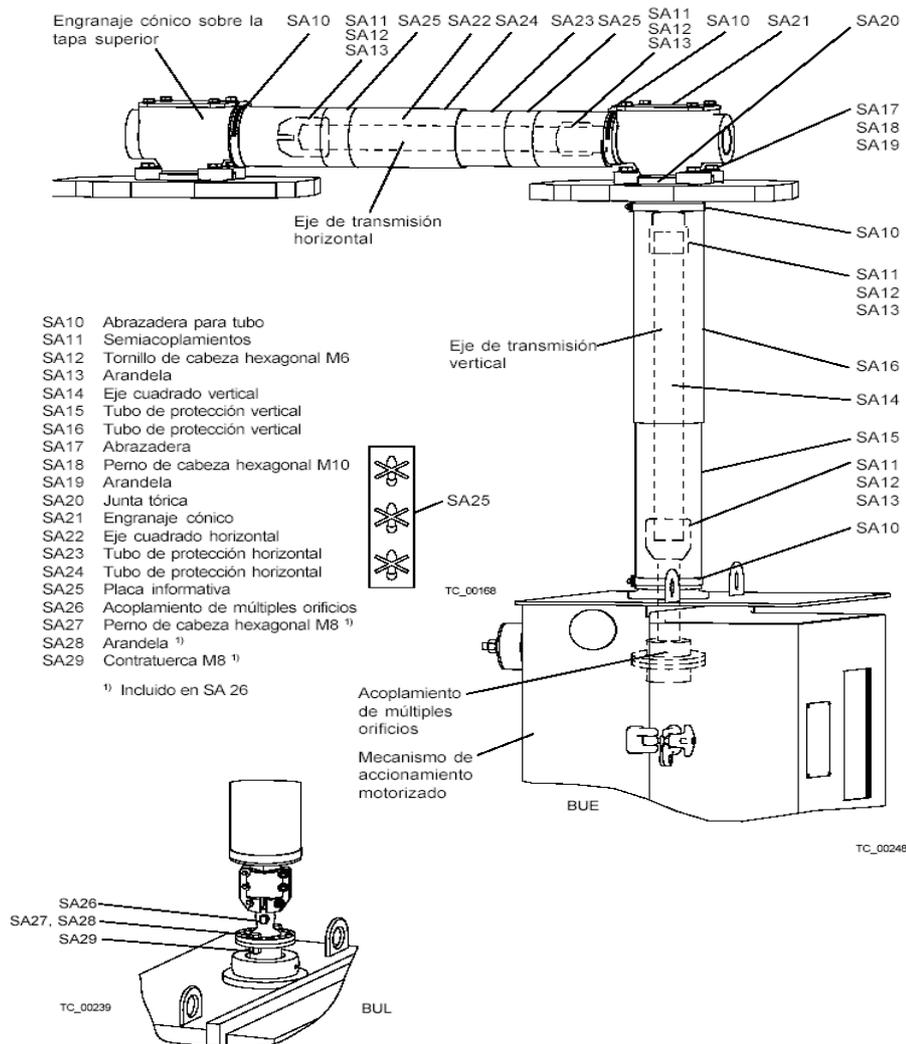
**Figura 2.7. Armario de accionamiento y mando [2]**

### **2.3.2. 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 (Figura 2.8).

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 cambiador de tomas en carga no corresponda con la posición indicada en el armario de mando.



**Figura 2.8. Mecanismo de Transmisión [3].**

### 2.3.3. Cabeza del cambiador

La cabeza del cambiador de tomas en carga es un receptáculo metálico situado en la parte superior del cambiador de tomas en carga al que sirve de soporte, como se ilustra en la Figura 2.9. En su interior se encuentran los mecanismos acumuladores de energía del conmutador y las cruces de malta de accionamiento del selector.

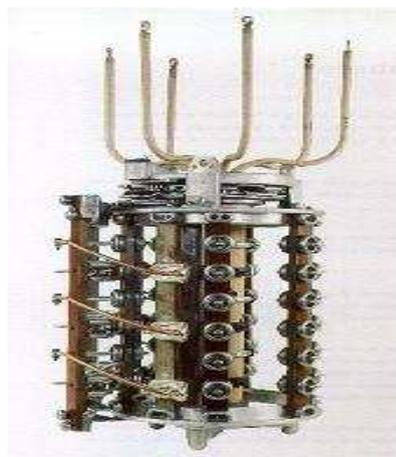
En la cabeza del cambiador dispone de una serie de tuberías para la conexión del conmutador con el depósito de expansión de aceite, para la toma de muestras de aceite, el vaciado del depósito del conmutador y el filtrado de aceite.



**Figura 2.9. Cabeza del regulador**

#### **2.3.4. Selector de tomas(Selector Switch)**

El selector (Figura 2.10) conduce la corriente de carga de la toma en servicio y selecciona la próxima toma a conectar. Se encuentra alojado en la cuba del transformador (bañado por su mismo aceite) o en un depósito adosado a la cuba principal y separada de la misma mediante una simple barrera de pressboard (selector externo, Figura 2.11) El selector es movido por un sistema mecánico sincronizado con el conmutador.



**Figura 2.10. Selector de tomas**

El selector, junto con el mecanismo acumulador de energía, es el primer elemento en moverse al recibir una orden de cambio. No corta ni establece carga.

Puede incorporar un preselector que permite duplicar el número de posiciones del selector. El preselector se mueve accionado por el selector sólo en momentos muy concretos de su recorrido.



**Figura 2.11. Cambiador de tomas en carga externo**

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 se encuentra unido de forma rígida al arrollamiento. Debido a ello no es posible extraerlo para realizar inspecciones durante el mantenimiento rutinario. En el caso de selectores internos, la cuba dispone de una boca de hombre que se puede abrir (previo vaciado parcial de aceite del transformador) en el caso de que existan sospechas fundadas de que existe una avería en el selector (Figura 2.12)



**Figura 2.12. Boca de hombre para la inspección del selector en cambiadores de tomas internos.**

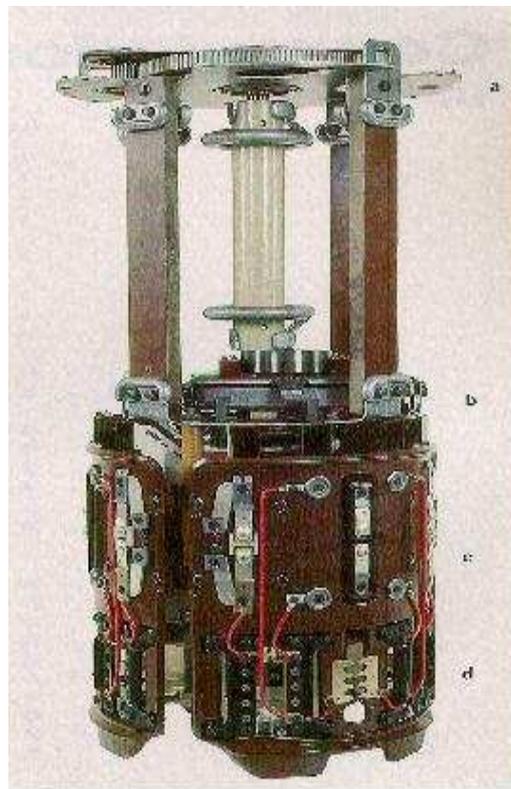
### **2.3.5. Conmutador o ruptor (Diverter Switch)**

El conmutador (Figura 2.13) es el elemento que efectúa la transferencia de la intensidad de carga desde la toma en servicio a una toma próxima seleccionada (conmutación) sin interrumpir el servicio. Incorpora unos contactos fijos y otros móviles y está conectado al selector. El conmutador se encuentra inmerso en un depósito de aceite independiente de la cuba del transformador, para evitar contaminarlo, debido a la degradación que sufre el aceite durante el proceso de conmutación.

El conmutador está unido a la cabeza del cambiador, de manera que forma un único cuerpo extraíble para efectuar las operaciones rutinarias de mantenimiento.

Durante el cambio de toma, es accionado por un mecanismo acumulador de energía de resortes ubicado en la cabeza del cambiador, que almacena energía durante la mayor parte del tiempo del cambio (entre 5 y 7seg) y libera la energía al final de la maniobra (40mseg).

Para limitar la corriente, el conmutador incorpora unas resistencias (lo más frecuente en Europa) o reactancias transitorias de conmutación.



**Figura 2.13. Conmutador**



## 2.4. Modos de fallo de un cambiador de tomas en carga

Los factores que contribuyen a que falle un cambiador de tomas en carga son [4],[5]:

- Diseño inadecuado
- Mala fabricación o mal control de calidad
- Operación incorrecta
- Deterioro o envejecimiento de los componentes
- Excesiva humedad en el aceite
- Mantenimiento no oportuno
- Inadecuado mantenimiento
- Montaje incorrecto de elementos después de mantenimiento
- Uso infrecuente de algunas posiciones de regulación

En un cambiador de tomas en carga se pueden dar fallos eléctricos y mecánicos. La mayor parte de los fallos son principalmente de origen mecánico, aunque sus consecuencias pueden originar fallos eléctricos. Los principales modos de fallo de cambiadores de tomas en carga son [6],[7]:

- Fallo en el motor de arrastre que acciona el cambiador, o bien en el sistema de mando del mismo (fallos eléctricos en el motor, elementos averiados en el sistema de mando, etc.).
- Fallo en la transmisión: Desalineación en acoplamientos, engranajes desgastados o dañados, rodamientos deteriorados.
- Fallo en el mecanismo acumulador de energía mecánica.
- Asincronismo o desregulación entre el cambiador y su accionamiento a motor:
  - Debe existir un sincronismo perfecto entre el cambiador y su accionamiento motor, de tal forma, que el cambiador siempre realice el cambio de toma completo, antes que el motor finalice la maniobra. Es fundamental que se cumpla en ambos sentidos de marcha del motor (subir y bajar toma) y para todos los polos (fases) que constituyen el cambiador.

El asincronismo entre el motor y el cambiador puede hacer que éste opere fuera de sus márgenes de trabajo o dejar abierto el circuito en carga, causando en ambos casos avería del cambiador y probablemente daño en el arrollamiento del transformador.

El asincronismo puede ser producto de un inadecuado diseño, o mal control de calidad de fabricación o ensamblaje, o componentes envejecidos o deteriorados como se ilustra en la Figura 2.14. En las operaciones de mantenimiento es importante comprobar la coincidencia entre el número de posición indicado por el accionamiento motor y el número que aparece en la cabeza del cambiador de tomas en carga en todas las posiciones de las tomas y para todos los polos del cambiador de tomas en carga.



**Figura 2.14. Contactos colapsados debido a mal sincronismo**

Asincronismo o desregulación entre los polos del cambiador: Se presenta cuando la conmutación entre los diferentes polos del cambiador no es simultánea, provocando diferencias entre los tiempos de conmutación.

- Depósito o acumulación de partículas de aceite quemado en los contactos del selector o del conmutador, de compuestos de partículas de aceite y plata, u óxido de cobre o sulfuros. La acumulación de partículas de aceite quemado no provoca directamente el fallo del cambiador, pero forma carbón pirolítico (en inglés coking, Figura 2.15) y puntos calientes en lugares donde circula la corriente de carga.

La Guía para manejo de vida de transformadores de CIGRE [8], sugiere la siguiente secuencia de acontecimientos desde que se genera en forma incipiente el defecto hasta que manifiesta el fallo “La formación de películas finas de carbón incrementa la resistencia de contacto y su temperatura. Un aumento en la temperatura de los contactos provoca un progresivo aumento de la resistencia de contacto y correspondientemente un aumento adicional de temperatura, erosión de los contactos, quemado, y generación de gas. La polución del aceite debida al carbón reduce las propiedades dieléctricas del aceite produciéndose un deterioro de aislamiento. Una insuficiente presión de los contactos provoca unos efectos semejantes a los mencionados (incremento en la resistencia de contacto).

En particular, el selector del cambiador de tomas es propenso a un fenómeno de envejecimiento denominado efecto de largo plazo, el cual se produce cuando el cambiador no opera en una determinada toma durante un tiempo prolongado; el efecto de largo plazo comienza con la formación de una capa delgada de aceite, esta formación es acelerada por las altas temperaturas, la corriente de carga y una baja presión de contacto.



**Figura 2.15. Capa de carbón cubriendo toda la superficie de la cabeza del regulador**

- Desprendimiento o arranque del material del contacto (ya sea de los contactos del selector o del conmutador): También se puede presentar desprendimiento o arranque de material de contacto, debido a arcos eléctricos producidos durante la conmutación o incluso por el desgaste natural de la operación del cambiador.

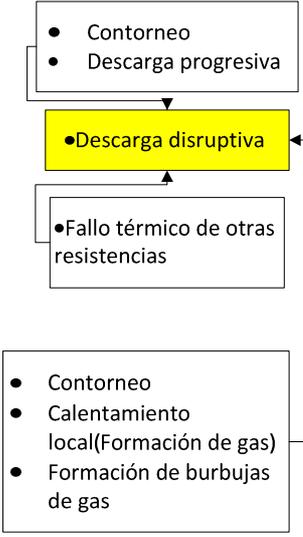


- Fallos causados por ruptura del aislamiento (aislamiento sólido o aislamiento líquido): Provocan serios daños al conmutador y la desconexión del transformador. Esta falta es inducida a menudo por arcos internos o arcos entre fases, debido a presencia de humedad o contenido de agua presente en el aceite en el cual está inmerso el conmutador o por depósitos de impurezas en las paredes del depósito del conmutador. Para prevenir este fenómeno es necesario realizar un filtrado del aceite periódicamente. Si se presenta dentro de la cuba del conmutador un excesivo arqueo, la temperatura del aceite tendería a incrementarse. Por lo tanto la temperatura de la cuba de aceite del conmutador es un parámetro indicador para representar la condición del cambiador de tomas. Este tipo de fallo no altera las vibraciones del cambiador, de forma que no es posible detectar este tipo de fallos por análisis de vibraciones, aunque sí por análisis de gases disueltos o por análisis físico-químicos del aceite del cambiador.
- Fallos en las resistencias de transición o en las trencillas de conexión de las mismas: Se debe a un inadecuado diseño o envejecimiento de las mismas. Una desconexión de las resistencias de transición dentro del conmutador, supone un circuito abierto que causa arcos en el aceite y si esto persiste las protecciones desconectarán el transformador. Este tipo de fallos se desarrolla lentamente dentro del conmutador e incrementa el valor de la medida de la resistencia dinámica de contacto. Otro tipo de fallos corresponde al cortocircuito de las resistencias de transición.
- Fallos diversos: Fallos en las juntas de sellado, corrosión en la cuba, fallos en la fijación, etc.:

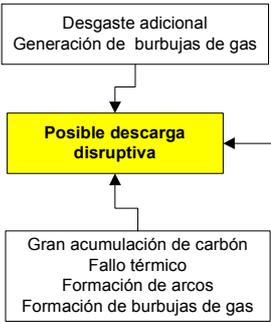
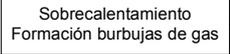
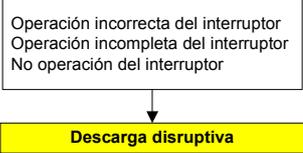
Los fallos repentinos están asociados a faltas causadas por ruptura del aislamiento, o a fallos en las resistencias de transición. La degradación gradual está asociada con el desgaste de contactos y el depósito o acumulación de partículas de carbón. La degradación gradual de los contactos es un fenómeno irreversible directamente relacionado con: corriente de carga, valor de la corriente circulante durante cada cambio de una toma a otra, número de operaciones del cambiador de tomas y tiempo de operación del transformador en cada una de las tomas desde el último mantenimiento.

En las Tabla 2.2, Tabla 2.3 y Tabla 2.4 [9], se resumen los diferentes fallos mencionados.

**Tabla 2.2. Defectos o fallos típicos y modo de fallos de un cambiador de tomas en carga.  
Conmutador parte I: fallos dieléctricos**

COMPONENTES DEL SISTEMA (CONMUTADOR)	DEFECTO O AVERIA	MODO DE FALLO
<p><b>CONMUTADOR</b> <b>Dielectricos</b></p> <p>Aislamiento sólido</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Entre tomas</li> <li>• A tierra</li> <li>• Entre fases</li> <li>• Barrera de pressboard</li> </ul> <p>Aislamiento liquido</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• A través de contactos</li> </ul> <p>Resistencia</p> <p>Reactancia</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua excesiva</li> <li>• Contaminación del aceite (combinado con carbón)</li> <li>• Objetos extraños</li>   <li>• Resistencia cortocircuitadas</li> <li>• Descargas</li>   <li>• Recalentamiento</li> <li>• Conexión incorrecta</li> <li>• Avería en el núcleo</li> </ul>	 <p>The diagram illustrates the progression of dielectric failures. It starts with 'Contorneo' and 'Descarga progresiva' in a box. An arrow points down to a yellow box labeled '• Descarga disruptiva'. From there, an arrow points up to a box labeled '• Fallo térmico de otras resistencias'. Another arrow points down from the yellow box to a larger box containing '• Contorneo', '• Calentamiento local (Formación de gas)', and '• Formación de burbujas de gas'. A feedback arrow points from this larger box back to the '• Descarga disruptiva' box.</p>

**Tabla 2.3. Defectos o fallos típicos y modo de fallos de un cambiador de tomas en carga.  
Conmutador parte II: fallos eléctricos y mecánicos**

COMPONENTES DEL SISTEMA(CONMUTADOR)	DEFECTO O AVERIA	MODO DE FALLO
<p><b>CONMUTADOR</b></p> <p><b>Eléctrico</b></p> <p>Resistencia</p> <p>Contactos</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Contactos auxiliares</li> <li>• Contactos principales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Circuito abierto</li> <li>•Sobrecalentamiento</li> <li>•Desgaste</li> <li>•Desalineamiento</li> <li>•Insuficiente presión contacto</li> <li>•Sobrecalentamiento</li> </ul>	 <pre> graph TD     A[Desgaste adicional Generación de burbujas de gas] --&gt; B[Posible descarga disruptiva]     C[Gran acumulación de carbón Fallo térmico Formación de arcos Formación de burbujas de gas] --&gt; B     D[Sobrecalentamiento Formación burbujas de gas] --&gt; B           </pre>
<p><b>Terminales</b></p> <p><b>Uniones &amp; conexiones</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Empalmes en mal estado (conexiones flojas, mal prensadas, etc).</li> <li>•Conductor dañado.</li> <li>•Filamentos rotos</li> </ul>	 <pre> graph TD     E[Sobrecalentamiento Formación burbujas de gas] --&gt; B[Posible descarga disruptiva]           </pre>
<p><b>Mecánico</b></p> <p>Resortes de operación</p> <p>Barras y ejes de operación</p> <p>Mecanismos de operación</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Operación ralentizada del conmutador</li> <li>•Eje de accionamiento roto</li> <li>•Sincronización incorrecta entre selector y conmutador</li> </ul>	 <pre> graph TD     F[Operación incorrecta del interruptor Operación incompleta del interruptor No operación del interruptor] --&gt; G[Descarga disruptiva]           </pre>

**Tabla 2.4. Defectos o averías típicas y modo de fallos del Selector de un cambiador de tomas en carga**

COMPONENTES DEL SISTEMA(CONMUTADOR)	DEFECTO O AVERIA	MODO DE FALLO
<p><b>Dieléctrico</b></p> <p>Aislamiento sólido</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Entre tomas</li> <li>• A tierra</li> <li>• Entre fases</li> <li>• Barrera de pressboard</li> </ul> <p>Aislamiento líquido</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• A través de contactos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua excesiva</li> <li>• Contaminación del aceite</li> <li>• Contaminación superficial</li> <li>• Descargas parciales de baja energía</li> <li>• Aceite excesivamente envejecido</li> </ul>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> <p>Descargas parciales destructivas. Contorneo localizado Descarga progresiva Celulosa excesivamente vieja o sobrecalentada</p> </div> <p style="text-align: center;">↓</p> <div style="background-color: yellow; border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> <p><b>Descarga disruptiva.</b></p> </div>
<p><b>Eléctrico</b></p> <p>Conexiones</p> <p>Contactos del selector</p> <p>Transición gruesa fina</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Malas conexiones</li> <li>• Contactos desalineados</li> <li>• Baño de plata deteriorado o desgastado</li> <li>• Escasa presión de los contactos,</li> </ul>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> <p>Sobrecalentamiento por formación de gas, chispas y arcos Sobrecalentamiento Acumulación de carbón entre contactos</p> </div>
<p><b>Mecánico</b></p> <p>Eje impulsor</p> <p>Contactos del selector</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deteriorado o roto</li> <li>• Alineamiento incorrecto con respecto la operación del conmutador.</li> <li>• Recorrido más allá del final</li> </ul>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> <p>Operación fuera de sincronismo entre el selector y el conmutador, ocasionando formación de arcos</p> </div>
<p><b>Mecanismo de arrastre</b></p> <p>Eje impulsor</p> <p>Topes mecánicos</p> <p>Motor y mecanismos de engranaje</p> <p>Equipo de control</p> <p>Interruptores auxiliares</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sincronización incorrecta</li> <li>• Operación más allá del extremo</li> <li>• Engranajes rotos</li> <li>• Par desalineado</li> <li>• Interruptores auxiliares gastados, rotos o dañados</li> </ul>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> <p>Operación incorrecta del selector con respecto al conmutador</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> <p>El cambiador se bloquea en una toma que no opera</p> </div>



### *Capítulo 3*

## **ESTADO DEL ARTE EN TECNICAS DE DIAGNOSTICO DE UN OLTC**

Tradicionalmente, las técnicas de diagnóstico de cambiadores de tomas en carga estuvieron basadas en revisiones periódicas en función del número de maniobras. En estas revisiones, se extraía el conmutador del cambiador de tomas en carga, se cambiaban las resistencias deterioradas, se pulían las trencillas de unión de dichas resistencias, se sustituían los contactos, etc. Por lo que se refiere al selector, no es posible extraerlo, de modo que para inspeccionarlo es preciso retirar parcialmente el aceite de la cuba del transformador y desmontar la boca de hombre para la inspección (Figura 2.12). Afortunadamente las inspecciones del selector no son muy habituales (en condiciones normales se hacen cada 8 años [3], salvo que haya alguna razón para sospechar de la existencia de un defecto en el mismo<sup>3</sup>).

Evidentemente, las técnicas de mantenimiento basadas en revisiones periódicas, no constituyen una solución satisfactoria al problema del diagnóstico, ya que se revisan cambiadores que no presentan problema alguno (lo cual supone sacar al transformador de servicio, para lo cual hay que contratar una grúa para extraer el conmutador, y contar con un equipo de técnicos altamente cualificados, durante un tiempo relativamente largo). Además, se corre el riesgo de que existan fallos catastróficos debido a problemas intempestivos que se podrían producir en el período entre revisiones. Incluso es posible que ciertas averías se produzcan por un mal ensamblaje del equipo después de una revisión [2]-[4].

Una mejora respecto del mantenimiento preventivo basado únicamente en el tiempo de funcionamiento es la propuesta por Redfern et al [10], que propugnan realizar el mantenimiento, en un tiempo variable que depende del número de

---

<sup>3</sup> Por ejemplo, si las protecciones desconectaban el transformador cuando trabaja en ciertas posiciones de regulación pero no lo desconecta cuando trabaja en otras.



maniobras desde la última conmutación y la intensidad que circula por el cambiador de tomas en carga durante el momento de la conmutación utilizando una función de desgaste

Más recientemente han aparecido las técnicas denominadas “predictivas” que pretenden detectar un defecto cuando aún es incipiente. Entre estas técnicas cabe destacar el análisis de gases disueltos en el aceite (DGA) [11], la medida de la temperatura del cambiador de tomas en carga [12], la medida de la resistencia dinámica de contacto [13], la medida del par del motor de arrastre [14], y la medida de la señal de vibración durante el cambio de una toma a otra [15],[16]. A continuación se describen brevemente cada una de estas técnicas.

### **3.1. Técnicas de diagnóstico**

#### **3.1.1. Diagnóstico con base en gases disueltos en el aceite**

El aceite aislante de un transformador va degradándose (pérdida paulatina de sus características) durante el funcionamiento normal del mismo, mermando sus propiedades dieléctricas y refrigerantes. En particular el aceite de un transformador se descompone bajo la acción de un arco eléctrico y debido a la temperatura. El envejecimiento normal del aceite produce cantidades muy pequeñas de gases combustibles (principalmente hidrógeno, CO, CO<sub>2</sub> e hidrocarburos gaseosos) mientras que sollicitaciones térmicas y eléctricas anormales en el transformador, dan como resultado la emisión de grandes cantidades de gases. La proporción entre los diferentes gases generados depende de la temperatura de descomposición del aceite, y ésta a su vez, del tipo de defecto.

Parte de los gases generados quedan disueltos en el aceite aislante, y el análisis de estos gases es un método muy efectivo para obtener información de posible faltas internas en el transformador [17],[18].

El Standard IEEE STD C57.104-91 “Guide for the interpretation of gases generated in oil- immersed transformers” [19], describe cómo se debe interpretar la concentración de gases disueltos en aceite, el diagnóstico del estado del transformador y las sugerencias o recomendaciones a tener en cuenta.

En general se detectan nueve gases típicos o patrón (Tabla 3.1) de los cuales todos son gases combustibles a excepción del oxígeno, nitrógeno y dióxido de carbono. Algunos ingenieros utilizan también el propano y el propeno [20].

**Tabla 3.1. Gases típicos de la combustión**

Simbolo	Nombre
H <sub>2</sub>	Hidrogeno
O <sub>2</sub>	Oxigeno
N <sub>2</sub>	Nitrógeno
CH <sub>4</sub>	Metano
CO	Monóxido de carbono
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Etano
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Etileno
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Acetileno

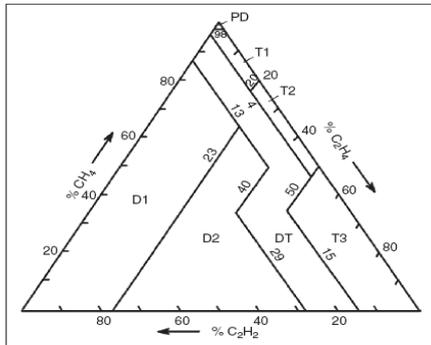
Existen diferentes formas de interpretación de las concentraciones de gases disueltos en el aceite, tales como el método Rogers [18], [22], el método Dornenburg [18], el método MSS [22], o el triángulo de Duval [24][12][11]. Para detectar una avería incipiente es preciso tener en cuenta las concentraciones de gases producidos, mientras que la tendencia de dichas concentraciones es indicativa de la actividad del defecto.

Por lo que se refiere a la detección de averías en cambiadores de tomas en carga, cabe distinguir entre averías en el conmutador y averías en el selector.

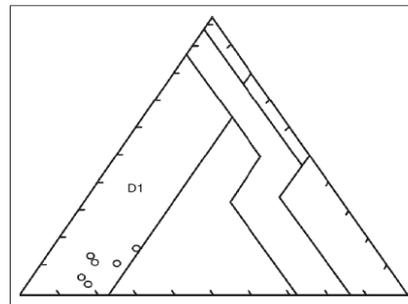
Los fallos eléctricos más comunes en el conmutador de un cambiador de tomas en carga son sobrecalentamiento de contactos o puntos calientes y arcos eléctricos. Cada uno de estos fallos puede presentarse individual o simultáneamente. Debido a ello, los gases más frecuentes en cambiadores de tomas en carga son acetileno (producido en el caso de arcos eléctricos) y metano, etano y etileno (producidos en el caso de puntos calientes) [17].

El principal problema para la detección de fallos en conmutadores de cambiadores de tomas en carga es que cuando se opera el conmutador, se producen pequeños arcos que provocan una gran cantidad de gases (principalmente C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, pero también H<sub>2</sub> y otros), los cuales son del mismo tipo que los producidos por un fallo interno del transformador. Por ello, los métodos de diagnóstico indicados anteriormente (Rogers, MSS, Duval) no son aplicables

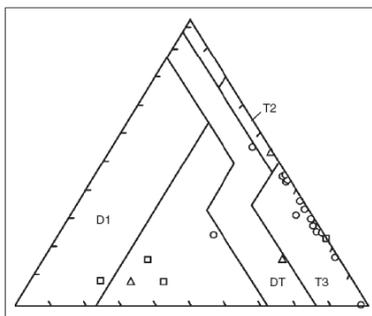
directamente al diagnóstico de cambiadores de tomas en carga. De hecho, el cromatógrafo utilizado para a separación de los gases disueltos en el aceite debe ser diferente del utilizado para el aceite de la cuba, pues el volumen de gases disueltos es mucho mayor y saturaría el equipo.



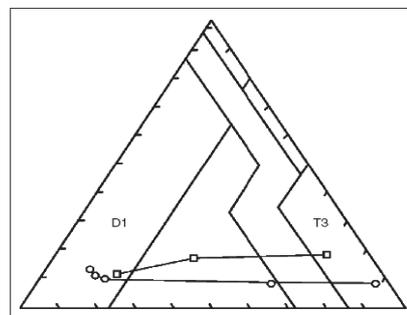
(a)Coordenadas y zonas de defecto del triángulo



(b)Operación normal del cambiador de toma en servicio

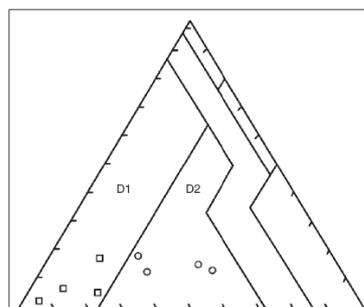


(c) Defectos térmicos en OLTC in servicio: O: carbón severo



(d) OLTC sujeto a un gran número de operaciones sin cambio de aceite

O: 500, 3600,49.000, 202.000 y 269.000 operaciones;  
 □: 2750,8730 y 47.830 operaciones (izquierda y derecha del triángulo)

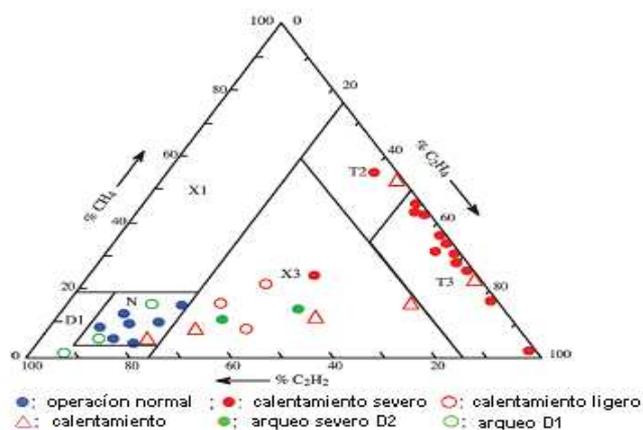


(e) arqueado en un OLTC en servicio; O: arqueado; □: arqueado severo

**Figura 3.1. Triángulo clásico de Duval**

Así, en el triángulo clásico de Duval (Figura 3.1) no hay una clara separación de la zona que corresponde a cambiadores de tomas en buen estado y defectuosos [23]. Sin embargo, en 2008 Duval[24] presentó una segunda versión de su

triángulo (llamada “el triángulo 2 de Duval”) en la que es más fácil apreciar los fallos en los cambiadores. Hay que decir, no obstante, que los lados del triángulo de Duval 1 y del triángulo de Duval 2 son idénticos (porcentajes de metano, etileno y acetileno), y sólo cambia la división interna del triángulo (Figura 3.2). El significado de las zonas N, X1, X3, D1, T2 y T3 se muestra en la Tabla 3.2



**Figura 3.2. Triángulo 2 de Duval**

**Tabla 3.2. Significado de las zonas N, X1, X3, D1, T2 y T3**

Zona	Identificación	Acciones recomendadas
N	Operación Normal	
T3	Defecto térmico severo T3 (T>700°C); carbón denso	Cambio de aceite. Inspección de contactos con carbón del OLTC
T2	Defecto térmico severo T2 (300>T>700°C); carbón	
X3	Defecto T3 o T2 in progreso con algo de carbón o incremento en la resistencia de contactos. O severo arqueo D2	Inspección del OLTC para comprobar presencia de carbón o resistencia de contactos o arqueos severos
D1	Arqueo anormal D1 (fuera de la zona N)	Inspección del OLTC para pequeñas señales de arqueo
X1	Arqueo anormal D1 de defecto térmico en progreso	Área en periodo de investigación

Otro método de detectar averías en conmutadores de cambiadores de tomas en carga a partir del análisis de gases disueltos ha sido propuesto por Jakob [18].

Por lo que se refiere al selector, éste se encuentra inmerso en el aceite de la cuba principal, y los arcos eléctricos o puntos calientes que pudieran producirse se diagnostican de forma semejante a como se hace con este tipo de averías en otros puntos del transformador. Para distinguir si la avería se encuentra en el selector o en otro punto del transformador hay que comprobar si la generación de gases está



relacionada con el hecho de que el transformador trabaje en una toma determinada.

El análisis de gases disueltos se utiliza desde el principio de los años 70 del siglo pasado. Su principal inconveniente es que en la actualidad, esta técnica se realiza con una cierta periodicidad, de modo que podría ocurrir que el cambiador de tomas en carga sufriera alguna avería en el período entre tomas de muestras de aceite. Es posible que en un futuro el desarrollo y reducción de precio de los sensores de gases multigas on-line permita utilizar la técnica para monitorización de transformadores.

#### **3.1.2. Medida de la temperatura**

La mayoría de los fallos en cambiadores de tomas en carga se manifiestan generando calor. Midiendo la diferencia de temperatura entre la cuba principal y el habitáculo del cambiador de tomas en carga, es posible detectar defectos en el cambiador [26]. En condiciones normales la temperatura de la cuba es un poco mayor que la del cambiador de tomas en carga, mientras que en condiciones de falta la temperatura del cambiador de tomas en carga puede ser superior a la de la cuba. Para interpretar las diferencias de temperatura es interesante disponer de más datos, tales como: número de toma en la que se encuentra trabajando el transformador, grado de carga del mismo, número de cambios de toma en la última hora de funcionamiento, etc. Incluso el hecho de si el calentamiento se produce en la transición de una toma par a una toma impar o viceversa puede ser de interés [27].

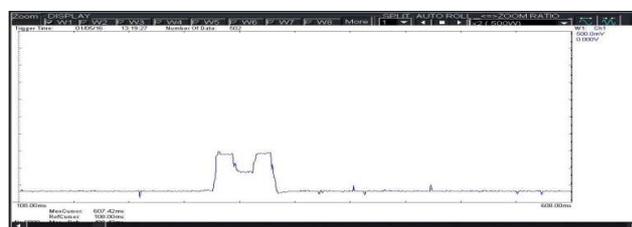
Esta técnica no sirve para detectar problemas de naturaleza mecánica [28]. El método puede ser usado como una técnica de monitorización o de mantenimiento predictivo; en este último caso, se puede emplear termografía.

Esta técnica tiene el inconveniente que en determinados tipos de cambiadores que se encuentran muy dentro de la cuba, la medida de la temperatura del receptáculo del cambiador, puede ser complicada utilizando sondas de temperatura externas al transformador. Dentro de sus ventajas está que no se requiere desconectar de servicio el transformador y que puede ser utilizada para monitorización on-line de transformadores.

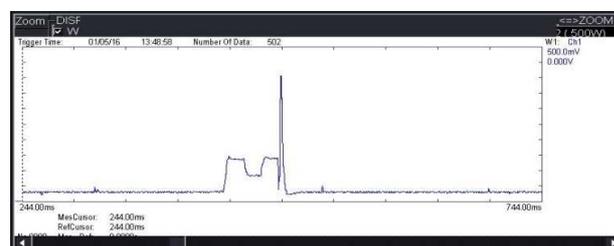
### 3.1.3. Medida de la resistencia dinámica de contacto

La llamada “resistencia dinámica de contacto” es la resistencia de una fase del transformador (incluyendo los contactos del cambiador de tomas y la resistencia de conmutación) durante el proceso de cambio de tomas [29]. Antes de realizar la medida de resistencia, conviene hacer un cambio completo de tomas desde la toma 1 a la última (p.e. la toma 21) y bajando, para “limpiar” los contactos del conmutador y del selector de restos de aceite quemado, carbonilla, etc. Para realizar la medida, se aplica entre una fase del transformador y el neutro una tensión constante de valor reducido (en torno a 5 V de DC) y se registra la corriente durante el proceso de cambio de toma. Para identificar el mayor número de fallos posible, se realizan dos tipos de medidas:

La medida de la resistencia dinámica durante el cambio de una toma a la siguiente, puede utilizarse para detectar problemas en la resistencia de conmutación y tiempos de conmutación. Como la medida se realiza a tensión constante, el registro de intensidad es inversamente proporcional a la resistencia de conmutación. En la Figura 3.3a se muestra el registro de un cambiador sin fallos y en la Figura 3.3b en uno defectuoso.



a) Transición en un cambiador sin averías



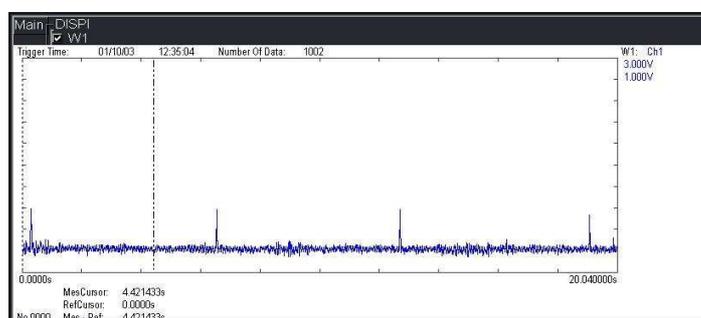
b) Transición en un cambiador averiado

**Figura 3.3. Registro de corriente durante la medida de la resistencia dinámica durante el cambio de una toma a la siguiente.**

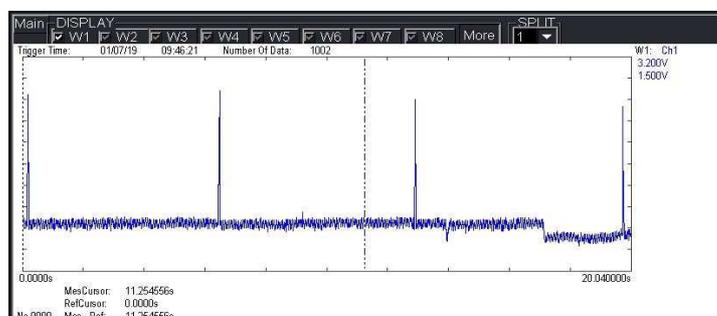
La medida de la resistencia dinámica durante el margen completo de regulación (desde la primera toma a la última y viceversa) puede ser utilizada para

identificar fallos en el selector, el preselector o el inversor. El registro obtenido en este caso, debe mostrar una variación de resistencia uniforme, progresivamente creciente o decreciente Figura 3.4a; una discontinuidad en el registro es síntoma de un mal estado de los contactos de los mencionados elementos (Figura 3.4b).

La medida de las resistencias se ha de realizar en cada una de las tres fases del arrollamiento, pues la medida de una sola fase, sólo aporta información sobre las averías en los elementos comunes a las tres fases y en los elementos propios de la fase medida. Sin embargo, en el caso de arrollamientos en estrella (como es lo habitual) es posible aplicar la misma tensión a las tres fases en paralelo y con ello realizar la medida de la resistencia de las tres fases simultáneamente (Figura 3.5).

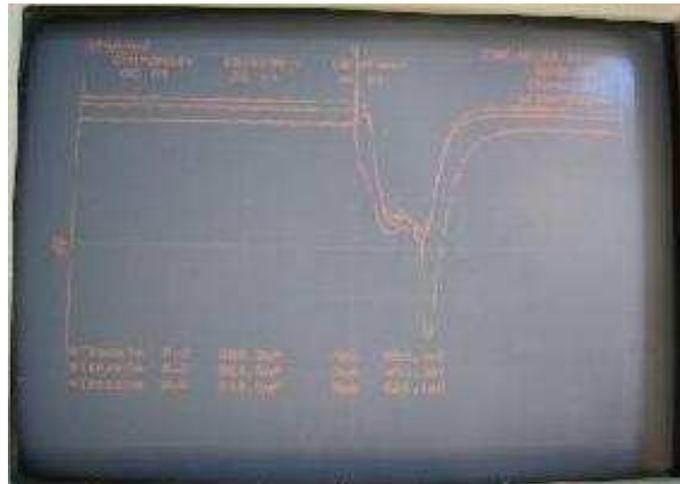


a) Resistencia dinámica de regulación durante el margen completo de regulación (detalle) en un cambiador sin averías



b) Resistencia dinámica de regulación durante el margen completo de regulación (detalle) en un cambiador averiado

**Figura 3.4. Detalle del registro de corriente durante la medida de la resistencia dinámica de contacto en el margen completo de regulación.**



**Figura 3.5. Medida simultánea de la resistencia de contacto de las tres fases del transformador**

Algunos autores utilizan el método con el arrollamiento secundario abierto (en vacío) mientras que otros lo conectan en cortocircuito [30]. Cuando un transformador esté en vacío, su elevada inductancia hace que la respuesta del transformador sea muy lenta; sin embargo, cortocircuitando el secundario se alcanza el régimen permanente de corriente en un tiempo menor.

Erbrink et al [30],[31], utilizan este procedimiento en un sistema de diagnóstico de cambiadores de tomas que también incluye una medida de la velocidad del eje de transmisión del cambiador de tomas y de la potencia del motor de arrastre del cambiador.

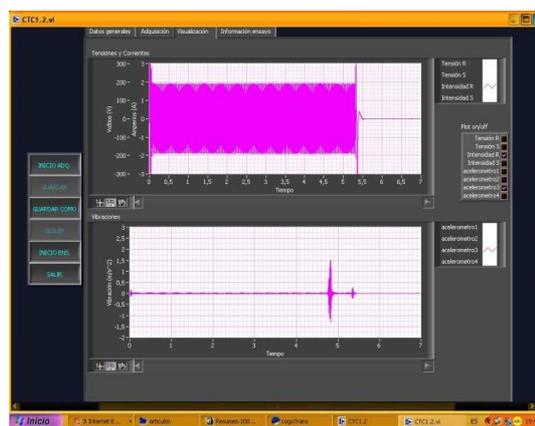
En los sistemas de medida de la resistencia dinámica de contacto que utilizan corrientes muy bajas la medida puede no ser correcta en el caso de que haya una película demasiado gruesa de aceite quemado pegada a los contactos. En esos casos la resistencia de contacto en una determinada toma puede ser diferente subiendo y bajando.

#### **3.1.4. Medida del par del motor de arrastre**

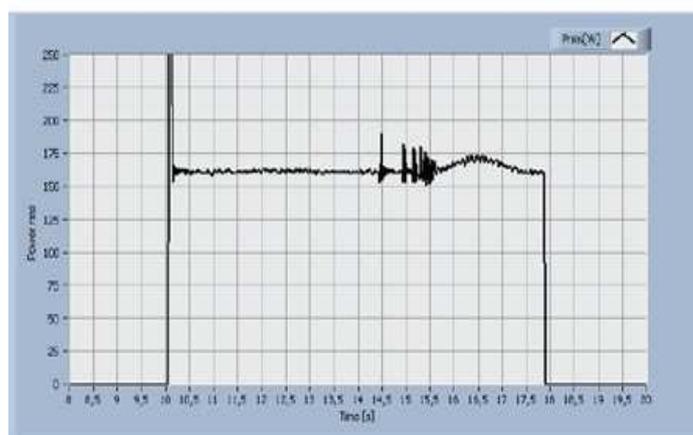
Los fallos en el accionamiento a motor del cambiador de tomas en carga pueden ser detectados midiendo o calculando el par desarrollado por el motor de accionamiento, ya que esta magnitud es muy sensible a los problemas mecánicos. La estimación o cálculo de este par a partir de la corriente consumida por el motor no es difícil, pero para ello se precisa conocer los parámetros del motor

(inductancias, constante de tiempo del rotor) y actualizar estos parámetros con la temperatura del mismo. Para obtener dichos parámetros habría que sacar el motor del armario del cambiador y someterlo a una serie de ensayos (vacío, cortocircuito), lo cual es muy engorroso. Por estas razones, en lugar de utilizar el par del motor, para el diagnóstico de faltas se utiliza el consumo de potencia.

Para calcular el consumo de potencia se registra la tensión y la corriente en dos fases del mismo mediante pinzas amperimétricas y sondas voltimétricas de efecto Hall. Debido a ello, este sistema se puede utilizar en transformadores en servicio sin necesidad de desconectar el transformador de la red en ningún momento. En la parte superior de la Figura 3.6 se muestra la corriente en una fase del motor durante el cambio de tomas. Variaciones en la potencia consumida (Figura 3.7) pueden ser indicativas de un rozamiento excesivo del eje o de un desgaste excesivo en alguno de los elementos del mecanismo de accionamiento.



**Figura 3.6. Corriente en una fase del motor de accionamiento del OLTC (parte superior) correspondiente a la señal vibración durante una transición entre dos tomas consecutivas (parte inferior).**



**Figura 3.7. Variaciones en la potencia consumida por el accionamiento a motor pueden ser indicativo de rozamiento excesivo del eje o desgaste en algunos elementos del accionamiento a motor**

### 3.2. Medida de Vibración

La medida de las vibraciones en cambiadores de tomas en carga es el método elegido en esta tesis doctoral para realizar el diagnóstico del estado del cambiador de tomas en carga; ello justifica realizar una exposición más detallada del estado del arte.

En la Figura 3.8 se muestra un registro de vibración obtenido durante la actuación del cambiador de tomas en carga. Como se expondrá en el capítulo 4, en dicho registro se observan una serie de impulsos de vibración que corresponden a la actuación de diferentes componentes del cambiador de tomas (motor de arranque, actuación de las cruces de malta, movimiento del selector, etc).

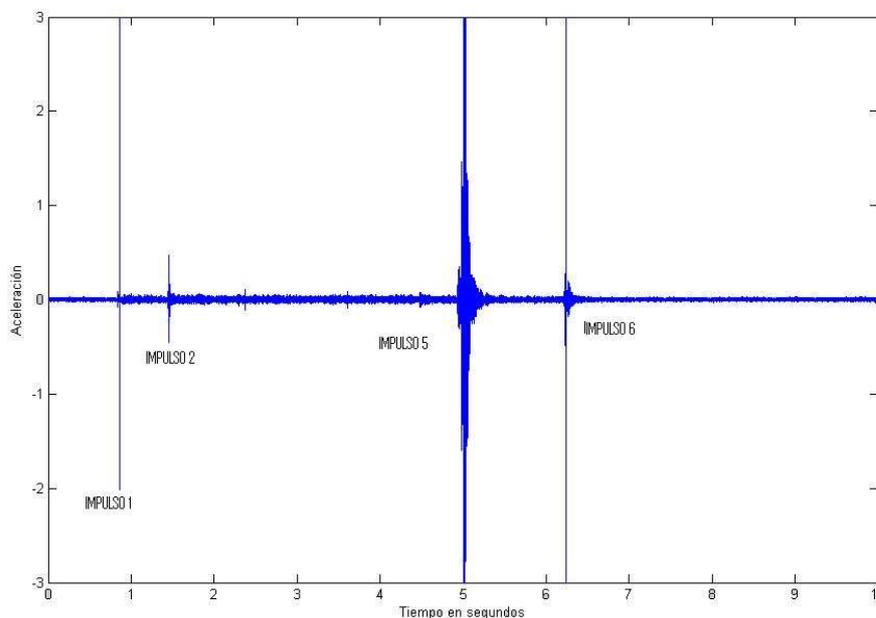


Figura 3.8. Registro de vibraciones durante la actuación del cambiador de tomas

En 1996 y 1998 T. Bengtsson [32],[37], describe un método de diagnóstico de cambiadores de tomas en carga basado en el patrón de vibraciones. El método está basado en la comparación de la envolvente de la señal de vibración. Bengtsson sugiere que un sistema de monitorización basado en el análisis de frecuencia podría aportar mayor información que uno basado en el análisis de la amplitud de vibraciones. Sin embargo, como un sistema de monitorización basado en la frecuencia requeriría un hardware mayor, se decanta por un análisis de amplitud. El sistema de Bengtsson está basado en que al envejecer los contactos un cambiador de tomas en carga los tiempos entre impulsos de vibraciones y la



amplitud de los mismos cambian. Los cambios serán abruptos o graduales según se trate de fallos catastróficos o procesos de envejecimiento. Dado que cuando se repite un cambio de tomas idéntico las señales de vibración son similares pero no idénticas, utiliza una señal de comparación que es la media de las envolventes de la señal de vibraciones de diez operaciones correctas. La variable de diagnóstico es la diferencia entre la señal registrada,  $S(t)$ , y la señal de comparación,  $R(t)$ , dividida entre la desviación estándar,  $D(t)$

$$T(t) = \frac{|S(t) - R(t)|}{D(t)} \quad (3.1)$$

Es posible especificar límites generales que sólo deben excederse de forma muy esporádica (probabilidad menor a  $3 \cdot 10^{-5}$ ) en transformadores que pertenezcan a una misma población estadística.

Esto permite valorar la degradación del cambiador de tomas en carga durante el período del tiempo entre dos pruebas. Es habitual en la industria realizar pruebas entre 1 y 3 años, pero la periodicidad concreta de la prueba depende de la frecuencia de las operaciones del transformador.

A raíz de estos trabajos previos, la técnica de la medida de vibraciones en cambiadores de tomas en carga está siendo utilizada por algunas compañías como ABB y Doble Company para evaluar el estado de los cambiadores de tomas en carga, sus modos de fallo y detectar posibles defectos.

En 1998 P. Kang [21], describe un sistema de monitorización en línea y diagnóstico de la condición de cambiadores de tomas en carga para transformadores de 33/11 kV de la compañía Queensland Electricity Transmisión. Los trabajos de P. Kang sobre cambiadores de tomas en carga se extienden desde 1998 a 2003, y en sucesivos artículos [34]-[36], expone diferentes variaciones y mejoras del método desarrollado, desde tratamientos con Wavelet [34], FFT y mapas autoorganizados SOM[16],[36]. Los trabajos de Kang se describirán más adelante al hablar de la aplicación de las redes neuronales artificiales al análisis de vibraciones en cambiadores de tomas en carga (apartado 3.2.2).

En el 2001 y posteriormente en el 2003, M. Foata [33],[38] presenta la experiencia de la compañía Hidro-Quebec en lo que respecta a detección de averías en cambiadores de tomas en carga a partir del análisis de vibraciones. El equipo utilizado se basa en el análisis de la envolvente de la señal de vibraciones.



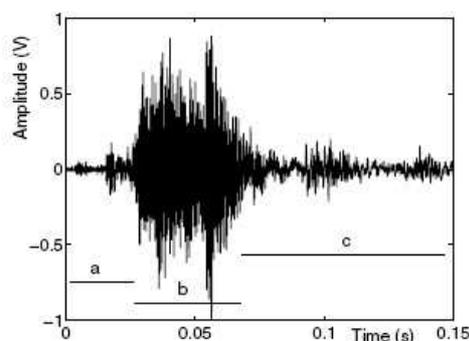
El método de diagnóstico consiste en la comparación de la onda registrada con una referencia. Esta referencia puede obtenerse de formas distintas: comparando señales de vibración con el transformador bajo condiciones de descarga (desenergizado) y bajo carga (energizado), comparando registros del transformador en vacío con registros del transformador en carga o comparando registros recientes con medidas previas. También cabe una combinación de los métodos indicados. Por lo que se refiere al diagnóstico del selector, se limita a detectar la aparición o desaparición de impulsos de vibración. El sistema de diagnóstico se completa con una medida de la corriente consumida por el motor de arrastre.

En 2005 Almeida et al. [40], presentan resultados experimentales al aplicar la transformada discreta de Wavelet para evaluar la condición de un cambiador de tomas en carga. Con base en los coeficientes de aproximación y detalle producto de la descomposición wavelet, definen un coeficiente de energía para cada nivel de resolución, como la relación de energía entre los coeficientes de aproximación y detalle de ese nivel.

El estado de los contactos del cambiador de tomas en carga es evaluado a partir de la tendencia de la grafica de los coeficientes de energía normalizados en función del nivel de descomposición wavelet, ya que en cambiadores de tomas en carga con contactos desgastados los coeficientes de detalle tienen una tendencia creciente al aumentar el nivel de descomposición, mientras que en cambiadores de tomas en carga con contactos en buen estado la tendencia es decreciente.

En 2005 Simas et al [41], exponen una técnica basada en algoritmos genéticos para clasificar vibraciones en conmutador de un cambiador de tomas. Dividen el proceso de conmutación en zonas (Figura 3.9). Modelan las vibraciones registradas en cada una de las zonas como una suma de funciones sinusoidales amortiguadas, cada una de las cuales es la solución a una ecuación diferencial de segundo orden que rige la vibración producida cuando dos cuerpos chocan. Observan que a partir de tres sumandos el algoritmo utilizado es demasiado lento y la precisión no aumenta mucho, por lo que finalmente se trata de obtener los parámetros que definen las tres funciones sinusoidales que sumadas se aproximan más a la vibración registrada. Para estimar las frecuencias naturales de cada una de las funciones sinusoidales analizan la densidad espectral de frecuencia, para

estimar la amplitud inicial, el coeficiente de amortiguación y los tiempos de inicio de cada una de las vibraciones individuales minimizan el error cuadrático medio entre la respuesta modelada y la señal registrada. Como el número de parámetros a hallar es muy elevado y la función objetivo es no lineal, recurren a técnicas genéticas. Llegan a la conclusión de que la zona **a** de la Figura 3.9 es la más adecuada para diagnosticar, y que la amplitud asociada a una de las frecuencias naturales es la más sensible al estado del conmutador. Las zonas **b** y **c** (Figura 3.9) proporcionan menos información acerca del estado de los contactos que la zona a. Por tanto, en sistemas industriales, sólo la zona a se utiliza para el diagnóstico.



**Figura 3.9. Señal de vibración del proceso de conmutación dividida en zonas**

En 2005 Wegelin et al.[43], proponen un procedimiento no invasivo mediante el análisis Prony de las vibraciones. El método Prony es una técnica paramétrica para ajustar una señal por sinusoides amortiguadas. Definen un índice de dispersión de energía (IDE) y un valor IDE de umbral de para estimar el estado de cada contacto de un OLTC. Su estudio concluye que los contactos desgastados presentan mayor dispersión y valores de IDE por debajo del umbral con respecto a los contactos nuevos

En 2006 Kerry Williams [44], describe como se puede interpretar e identificar problemas potenciales y los tipos de problemas que pueden ser detectados de los datos de vibración obtenidos del monitoreo en línea. Obtiene la transformada wavelet de la envolvente de la señal de vibración. La existencia de defecto en el conmutador es determinada a partir de los tiempos entre impulsos de vibración y de la aparición o desaparición de impulsos de vibración. La metodología parece estar basada más en el juicio de un experto humano que en un algoritmo automático de detección de fallos.

### 3.2.2. Estado del arte de las redes neuronales artificiales con base en el análisis de vibraciones. aplicadas a cambiadores de tomas en carga.

En este apartado se proporciona una panorámica de cómo han utilizado diferentes autores redes neuronales artificiales para la detección de averías en cambiadores de tomas en carga basadas en el análisis de vibraciones.

Kang et al, llevan a cabo un trabajo muy completo en vibraciones para detección de fallos en cambiadores de tomas en carga que se extiende desde 1998 hasta 2003. Dada la magnitud de su trabajo se hace una síntesis un poco más extensa del mismo.

En 1998 Kang et al [21], utiliza la transformada de Wavelet discreta aplicada a la envolvente de la señal; los coeficientes wavelet de detalle de las envolventes de la señal son posteriormente transformadas mediante FFT para obtener unos vectores de características. El error entre el vector de características de la señal de vibraciones patrón y cada nueva señal adquirida se denomina *normalised quantisation error* (NQE) y son las entradas al mapa auto-organizado.

En el 2000 Kang et al [5], aproxima la función de distribución de probabilidad del error mínimo de cuantización (Minimum Quantisation Error, MQE) a una distribución logarítmicamente normal (lognormal), de forma que:

$$pdf(MQE) = \frac{1}{\sigma \cdot MQE \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(\ln(MQE) - \mu_0)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3.2)$$

Donde  $\mu_0$  y  $\sigma$  representan la media y la desviación estándar respectivamente, de los valores del logaritmo natural del MQE usados durante el entrenamiento del mapa auto-organizado.

La distribución lognormal se caracteriza porque existe solo para valores positivos de la variable de estudio, es una función dependiente de dos parámetros y asocia a la media de los datos (también conocida como esperanza matemática), un valor superior a la mediana. Asimismo, la función logaritmo permite analizar con un detalle adecuado tanto la zona de pequeños valores de la variable en estudio como la zona de elevados valores de la variable bajo estudio. Gracias a estos atributos, la función de distribución lognormal de probabilidad es apropiada como modelo estadístico aplicable a la distribución del MQE.

Es de esperar que cuando sean presentadas al mapa señales correspondientes a grupos desconocidos, la media de la función de distribución de probabilidad del MQE varíe de  $\mu_0$  a un nuevo valor. Dado que las señales correspondientes a valores atípicos en las señales de vibración, o a condiciones de daño desconocidas, no están habitualmente disponibles, el resultado obtenido a partir de una condición de daño desconocida resulta ser impredecible.

El umbral de detección se determina seleccionando una tasa de falsas alarmas  $P_f$  obtenida a partir de la función de densidad de probabilidad de MQE:

$$P_f = \int_f^{+\infty} \frac{1}{\sigma \cdot MQE \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(\ln(MQE) - \mu_0)^2}{2\sigma^2}\right] d(MQE); \quad 0 \leq P_f \leq 1 \quad (3.3)$$

$P_f$  representa la probabilidad de que MQE sea mayor o igual a  $f$ . Dicha tasa indicará el porcentaje máximo admisible de falsas alarmas que pueden llegar a considerarse, con lo cual se atenúa el efecto que puedan llegar a producir valores atípicos en las señales de vibración, que podrían llevar a una clasificación errónea por parte del mapa auto-organizado. Un muy bajo umbral de detección estará relacionado con un alto porcentaje correspondiente a falsas alarmas, implicando que muchas de las señales conocidas, puedan llegar a ser consideradas como incorrectas; asimismo, si se decide por un porcentaje de falsas alarmas demasiado bajo, el sistema de clasificación será demasiado limitado y muchas de las señales incorrectas podrán ser confundidas como correctas. El daño ocurrido en un cambiador de tomas en carga puede ser tanto de carácter abrupto, como de carácter gradual, por lo que se definen dos umbrales de detección correspondientes a cada uno de estos escenarios.

**Umbral de detección de deterioro abrupto:** Se considera que un patrón correspondiente a una señal pertenece a una condición de daño asociada a un deterioro abrupto cuando el valor medio del MQE obtenido durante la clasificación,  $MQE_c$ , cumpla (3.4) en por los menos dos pruebas consecutivas, con el fin de poder descartar la influencia de algún valor atípico en la señal de vibración.

$$MQE_c \geq \beta_{abr} \quad (3.4)$$

El umbral de detección  $\beta_{abr}$  equivale a



$$\beta_{abr} = \exp(\mu_0) + \lambda\sigma \quad (3.5)$$

El factor  $\mu_0$  equivale nuevamente a la media del logaritmo natural del MQE del *SOM* entrenado cuando le fueron presentadas los patrones correspondientes a las categorías de daño. El factor  $\lambda$  de desviación se define como:

$$\lambda = (f - \mu_0)/\sigma \quad (3.6)$$

Siendo así proporcional a la desviación del MQE alrededor de la media, donde  $f$  depende de la tasa de alarma en falso  $P_f$ .

**Umbral de detección de deterioro gradual** Debido a que el deterioro de los contactos del cambiador de tomas en carga es un proceso en su mayoría gradual, un simple cambio en el valor medio del MQE puede no ser un exacto indicador de la condición del cambiador de tomas en carga en dicho momento, ya que como se ha comentado, las señales de vibración poseen un cierto grado de variabilidad dentro de los parámetros normales de operación del cambiador de tomas en carga. Con el propósito de detectar cuando el cambio del MQE se produce gradualmente, usualmente se emplea el procedimiento de suma acumulativa (*Cumulative Sum, CUSUM*), utilizado en estadística para medir las variaciones de una función creciente al superar un determinado umbral. Chang y Fricker [39], modifican este procedimiento y definen un indicador acumulado  $c(i)$ , donde  $i$  representa la prueba en la cual fueron obtenidas las señales de vibración, y  $\mu_{crit}$  es el valor crítico de la media del logaritmo de MQE para el cual se sigue considerando el funcionamiento del cambiador de tomas en carga como normal. El indicador  $c$  para la prueba  $i$  se define mediante (3.7)

$$c(i) = \max\{0, \ln(MQE(i)) - \mu_{crit} + c(i-1)\} \quad (3.7)$$

Este indicador  $c(i)$  se caracteriza por incrementarse de manera elevada para pequeños incrementos sucesivos del valor de  $\ln(MQE)$  por encima del valor crítico  $\mu_{crit}$ .

El umbral de detección de deterioro gradual  $\beta_{grd}$  será entonces equivalente al valor crítico del indicador acumulado  $c$  para el cual se considera que se permanece en zona normal de trabajo.



$$\beta_{grd} = c_{crit} \quad (3.8)$$

De esta forma, la alarma de posible deterioro gradual en el cambiador de tomas en carga se emite cuando:

$$MQE_c \geq \beta_{grd} \quad (3.9)$$

En 2001, Kang et al [35], introducen la señal de autocorrelación ( $R_{xx}$ ) de la envolvente, para diferentes valores del desfase temporal ( $\tau$ ). La función  $R_{xx}(\tau)$  es normalizada respecto de su valor máximo. Posteriormente, la función normalizada es sub-muestreada y es usada como variable de entrada a un mapa auto-organizado (SOM).

En 2002 y 2003 Kang et al [36],[16] implementan como datos de entrada a un mapa auto-organizado la envolvente alineada y normalizada y suavizada mediante wavelet de la señal de vibración de un cambiador de tomas en carga. Para la detección de fallos utiliza redes neuronales artificiales(SOM) alimentadas por el error normalizado cuantificación (MQE), definido como la diferencia entre el vector de auto-correlación (con diferentes desfases temporales) de cada nueva señal adquirida y el vector de auto-correlación de la señal patrón de vibraciones.

A demás de los trabajos mencionados, otro autor que recientemente utiliza redes neurales artificiales es Simas.

En el 2008 Simas et al [42], se aleja de su trabajo anterior [41], y utiliza mapas auto-organizados como un clasificador para identificar diferentes niveles de desgaste de los contactos eléctricos del cambiador de tomas en carga. Este clasificador fue capaz de separar los patrones disponibles en cuatro distintas condiciones de funcionamiento: post-mantenimiento (sin desgaste), desgaste bajo, desgaste intermedio y desgaste severo. En su trabajo utiliza los coeficientes de la descomposición wavelet como entradas al mapa auto-organizado.

## Capítulo 4

# ESTUDIO EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se expone el estudio experimental realizado sobre un cambiador de tomas en carga, fabricado por MR (Maschinenfabrik Reinhausen), ubicado en Laboratorio de Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid.

En primera instancia se realizaron ensayos sobre el cambiador en buen estado (al que se había realizado previamente un mantenimiento), posteriormente se realizaron las modificaciones pertinentes sobre el cambiador de tomas en carga, para simular siete tipos de averías.

Sobre los registros de vibración obtenidos del estudio experimental se aplicarán las técnicas de diagnóstico expuestas en el capítulo 6.

### 4.1. Cambiador de tomas utilizado

Para la realización del estudio experimental se ha utilizado un cambiador de tomas en carga cedido por Unión FENOSA Distribución. El cambiador de tomas en carga es un cambiador de tipo D I 1200 150/110 12 23 3 W<sup>4</sup> (Figura 4.1) que perteneció a un autotransformador monofásico que formaba parte de un banco de transformación 250.000/150.000±10x1517/17000 V, 80 MVA. El cambiador de tomas en carga utilizado presenta la particularidad que la barra que sustenta la toma número 5 está partida (Figura 4.2), de modo que no se dispone del contacto fijo número 5 del selector.

En funcionamiento habitual el selector se encuentra inmerso en la cuba del transformador, bañado de aceite, mientras que el conmutador se encuentra en un habitáculo bañado con su propio aceite. Durante los ensayos, el selector no se encontraba rodeado de aceite; al igual que el habitáculo del conmutador. Evidentemente, la existencia o no de aceite influye en la amplitud de las

---

<sup>4</sup> El significado de la referencia D I 1200 150/110 12 23 3 W es: Regulador de tipo D monofásico. Intensidad asignada 1200 A. Aislamiento a tierra 150KV. Selector con 12 contactos. 23 posiciones de regulación. 3 posiciones intermedias en la actuación del preselector. Preselector de tipo inversor (W)

vibraciones obtenidas, sin embargo no afecta a la frecuencia de éstas vibraciones por lo que el estudio experimental se considera válido.



Figura 4.1. Cambiador de tomas en carga utilizado en los ensayos



Figura 4.2. Detalle del selector, mostrando la barra rota de la toma número 5

#### 4.2. Sistema de medida

El sistema de medida utilizado para el registro de la señal de vibración del cambiador de tomas en carga, se ilustra en la Figura 4.3

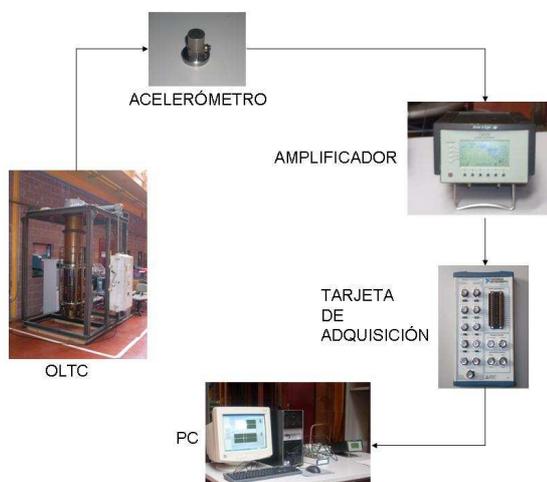


Figura 4.3. Sistema de medida



Las características de los elementos de hardware y software que conforman el sistema de medida se describen a continuación.

#### 4.2.2. Hardware

El hardware utilizado para la adquisición de datos de vibración incluye sensores de medición (acelerómetros piezoeléctricos), equipo de acondicionamiento de la señal (Amplificador y Acondicionador de señal) y una tarjeta de adquisición de datos; las características del hardware son:

- Acelerómetros piezoeléctricos de rango de sensibilidad  $1.02 \pm 0.02$  pC/ms<sup>2</sup>, con un rango de frecuencia nominal de 1 a 12 KHz.
- Amplificador y Acondicionador de Señal NEXUS, Marca Bruel&Kjaer de cuatro canales, cuya salida es en tensión y varía entre -3.16 a 3.16 V de pico.
- Tarjeta de adquisición de datos NI-DAQmx de National Instruments, 50KS/s, 12 bits, 16 (8) entradas analógicas en modo común, rango de entrada  $\pm 0,05V$  a  $\pm 10V$ .
- Accesorio de conexiones BNC-2110 de Nacional Instruments.

#### 4.2.3. Software

El software para el funcionamiento del sistema de adquisición de datos está integrado por:

- Filtrado de la señal (filtro paso bajo y filtro paso alto) mediante el software de filtrado incluido en el amplificador Nexus
- Sistema operativo Windows XP profesional
- Drivers de National Instruments para la tarjeta de adquisición de datos (NI\_daqmx versión 7.3.1).
- Aplicación de medida y almacenamiento de datos del cambiador de tomas en carga (CTC1.3) desarrollada en Labview 7.1. La frecuencia de muestreo es de 50 KHz. Los ficheros de datos generados están en formato .txt



- Aplicación de base de datos Access

### 4.3. Denominación de los registros de vibraciones

El selector tiene dos contactos móviles, el primero de los cuales conecta la toma en la que se encuentra trabajando el transformador con la salida<sup>5</sup>, mientras que el otro es el encargado de seleccionar la toma en la que se desea que el transformador funcione. En la literatura se dice que el primero de los mencionados contactos es el que lleva carga y el segundo es el contacto sin carga.

Al ser el funcionamiento del cambiador de tomas en carga diferente en función del cambio de toma realizado, también lo será la señal de vibración generada. Por lo tanto se han denotado los registros de vibraciones mediante un código de cuatro cifras.

- La primera cifra indica la “toma precedente” en la que se encontraba trabajando el transformador
- La segunda cifra indica la “toma inicial”, que es la toma en la que se encuentra trabajando el transformador antes de realizar el cambio de toma
- La tercera cifra indica la “toma final”, que es la toma en la que se encontrará trabajando el transformador una vez finalizado el proceso de cambio de toma.
- La cuarta cifra indica el número de repetición, ya que cada una de las señales de vibración ha sido grabada un gran número de veces.

En un proceso de cambio de toma el selector no siempre opera. Así, si los contactos móviles del selector se encuentran en las tomas 5 y 6 y se desea transferir la carga de nuevo a la toma número 5, el selector no debe actuar; este cambio de toma se denomina 5-6-5-1. A diferencia de lo anterior, si se desea transferir la carga a la toma número 7, es decir realizar un cambio ascendente 5-6-7-1, antes que el conmutador efectuó la transferencia de la carga, el contacto móvil sin carga del selector (que se encuentra en la toma número 5) debe moverse a la toma número 7.

---

<sup>5</sup> Habitualmente el neutro de la estrella, aunque al ser el cambiador de tomas en carga utilizado de un autotransformador, en este caso la regulación se realiza en el extremo de línea.

#### **4.4. Acelerómetros**

Se dispuso como sistema de fijación del acelerómetro un imán ubicado en la superficie de medida, dado que no es factible fijar los acelerómetros con tornillo o adherirlos con algún tipo de pegamento a la cuba del transformador (distorsiona la medida).

Para asegurar que las medidas tomadas son correctas, se debe realizar lo siguiente:

- Verificar las características del acelerómetro (calibrado previamente) realizando una serie de medidas.
- Verificar en cada adquisición que los acelerómetros no estén fuera de rango, para ello previamente configurar para cada canal del Nexus la ganancia y el valor del filtro a utilizar.

##### **4.4.1. Disposición de acelerómetros**

Durante las pruebas preliminares se probaron varios lugares para ubicar los acelerómetros. En las Figura 4.4, Figura 4.5 y Figura 4.6 se muestran tres, de las varias ubicaciones en las que se probó: tapa del regulador (Figura 4.4), debajo de las cruces de malta (Figura 4.5) y en una pletina interna del conmutador aledaña a las cruces de malta (Figura 4.6).



**Figura 4.4. Acelerómetro en la tapa del regulador**



Figura 4.5. Acelerómetro. debajo de las cruces de malta



Figura 4.6. Acelerómetro. en la pletina del conmutador aledaña a las cruces de malta.

Las señales de vibración obtenidas en las tres disposiciones al realizar el cambio de toma 2-1-2-1<sup>6</sup> se ilustran en las figuras 4.7, 4.8 y 4.9 respectivamente

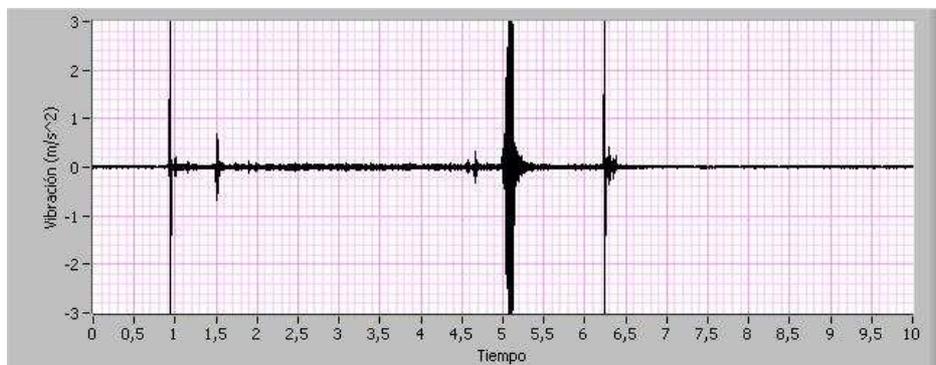


Figura 4.7. Pruebas para la ubicación del acelerómetro: Registro de vibraciones del acelerómetro conectado en la tapa del regulador

<sup>6</sup> En este caso no actúa el selector

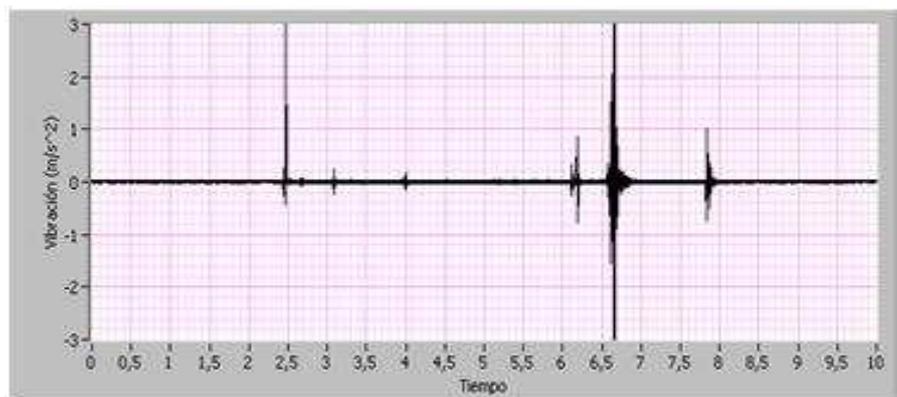


Figura 4.8. Pruebas para la ubicación del acelerómetro: Registro de vibraciones del acelerómetro conectado debajo de las cruces de malta.

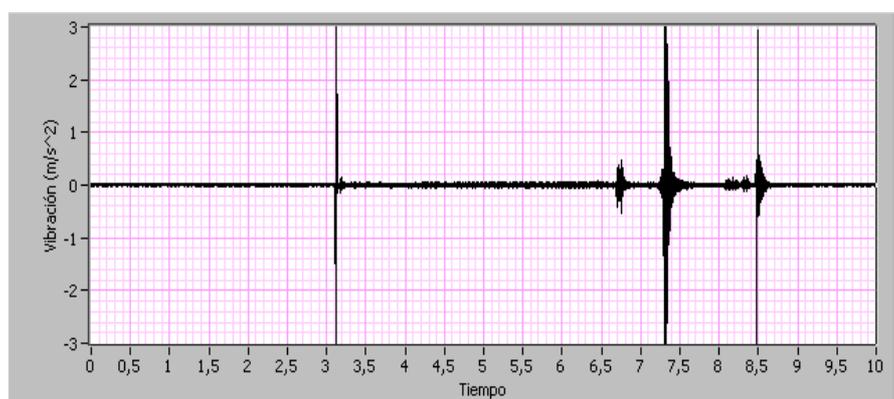


Figura 4.9. Pruebas para la ubicación del acelerómetro. Registro de vibraciones del acelerómetro conectado sobre una pletina interna del conmutador aledaña a las cruces de malta.

Un estudio de correlación de las señales de las figuras 4.7, 4.8 y 4.9 muestra que el índice de correlación entre ellas es de 0.978, por lo que es indiferente, desde este punto de vista el sitio donde se coloque el acelerómetro. Más sin embargo se decidió ubicar el acelerómetro en la tapa del regulador, dado que en transformadores encubados no es posible disponer el acelerómetro en el resto de las ubicaciones mencionadas.

#### 4.5. Análisis de la señal de vibración

Un análisis detallado de las vibraciones que se producen durante un cambio de toma ha sido realizado con el fin de comprender los diferentes impulsos que constituyen la señal de vibración del cambiador de tomas en carga, debido a que la señal de vibración es diferente según actúe o no el selector.

### 4.5.1. Proceso de cambio de toma con actuación del selector.

El proceso de cambio de toma es independiente, de si el cambiador de tomas en carga está equipado o no con preselector (inversor o gran escalón) y de la posición del mismo, por lo cual no se tendrá en cuenta para describir el proceso de cambio de toma.

En la Figura 4.10 se muestra una representación figurada del despiece del conjunto selector-conmutador, con sus mecanismos de actuación asociados.

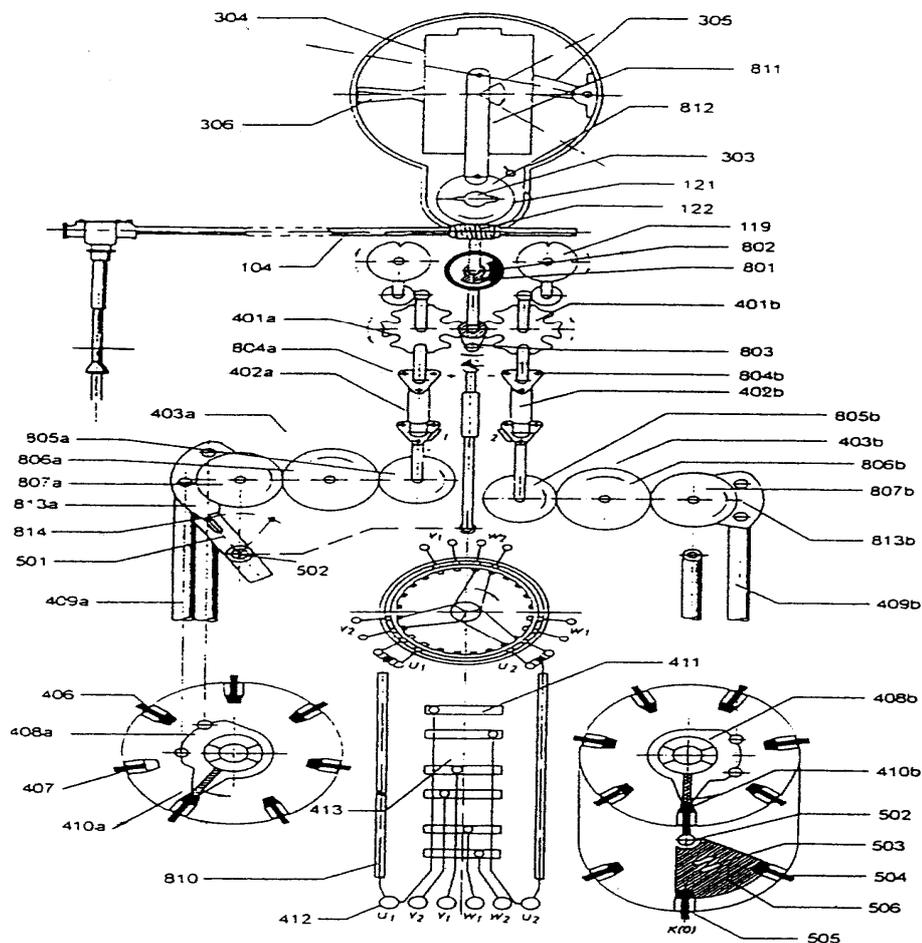


Figura 4.10. Disposición esquemática del conjunto selector-conmutador

Para una transición (cambio de toma) entre una toma inicial B y una toma final C, siendo la toma precedente la posición A, el proceso de transición es el siguiente:

El proceso se inicia al dar la orden de cambio de toma. El accionamiento a motor (AM) a través de los ejes de transmisión hace girar el tornillo sin fin (122



en la Figura 4.10) y este a la rueda helicoidal (121 en dicha figura). La actuación de la rueda helicoidal desencadena dos procesos simultáneos que desembocarán en la actuación del selector y en la actuación del conmutador. Para hacer referencia a cuál de estos dos elementos actúa, en los siguientes pasos se indica entre paréntesis S (para describir la secuencia de acontecimientos que desembocan en la actuación del selector) o C (para describir los acontecimientos de actuación del conmutador).

2(C). La rueda helicoidal, a través del acoplamiento (303), arrastra la biela, con lo que el acumulador de energía empieza a cargarse.

2(S). Simultáneamente, la rueda helicoidal arrastra el sistema de leva manivela (801 y 803), que produce el movimiento de la cruz de malta (401) correspondiente (existen dos cruces de malta, una para las posiciones pares del selector y otra para las posiciones impares), la cual a través del eje (402) hace girar los contactos móviles del selector que se encuentran en la toma precedente (toma A).

3(S). El contacto móvil del selector llega a la toma final (toma B). El mecanismo de actuación del selector ha finalizado su misión.

3(C). Mientras tanto, el mecanismo de resortes continúa aún cargándose.

4(C). Cuando el resorte se ha cargado, el mecanismo acumulador de energía se auto-libera (gracias a una leva que impacta contra una palanca liberadora, Figura 4.14) y la energía almacenada se transmite al conmutador, el cual transfiere la carga (intensidad) en **46 milisegundos**. Hasta el inicio de la conmutación se ha consumido prácticamente todo el tiempo del cambio de toma (**4,3 segundos**).

El accionamiento a motor para y finaliza la actuación del cambiador de tomas en carga.

Resta decir que la actuación del conmutador es de izquierda a derecha (sentido de giro horario en la Figura 4.18) en una transición de toma impar a toma par (por ejemplo 2-3-4) mientras que en una transición de toma par a toma impar (por ejemplo 1-2-3) es de derecha a izquierda (sentido de giro anti-horario en la Figura 4.18). Por lo que se refiere al selector, la actuación es de izquierda a derecha cuando se va a una toma superior (sentido de giro anti-horario, mirando el selector desde arriba), mientras que es de izquierda a derecha cuando se va a una toma inferior (sentido de giro horario).

#### 4.5.2. Análisis de la señal de vibración en un cambio de tomas con actuación del selector

La Figura 4.11 muestra el registro de vibración durante un cambio de tomas con actuación del selector. Como se observa, el proceso de cambio de toma dura **5,3 segundos**. En dicho registro de vibración se distinguen seis impulsos.

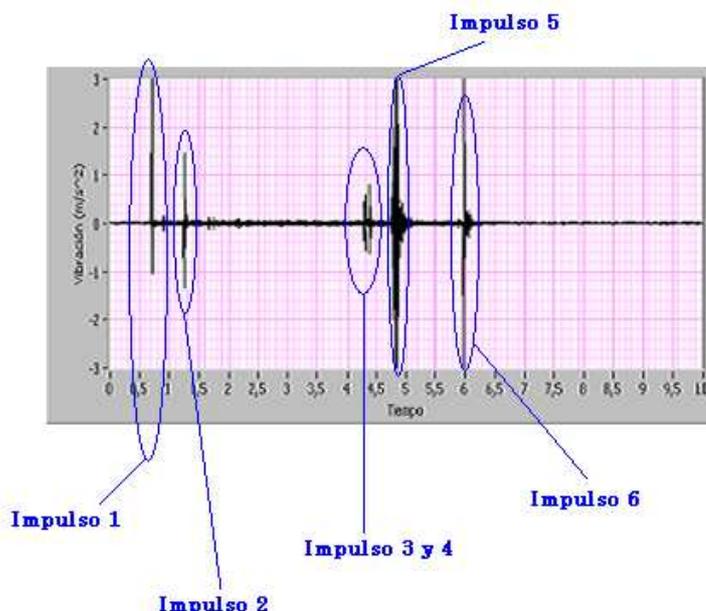


Figura 4.11. Registro de vibración durante un cambio de tomas con actuación del selector

- Impulso 1: arranque del accionamiento a motor (A.AM).
- Impulso 2: Actuación de las cruces de malta (CM), simultánea al inicio del movimiento de la toma precedente del selector (Figura 4.12a).
- Impulso 3: Los contactos del selector finalizan su recorrido (llegan a la toma final).
- Impulso 4: Finaliza el movimiento de la cruz de malta par o impar según sea el caso (Figura 4.12 b).
- Impulso 5: Grupo de impulsos correspondientes al proceso de conmutación
- Impulso 6: parada del accionamiento a motor (P.AM).



a) Inicio movimiento cruces de malta      b) fin de movimiento cruces de malta  
**Figura 4.12. Secuencia de operación de las cruces de malta (Tiempo de operación 3,33 segundos).**

El tiempo promedio de operación de las cruces de malta<sup>7</sup> (diferencia temporal entre los impulsos 2 y 4) es de **3,33 segundos**.

#### 4.5.3. Proceso de cambio de toma sin actuación del selector.

La Figura 4.13 muestra el registro de vibración durante un cambio de tomas sin actuación del selector (maniobra de cambio de toma ascendente a una descendente o viceversa). A diferencia del caso anterior, el proceso de cambio de toma dura **7,3 segundos**. En dicho registro de vibración se distinguen cinco impulsos cuya secuencia de acontecimientos es la siguiente:

1. Arranca el AM (impulso 1), con un sentido de giro inverso al de la maniobra anterior. Los ejes de accionamiento movidos por el AM hacen girar el tornillo sin fin y éste a la rueda helicoidal del cambiador de tomas en carga, girando en sentido inverso.

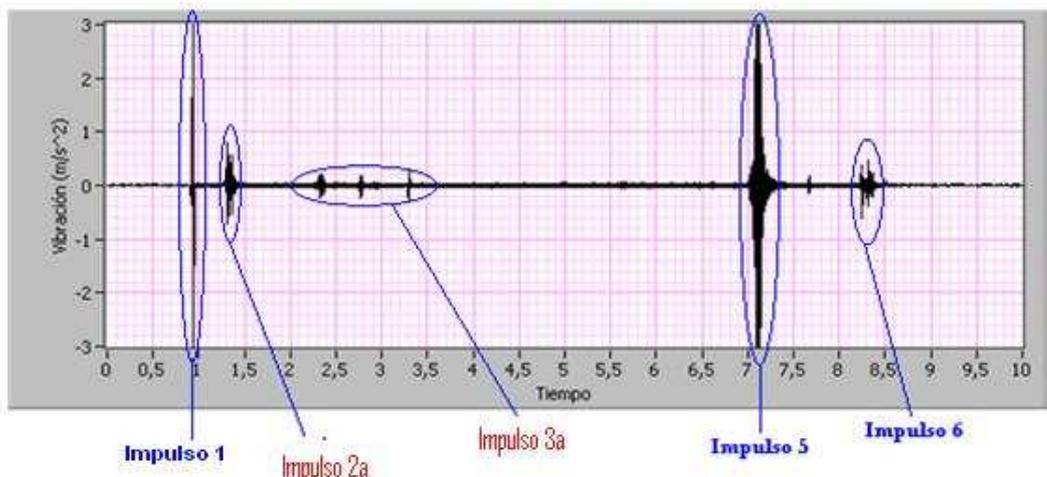
2. La leva del sistema leva-manivela (801 en la Figura 4.10) contiene un elemento con vaciado interior (engranaje en forma de herradura), el cual opera sólo cuando se invierte el sentido de giro, por lo que la leva deja de arrastrar la manivela durante media vuelta e impide que actúe el selector (impulso 2a). Por lo tanto los pasos 2(S) y 3(S) del apartado anterior son eliminados.

Por la interacción del tornillo sin fin (TSF) con el elemento de vaciado interior (EVI) que deja de arrastrar a la leva durante media vuelta hasta volver a posición original se produce el impulso 3a.

Los pasos 3(C), 4(C) referentes a la actuación del conmutador y la parada del AM son idénticos a los descritos cuando actúa el selector, razón por la cual independientemente

<sup>7</sup> Verificado a partir de fotogramas de un video grabado.

que actúe o no selector, siempre están presentes los impulsos 1, 5 y 6 de la señal de vibración.



**Figura 4.13. Señal de vibración sin actuación del selector**

En la Tabla 4.1 se presenta un resumen de los eventos que se producen en un cambiador de tomas en carga, cuando actúa y no actúa el selector

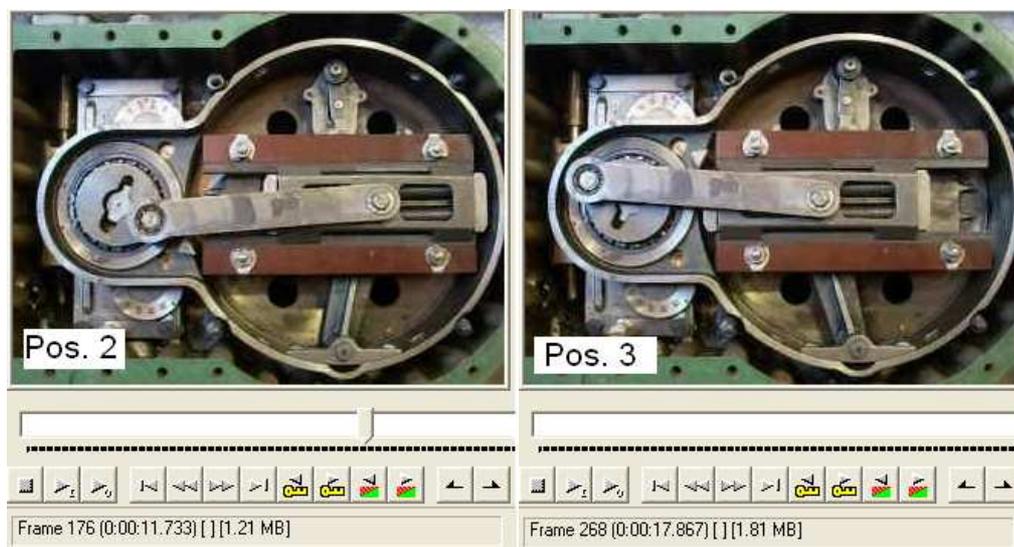
**Tabla 4.1. Eventos de un cambiador de tomas en carga (el símbolo  $\checkmark$  indica existencia del impulso, mientras que el símbolo  $x$  significa ausencia del impulso)**

	Actuación del selector $t_{\text{maniobra}} 5.3\text{seg}$	No actuación del selector $t_{\text{maniobra}} 7.3\text{seg}$
Impulso 1: A.AM	0.5s	0.5s
Inicio carga acumulador energía	$\checkmark$	$\checkmark$
Impulso 2: Inicio actuación CM	1.09s	x
Impulso 2a: operación del evi	x	$\checkmark$
Impulso 3: Actuación del selector	4.17s	x
Impulso 3a: Interacción tsf y evi	x	$\checkmark$
Impulso 4: finaliza actuación CM	4.55s	x
Impulso 5: Conmutación	100ms	100ms
Impulso 6: P.AM	5.58 s	7.8 s

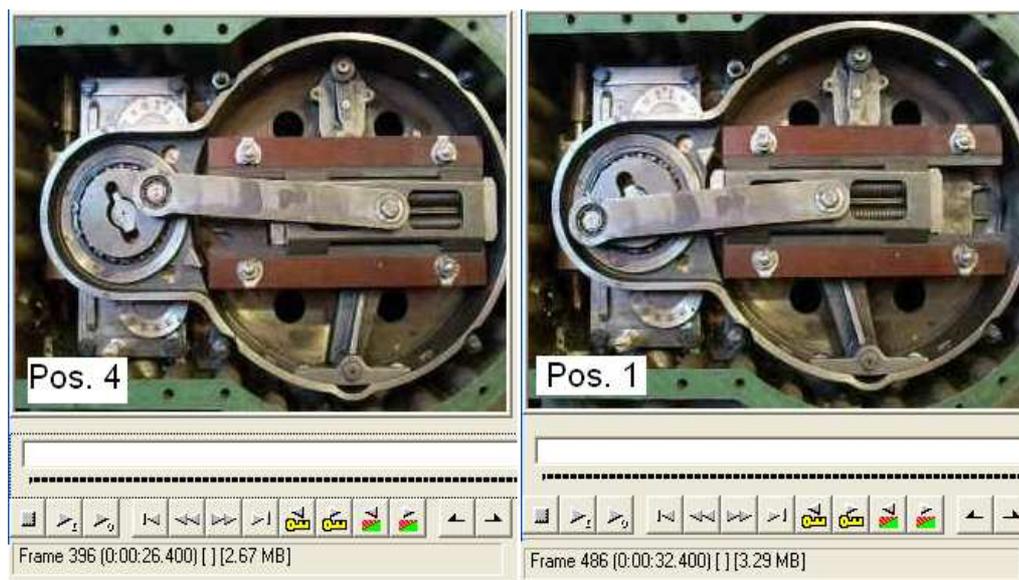
#### 4.5.4. Proceso de conmutación

El proceso de conmutación se encuentra sincronizado con la actuación (o no actuación, en su caso) del selector. En un cambio de toma ascendente o descendente, en el que actúe el selector, la biela del acumulador de energía gira  $180^\circ$  aproximadamente. En cambios de toma ascendentes la biela pasa de la posición 2 a la posición 3 de la Figura 4.14 y viceversa cuando se realiza un nuevo cambio de toma en el mismo sentido. Análogamente para cambios de toma descendente la biela pasará de la posición 4 a la posición 1 de la Figura 4.15 y

viceversa si se continúa cambiando de toma de forma descendente. El tiempo total de la maniobra desde el arranque hasta la parada del motor cuando se realizan cambios ascendentes (o descendentes) consecutivos es de **5,3 segundos**.



**Figura 4.14. Posiciones y giro de la biela para cambios ascendentes (Cambio 1\_2\_3)**



**Figura 4.15. Posiciones y giro de la biela para cambios descendentes (cambio3\_2\_1)**

Sin embargo, si se invierte el sentido de giro del cambiador de tomas en carga (paso de una maniobra ascendente a una descendente o viceversa) los ejes de accionamiento, el tornillo sin fin y la rueda helicoidal del cambiador de tomas en carga giran en sentido contrario; produciéndose un cambio en el sentido de giro de la biela. El conjunto biela-manivela del conmutador adapta su posición para iniciar su movimiento en sentido contrario. Para ello, gira más de 180°: si está en la posición 2 (Figura 4.14) pasa a la posición 4 (Figura 4.15) o si se encuentra en la posición 3 (Figura 4.14) pasa a la posición 1 (Figura 4.15). Ese incremento en



el recorrido del mecanismo hace que la maniobra se prolongue, 2 segundos más, haciendo que el tiempo de maniobras sea **7,3 segundos** aproximadamente. En el recorrido de inversión del sentido de giro la biela atraviesa dos ángulos de tiempos muerto (Figura 4.16) en los que el resorte acumulador de energía no sufre ninguna elongación. La primera región de tiempo muerto (los primeros 45°) es propia del posicionamiento de la biela para el cambio siguiente, pero los segundos 45° que recorre la biela tienen una explicación mecánica trascendental, ya que en ella se produce el siguiente fenómeno:

El segundo ángulo de 45° de tiempo muerto (vueltas en vacío del cambiador de tomas en carga) recorrido por la biela origina un retardo de tiempo de 2 segundos en la operación del cambiador de tomas en carga. Este tiempo muerto está relacionado con la simetría del ajuste del cambiador de tomas en carga y el mando a motor (AM). Para un correcto funcionamiento, es necesario que el cambiador de tomas en carga efectúe el cambio de una toma completo antes que el AM finalice la maniobra. Para conseguir este solapamiento en ambos sentidos, los AM disponen de un sistema que al invertir el sentido de giro del accionamiento, el eje de salida (eje de transmisión) efectúa varias revoluciones (vueltas en vacío; aproximadamente 5) sin que estas afecten su sistema de control (el sistema de control no se mueve). En funcionamiento normal (movimiento ascendente o descendente), las vueltas en vacío están promediadas en ambos sentidos del giro del cambiador de tomas en carga, de forma que del salto a la parada del AM existen 2 vueltas aproximadas en cada sentido.

Para calcular el tiempo muerto que permita determinar el ángulo que recorre la biela fue necesario acudir a fotogramas (Figura 4.14 y Figura 4.15) dado que la señal de vibración no permite visualizar y por ende medir la actuación de la biela con exactitud.

En un cambio de toma en el que no actúa el selector, el tiempo de operación de la biela es de **6,13 segundos** y recorre un ángulo de 180 grados. Cuando no actúa el selector, el tiempo de operación de la biela es **7,667 segundos**, recorriendo un ángulo de  $(180^\circ + \alpha)$ . Donde:  $\alpha = (180^\circ \cdot 7,667) / 6,13 - 180^\circ = 45^\circ$

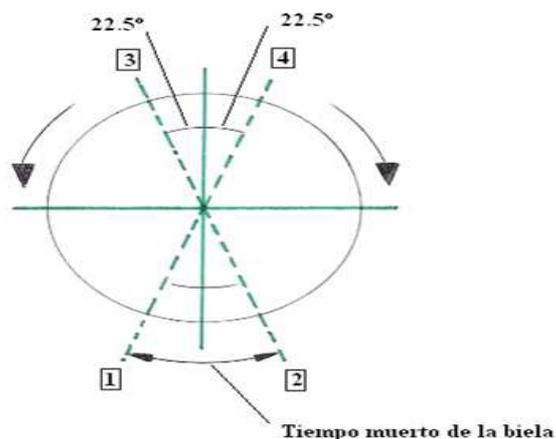


Figura 4.16. Detalle de actuación de la biela.

Al final de la media vuelta de la rueda helicoidal (121 en la Figura 4.17) correspondiente a un cambio de posición, una leva (304) solidaria al carro del acumulador incide sobre la palanca liberadora (306), la cual libera el resorte acumulador de energía y la manivela de accionamiento del conmutador (305) y se transfiere la carga del transformador (actúan los contactos del conmutador). A esto se le denomina proceso de conmutación (Figura 4.19 y Figura 4.20).

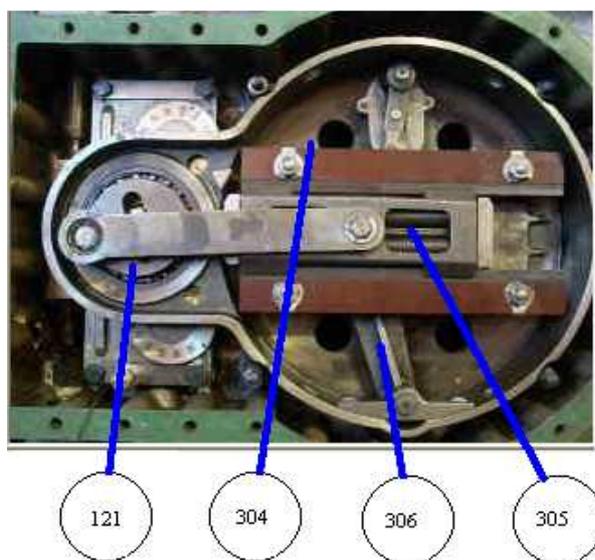


Figura 4.17. Cabeza insertable del conmutador

El conmutador (Figura 4.18) lleva acoplados tres sistemas de balancín flotantes (estrella de tres brazos), en cada uno de los cuales hay una excéntrica<sup>8</sup> de seis contactos móviles que conectan o no con seis contactos fijos (denominados en adelante a, b1, b2, c1, c2, d, Figura 4.19). El giro del árbol central arrastra los

<sup>8</sup> Los centros de giro de las palancas de los contactos están descentrados del árbol de accionamiento del conmutador.

sistemas de balancín y su movimiento hace que los contactos móviles, deslizándose por las correderas de los platos, se separen o se acerquen de los contactos fijos. Esto ocurre simultáneamente en los tres sectores del conmutador.

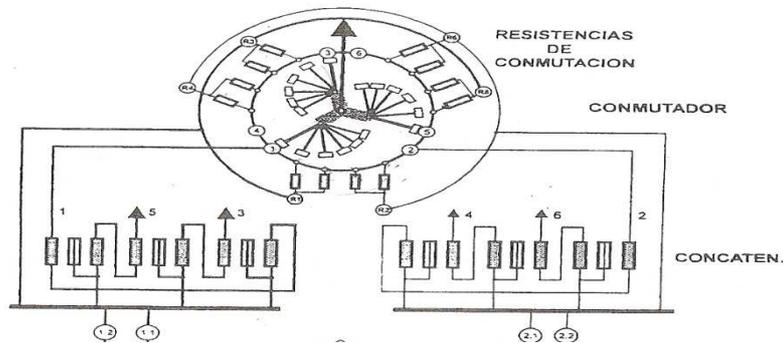


Figura 4.18. Esquema del conmutador

Los eventos que se suceden en la actuación del conmutador (Figura 4.19) se detallan a continuación:

1. Inicialmente, el primero de los contactos móviles toca el contacto fijo **a**. La carga pasa por el contacto **a**. El transformador se encuentra en la toma inicial.
2. Impulsado por la actuación del acumulador de energía, el árbol del conmutador inicia el giro y cierra el contacto **b1**, con el contacto **a** aún cerrado. La carga pasa a través de los contactos **a** y **b1**.
3. Se abre el contacto **a** y se cierra el contacto **b2**, la carga pasa ahora a través de R1 produciéndose la primera conmutación.
4. Se cierra el contacto **c1**, segunda conmutación a través de **R1** y **R2**
5. Se cierra **c2** y se abre **b1** y **b2**, la carga pasa a través de R2 tercera conmutación.
6. Se cierra el contacto **d**. La carga por **c2** y **d**
7. Se abre **c1** y **c2** y la carga pasa solo por el contacto **d**, terminando el proceso de conmutación y la maniobra de cambio de toma. El transformador queda conectado a la toma final.

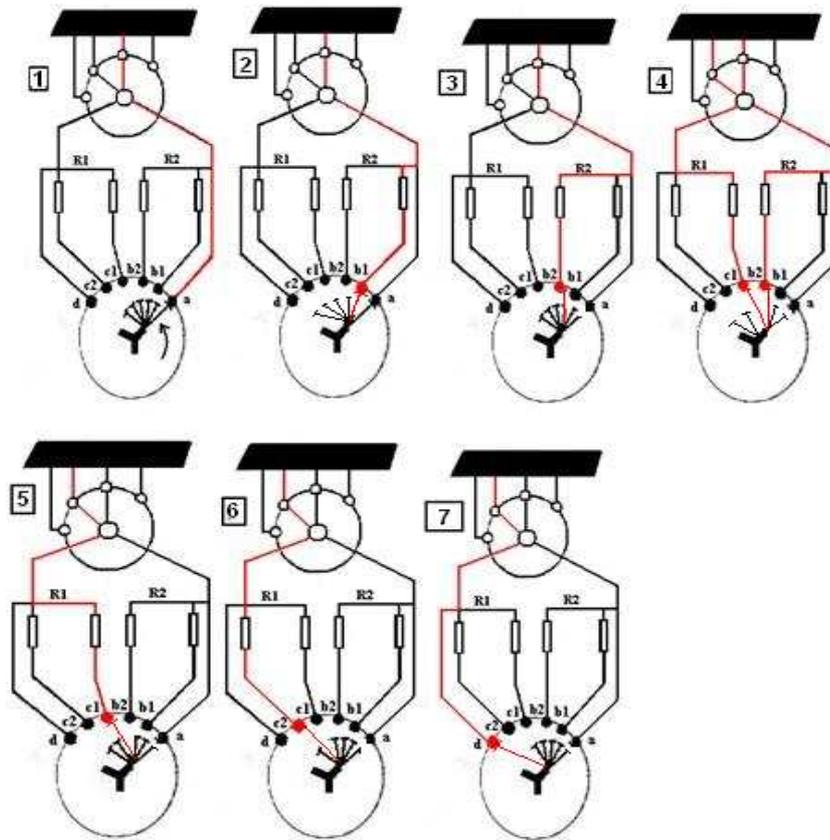


Figura 4.19. Eventos de actuación del conmutador visto monofásicamente

Estos eventos dan origen a una serie de impulsos de vibración (Figura 4.20). No es una tarea sencilla identificar el significado de cada uno estos impulsos, ya que el proceso dura apenas **100 ms**, y dentro de este intervalo se encuentra el proceso de actuación del conmutador propiamente dicho, que según el fabricante es de aproximadamente **40 ms**. Después de realizar varias mediciones con base en la señal de vibración y corroborado con fotogramas (Figura 4.21) se encontró que el tiempo promedio total de conmutación es de **94 ms**, mientras que la parte central del proceso de conmutación (tres impulsos principales de la Figura 4.20) el tiempo promedio es de **33 ms**.

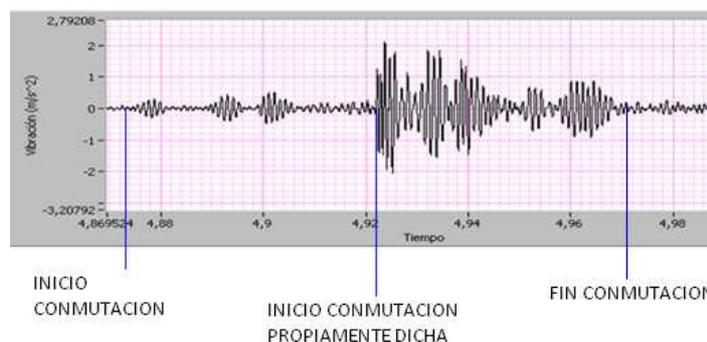


Figura 4.20. Detalle del proceso de Conmutación (Impulso 5)

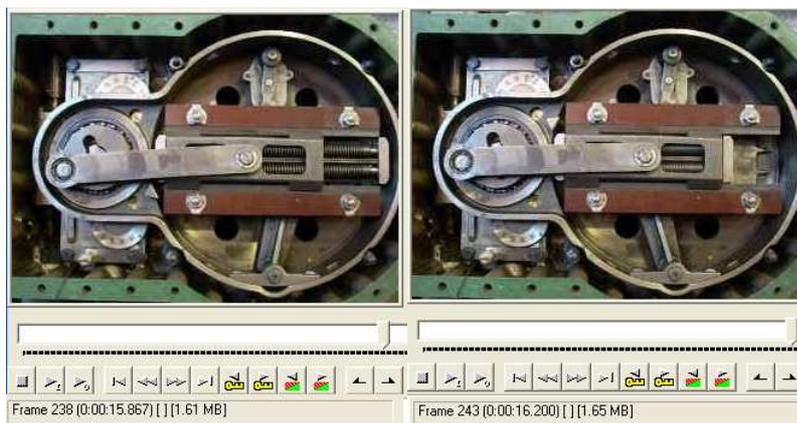


Figura 4.21. Proceso de conmutación (Tiempo de conmutación = 16.200 – 15.867 = 33 ms).

#### 4.6. Metodología de los ensayos

La vibración que tiene lugar cuando un cuerpo impacta sobre otro cuerpo es un fenómeno complejo que depende de múltiples factores. En un sistema complejo como es un cambiador de tomas en carga la señal de vibración al realizar un determinado cambio de tomas no es totalmente repetible al repetir el mismo cambio de tomas. Por ello se han realizado un gran número de cambios de toma y se ha recurrido a procedimientos estadísticos.

En primer lugar se han registrado treinta medidas de vibración en las mismas condiciones exactamente con actuación del selector (por ejemplo, en la transición 7-8-9). En segundo lugar se han registrado diez medidas de vibración en varias transiciones diferentes de la anterior (por ejemplo 1-2-3). Dado que la actuación del conmutador es de izquierda a derecha (sentido de giro horario en la Figura 4.18) en una transición de toma impar a toma par (por ejemplo 2-3-4) mientras que en una transición de toma par a toma impar (por ejemplo 1-2-3) es de derecha a izquierda (sentido de giro anti-horario en la Figura 4.18), se han registrado otras diez medidas de vibración (con actuación del selector) en varias transiciones de toma impar a toma par (por ejemplo 6-7-8). Idéntico procedimiento se ha seguido en cambios de toma sin actuación del selector.

#### 4.7. Simulación experimental de averías

Una vez realizadas las medidas de vibración con el cambiador de tomas en carga en buen estado, se han provocado (o simulado) una serie de averías en el mismo. Se ha centrado la atención en las averías en el selector por dos razones:

- No existen técnicas no invasivas de detección de fallos en el selector. La comprobación de si el selector tiene un fallo requiere el desencubado del mismo.
- El conmutador es un mecanismo mecánicamente muy complejo, y su manipulación para simular un fallo requiere desmontar el resorte almacenador de energía, la biela del acumulador de energía, la palanca liberadora, etc. Es aconsejable que este tipo de operaciones de mantenimiento sean realizadas por empresas especializadas, pero, dado el gran volumen de trabajo que tienen estas a lo largo del año es difícil conseguir la participación de las mismas.

#### **4.7.1. Simulación de averías en el selector: Las averías simuladas fueron:**

- Holgura en el anclaje de las barras del selector a la estructura (Figura 4.22).
- Contacto fijo del selector flojo (Figura 4.23).
- Muelles de los contactos móviles del selector sin la tensión adecuada (Figura 4.24).
- Barra de anclaje del selector partida (Figura 4.25).
- Contacto fijo del selector desgastado (Figura 4.26).
- Contacto del selector erosionado debido a la acción del arco eléctrico (Figura 4.27).



**Figura 4.22. Holgura en el anclaje de las barras del selector a la estructura**



**Figura 4.23. Contacto fijo flojo del selector.**



**Figura 4.24. Muelles de los contactos móviles del selector sin la tensión adecuada**



**Figura 4.25. Barra de anclaje del selector partida**



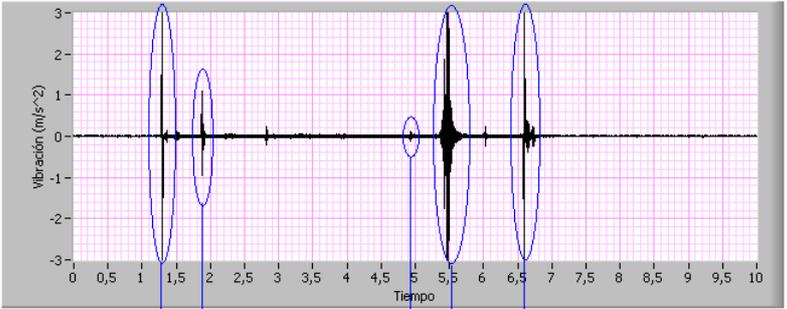
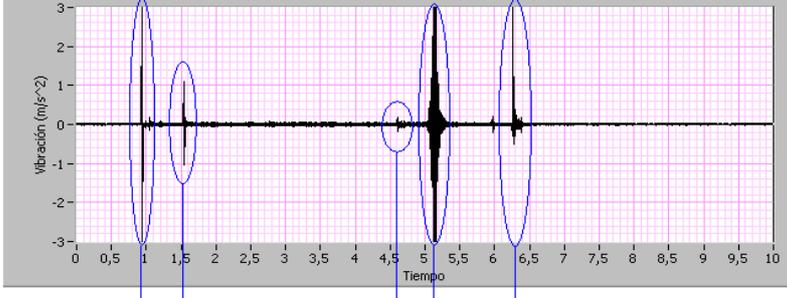
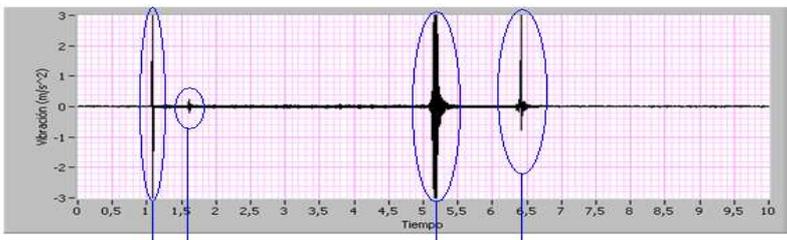
**Figura 4.26. Contactos fijos del selector desgastados**

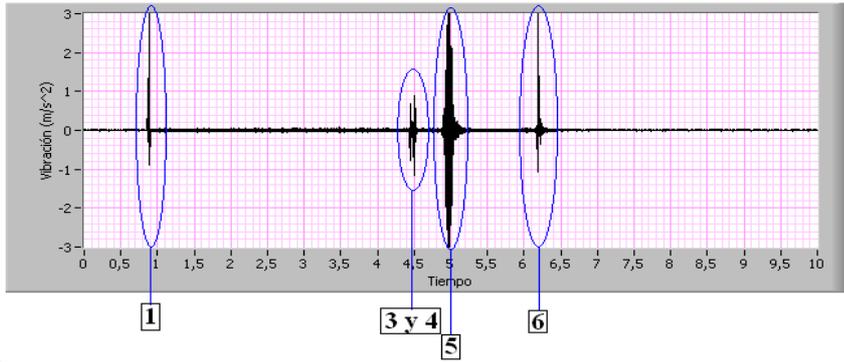
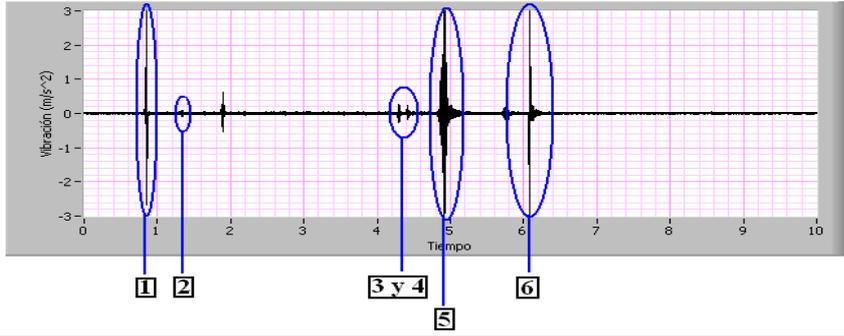
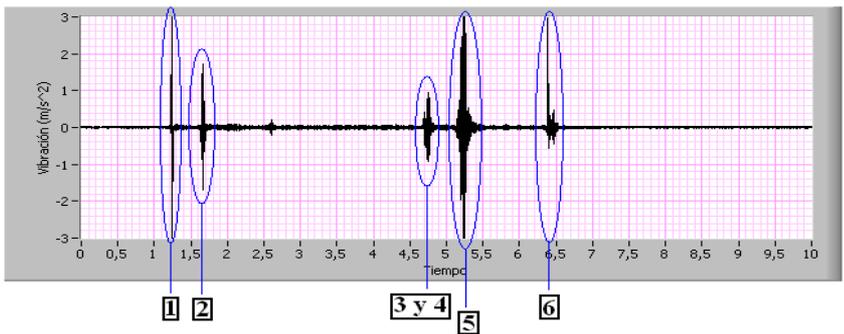


**Figura 4.27. Contactos del selector erosionados debido a la acción del arco eléctrico**

En la Tabla 4.2 se muestra la repercusión de cada una de las averías del selector en el patrón de vibraciones del cambiador de tomas en carga. Evidentemente, para la detección de fallos en el selector es preciso analizar procesos de cambio de toma en los que actúe el selector (apartado 4.5.2).

Tabla 4.2. Repercusión de cada una de las averías del selector simuladas en el patrón de vibraciones.

AVERÍA	SEÑAL DE VIBRACIÓN
<p>Holgura en el anclaje de las barras del selector a la estructura</p>	 <p>The graph shows acceleration (m/s<sup>2</sup>) vs. time (s). Peaks are circled in blue and labeled 1, 2, 3, 5, and 6. Peak 1 is at ~1.1s, peak 2 at ~1.8s, peak 3 at ~5.1s, peak 5 at ~5.5s, and peak 6 at ~6.5s.</p>
<p>Contactos fijos del selector flojos.</p>	 <p>The graph shows acceleration (m/s<sup>2</sup>) vs. time (s). Peaks are circled in blue and labeled 1, 2, 3, 5, and 6. Peak 1 is at ~1.1s, peak 2 at ~2.1s, peak 3 at ~5.1s, peak 5 at ~5.5s, and peak 6 at ~7.1s.</p>
<p>Muelles de los contactos móviles sin la tensión adecuada</p>	 <p>The graph shows acceleration (m/s<sup>2</sup>) vs. time (s). Peaks are circled in blue and labeled 1, 2, 3, 5, and 6. Peak 1 is at ~1.1s, peak 2 at ~1.8s, peak 3 at ~5.1s, peak 5 at ~5.5s, and peak 6 at ~6.5s.</p>
<p>Barra de anclaje selector partida (contactos fijos de llegada inexistentes)</p>	 <p>The graph shows acceleration (m/s<sup>2</sup>) vs. time (s). Peaks are circled in blue and labeled 1, 2, 5, and 6. Peak 1 is at ~1.1s, peak 2 at ~1.8s, peak 5 at ~5.5s, and peak 6 at ~6.5s. There is a significant gap in activity between 3s and 5s.</p>

AVERÍA	SEÑAL DE VIBRACIÓN
<p>Barra de anclaje selector partida (contactos fijos de partida inexistentes)</p>	
<p>Contactos fijos de llegada del selector desgastados.</p>	
<p>Contactos fijos de llegada del selector erosionados</p>	

#### 4.7.2. Simulación de averías en conmutador

Dada la complejidad del mecanismo del conmutador y las pequeñas holguras que se toleran, para manipular el conmutador es muy recomendable que lo haga personal especializado<sup>9</sup>.

#### 4.7.3. Otras averías simuladas

Se simularon las siguientes averías

- Carro de accionamiento amortiguado (Figura 4.28 y 4.29).

<sup>9</sup> Recuérdese en este sentido que una de las principales causas de fallo de un cambiador de tomas en carga es un incorrecto montaje después de una operación de mantenimiento



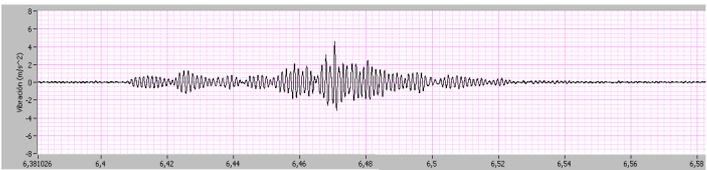
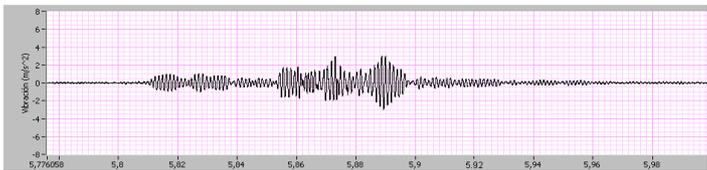
Figura 4.28. Amortiguación al final del recorrido del carro superior.



Figura 4.29. Amortiguación en la leva y en el sistema de enclavamiento.

En la Tabla 4.3 se muestra la repercusión de estas averías en el patrón de vibraciones del cambiador de tomas en carga.

Tabla 4.3. Repercusión de las averías del mecanismo acumulador de energía en el patrón de vibraciones del cambiador de tomas en carga.

AVERIA	SEÑAL DE VIBRACIÓN
<p>Amortiguamiento en el recorrido del carro superior del la cabeza insertable del cambiador de tomas en carga.</p>	
<p>Amortiguamiento en la leva de arrastre carro superior y del sistema del enclavamiento.</p>	



## Capítulo 5

# MODELADO Y SIMULACION

El desarrollo y maduración de la técnica de diagnóstico mediante el análisis de vibraciones está limitada por la disponibilidad de datos de los patrones de averías que cubran la gama completa de las condiciones de defecto del sistema. Los datos para sistemas en buen estado son relativamente fáciles de conseguir, pero los datos de averías son mucho más difíciles de obtener. Por esta razón se han provocado experimentalmente averías de cambiadores de tomas en carga (Capítulo 4) en el laboratorio de la Universidad Carlos III de Madrid.

Implementar averías experimentales en el laboratorio consume gran cantidad de tiempo, es costosa y no siempre representa la operación real del cambiador de tomas en carga. En este sentido, es de gran interés el desarrollo de modelos de simulación del patrón de vibración como herramienta predictiva de las vibraciones del cambiador de tomas en carga (en buen estado y con diferentes tipos de averías) y así suplir o complementar los datos físicos de las pruebas de campo. Con este fin se ha modelado el selector del cambiador de tomas en carga en SolidWorks™, el cual es un programa de diseño asistido por computador (Computer Aided Design(CAD)) para modelado mecánico.

Una vez modelado el selector, se ha realizado una simulación del comportamiento del mismo tanto en buen estado como con averías mediante el programa de elementos finitos ALGOR. También se han desarrollado prototipos de simulación del conmutador del cambiador de tomas en carga, pero dada la complejidad de este elemento por su gran número de partes móviles, hace necesario realizar un gran número de simplificaciones debido a las limitaciones en cuanto al equipo informático utilizado. De este modo, con las simplificaciones que se admitieron, los tiempos de simulación superaban los cuatro

días, y aún así los resultados no eran suficientemente satisfactorios. Por esa razón sólo se ha realizado un modelado y simulación del selector.

### 5.1. Modelado

La herramienta de modelado SolidWorks™ utiliza la tecnología de software aplicada al diseño de geometrías, permitiendo exportar los elementos o conjuntos modelados a programas de análisis de métodos numéricos.

Teniendo en cuenta que el problema a estudiar carece de simetría axial, el modelo desarrollado fue un modelo tridimensional, esto condicionó el detalle del modelo a desarrollar.

En el modelado del selector del cambiador de tomas en carga se llevó a cabo mediante la siguiente metodología:

- Toma de fotografías y de medidas del conjunto y detalle de cada una de las piezas constitutivas del selector. (Figura 5.1). Piezas menores como tornillos, tuercas, arandelas, etc. no fueron tenidas en cuenta por no influir en el proceso de simulación.
- Selección previa de los subconjuntos constitutivos más importantes a modelar, tales como la columna central, los contactos fijos y los contactos móviles; los cuales posteriormente fueron ensamblados en un solo conjunto (Figura 5.2 y 5.3).

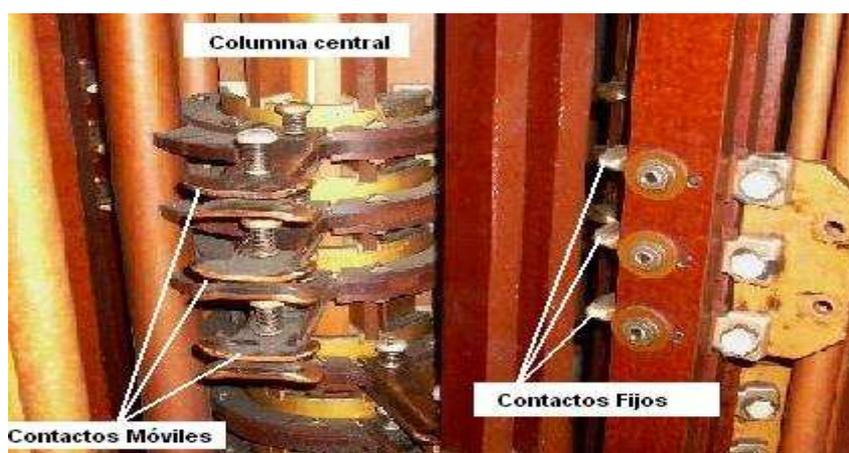
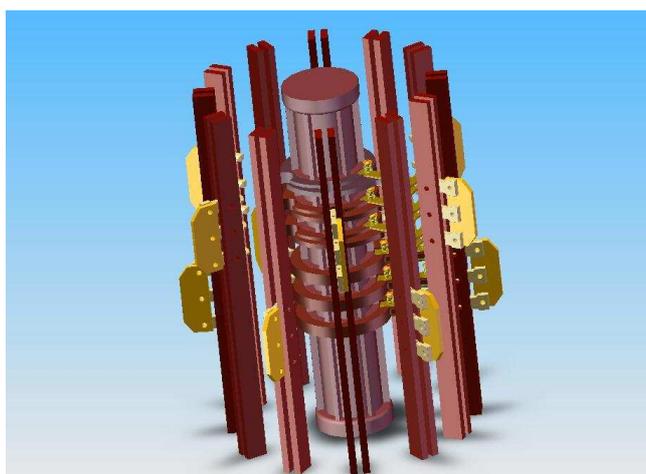


Figura 5.1. Detalle del selector del cambiador de tomas en carga

En la Tabla 5.1 se resume el número de piezas de cada subconjunto y el número de piezas del ensamblaje total:

**Tabla 5.1. Número de piezas modeladas del puente de contactos del selector**

<b>Subconjunto</b>	<b>Pieza</b>	<b>Unidades</b>
<b>Columna Central</b>	Columna Central	1
<b>Contactos Móviles</b>	Puente de Contactos	6
	Contactos Móviles	12
	Pasador	12
	Eje de Presión	12
	Tapa de Presión	12
	Muelle	12
	<b>Contacto Fijo</b>	Pletina de Unión de Contactos Fijos
Barra Aislante Portacontactos		24
Contacto Fijo		36
<b>Número Total de Piezas</b>		<b>139</b>



**Figura 5.2. Selector**

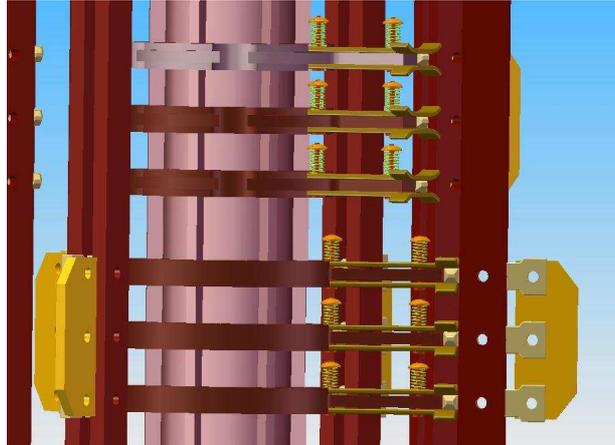


Figura 5.3. Detalle del modelado de los contactos móviles

## 5.2. Elementos finitos

El método de elementos finitos (FEM en inglés), es un método numérico para la solución de problemas de ingeniería. En este método el cuerpo del problema se discretiza (divide en forma equivalente) en un número finito de elementos interconectados por medio de puntos comunes o nodos. La solución del problema complejo sigue las reglas de los problemas discretos. Las incógnitas dejan de ser funciones matemáticas continuas y pasan a ser el valor de éstas en los nodos. El problema se soluciona resolviendo una serie de ecuaciones algebraicas simultáneas y obteniendo el resultado de un todo conformado por cada resultado arrojado por los elementos finitos. El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del valor de las variables en los nodos mediante las adecuadas funciones de interpolación o funciones de forma.

## 5.3. Simulación en ALGOR™

La simulación fue implementada en el software desarrollado por la compañía Algor Corporation, la cual introdujo el análisis de elementos finitos (FEA) en 1984, la interfaz para programas CAD en 1985, en 1997 el módulo de simulación de eventos mecánicos, el cual combina fenómenos cinemáticas, cuerpos rígidos, cuerpos flexibles y análisis de esfuerzos no lineales [45].

Algor™ se divide en aplicaciones interconectadas e independientes entre sí que permiten realizar las simulaciones de un modelo mediante tres etapas:

- Pre-procesamiento, se realiza mediante el módulo FEMPRO
- Procesamiento, se realiza mediante el módulo ALGOR MES (Mechanical Event Simulation)
- Post-procesamiento, se realiza mediante el módulo ALGOR FEMPRO SUPERVIEW

### **5.3.1. Pre-procesado del modelo de selector**

En la aplicación FEMPRO se realizan las siguientes etapas:

- Definición de la geometría objeto de estudio.
- Asignación de las propiedades físicas de los materiales.
- Asignación de las condiciones de contorno
- Aplicación de las cargas.
- Mallado de la geometría.
- Resolución del problema y análisis de la solución.

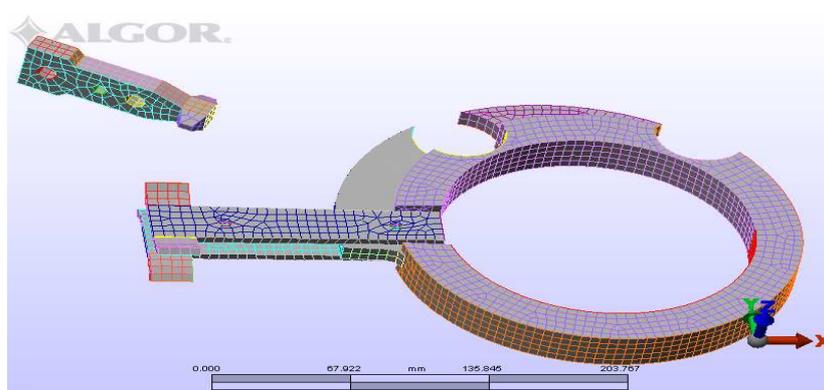
#### **5.3.1.1. Definición de la geometría objeto del estudio**

El modelo original en SolidWorks™ (Figura 5.2) es muy complejo por su geometría y su elevado número de piezas, por lo que es imposible simularlo en ALGOR™ con el software y el hardware disponible.

Se paso 139 a 4 piezas (Figura 5.4) centrándose en los contactos fijos y móviles (dos piezas) y el puente de contactos. La simplificación de la geometría se baso a los siguientes criterios:

- Suprimir las piezas que no inciden de manera directa en la señal de vibración al efectuar un cambio de toma. Centrando la atención en los contactos fijos y los contactos móviles.
- Tamaño de los elementos: Algunos de los elementos que conforman los mecanismos de presión (eje, tapa de presión, pasador y muelles) son muy

pequeños en relación al conjunto modelado; lo que ocasiona que no se pueda realizar un mallado óptimo para el modelo, ya que para que las piezas más pequeñas presenten un número suficiente de nodos, las piezas de mayor tamaño debería tener un número tan elevado de nodos que demoraría las simulaciones en exceso o podría hacer que la matriz del problema fuera próxima a la singular. Por ello los mecanismos de presión son sustituidos por una fuerza  $F$ , de valor 120 N, aplicada en los mismos puntos, dirección y sentido (Apéndice I).



**Figura 5.4. Piezas del modelo simulado en ALGOR™**

### **5.3.1.2. Asignación de las propiedades físicas de los materiales**

ALGOR™ incorpora una biblioteca con todo tipo de materiales, además posibilita seleccionar propiedades de materiales no incluidos en dicha biblioteca.

Para los contactos móviles y fijos el material seleccionado es el CeramTec Grade 950 Toughened Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ ) y para el puente de contactos acero AISI 1010, un acero muy común para piezas con sollicitaciones durante su vida útil, ya que son materiales típicos para las utilizaciones indicadas.

### **5.3.1.3. Asignación de las condiciones de contorno**

Las condiciones de contorno aplicadas a las piezas estudiadas en ALGOR™ son las mismas que las que presentan dichas piezas en el modelo real:

- El contacto fijo (Figura 5.5) está empotrado en 2 agujeros, de forma semejante a como en selector real está remachado a las barras aislantes.

- El puente de contactos (Figura 5.6) sólo puede rotar sobre su eje, igual que sucede en la realidad que sólo rota sobre el eje de la columna central.

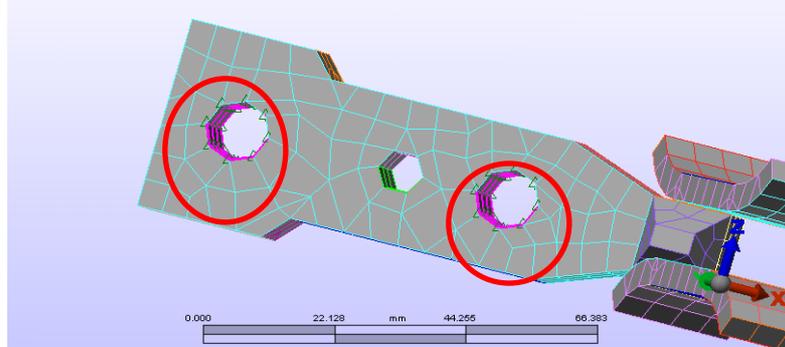


Figura 5.5. Condiciones de contorno del contacto fijo: Empotramiento

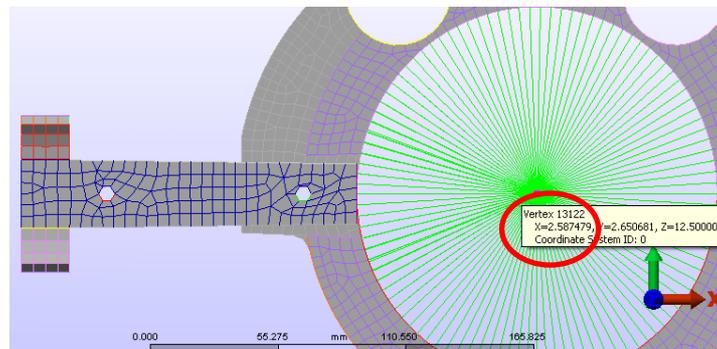


Figura 5.6. Condiciones de contorno del puente de contactos: rotación solo en Z

#### 5.3.1.4. Aplicación de las cargas

Las cargas aplicadas sobre el modelo son las fuerzas  $F$  de valor 120 Newton, que simulan los mecanismos de presión (muelles) que actúan sobre los contactos móviles (Figura 5.7).

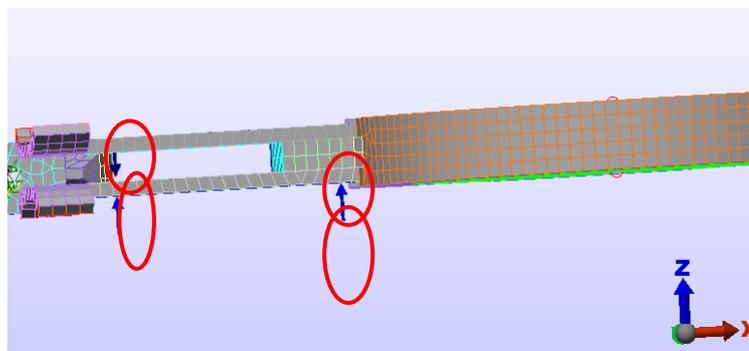
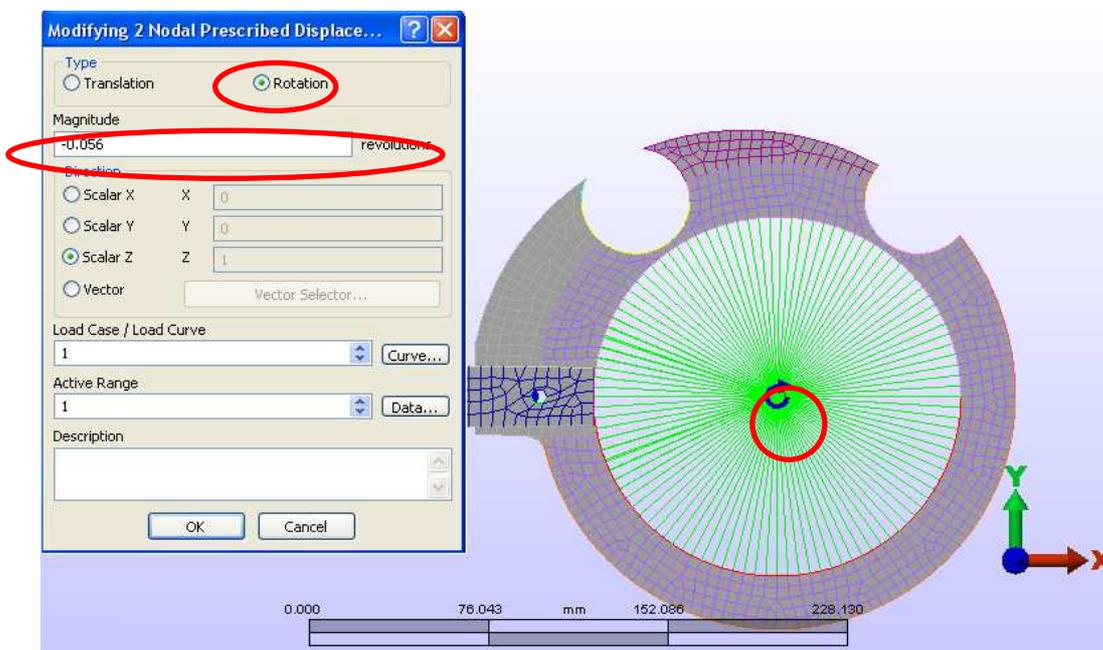


Figura 5.7. Fuerzas  $F$  aplicadas sobre los nodos del modelo

**5.3.1.5. Movimientos y desplazamientos:**

Se analizó el impacto de los contactos móviles sobre el contacto fijo mediante la simulación del giro del puente de contactos de dos formas diferentes:

- Introduciendo una velocidad de rotación constante (Figura 5.8): Se aplicó al eje de rotación del puente de contactos una velocidad de rotación de valor constante (0.056 rpm), de manera que los contactos móviles impacten en el contacto fijo en un tiempo alrededor de 3 segundos, al final del movimiento del selector. El cálculo de la velocidad de rotación se muestra en el apéndice II.
- Aplicando solo una velocidad inicial de rotación (Figura 5.9): Se aplica exclusivamente una velocidad de rotación (en eje Z) al puente de contactos que arrastra los contactos móviles. Esta velocidad es calculada de forma que, tomando como centro de rotación el eje de la columna central, los contactos móviles impacten contra el contacto fijo en un tiempo alrededor de 3 segundos, al final del movimiento del selector. Este análisis fue descartado, dado que no se lograba que el contacto móvil impactara sobre el contacto fijo.



**Figura 5.8. Introducción de parámetros de un momento de rotación en ALGOR™**

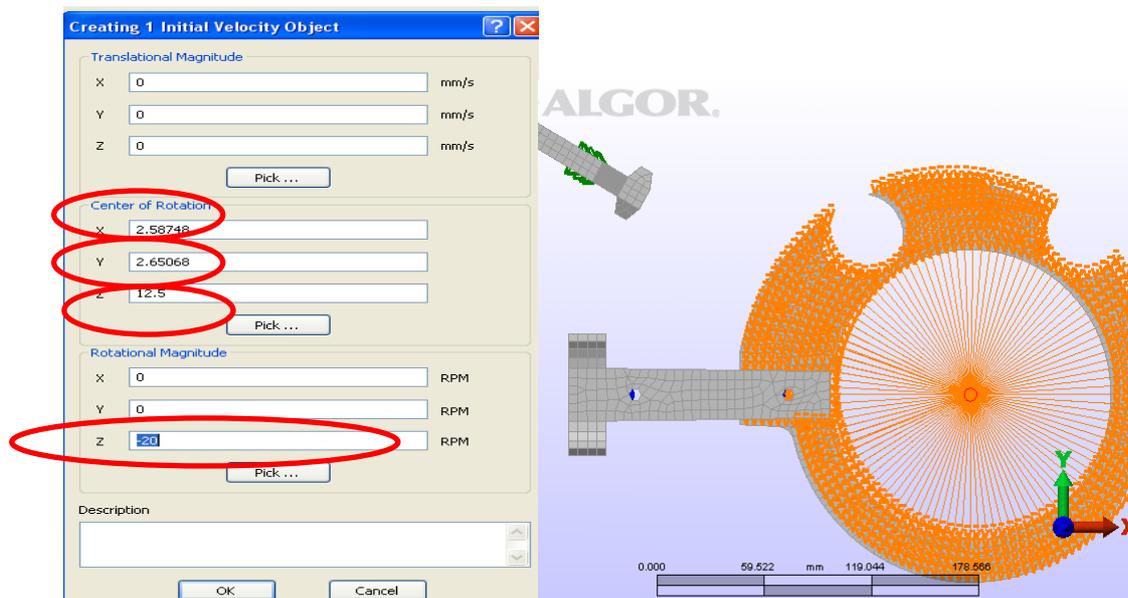


Figura 5.9. Parámetros de velocidad inicial

### 5.3.1.6. Mallado de la geometría

El mallado del modelo es una de las etapas más importantes del proceso de análisis en ALGOR™ ya que la precisión del análisis depende en gran medida del número de nodos que tenga la malla. Una malla muy fina, con un gran número de nodos, proporciona un análisis más preciso pero requerirá un hardware muy potente y los tiempos de procesamiento de datos serán muy elevados.

Para el análisis del selector se han hecho varias pruebas para obtener una relación óptima entre el tamaño de la malla, la capacidad del hardware y el tiempo de procesamiento de datos. Se ha elegido un tamaño medio de malla: 90% y se obtuvo un tiempo de procesamiento en torno a 40 horas.

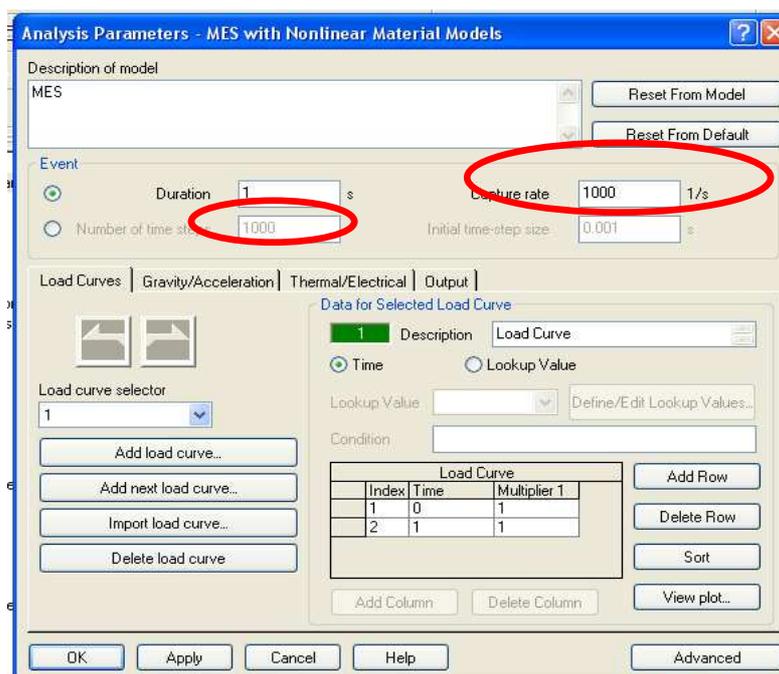
### 5.3.1.7. Resolución del problema y análisis de la solución

Con el fin de determinar la precisión del análisis es necesario introducir una serie de parámetros (Figura 5.10):

- Tiempo de duración del evento
- Tasa de captura o “capture rate”

El número de pasos es el producto del tiempo de duración del evento por la tasa de captura. El número de pasos es proporcional al tiempo que se demorarán las simulaciones. Como el tiempo de duración del evento es un parámetro fijo (la actuación del selector dura 3 segundos en el cambiador de tomas estudiado), el único parámetro que se podrá variar para elegir la duración de las simulaciones es la tasa de captura.

Se ha escogido en base a ensayo y error una tasa de captura para que las simulaciones no excedan de las 40 horas.



**Figura 5.10.** Ventana de selección de los parámetros del análisis

### 5.3.2. Etapa de procesamiento

Es la parte del programa que realiza el cálculo por método de elementos finitos y genera las soluciones. Los pasos que sigue son los siguientes:

- Selección del tipo de cálculo a realizar (estático, dinámico, lineal, no lineal, etc)
- Configuración de los parámetros de cálculo

El programa transfiere las cargas al modelo, resuelve el sistema de ecuaciones y genera la solución. Este paso es completamente transparente al usuario, pues el módulo de ALGOR™ que se encarga de crear las matrices del sistema y su resolución de forma

iterativa se ejecuta en segundo plano. Esto impide que el usuario intervenga durante el proceso.

Para esta etapa se usa el módulo de ALGOR™ MES (Mechanical Event Simulation), el cual admite realizar análisis cinemáticas en función del tiempo y muestra el grado de avance

MES permite optimizar el comportamiento dinámico de componentes, contrastando los resultados de laboratorio, ahorrando tiempo y costes. Con MES se puede implementar mejoras en el diseño de piezas, pudiendo de este modo predecir y controlar su fallo.

### **5.3.2.1. Desarrollo matemático de un impacto en ALGOR™ MES:**

La simulación de eventos MES, simultáneamente reproduce el comportamiento de flexión dinámico de un componente o mecanismo para estimar los esfuerzos que puedan resultar del movimiento o de la interacción entre componentes de otros objetos independientes.

Las principales ventajas de esto son:

- Eliminación del cálculo de fuerzas, ya que el programa calcula las tensiones basándose en la física del evento.
- Visualización en tiempo real, donde se detecta cómo el diseño opera en la simulación.

El análisis de tensión estático tradicional, está basado en la ley de Hooke:

$$F = K \cdot d \quad (5.1)$$

Donde:

$F$  = Fuerza

$K$  = Constante de rigidez

$d$  = Desplazamiento

Siendo  $F$  y  $K$  conocidas para obtener los desplazamientos.

La cinemática tradicional de cuerpo rígido, está basada en la segunda ley de Newton:



$$F = m \cdot a + F_r = m \cdot a + c \cdot v \quad (5.2)$$

Donde:

$F$  = Fuerza

$m$  = Masa

$a$  = Aceleración

$F_r$  es la fuerza de rozamiento, en la que se puede asumir que predomina la fricción viscosa, igual al producto de la velocidad,  $v$ , por la constante de fricción viscosa,  $c$ .

La simulación de eventos mecánicos combina la segunda ley de Newton con la ley de Hooke, y por tanto la ecuación fundamental de la simulación de eventos es:

$$m \cdot a = K \cdot d - c \cdot v \quad (5.3)$$

Cuando se tiene un sistema con diferentes elementos, se puede escribir en forma matricial:

$$[M]\{a\} + [C]\{v\} + [K]\{d\} = 0 \quad (5.4)$$

Donde:

$[M]$  = Matriz de masas

$\{a\}$  = Vector de aceleración

$[C]$  = Matriz constantes

$\{v\}$  = Vector de velocidad

$[K]$  = Matriz de rigidez

$\{d\}$  = Vector de desplazamiento

### 5.3.3. Etapa de post-procesamiento

Es ejecutada por el módulo de ALGOR™ FEMPRO SUPERVIEW en el cual se visualizan los resultados

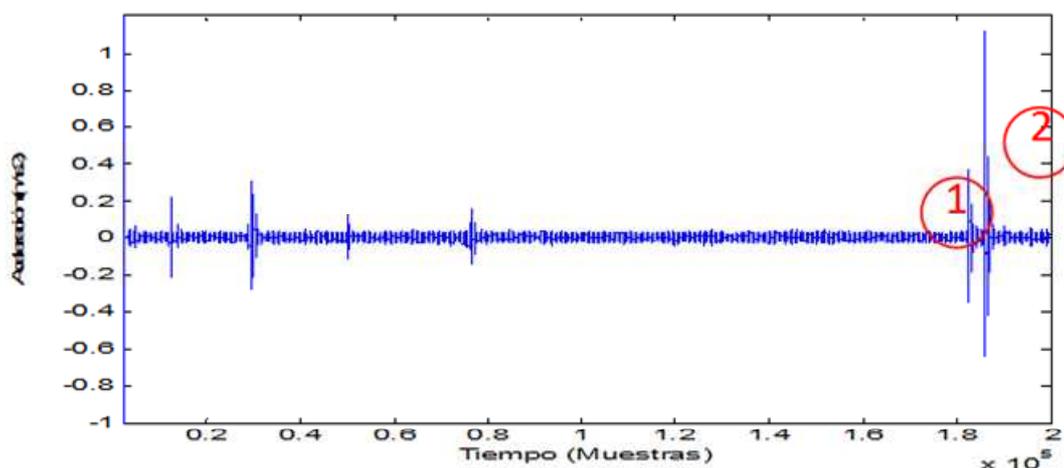
#### 5.4. Validación del modelo

Para validar el modelo simulado en ALGOR™ de la señal de vibración del cambiador de tomas en carga en buen estado, se ha confrontado los resultados del modelo con la señal de vibración experimental con el cambiador de tomas en buen estado.

En la Figura 5.11 se muestra la señal de vibraciones medida experimentalmente (Figura 5.11a) y los resultados de la simulación de dicho impacto (Figura 5.11b). En la Figura 5.11a se observan los impulsos 1 y 2 que corresponden, con los impulsos 3 y 4 de la señal simulada (Figura 5.11b).

El impulso 1 (o 3) se genera cuando los contactos fijos impactan en los contactos móviles de la toma de llegada (Figura 5.12a) y el impulso 2 (o 4) en el acoplamiento de los contactos fijos y móviles (Figura 5.12b).

La diferencia de amplitud entre la señal real y la señal simulada radica en que en la simulación únicamente se ha modelado una fase del selector (compuesta por 4 piezas), mientras que en el modelo experimental el golpe excita los modos de todo el sistema (formado por un elevado número de piezas).



(a)

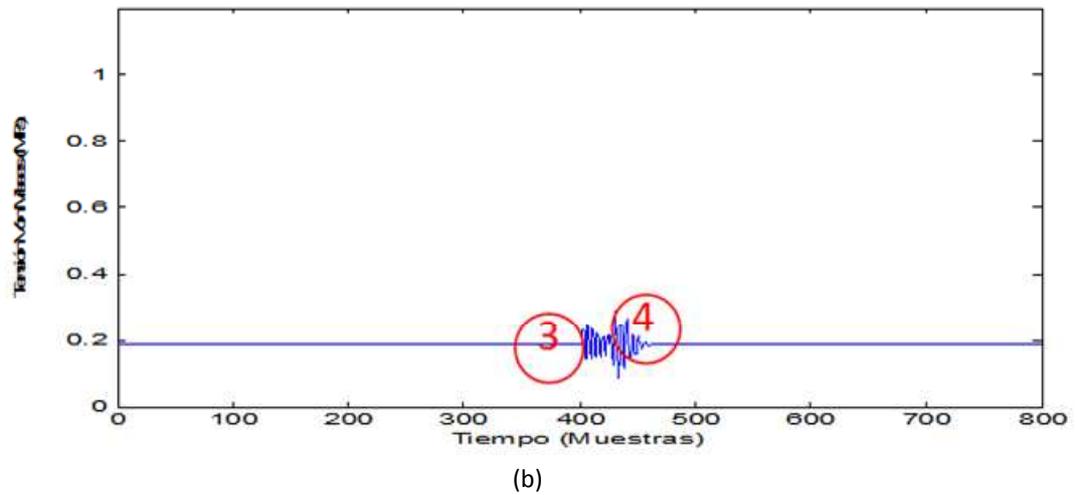


Figura 5.11. (a) Señal de vibración experimental de los impulsos 1 y 2 (b) Señal de vibración simulada en buen estado

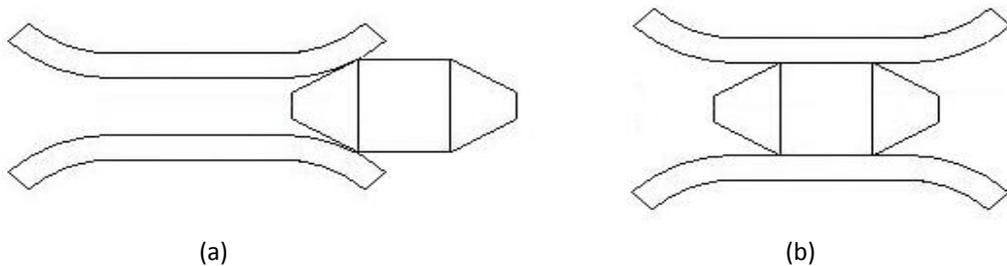
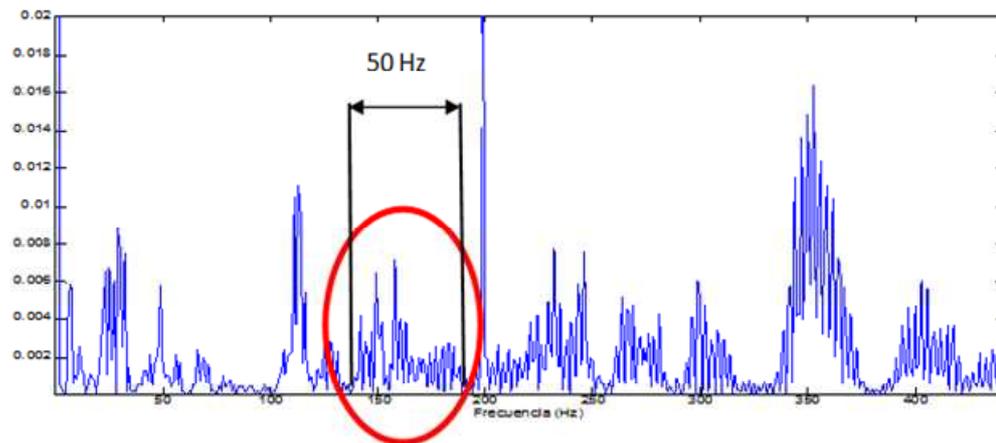
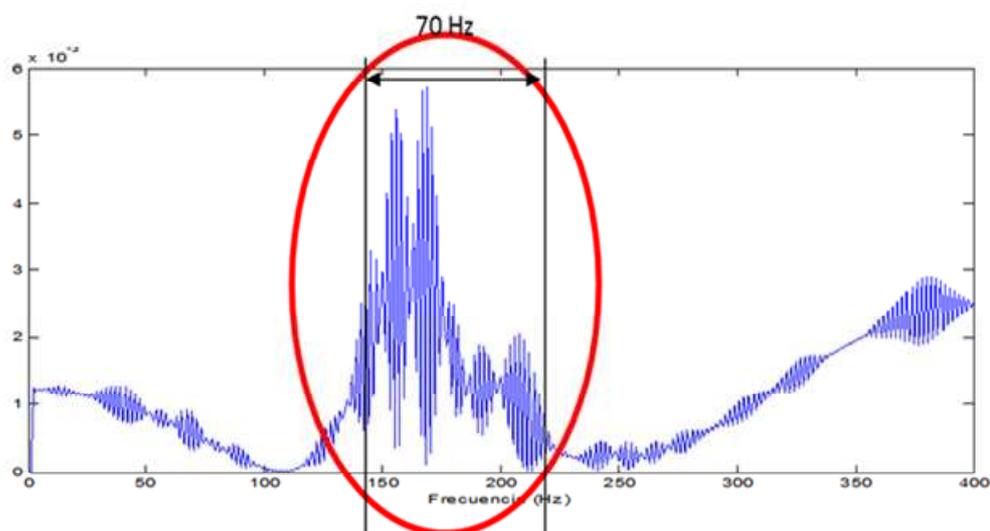


Figura 5.12. Entrada del contacto fijo en los contactos móviles (a) (izquierda). Acoplamiento de los contactos móviles en el contacto fijo (b) (derecha)

Al aplicar la Transformada rápida de Fourier (FFT) a las señales de vibración de las Figura 5.11a y 5.11b se observa su similitud en forma y en las frecuencias principales en el rango de validez del modelo (Figura 5.13).



(a)



(b)

Figura 5.13. FFT de la señal de vibración experimental de los impulsos 3 y 4 (a) FFT de la señal de vibración simulada en buen estado (b)

La Figura 5.14 muestra un zoom del espectro de frecuencias de vibraciones de la Figura 5.13 en el rango de validez del modelo. Se observa que la distancia entre frecuencias es la misma (2Hz) tanto en la señal experimental como en la señal simulada.

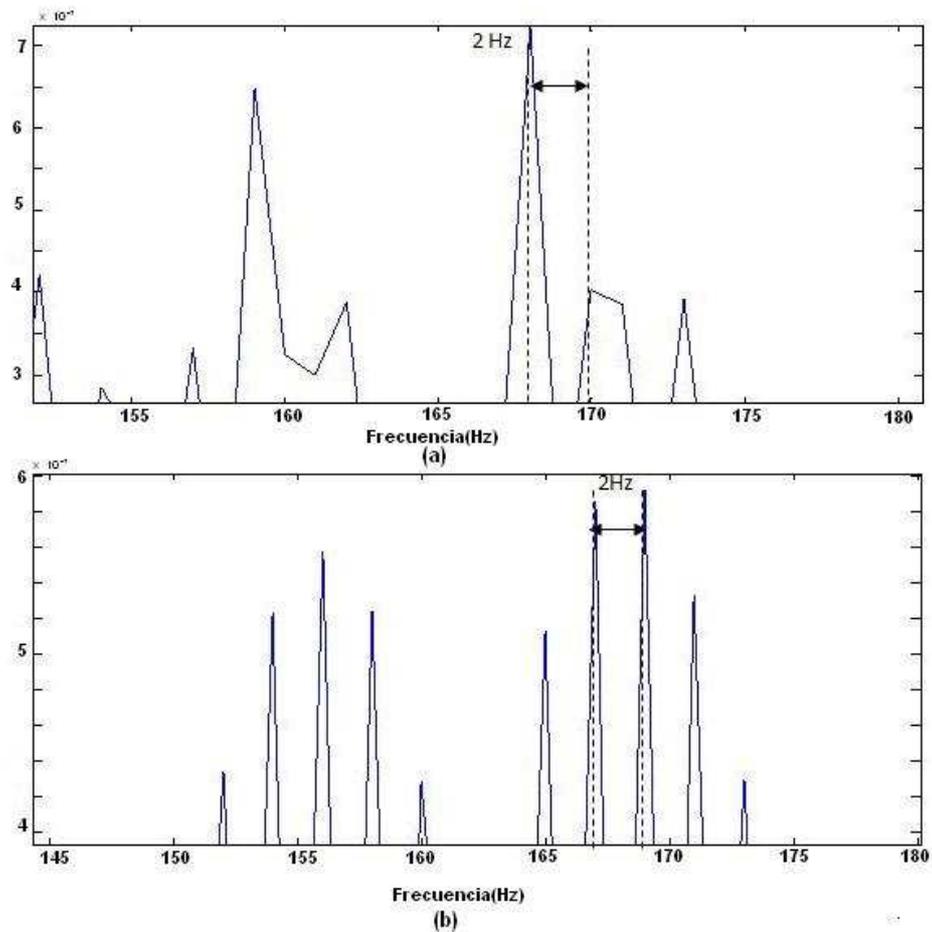


Figura 5.14. Ampliación de la señal experimental del CTC (a). Ampliación de la señal simulada del CTC en buen estado (b)

### 5.5. Simulación de averías en el cambiador de tomas en carga

En este apartado se compara la señal simulada en buen estado frente a varios tipos de averías:

- Comparación de la señal de vibraciones simulada con el cambiador de tomas en carga en buen estado frente a las señales de vibración simuladas con averías en los muelles. Se han realizado dos simulaciones, una con el doble de la constante de rigidez de los

muelles original y otra con la mitad de constante de rigidez ( $k'=2k$  y  $k'=k/2$ )

- Comparación de la señal de vibraciones simulada con el cambiador de tomas en carga en buen estado frente a la señal de vibración simulada con avería en el contacto fijo. Se han realizado dos simulaciones, la primera de ellas admitiendo un desgaste de los contactos y la segunda suponiendo que los contactos fogueados (protuberancias y arranque de material en los contactos).
- Comparación de la señal de vibraciones simulada con el cambiador de tomas en carga en buen estado frente a las señales de vibración simuladas con averías en el contacto fijo y en los muelles (combinación de las averías anteriores).

### 5.5.1. Efecto de una avería en los muelles ( $k'=2k$ y $k'=k/2$ )

En la Figura 5.15 se muestra la tensión de Von Misses<sup>10</sup> en el nodo de entrada de los contactos fijos del selector simulada con los muelles del selector en buen estado (Figura 5.15 a), con los muelles más rígidos de lo normal (Figura 5.15b) y con los muelles menos rígidos de lo normal (Figura 5.15c).

Lo más relevante de la comparativa entre la señal simulada del cambiador de tomas en carga en buen estado con las señales del cambiador de tomas en carga con averías en los muelles es la no linealidad en la influencia de la constante de rigidez  $K$  de los muelles del mecanismo de presión.

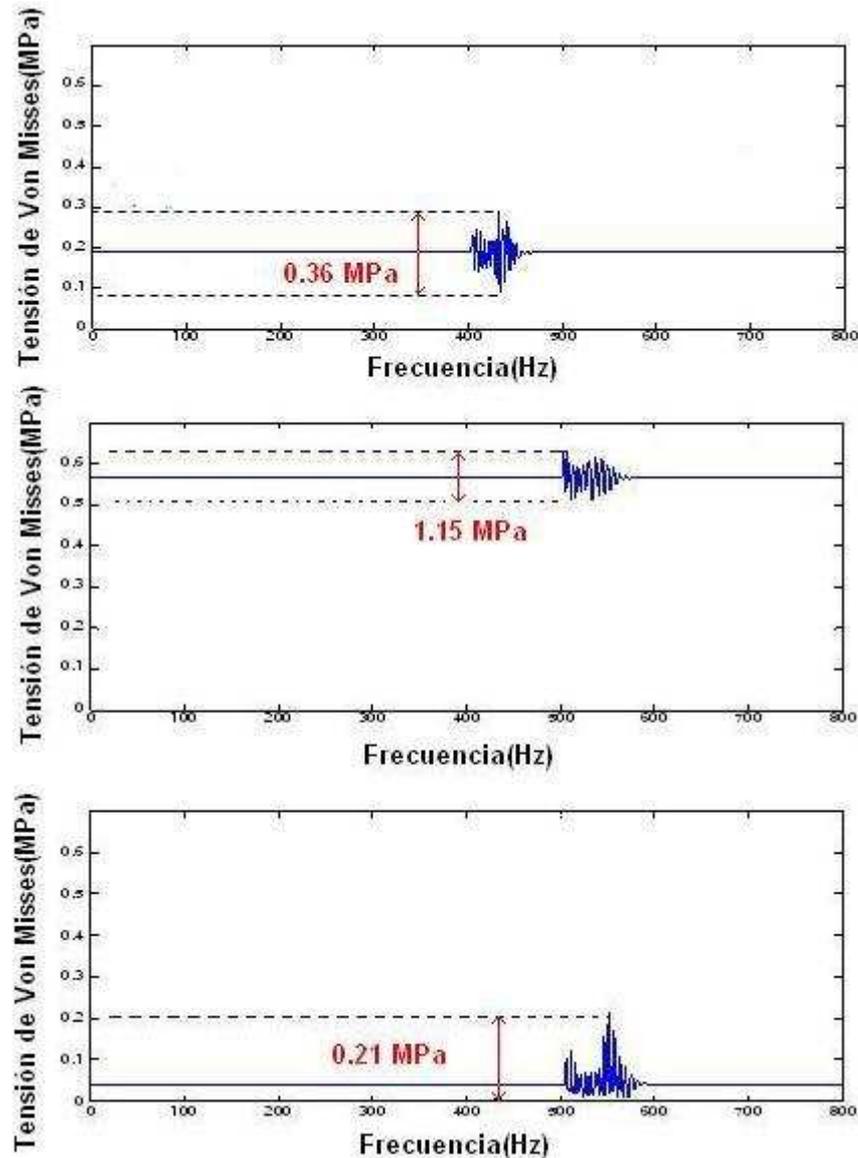
Se puede observar que la máxima tensión de Von Misses en la señal simulada del cambiador de tomas en carga en buen estado es de alrededor de 0,36 MPa (Figura 5.15a); mientras que para la de avería con el doble de rigidez ( $2K$ ) (Figura 5.15b) es de 1,15 MPa. Es decir, al doblar la rigidez del muelle la tensión se triplica.

Por el contrario, al disminuir a la mitad la constante de rigidez (Figura 5.15c) la tensión disminuye a 0,21 MPa, eso es alrededor de 1,7 veces menos. Con esto se podría creer que disminuyendo la constante de rigidez de los muelles se alarga

---

<sup>10</sup> La tensión de Von Misses es una magnitud física proporcional a la energía de distorsión elástica en materiales dúctiles. Cuando en algún punto de del material, la energía por unidad de volumen supera cierto umbral, el material se avería.

la vida útil de las piezas que forman el selector, pero éste estudio es desde el punto de vista mecánico, sin tener en cuenta los problemas que surgen de tipo eléctrico, y sus consecuencias, ante estas averías.



**Figura 5.15.** Señal de vibración simulada en buen estado (a) (arriba), Señal de vibración simulada con muelle  $k'=2k$  (b) (en medio), Señal de vibración simulada con muelle  $k'=k/2$  (c) (abajo)

En la Figura 5.16 se muestran las FFT de las señales simuladas del cambiador de tomas en carga en buen estado frente a las señales simuladas del cambiador de tomas en carga con averías en los muelles del mecanismo de presión. De esta forma se pueden apreciar las variaciones en la frecuencia y amplitud que provocan

estos dos tipos de avería y así poder reconocerlas cuando se realice el mantenimiento predictivo.

Además se puede observar que, en relación a la señal simulada en buen estado, cuando el fallo en los muelles tiene  $K'=2K$  crece la amplitud de las frecuencias en todo el rango, mientras que cuando el fallo es  $K'=K/2$ , crecen las frecuencias por debajo de 50Hz y se amortiguan todas las demás.

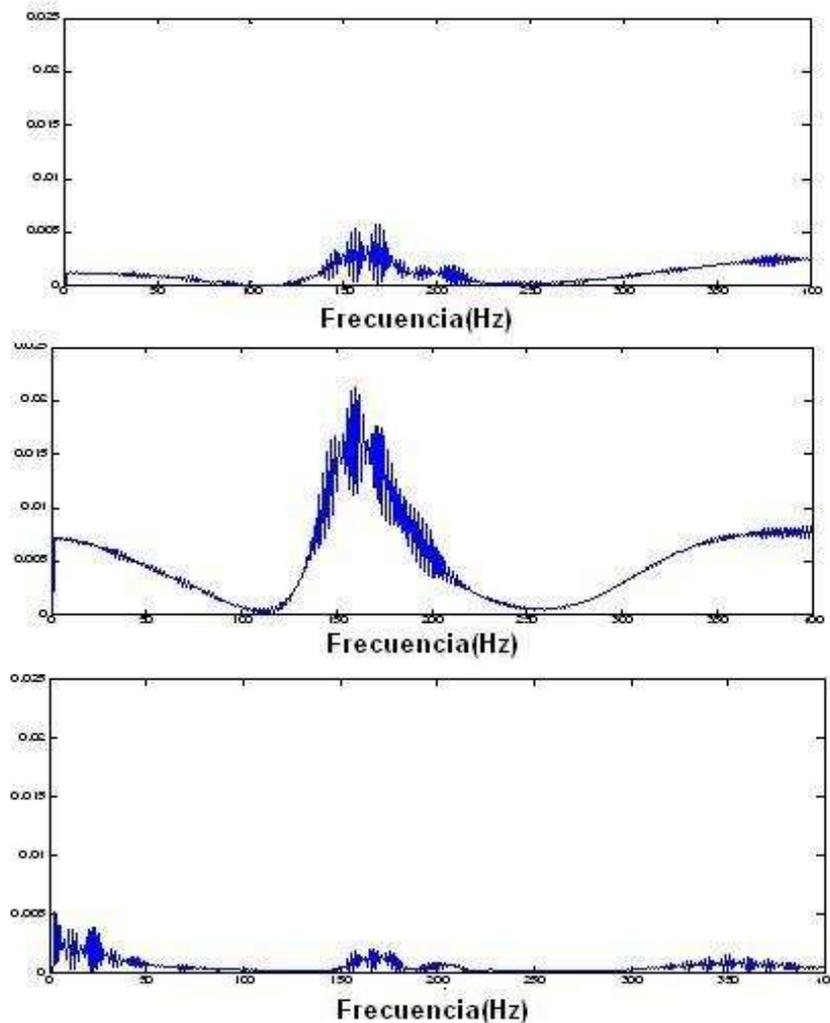


Figura 5.16. FFT de la señal de vibración simulada en buen estado (a) (arriba), FFT de la señal de vibración simulada con avería en los muelles  $k'=2k$  (b) (en medio), FFT de la señal de vibración simulada con avería en los muelles  $k'=k/2$  (c) (abajo)

### 5.5.2. Señal simulada con cambiador de tomas en buen estado frente a la señal simulada con averías en el contacto fijo

Para estudiar el comportamiento del modelo ante una avería en el contacto fijo, se ha tomado el contacto fijo inicial (Figura 5.17a) y se le ha realizado una

serie de modificaciones (Figura 5.17b) de forma que simule un contacto en mal estado, con muescas en las superficies de contacto debidas a un cortocircuito.

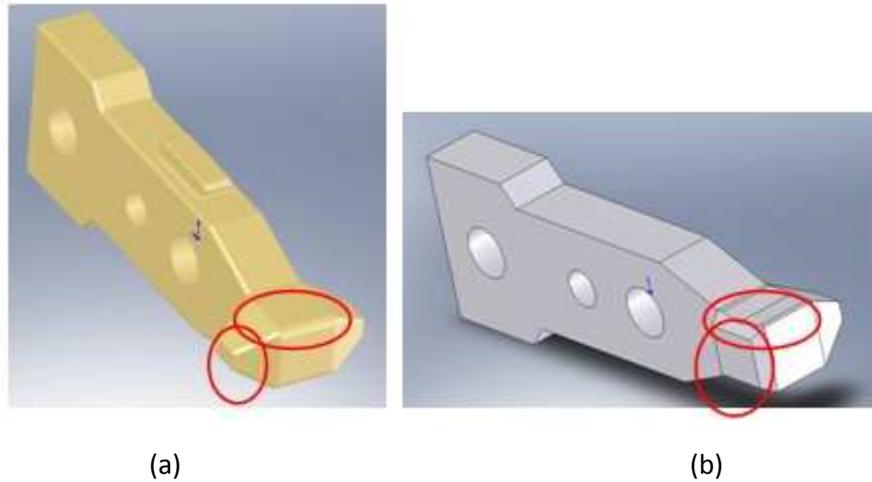


Figura 5.17. Contacto fijo inicial (a) contacto fijo con defecto(b)

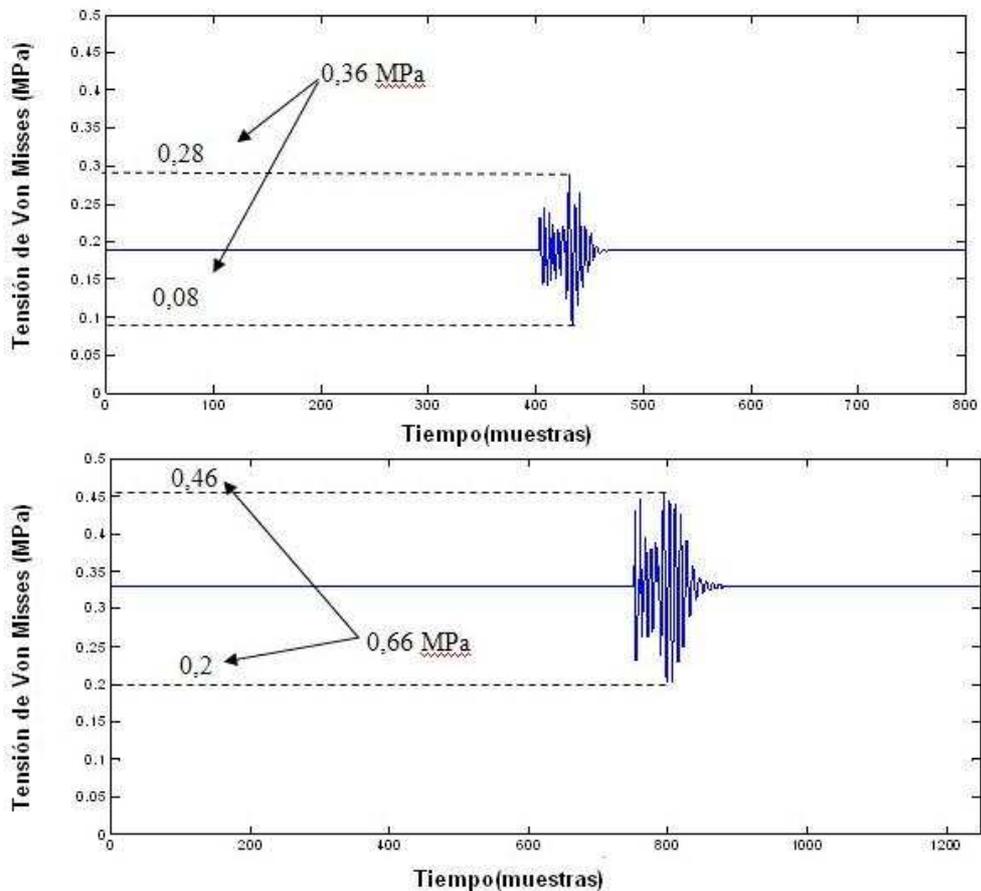


Figura 5.18. Señal de vibración simulada en buen estado (a) (arriba), señal de vibración simulada con defecto en el contacto fijo (b) (abajo)

En la (Figura 5.18) se observa que al existir un defecto de este tipo en el contacto fijo aumenta la tensión hasta alcanzar 0,66 MPa. Teniendo en cuenta que la tensión con el cambiador de tomas en carga en buen estado era 0,36 MPa, esto significa que aumenta casi el doble.

Además si se compara este resultado con los de las señales simuladas del cambiador de tomas en carga con avería en los muelles (Figura 5.15) se observa que, ordenando de mayor a menor el valor de las tensiones, el riesgo a sufrir una rotura por fatiga es mayor en el caso de la avería en los muelles con  $K'=2K$  (1,15 MPa), siguiéndole el defecto en el contacto fijo (0,66 MPa) y por último, la avería en los muelles con  $K'=K/2$  (0,21MPa).

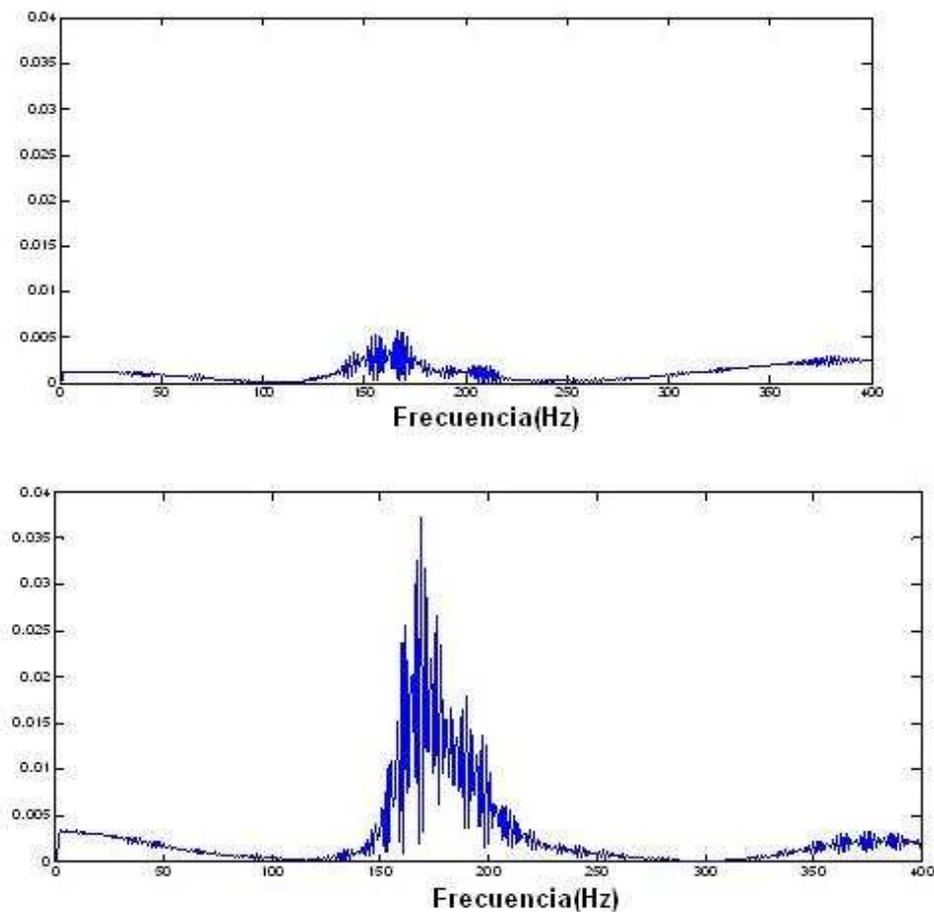
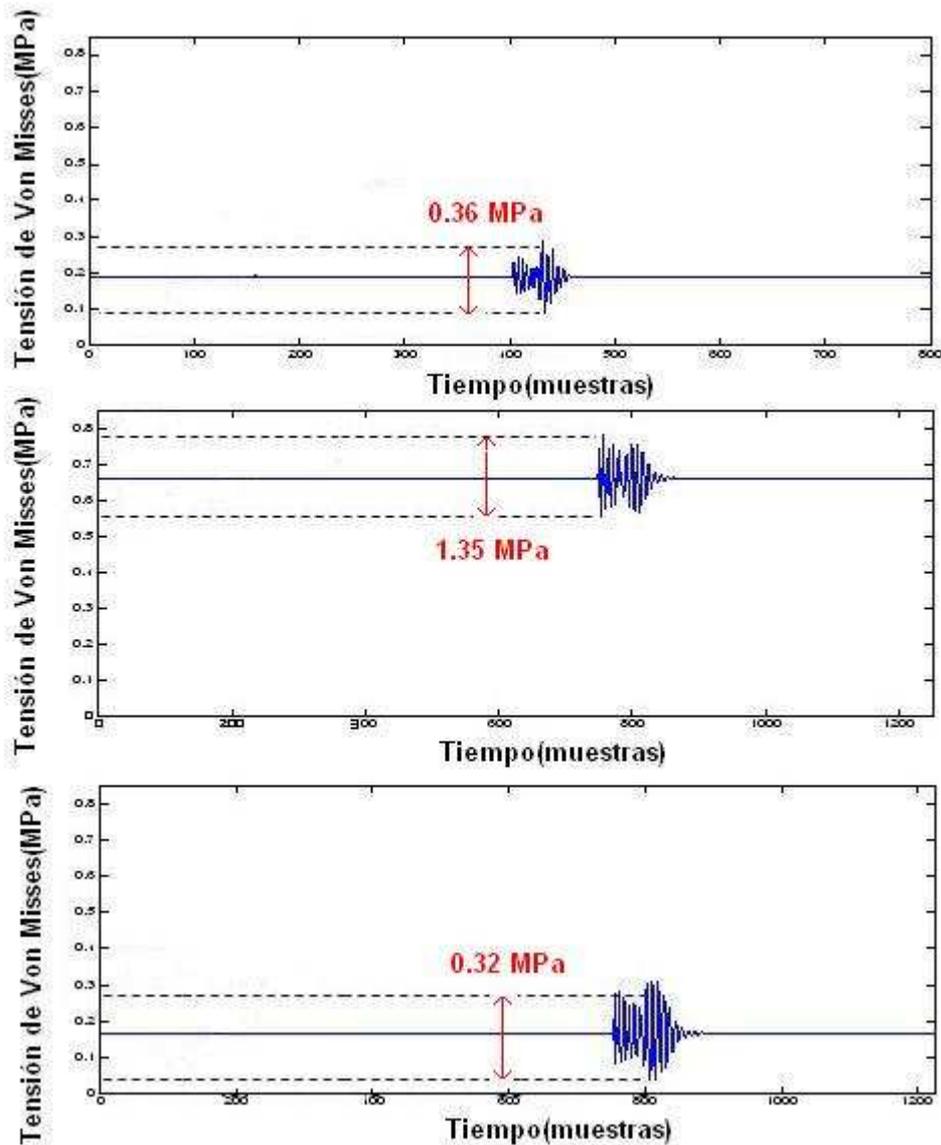


Figura 5.19. FFT de la señal de vibración simulada en buen estado (a) (arriba), FFT de la señal de vibración simulada con defecto en contacto fijo (b) (abajo)

Cuando el selector presenta un defecto en el contacto fijo hay un pequeño aumento en las frecuencias menores a 50Hz y un gran aumento en las frecuencias comprendidas entre 150 y 225Hz.

**5.5.3. Señal simulada con en cambiador de tomas en carga en buen estado frente a la señal simulada con averías en el contacto fijo y en los muelles  $k'=2k$  y  $k'=k/2$ .**



**Figura 5.20. Señal de vibración simulada en buen estado (a) (arriba), Señal de vibración simulada con defecto en el contacto fijo y muelles  $k'=2k$  (b) (en medio), Señal de vibración simulada con defecto en el contacto fijo y muelles  $k'=k/2$  (c) (abajo)**

En la Figura 5.20 se observa que la señal de vibración simulada del cambiador de tomas en carga con avería en el contacto fijo y en los muelles con  $K'=2K$  es la

que presenta mayor tensión (1,35 MPa) y, por lo tanto, la que tiene mayor riesgo de rotura a fatiga de todas las señales analizadas.

Como ocurre en el caso de la señal en buen estado con averías en los muelles (Figura 5.15) no existe linealidad cuando se multiplica o se divide el valor de la constante de rigidez de los muelles. La señal en buen estado presenta 0,36 MPa y cuando existe un defecto en el contacto fijo y en los muelles con  $K'=2K$  aumenta casi 4 veces más.

En cambio, cuando en el cambiador de tomas en carga existe avería en el contacto fijo y en los muelles  $K'=K/2$  la tensión es prácticamente la misma que el cambiador de tomas en carga en buen estado, 0,32 MPa y 0,36 MPa respectivamente.

Otro dato a destacar es que las tensiones producidas por las diferentes averías no se superponen es decir, la señal de vibración con avería en el contacto fijo presenta una tensión de 0,66 MPa y la tensión cuando la avería es únicamente en los muelles con  $K'=2K$  es de 1,15 MPa; en cambio, la tensión con los dos tipos de averías (en el contacto fijo y en los muelles con  $K'=2K$ ) es de 1,35 MPa y no 1,81 MPa.

**Tabla 5.2. Muestra un resumen de las diferentes señales simuladas.**

Tipo de avería	Cont. Fijo + $K'=2K$	Muelles $K'=2K$	Cont. Fijo	Buen Estado	Cont. Fijo + $K'=K/2$	Muelles $K'=K/2$
Tensión Von Misses (MPa)	1,35	1,15	0,66	0,36	0,32	0,21

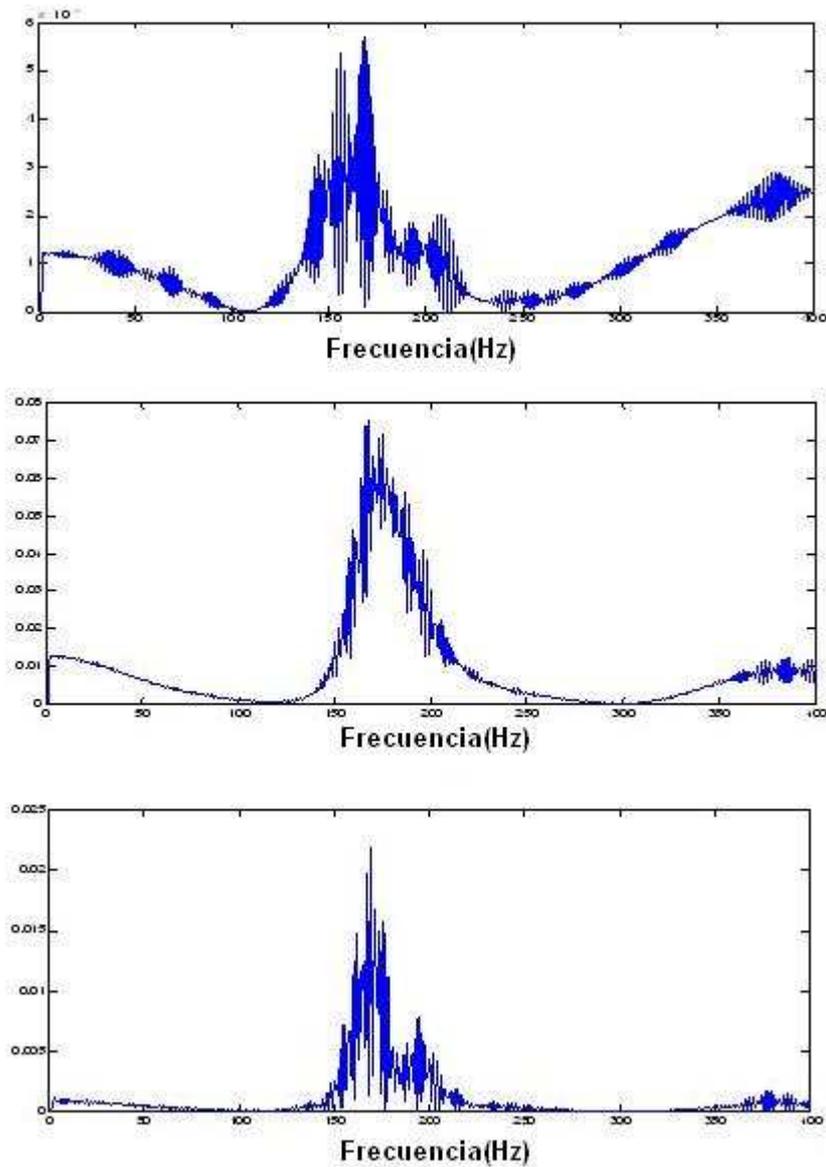
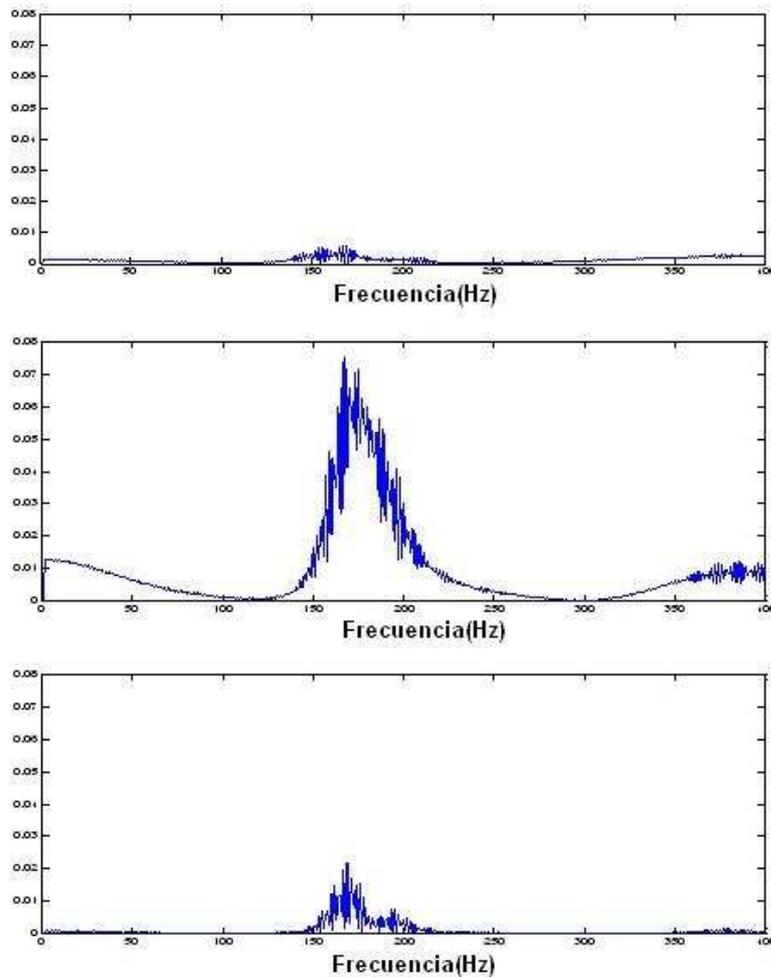


Figura 5.21. FFT de la señal de vibración simulada en buen estado (a) (arriba), FFT de la señal de vibración simulada con defecto en el contacto fijo y muelles  $k'=2k$  (b) (en medio), FFT de la señal de vibración simulada con defecto en el contacto fijo y muelles  $k'=k/2$ (c) (abajo)



Aplicando la misma escala en las gráficas:



**Figura 5.22. FFT de la señal de vibración simulada en buen estado (a) (arriba), FFT de la señal de vibración simulada con defecto en el contacto fijo y muelles  $k'=2k$  (b) (en medio), FFT de la señal de vibración simulada con defecto en el contacto fijo y muelles  $k'=k/2$ (c) (abajo)**

Comparando las FFT de la Figura 5.22 se observa que en los dos tipos de avería crecen las frecuencias comprendidas en el rango de los 100-250Hz, siendo más acentuado el aumento para el defecto en el contacto fijo y en los muelles con  $K'=2K$ .

Sin embargo, las frecuencias comprendidas en los rangos de 0 a 50Hz y de 300 a 400Hz de la FFT con defecto en el contacto fijo y en los muelles con  $K'=2K$  aumentan, mientras que las del defecto en el contacto fijo y en los muelles con  $K'=K/2$  disminuyen.

Otro dato a destacar es que en todas las FFT no existen frecuencias en 110 Hz y 290Hz.

*Capítulo 6***TRATAMIENTO DE LA SEÑAL DE VIBRACIÓN**

En el presente capítulo se aborda el tratamiento matemático de las señales de vibración obtenidas del estudio experimental descrito en el capítulo 4, con el fin de obtener indicadores que permitan hacer el diagnóstico de un cambiador de tomas en carga.

Las diferentes averías en el selector o en el conmutador presentan una mayor repercusión en lugares específicos de la señal de vibración, por ello, los impulsos presentes en la señal cuando actúa el selector (estudio realizado en el apartado 4.5.2) se han asociado a seis intervalos temporales de la señal de vibración (Tabla 6.1).

**Tabla 6.1. Intervalos temporales de los impulsos de la señal de vibración**

<b>Impulsos</b>	<b>Intervalo de tiempo</b>
Impulso 1: Arranque accionamiento a motor (A.M) e inicio carga el acumulador energía.	0 a 1.5s
Impulso 2: inicio actuación cruces de malta	1.5 a 2s
Impulso 3: Actuación del selector	2 a 5s.
Impulso 4: finaliza actuación cruces de malta	
Impulso 5: Proceso de conmutación	5 a 6s
Impulso 6: Parada del accionamiento motor	6 a 7s

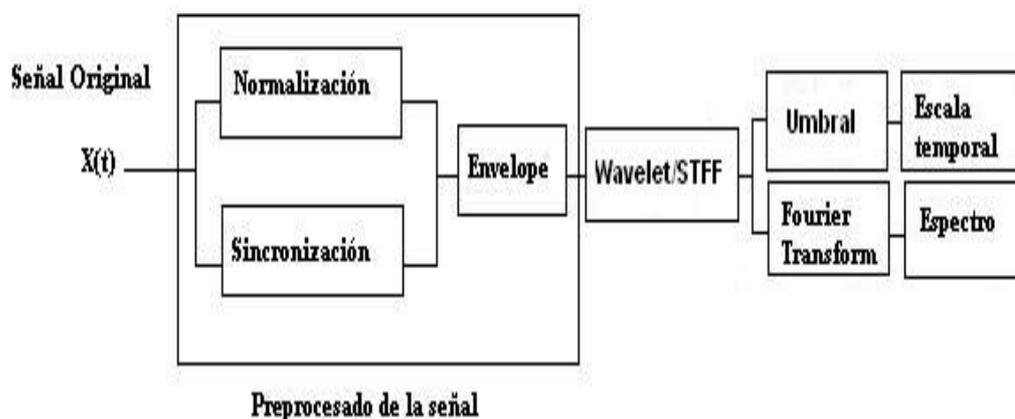
Las diferentes averías en el selector y en el conmutador afectan al patrón de vibración del cambiador de tomas en carga de la siguiente manera:

- Desaparición o aparición de uno o de varios impulsos de la señal de vibración
- Alteración del espectro de frecuencias de la señal de vibración.
- Alteración de los tiempos entre impulsos de vibración.
- Alteraciones en la amplitud de los impulsos de vibración.

A la señal de vibración se le ha realizado en primer lugar un pre-procesado, que se expone en el apartado 6.2. En segundo lugar se han aplicado técnicas de frecuencia (transformada de Fourier) y técnicas tiempo-frecuencia (transformada de Fourier de tiempo corto y transformada Wavelet), para la detección de averías (Figura 6.2). Estas técnicas fueron implementadas en el lenguaje de programación Matlab con el fin de realizar la lectura automática de los principales parámetros de diagnóstico del cambiador de tomas en carga:

- Número de impulsos de la señal de vibración
- Amplitud de los impulsos de la señal de vibración
- Tiempo entre impulsos.

Dado que la amplitud de los impulsos de la señal de vibración depende del grado de carga del transformador [21], sumado al hecho que este parámetro es muy variable cuando se repite dos veces un mismo cambio de toma, en las mismas circunstancias hace que la amplitud no se ha utilizado como un indicador en el diagnóstico de averías.



**Figura 6.2. Proceso de análisis de la señal de vibración**

## 6.1. Pre-procesado de la señal

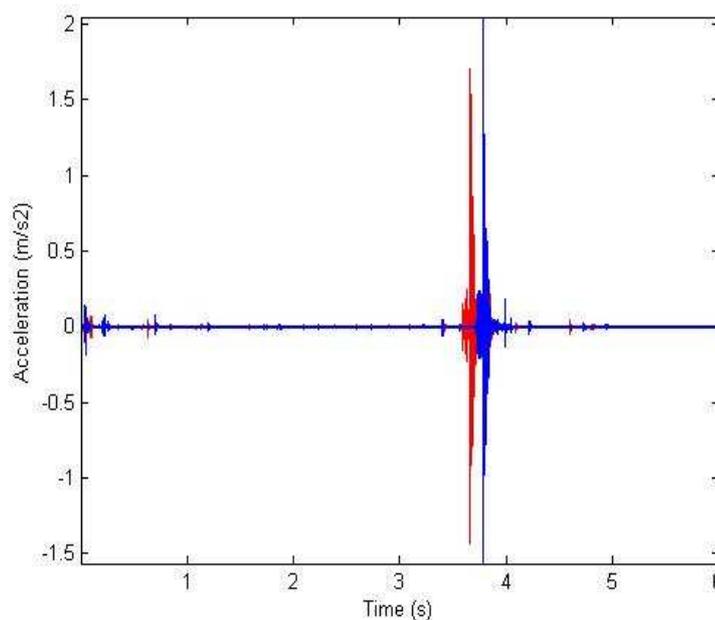
Previo al análisis temporal o tiempo-frecuencia de la señal, se ha realizado un pre-procesamiento a la señal consistente en:

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

No obstante, para reducir el tiempo de procesamiento de la señal, en algunas ocasiones se ha trabajado con la señal sin sincronizar.

### 6.1.1. Normalización de la señal de vibración

Cuando se registran dos procesos de cambio de toma idénticos, pueden existir diferencias de amplitud y pequeñas diferencias temporales entre los registros de la señal de vibración (Figura 6.3). Para realizar un estudio comparativo entre registros de vibraciones en diferentes circunstancias es útil normalizar las señales de vibración.



**Figura 6.3. Diferencias temporales y de amplitud en la señal de vibración al realizar un cambio de toma dos veces**

Las señales se han normalizado usando su valor eficaz:

$$vibnorm[n] = \frac{vib[n]}{RMS_{vib}} = \frac{vib[n]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [vib[i]]^2}} \quad (6.1)$$

Donde:

$vibnorm[n]$ : Señal de vibración normalizada.

$vib[n]$  : Señal de vibración original.

$N$  : Número de muestras totales en  $vib[n]$ .

### 6.1.2. Sincronización de la señal de vibración

La sincronización de las señales de vibración se realiza desplazando el eje de tiempos de las señales de vibración consideradas (Figura 6.4). El valor del desplazamiento se obtuvo como aquel valor que hace máximo el índice de correlación de Pearson. El índice de correlación de Pearson,  $r$ , evalúa la relación entre dos conjuntos de datos, y se define como el cociente de la co-varianza entre dos variables y la raíz cuadrada del producto de las desviaciones estándar (6.2). El índice de Pearson toma un valor entre -1 y 1. Un índice próximo a +1 o a -1 hace referencia a una relación lineal perfecta con dependencia positiva o negativa.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (vib[i] - \overline{vib[i]}) (vibs[i] - \overline{vibs[i]})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (vib[i] - \overline{vib[i]})^2 \sum_{i=1}^N (vibs[i] - \overline{vibs[i]})^2}} \quad (6.2)$$

Donde

$vib[i]$ : Señal normalizada de vibración "1".

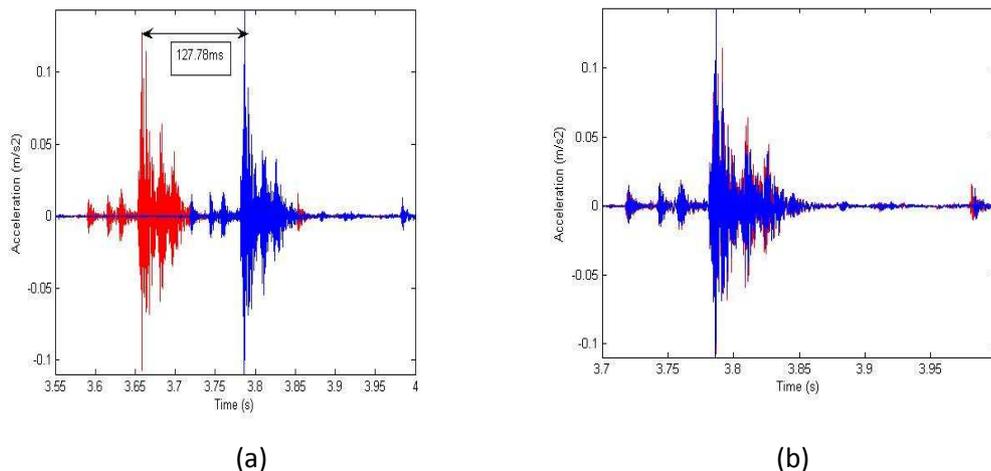
$vibs[i]$ : Señal normalizada de vibración "2".

$\overline{vib[i]}$ : Valor medio de la señal de vibración "1".

$\overline{vibs[i]}$  :

Valor medio de la señal de vibración "2".

$N$  : Número de muestras de la señal de vibración.



**Figura 6.4.** Señal de vibración (detalle) después del proceso de normalización (a) y después del proceso de sincronización (b).

### 6.1.3. La transformada de Hilbert

Se ha validado [26], que el análisis de la envolvente de la señal proporciona una señal más fácil de interpretar para detección temporal de averías que el análisis de la señal en bruto, por ello una vez que la señal de vibración ha sido normalizada se ha aplicado la transformada de Hilbert que permite extraer la envolvente de la señal.

La transformación de Hilbert de una señal  $x(t)$  se define como la convolución de  $x(t)$  y  $1/\pi t$ :

$$\bar{x}(t) = x(t) * \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (6.3)$$

La integral anterior tiene una singularidad en el punto  $t=\tau$ , pero a pesar de ello puede tener un valor finito.

Si, por el contrario, se conoce la transformada de Hilbert y se desea conocer la señal original, se procede de la siguiente forma.

$$x(\tau) = -\bar{x}(t) * \frac{1}{\pi t} = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\bar{x}(t)}{\tau - t} dt \quad (6.4)$$

Algunas propiedades de la transformación de Hilbert [46], son:

- La transformación de Hilbert conserva la energía de la señal

$$x(\tau) = -\hat{x}(t) * \frac{1}{\pi t} = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\hat{x}(t)}{\tau - t} dt \quad (6.5)$$

- La transformación de Hilbert de una señal deja el valor de las componentes armónicas de la señal inalteradas pero cambia su desfase en  $\pi/2$ .
- Si  $F(\omega)$  es la transformada de Fourier de  $x(t)$ , entonces, la transformada de Fourier de  $\hat{x}(t)$  es  $j \cdot \text{sign}(\omega)F$ . Debido a lo anterior, una función y su transformada Hilbert son ortogonales.

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \int_{-r}^r x \cdot \hat{x} du = 0 \quad (6.6)$$

Mediante la transformación de Hilbert se puede crear una función compleja,  $u(t)$ , definida de forma que la parte real de  $u(t)$  es la señal original mientras que la parte imaginaria es la transformación de Hilbert de la señal original

$$u(t) = x(t) + j\hat{x}(t) \quad (6.7)$$

La transformación de Hilbert de la función

$$x(t) = A \cos \omega t$$

es

$$\hat{x}(t) = A \sin \omega t$$

Por ello el módulo de la función compleja  $u(t)$  será

$$|u(t)| = \sqrt{(A \cos \omega t)^2 + (A \sin \omega t)^2} = A \quad (6.8)$$

Si se tiene una señal sinusoidal modulada según una envolvente, el efecto de aplicar la transformación de Hilbert a dicha señal es tener una señal unidireccional con la misma envolvente de la señal pero en la que las fluctuaciones de la señal desaparecen. En el caso de señales más complejas compuestas por una señal alternativa  $x(t)$  que decae según una cierta envolvente, es tener una señal unidireccional con la misma envolvente de la señal pero en la que las fluctuaciones de la señal dentro de la envolvente se ven aminoradas. A título de ejemplo, en la Figura 6.5 se muestran las vibraciones registradas durante la actuación del conmutador junto con su transformada de Hilbert.

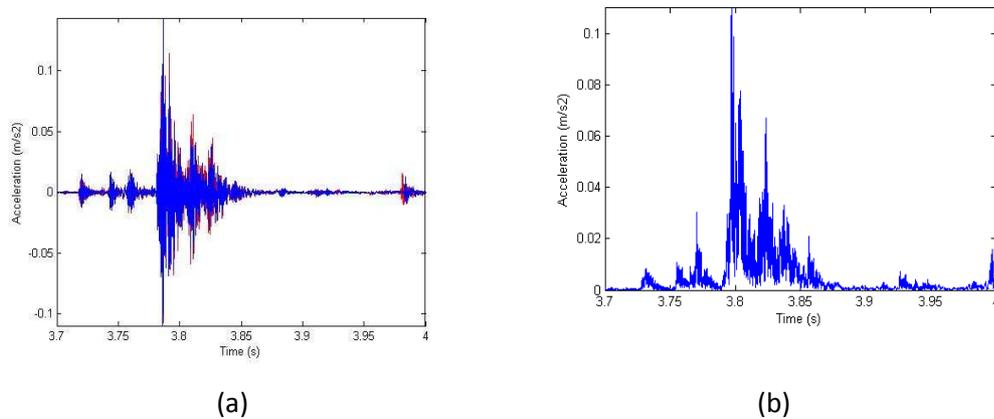


Figura 6.5. Señal de vibración conmutación del OTLC y transformada de Hilbert

## 6.2. Técnicas frecuenciales: La transformada de Fourier

Entre las herramientas más importantes de análisis matemático para el procesamiento de señales se encuentra la transformada de Fourier, de gran utilidad cuando es aplicada a señales de carácter estacionario. La transformada de Fourier de una señal  $x(t)$  se define como:

$$F\{x(t)\} = X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (6.9)$$

La transformada de Fourier proporciona el contenido de frecuencias de la señal. Para señales periódicas, el contenido en frecuencia permanece invariante. Sin embargo, si este tipo de análisis se aplica a una señal no estacionaria  $x(t)$ , cualquier cambio abrupto en el dominio del tiempo en la señal se hace extensivo a todo el dominio de frecuencia en  $X(f)$ , su transformada de Fourier, por lo que

muchos de los aspectos temporales de  $x(t)$ , tales como el comienzo y el fin de la señal, así como los instantes de aparición de singularidades no pueden ser analizados adecuadamente por el análisis de Fourier [47].

### 6.3. Técnicas tiempo-frecuencia

Para la obtención de los principales parámetros de diagnóstico del cambiador de tomas en carga, a la envolvente de la señal de vibración se le ha aplicado las siguientes técnicas tiempo frecuencia:

- Transformada de Fourier en tiempo corto (STFT)
- Transformada Wavelet

#### 6.3.1. Transformada de Fourier en Tiempo Corto (STFT)

La transformada de Fourier mediante el uso de ventanas de análisis se convierte en la transformada de Fourier en tiempo corto (*Short-Time Fourier Transform, STFT*) definida [46] como:

$$STFT(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)g^*(t - \tau)e^{-j2\pi ft} dt \quad (6.10)$$

Entre las funciones ventana más utilizadas, se encuentran las de tipo gaussiano (Hamming, Hann), definidas por (6.11).

$$g_{t,\tau} = e^{-\pi(t-\tau)^2} \quad (6.11)$$

Siendo  $s$  una constante que define el ancho de la ventana y  $\tau$  un factor de desplazamiento, el cual señala sobre qué instante de tiempo se centra la ventana. Las ventanas de análisis de tipo gaussiano son ampliamente utilizadas debido a que pueden alcanzar buenas resoluciones simultáneamente en tiempo y frecuencia.

En esencia, la transformada de Fourier de tiempo corto, evalúa la transformada de Fourier original sobre la señal vista a través de la ventana de análisis, a medida que esta es desplazada, recorriendo la totalidad de la señal de estudio. Este tipo de

análisis puede hacerse análogo a la implementación de un banco de filtros pasabanda, de frecuencia central  $f$ , los cuales tienen una respuesta al impulso determinada por la ventana de análisis modulada a dicha frecuencia. El ancho de banda de este filtro está asociado a  $G(f)$ , la transformada de Fourier de  $g(t)$  según:

$$\Delta f^2 = \frac{\int f^2 |G(f)|^2 df}{\int |G(f)|^2 df} \quad (6.12)$$

El denominador de (6.12) representa la energía de la ventana de análisis  $g(t)$ . La STFT obtenida usando dicha ventana de análisis, será capaz de discriminar dos frecuencias diferentes en la señal de estudio solo si se encuentran separadas en frecuencia, un intervalo [Hz] tal que se cumpla (6.13):

$$(f_1 - f_2) > \Delta f \quad (6.13)$$

Siendo  $\Delta f$  la resolución en frecuencia de la STFT dada por (6.12). Asimismo, la resolución en el dominio del tiempo  $\Delta t$  está dada por:

$$\Delta t^2 = \frac{\int t^2 |g(t)|^2 dt}{\int |g(t)|^2 dt} \quad (6.14)$$

El denominador de (6.14) representa la energía de  $g(t)$ . Esta segunda resolución implica que para que sea posible la discriminación temporal de dos frecuencias presentes en una señal, estas deben encontrarse separadas como mínimo un intervalo de tiempo, tal que se cumpla (6.15):

$$(t_1 - t_2) > \Delta t \quad (6.15)$$

Sin embargo, existe una limitación en la magnitud de las resoluciones en tiempo y frecuencia [69]. El producto entre estas resoluciones no puede hacerse arbitrariamente pequeño, siendo restringido a un valor determinado por (6.16):

$$\Delta t \Delta f \geq \frac{1}{4\pi} \quad (6.16)$$



Esta limitación indica que es imposible definir una ventana de análisis  $g(t)$ , con resolución temporal  $\Delta t$ , cuya energía se encuentre perfectamente localizada en el tiempo, y que, simultáneamente, su transformada de Fourier  $G(f)$  (con resolución en frecuencia  $\Delta f$ ) posea su energía perfectamente localizada en frecuencia. Debido a esto, una ventana de análisis de corta duración será ideal para determinar la ubicación temporal de una frecuencia, mientras que una ventana de larga duración será útil para determinar las frecuencias presentes en la señal de análisis.

### 6.3.2. Transformada Wavelet

Para reducir la limitación en resolución presente en la STFT, y que se ajuste la resolución de la ventana de análisis, tanto en tiempo como en frecuencia, de modo que se permita que la resolución temporal sea lo suficientemente útil a altas frecuencias y una resolución en frecuencia conveniente para bajas frecuencias, es necesario un conjunto de funciones base (o Wavelet madre), diferente al de las exponenciales complejas (sinusoidales) propias de la transformada de Fourier, cuya resolución tanto en tiempo como en frecuencia pueda ajustarse según los requerimientos del caso específico.

Una Wavelet es una función  $\psi$  que pertenece al espacio  $L^2(\mathbb{R})$  de energía finita, de carácter oscilatorio normalizada (6.17) y centrada alrededor de  $t = 0$ :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \tag{6.17}$$

El espectro en frecuencia de la *wavelet* es de tipo pasabanda. Las *wavelets* son generadas a partir de la traslación y cambio de escala de una misma función Wavelet  $\psi(t)$ , llamada “*Wavelet madre*”, y se definen como:

$$\psi_{\tau,s} = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) ; s > 0 \tag{6.18}$$

Donde:

$s$  : Factor de escala

$\tau$  : Factor de traslación

El parámetro  $\tau$  se encarga de asignar la información contenida en la *wavelet* a un instante de tiempo específico. Mientras que el factor de escala puede comprimir ( $s < 1$ ) o dilatar ( $s > 1$ ) la función  $\psi_{s,\tau}(t)$ . El factor de escala puede ser visto como

$$s = \frac{f_0}{f} \quad (6.19)$$

Donde  $f_0$  denota la frecuencia central de la *wavelet*. Al modificar el valor de  $s$  se cubren rangos diferentes de frecuencias ya que valores grandes de  $s$  corresponden a frecuencias bajas o escalas grandes de  $\psi_{s,\tau}(t)$  (dilatación de la *wavelet*) mientras que valores pequeños de  $s$  corresponden a frecuencias de mayor rango o escala pequeñas de  $\psi_{s,\tau}(t)$  (contracción de la *wavelet*) [47].

La *Wavelet* madre debe elegirse de un conjunto ampliamente conocido de familias entre las que se encuentran la Haar, Daubechies, Biortogonal, Coiflets, Symlets, Morlet, Meyer entre muchas otras, según sea el propósito del análisis (detección de singularidades, suavizado de señales, etc); también se puede diseñar un tipo especial de *Wavelet* madre que cumpla determinados requerimientos establecidos para un análisis específico.

Existen básicamente dos tipos principales de transformada *Wavelet*: La transformada *Wavelet* Continua (CWT), y la transformada *Wavelet* Discreta (DWT). En esta tesis se ha utilizado la transformado *Wavelet* discreta.

### 6.3.2.1. La transformada *Wavelet* Continua (CWT)

La transformada *Wavelet* continua se define como:

$$W_f(\tau, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{\tau,s}^*(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^*\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \quad (6.20)$$

Siendo  $\psi_{\tau,s}^*(t)$  el complejo conjugado de la *wavelet* madre  $\psi_{\tau,s}(t)$ .

Mediante la identidad de Parseval [48], se puede llegar a la expresión equivalente:

$$W_f(\tau, s) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) \Psi_{\tau, s}^*(\omega) d\omega \quad (6.21)$$

donde  $F(\omega)$  y  $\Psi^*(\omega)$  son las transformadas de Fourier de  $f(t)$  y  $\psi^*(t)$  respectivamente.

Los coeficientes obtenidos mediante la transformada Wavelet miden la semejanza o correlación entre la señal en estudio y el tipo de wavelet aplicada, para una escala  $s$  y un desplazamiento  $\tau$  determinados.

La transformada continua Wavelet se representa mediante un mapa espectro-temporal llamado escalograma, el cual permite detectar patrones de comportamiento en la variación del espectro de manera que las señales, se puedan agrupar o clasificar de acuerdo a su patrón característico.

La transformada Wavelet Continua es invertible siempre y cuando se cumpla la condición de admisibilidad. La transformada inversa Wavelet continua (ICWT) es obtenida mediante una fórmula de “identidad de resolución” [49], dada por:

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_s \int_\tau W_f(\tau, s) \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \frac{d\tau ds}{s^2} \quad (6.22)$$

### 6.3.2.2. La transformada Wavelet Discreta (DWT)

Los coeficientes *wavelet* pueden ser calculados para cualquier valor de la escala; sin embargo, debido a la gran cantidad de información redundante [49], que origina este cálculo computacional, se puede realizar el cálculo solamente para unas ciertas escalas y traslaciones. Este tipo de análisis se denomina transformada Wavelet Discreta.

Para analizar una onda en un amplio margen tiempos y frecuencias, se eligen los factores de escala y traslación de forma que  $s=s_0^j$  y  $\tau=ks_0^j$ . La Transformada

Discreta de Wavelet para un cierto valor de la escala (determinado por  $j$ ) y de la posición (determinada por  $k$ ) tiene la forma

$$d_{j,k} = s_0^{-\frac{j}{2}} \int f(t) \psi \left( \frac{t - ks_0^j}{s_0^j} \right) dt \quad (6.23)$$

Si la señal  $f(t)$  no se dispone en forma continua, sino en forma discreta, la integral anterior se convierte en una suma.

Si se verifica la condición de admisibilidad se puede reconstruir la onda original como

$$f(t) = \frac{2}{A+B} \sum_j \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (6.24)$$

En caso en el que las escalas y posiciones estén basadas en potencias de dos se denominan escalas y posiciones diádicas. La escala diádica permite cubrir un gran margen de frecuencias. Los factores de traslación ( $\tau$ ) y escala ( $s$ ) siguen la ley

$$s = 2^j ; \quad \tau = 2^j k \quad (j, k) \in Z^2 \quad (6.25)$$

Para el caso de señales discretas, la expresión de la wavelet diádica  $j,k$  para una muestra  $n$  es:

$$\psi_{j,k}[n] = 2^{-\frac{j}{2}} \psi[2^{-j}n - k] \quad (6.26)$$

Para señales muestreadas, la relación entre las escalas y las frecuencias es

$$F_a = \frac{F_c}{s * T_s} \quad (6.27)$$

Donde  $F_a$  es la pseudo-frecuencia correspondiente a la escala  $s$  en Hz,  $F_c$  es la frecuencia central de la wavelet en Hz y  $T_s$  es el período de muestreo en kS/s.

Teniendo en cuenta la analogía entre las *wavelets* y los filtros pasabanda, el análisis DWT proporciona una descomposición de la onda en componentes de baja frecuencia (conocidas como *aproximaciones*) las cuales dan una idea general

de la señal, y en componentes de alta frecuencia, conocidas como *detalles* puesto que proveen la información referente a discontinuidades, bordes y variaciones abruptas de la señal. La señal de detalle para unos valores de  $j$  y  $k$  viene dada por (6.23) y la señal de aproximación por (6.28).

$$a_{j,k} = 2^{-\frac{j}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \phi_{j,k}(2^{-j}t - k) dt \quad (6.28)$$

Cuando una señal se filtra sucesivamente con filtros pasabanda se puede obtener sus componentes en frecuencia hasta el orden deseado. De forma semejante, el proceso de descomposición wavelet puede iterarse, descomponiendo el coeficiente de aproximación nuevamente por wavelets, para lograr un análisis multiresolución (Figura 6.6)

Sin embargo, debido a que el proceso anterior resulta en un incremento de los datos originales, se recurre a un proceso de submuestreo, con lo cual el proceso de descomposición *wavelet* genera aproximadamente la misma cantidad de datos obtenidos en la señal original [50]. El máximo nivel de descomposición *wavelet* posible el determinado por la cantidad de muestras de la señal original, ya que debido al submuestreo involucrado el proceso no puede continuarse si se tiene menos de una muestra.

Para el caso de señales discretas a las que se les aplica un análisis multiresolución, la señal original se puede reconstruir a partir de los coeficientes de aproximación y detalle [51], como:

$$f(n) = \sum_{n \in Z} a_{j,k}[n] \phi_{j,k}[n] + \sum_{j=J}^{\infty} \sum d_{j,k}[n] \psi_{j,k}[n] \quad j \in Z \quad (6.29)$$

Donde:

$j$  : Resolución inicial

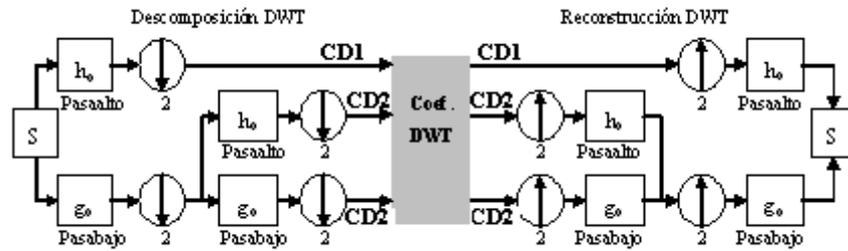


Figura 6.6. Esquema de descomposición y reconstrucción *wavelet* de segundo nivel

Como se ha indicado, lo habitual es realizar el proceso de descomposición a partir de los coeficientes de aproximación obtenidos en cada nivel de descomposición *wavelet* (Figura 6.6), pero también puede realizarse de manera conjunta sobre los coeficientes de aproximación y sobre los de detalle obtenidos previamente, convirtiéndose en la descomposición *wavelet packet* (Figura 6.7).

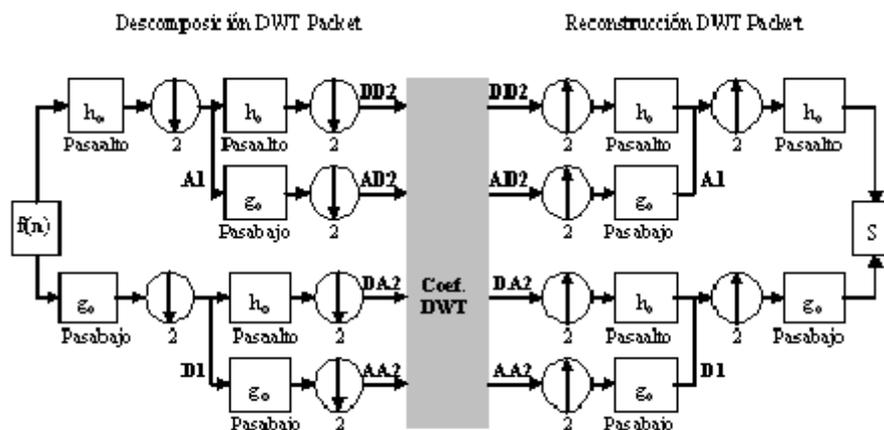


Figura 6.7. Esquema de descomposición y reconstrucción *wavelet packet* de segundo nivel

En el tratamiento de la ubicación temporal de los impulsos de la señal de vibración, a la envolvente de la señal de vibración se han aplicado las siguientes herramientas matemáticas de forma secuencial (Figura 6.2):

- Selección de la *wavelet* madre y descomposición de la señal aplicando DWT
- Establecimiento de umbral para la detección de impulsos.
- Eliminación del ruido mediante interpolación cúbica spline (utilizada solo para determinar los tiempos de los sub-impulsos de la etapa de conmutación).



- Reconstrucción de la señal original por aplicación de la transformada inversa wavelet (IDWT).

A continuación se describe estas herramientas y la forma en la que se han aplicado.

### Selección de la Wavelet madre

El primer problema que debe ser resuelto es encontrar la wavelet madre más adecuada para facilitar el proceso de identificación de los impulsos de vibración.

Para ello se ha aplicado a la señal de vibración la transformación wavelet discreta con diferentes wavelet madre: diferentes tipos de biortogonales (1.1, 1.3, 1.5, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8, 3.1, 3.3, 3.5, 3.7, 3.9, 4.4, 5.5, 6, 8), Coiflet (1 a 5), Daubechies (1 to 9), y Symlet (2 a 8).

Para tener un indicador relativo a la correlación entre la señal procesada y la wavelet madre seleccionada, se ha usado el teorema de Parseval [48]. El indicador elegido es la suma de los cuadrados de los coeficientes espectrales de la transformada de Fourier referidos al dominio de la frecuencia, ya que está relacionado con la cantidad de energía de la señal

$$\frac{1}{N} \sum |f[t]|^2 = \sum |b_k|^2 \quad (6.30)$$

Donde  $N$  es el período de muestreo, y  $b_k$  son los coeficientes espectrales de la transformada de Fourier.

Usando (6.29) and (6.30) para aplicar el teorema de Parseval a la DWT se obtiene

$$\frac{1}{N} \sum |f[t]|^2 = \sum_{-\infty}^j \sum |d_j[n]|^2 + \sum_{n \in Z} |a_j[n]|^2 \quad (6.31)$$

Se ha aplicado (6.31) como índice de comparación para la evaluación de diferentes tipos de wavelet madre al análisis de las ondas de vibración de un cambiador de tomas en carga descompuestas en intervalos (como se indicó en el

apartado 6.1), obteniéndose los valores indicados en la Tabla 6.2. El índice de comparación se ha aplicado a la onda original y a su envolvente.

Tabla 6.2. Índices de comparación señal 4\_5\_1 y su envolvente (10 escales)

Wavelet	Type	Índice de la Señal	Índice de la envolvente
Daubechies	Db9	3500	252
Symelet	sym8	3497	251
Coiflet	coif5	3502	253
Biortogonal	Bior 3.1	498043	2420
Biortogonal	Bior 3.3	20574	639

De la Tabla 6.2 resulta evidente que cuando se evalúa la envolvente, el mayor índice (energía almacenada en la señal) es el obtenido con la Wavelet Biorthogonal 3.1. Sin embargo, esta wavelet no es integrable [52], de forma que no se puede llevar a cabo una transformada rápida de Fourier, puesto que no convergería. Por tanto, no se puede asociar una pseudo frecuencia que nos permita relacionar una escala en el dominio wavelet con una frecuencia en el dominio de Fourier. Debido a ello se eligió la wavelet madre Bior 3.3, dado que esta wavelet presenta el siguiente mayor índice de comparación y permite caracterizar la señal de vibración.

En el caso de la Bior 3.3  $F_c=1$  Hz (Figura 6.8) y las señales de vibración han sido muestreadas con una frecuencia de muestreo  $\frac{1}{T_s} = 50$  kHz (capítulo 4), por lo que la ecuación (6.27) queda:

$$F_a = \frac{50000}{S} \quad (6.32)$$

En la Tabla 6.3 se muestran las pseudo-frecuencias asociadas a la wavelet Bior 3.3 en nuestro caso.

Tabla 6.3. Pseudo frecuencias asociadas a Bior 3.3

Scale	Dyadic scale	Frequency
2	1	25000.0
4	2	12500.0
8	3	6250.0
16	4	3125.0
32	5	1562.5
64	6	781.25
128	7	390.625
256	8	195.313
512	9	97.656
1024	10	48.828

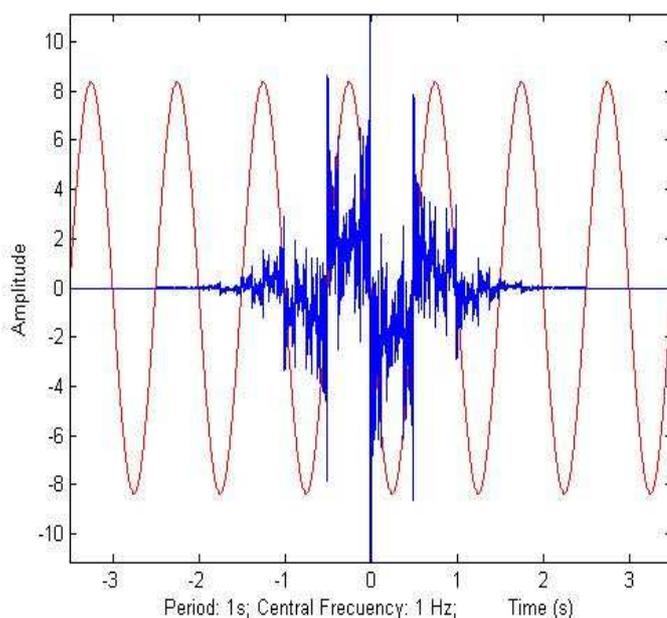


Figura 6.8. Wavelet Bior 3.3 (Azul) and associated pseudofrequency (Roja)

Establecimiento de umbral para detección de impulsos

Existen diferentes tipos de implementación de umbrales para ser aplicados sobre los coeficientes wavelet entre los que se encuentran el umbral suave, el umbral duro y el desplazamiento cíclico. Los autores [53]-[55], aplican algunos de

los umbrales citados sólo sobre los coeficientes de aproximación o sólo sobre los coeficientes de detalle de la señal. A continuación se realiza una breve exposición de los umbrales citados.

**Umbral Duro (Hard Threshold):** Este operador evalúa si el valor absoluto del coeficiente *wavelet* de entrada  $d_i$ , es mayor que el umbral seleccionado, en cuyo caso el coeficiente de salida  $d_o$  permanece invariante, en caso contrario se iguala a cero (6.33).

$$d_o = \begin{cases} d_i < \text{umbral} \Rightarrow d_o = 0 \\ d_i \geq \text{umbral} \Rightarrow d_o = d_i \end{cases} \quad (6.33)$$

La implementación de este método es sencilla, pero su principal inconveniente es que genera ciertas discontinuidades para valores de  $d_i = \pm \text{umbral}$ , por lo cual no es muy conveniente para suavizado de señales.

**Umbral Suave (Soft Threshold):** Si el valor absoluto del coeficiente *wavelet* que se desea umbralizar,  $d_i$ , es mayor que el umbral seleccionado, se modifica el coeficiente restando el umbral a su valor absoluto, en el caso contrario se iguala a cero (6.34).

$$d_o = \begin{cases} d_i < \text{umbral} \Rightarrow d_o = 0 \\ d_i \geq \text{umbral} \Rightarrow d_o = \text{signo}(d_i) \cdot (|d_i| - \text{umbral}) \end{cases} \quad (6.34)$$

Su implementación no produce las discontinuidades presentes en el umbral duro, por lo cual es la más comúnmente utilizada en procesos de suavizado. Varios autores han implementado este método con una magnitud de umbral en función de la media absoluta de los coeficientes *wavelet* de primer nivel y del logaritmo de la cantidad de muestras de la señal a suavizar [56]-[58].

**Desplazamiento Cíclico:** Este método, también conocido como *Giro Cíclico* y descrito en [59], aprovecha el hecho que la DWT es variante a la translación, y se

propone implementar una mejor aproximación de una señal altamente ruidosa. Para lograrlo, se define un operador de desplazamiento  $D_i$ :

$$D_i[vib] = vib[n - i] \quad (6.35)$$

Mediante  $D_i$  se desplaza la señal de vibración  $i$  muestras, de manera cíclica de modo que las  $i$  muestras finales son trasladadas al inicio de la señal. El procedimiento es realizar una descomposición *wavelet*, una umbralización (suave o dura) y una reconstrucción *wavelet* para cada desplazamiento realizado. Finalmente, se hace un promedio general a partir de las estimaciones obtenidas para lograr una señal mucho más aproximada que la alcanzada por los procesos típicos de umbralización. Una de sus desventajas es que este proceso se realiza un total de  $N$  veces, siendo  $N$  el total de muestras de la señal, por lo cual puede no ser conveniente para señales con un amplio número de muestras.

Otros métodos de umbralización citados en la bibliografía son el obtenido mediante reglas de reducción de Bayes y el método de Organización de Espigas [60].

**Método propuesto:** Como se ha indicado, los autores consultados aplican la umbralización sólo sobre los coeficientes de aproximación o sólo sobre los de detalle, con lo que sucede que mientras algunos coeficientes se mantienen (ya sea inalterados o linealmente modificados), el resto de coeficientes son despreciados. Debido a ello se presentan variaciones considerables en la señal suavizada aun para el caso del umbral suave. Para solucionar este problema, en esta tesis se propone generar la señal de vibración suavizada con base a los coeficientes *wavelet* de aproximación inalterados y con un escalamiento de los coeficientes *wavelet* de detalle mediante un factor de reducción  $r$ , el cual depende del nivel de descomposición wavelet. Este factor  $r$  se encuentra determinado por (6.36):

$$d_o = d_i \cdot r = d_i(1 - K^n); n = 1, 2, 3, \dots \quad (6.36)$$

$n = \text{nivel de descomposición wavelet}$

El valor de  $K$  es definido por el usuario y se encuentra en el intervalo  $[0, 1]$ . Esto significa que para los primeros niveles de detalle (donde se presentan las

frecuencias más altas, que son las más afectadas por ruido de medida), se realizará una mayor reducción mientras que para niveles de detalle superiores (los cuales se obtienen de niveles inferiores de aproximación) se aplicará una reducción de menor magnitud.

Este método propuesto se ha validado en [26], para eliminación de ruido de la etapa de conmutación.

### **Indicadores para la selección de umbral**

La wavelet madre elegida para el análisis de la señal de vibración (bior 3.3) es ortogonal, por lo que preserva el ruido blanco gaussiano, y este ruido hace difícil localizar el instante en el que se produce el máximo de los impulsos de vibración. Para una mejor localización de algunos de los impulsos en la señal de vibración es necesario aplicar un umbral que permita la extracción de la información relevante y descartar el resto.

En esta tesis, se utilizó un umbral variable, basado en el valor eficaz de la envolvente de la señal, ya que los impulsos de vibración cambian mucho de una maniobra a la siguiente, de modo que un filtrado con un umbral fijo o basado en la amplitud de la señal de vibración no sería adecuado. Algunos de los indicadores utilizados para determinar el valor más adecuado del umbral fueron:

Energía preservada en la señal ( $E_p$ ): Mide la porción de la energía preservada en la señal después de aplicar el umbral

$$E_p = \frac{\sum_{i=1}^N [env_{th}[i]]^2}{\sum_{i=1}^N [env[i]]^2} \times 100\% \quad (6.37)$$

Error cuadrático medio (MSE): Este indicador es proporcional a la distorsión introducida por el umbral, por lo tanto debe ser lo más bajo posible.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [env[i] - env_{th}[i]]^2 \quad (6.38)$$

Relación señal ruido (SNR): Este indicador mide la proporción de ruido presente en la señal.

$$SNR(db) = 10 \log \frac{\sum_{i=1}^N [env[i]]^2}{\sum_{i=1}^N [env[i] - env_{th}[i]]^2} \quad (6.39)$$

Por tanto, la elección del umbral está basada en capturar el mayor porcentaje de energía posible con el menor valor de MSR y con un valor adecuado de SNR.

A título de ejemplo, uno de los primeros trabajos de esta tesis fue la obtención de los instantes en los cuales se producían los máximos de la señal de vibración del intervalo correspondiente a la actuación del conmutador [26]. Para escoger el umbral más adecuado para la etapa de conmutación de la señal de vibración, se evaluaron 72 señales de vibración. Este umbral fue aplicado sobre la transformada wavelet de la envolvente de la señal ( $env$ ), obteniéndose una señal *umbralizada* ( $env_{th}$ ). La Figura 6.9 muestra los valores de  $E_p$  y MSE en función del valor del umbral escogido para umbralizar los coeficientes de la etapa de conmutación. El valor de umbral apropiado está en el rango de 0.8% a 1.3% del valor eficaz de la envolvente de la señal.

Para un umbral del 1%, Los valores promedios después de evaluar 72 señales de vibración fueron:  $E_p = 97.59\%$ ,  $MSE = 1.28E-08$  con un  $SNR = 36.55db$ .

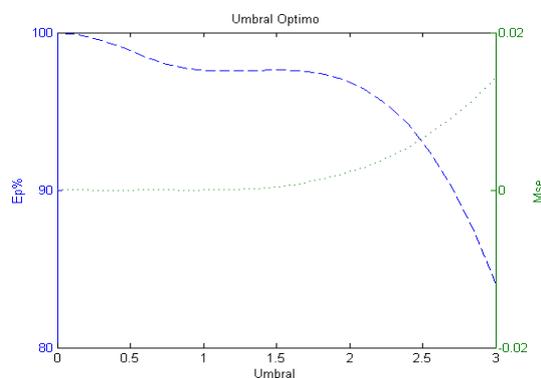


Figura 6.9. Energía preservada (línea verde) y MSE en función del umbral



De la misma forma, al abordar la detección de impulsos de toda la señal de vibración, el valor de umbral se tomo igual al 0.6% del valor eficaz de la envolvente, lo que corresponde a un  $E_p=99\%$ . Esto se hizo así porque se requería conservar todos los impulsos representativos de la señal de vibración y se comprobó que los impulsos 3 y 4 de la señal de vibración (Tabla 6.1) son muy sensibles al valor de umbral escogido.

### Aplicación del filtrado Spline a la señal de vibración

El término Spline hace referencia a una amplia clase de funciones que son utilizadas en aplicaciones que requieren la interpolación de datos y/o un alisado de la interpolación. El proceso de interpolación mediante polinomios consiste en la búsqueda de un polinomio que permita una aproximación a la función a interpolar dentro de un margen de tolerancia especificado. La calidad de la interpolación no necesariamente mejora con un incremento del grado del polinomio utilizado, ya que al aumentar el grado muchas veces el resultado tiende a ser más oscilante y puede derivar en inestabilidad numérica.

La interpolación segmentaría, también conocida como interpolación *Spline* surgió en 1946 gracias al trabajo de I. J. Schoenberg [61], y se enfoca no en la búsqueda de un único polinomio de aproximación, sino en una interpolación polinómica por secciones.

El filtrado Spline fue utilizado solamente en el análisis de impulsos de la zona de actuación del conmutador (impulso 5 en la tabla 6.1). Para el resto de la señal, el ruido presente era menor, de modo que no fue preciso emplear un filtrado Spline para su tratamiento<sup>11</sup>. En aquellos casos en los que se aplica Spline, el proceso seguido fue el siguiente:

Se busca primeramente describir una señal basada en los máximos locales presentes en la envolvente de vibración dentro de un número específico de muestras.

Una vez definida esta señal, se aplica el proceso de interpolación sobre ella. Este proceso implica la búsqueda de una envolvente aún más suavizada, que varía de acuerdo a los máximos locales de la envolvente original.

---

<sup>11</sup> Téngase en cuenta que siempre que se introduce un filtrado, se altera la señal, de forma que la ubicación del máximo cambia en mayor o menor medida



## Capítulo 7

# RESULTADOS ESTUDIO EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se exponen los resultados de los análisis realizados a las señales de vibración obtenidas de la forma indicada en los apartados 4.7.1 y 4.7.2, con el fin de detectar averías en el cambiador de tomas en carga. En primer lugar se expone el análisis en frecuencia de las señales de vibración y la información que es posible extraer de éste. En segundo lugar se expone el análisis tiempo-frecuencia utilizando transformada corta de Fourier y el análisis tiempo-frecuencia utilizando la transformada Wavelet.

Por último se presenta la determinación de los tiempos característicos entre impulsos de vibración, así como el tratamiento estadístico de los resultados.

Antes de realizar los análisis anteriormente mencionados sobre la señal de vibración es importante resaltar la importancia en la interpretación de los registros de vibración de la actuación o no actuación del selector. Para ello, y a manera de ejemplo, la Figura 7.1 muestra dos trazas de vibraciones tomadas cuando no actúa el selector (cambio de toma 3-4-3) y cuando actúa el selector (cambio de toma 2-3-4).

Como se aprecia en la Figura 7.1a, cuando no actúa el selector los impulsos 2, 3 y 4 desaparecen de la señal de vibración, dado que, al invertirse el sentido de giro, la operación del elemento con vaciado interior impide que actúe el selector, dando origen a un nuevo impulso llamado 2a (apartado 4.5.3). Además aparece un retardo de tiempo, de aproximadamente 2 segundos, entre el arranque del accionamiento a motor y la conmutación, respecto a cuando actúa el selector.

En el presente trabajo de tesis, la detección de averías se realiza a través del patrón de vibraciones. Evidentemente, la detección de averías en el selector debe realizarse a partir de los registros tomados en las transiciones en las que actúe el selector.

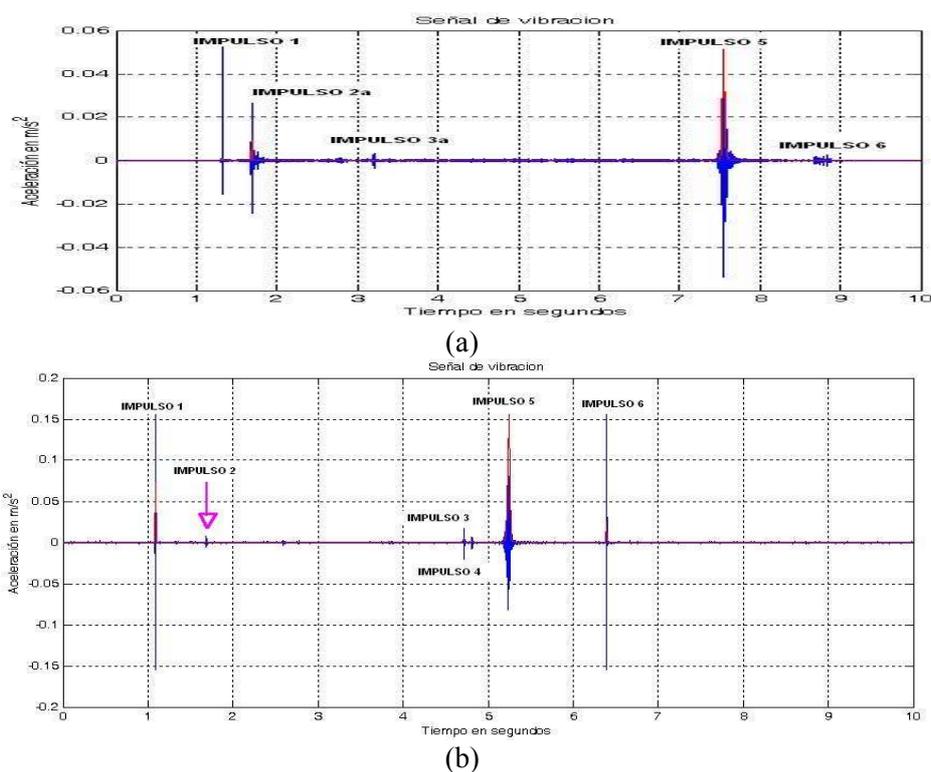


Figura 7.1. Registro de vibraciones en un cambio de tomas en el que no actúa el selector (a) y en un cambio de tomas en el que actúa el selector (b)

### 7.1. Análisis de frecuencias.

La señal de vibración y su correspondiente transformada rápida de Fourier para la señal en buen estado (Figura 7.2) y con diferentes tipos de averías se muestran en las Figura 7.3 a Figura 7.11, las cuales corresponden a:

- Figura 7.3: Holgura en el anclaje de las barras del selector a la estructura.
- Figura 7.4: Contactos fijos del selector flojos.
- Figura 7.5: Muelles del selector sin la tensión adecuada.
- Figura 7.6: Barra de anclaje de llegada inexistente.
- Figura 7.7: Barra de anclaje de partida inexistente
- Figura 7.8: Contactos fijos del selector desgastados.
- Figura 7.9: Contactos fijos del selector erosionados
- Figura 7.10: Amortiguamiento recorrido carro superior del conmutador.
- Figura 7.11: Amortiguamiento leva de arrastre carro superior del conmutador

Cuando se realiza un análisis de frecuencias aplicando la transformada Fourier, cualquier cambio abrupto presente en la señal en el dominio del tiempo se refleja en el dominio de la frecuencia; de forma que a cada señal le corresponde un único espectro en frecuencias. Sin embargo, si se toman dos señales de vibración en las que estos cambios abruptos se encuentren en diferentes instantes de tiempo, los espectros de la señal son muy semejantes, de forma que se hace muy difícil determinar a partir del espectro en frecuencias, en qué instante de tiempo se encuentra cada uno de los impulsos (actuación del selector, impulsos 2-3 y 4, actuación del conmutador, impulso 5, y el comienzo y fin de la señal, impulsos 1 y 6) dentro de la señal. Lo dicho se puede apreciar en las Figura 7.2 a Figura 7.7, pues si bien los registros temporales difieren en la presencia o no de determinados impulsos, los registros de frecuencias son bastante semejantes.

Del análisis de frecuencias mostrado en dichas figuras se desprende que para las señales correspondientes a cambiador en buen estado, con holgura en el anclaje de la barras del selector a la estructura, con contactos fijos del selector flojos, con muelles del selector sin la tensión adecuada y con una barra de anclaje (ya sea de llegada o de partida) inexistente, las frecuencias predominantes son 1kHz, 4kHz, 7kHz, 10kHz, 15kHz y 18kHz. No se observan diferencias especialmente significativas entre los espectros de estos seis casos.

Para las averías correspondientes a contactos del selector desgastados, contactos erosionados y amortiguamiento en el recorrido del carro superior o en la leva de arrastre del carro superior del cambiador de tomas en carga, aparece un grupo de frecuencias dominantes entre 0.5kHz y 1kHz.

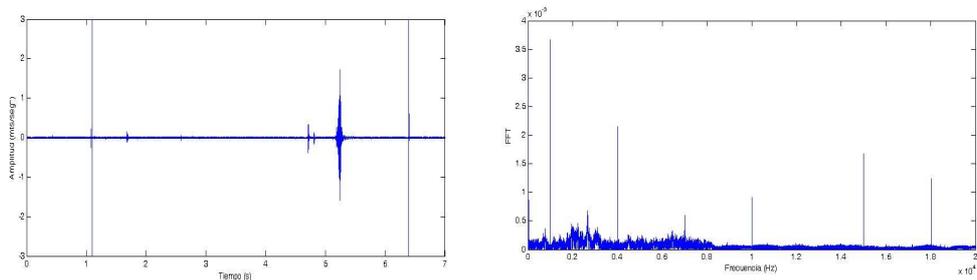
Con base en lo anterior se puede clasificar las señales de vibración en dos grupos: aquel en el que los de espectros de frecuencias dominantes está entre 0.5kHz y 1kHz y aquellos de frecuencias de 1kHz a 18KHz. En la tabla 7.1 se presenta un resumen de dicha clasificación.

Las conclusiones obtenidas en este apartado a partir del análisis de los espectros de las señales de vibración con diferentes tipos de averías no tienen una resolución suficientemente precisa como para ser utilizadas en un sistema de diagnóstico de averías en cambiadores de tomas en carga. Por ello, en los apartados que siguen se analiza la

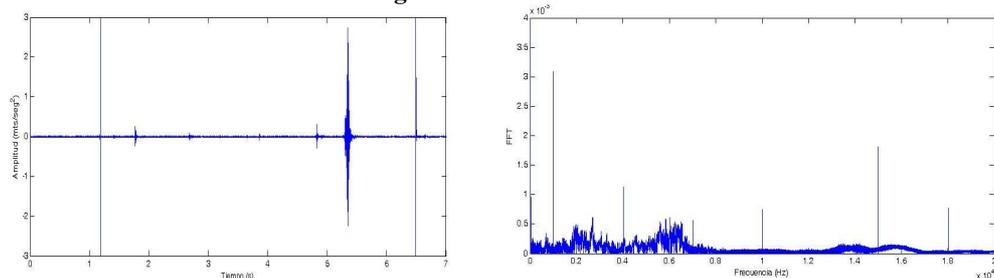


señal de vibraciones con técnicas tiempo-frecuencia para obtener indicadores de diagnóstico más precisos.

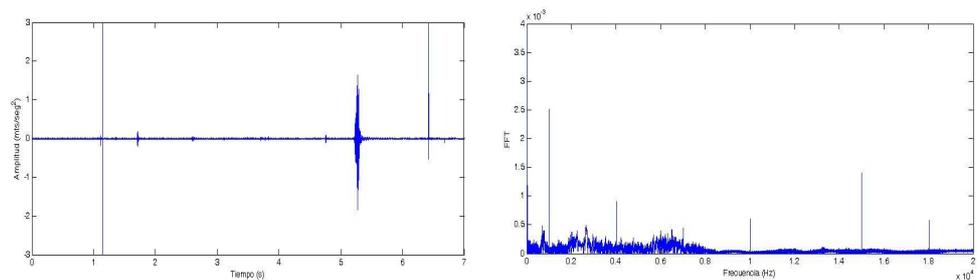
El análisis de la señal de vibración mediante técnicas tiempo-frecuencia (Transformada de Fourier de Tiempo Corto y transformada Wavelet) busca determinar indicadores que permitan diagnosticar con mayor precisión la condición del cambiador de tomas en carga.



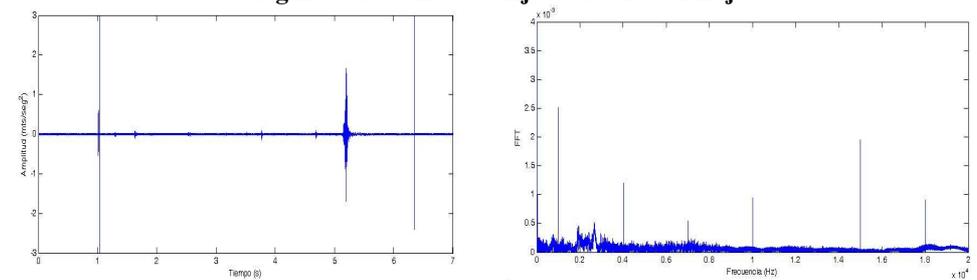
**Figura 7.2. Buen estado**



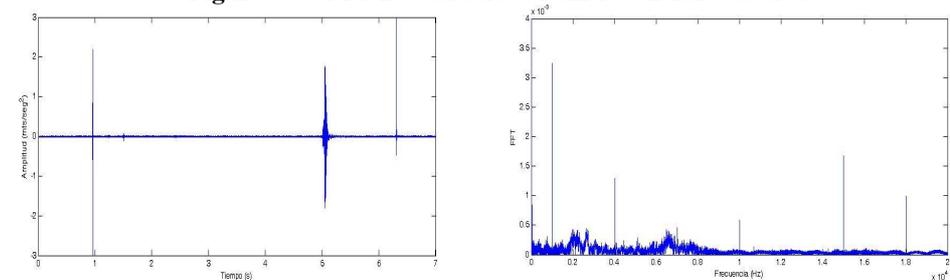
**Figura 7.3. Holgura en el anclaje de las barras del selector a la estructura**



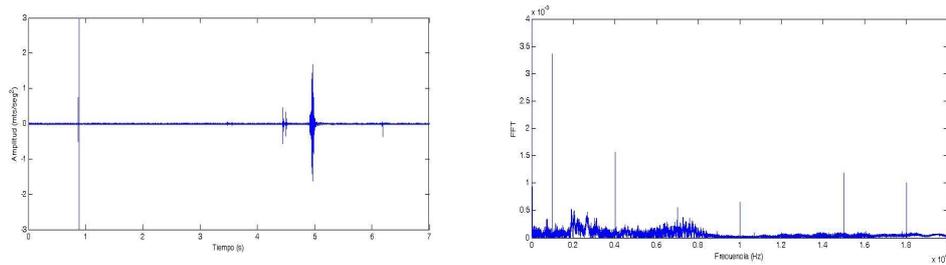
**Figura 7.4. Contactos fijos del selector flojos**



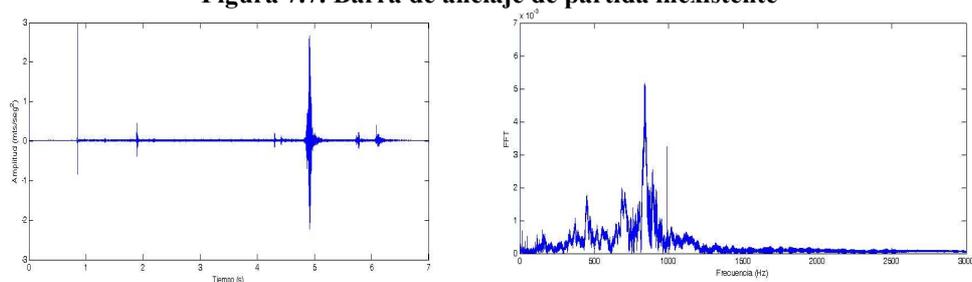
**Figura 7.5. Muelles del selector sin la tensión adecuada**



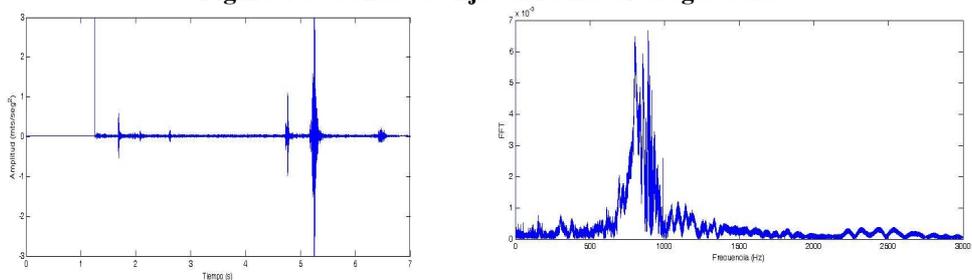
**Figura 7.6. Barra de anclaje de llegada inexistente**



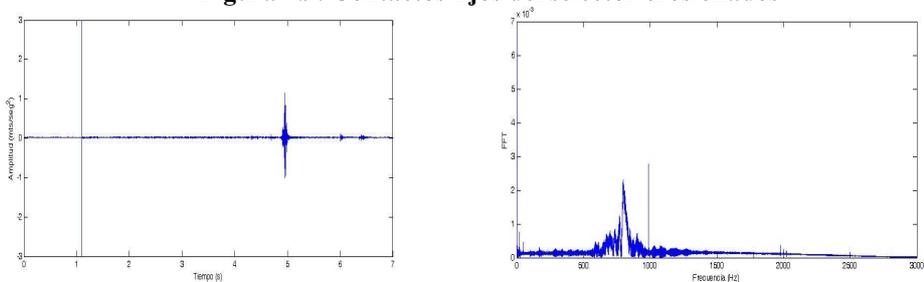
**Figura 7.7. Barra de anclaje de partida inexistente**



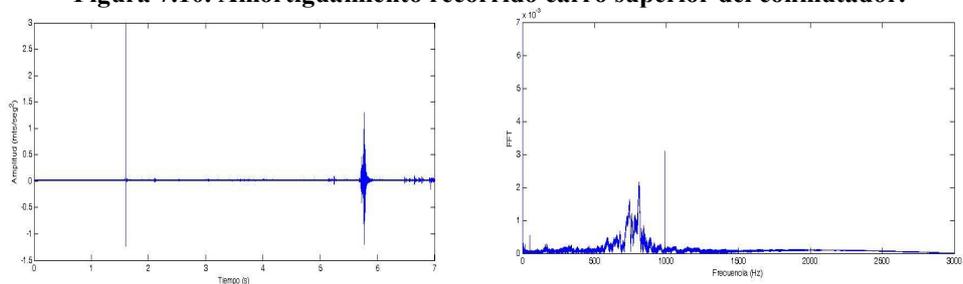
**Figura 7.8. Contactos fijos del selector desgastados**



**Figura 7.9. Contactos fijos del selector erosionados**



**Figura 7.10. Amortiguamiento recorrido carro superior del conmutador.**



**Figura 7.11. Amortiguamiento leva de arrastre carro superior del conmutador**



**Tabla 7.1. Detección de averías en cambiadores de tomas en carga basada en el análisis de las frecuencias dominantes presentes en la señal de vibración en buen estado y con averías**

Grupo	Avería	Figura	Frecuencias dominantes(Hz)
1	Cambiador de tomas en buen estado	7.2	1kHz,4kHz,7kHz,10kHz,15kHz y 18 kHz
	Holgura en el anclaje de las barras del selector a la estructura	7.3	
	Contactos fijos del selector flojos	7.4	
	Muelles del selector sin la tensión adecuada	7.5	
	Barra de anclaje de llegada inexistente	7.6	
	Barra de anclaje de partida inexistente	7.7	
2	Contactos fijos del selector desgastados	7.8	0.5 Hz a 1khz
	Contactos fijos del selector erosionados	7.9	
	Amortiguamiento recorrido carro superior del conmutador	7.10	
	Amortiguamiento leva de arrastre carro superior del conmutador	7.11	

## 7.2. Análisis tiempo-frecuencia utilizando la transformada de Fourier en tiempo corto (STFT)

El análisis de la señal mediante técnicas tiempo-frecuencia presenta mayores ventajas frente a un estudio de solo frecuencias, ya que proporciona mejores herramientas de decisión para el proceso de diagnóstico.

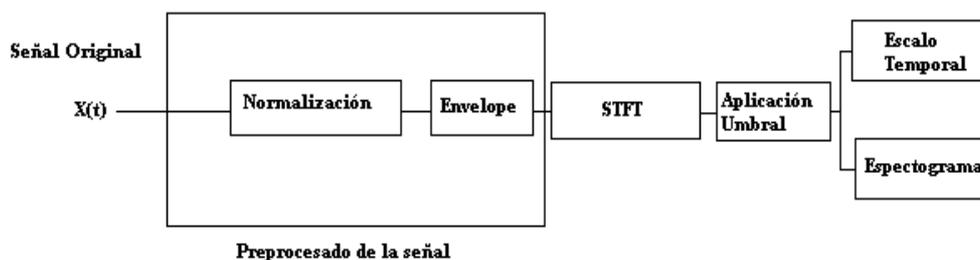


Figura 7.12. Procesamiento de la señal

Como se indicó en el capítulo 6, antes de aplicar la STFT a la señal de vibración se realizó un pre-procesado de la señal (Figura 7.12) consistente en normalización y aplicación de la transformada de Hilbert para obtener la envolvente de la señal (Figura 7.13).

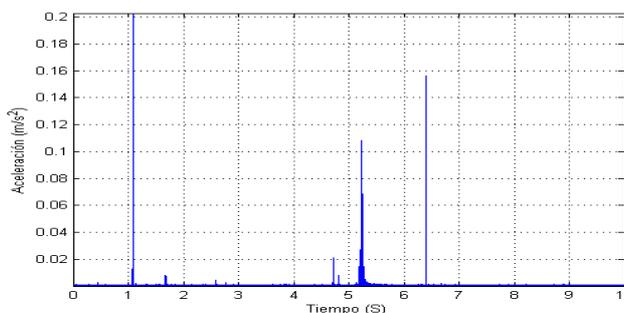


Figura 7.13. Envolvente normalizada de la señal de vibración

Dado que no existe en la literatura científica una metodología para elegir la ventana temporal más adecuada que permita aplicar la transformada corta de Fourier a la señal de vibración objeto de estudio, se ha realizado un estudio, con ayuda del WVTOOL de Matlab, utilizando diferentes ventanas (Barlett, Blackman, Dolph-Chebyshev, Flat top, Gauss-Weierstrass, Hamming, Kaiser-Bessel, Rectangular y Von Hann), que, además de tener su implementación propia en Matlab, habitualmente proporcionan buenos resultados.

Como conclusión del estudio se encontró que la ventana que mejor comportamiento presenta para este caso es la ventana de Hamming.

Para la correcta elección de la ventana es fundamental tener en cuenta el ancho de la misma (resolución temporal). El efecto de truncamiento y la resolución en frecuencias se encuentran estrechamente relacionados con el ancho de la ventana.

En la aplicación de la transformada corta de Fourier, con el fin de tener una resolución adecuada en la detección de los impulsos fundamentales de la señal de vibración, se tomó un ancho de ventana Hamming de 15 muestras.

Los impulsos fueron hallados con base en el concepto de umbral de energía (apartado 6.5.1). El criterio de escoger el umbral está basado en capturar el mayor porcentaje de energía de la señal de vibración, con el menor valor de distorsión de la señal, es decir menor error cuadrático (MSE) y un valor adecuado de relación señal ruido (SNR). Para elegir el umbral de energía adecuado fue necesario asegurarse que se captaba el mayor porcentaje de energía con el fin de preservar los impulsos 3 y 4 de bajo contenido energético. Pues en la mayoría de los casos se visualizan espurios es decir señales indeseadas presentes en la señal de vibración que parecen impulsos. Estos se descartan al aplicar las técnicas de pre-procesado, eliminación de ruido mediante wavelet y aplicación de el umbral mínimo de energía establecido para ser considerado como impulso.

Cuando el cambiador de tomas está en buen estado el número de impulsos en la señal es 6, sin embargo en caso de caso de averías el número de impulsos cambia. Las vibraciones de un sistema no son absolutamente repetitivas, por lo que si un cambiador de tomas se repite una determinada transición de tomas (por ejemplo 7-8-9) varias veces, en algunas ocasiones aparecen menos (e incluso en alguna ocasión pueden aparecer más) impulsos de los debidos. Por eso, conviene repetir varias veces cada transición y comparar las señales obtenidas entre sí. Una señal de vibraciones no se puede utilizar para al análisis si no es representativa de las vibraciones del sistema.

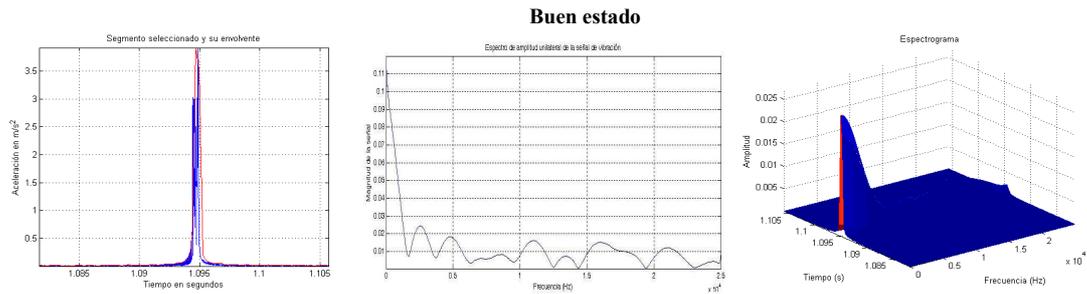
A continuación se presentan los resultados encontrados del análisis de las señales en buen estado y con avería.

En las Figura 7.14 a Figura 7.60, se muestra para cada uno de los impulsos presentes en la señal de vibración (parte izquierda de la figura) la evolución temporal de la señal (en color azul la señal original y en rojo la envolvente) focalizada en el instante de

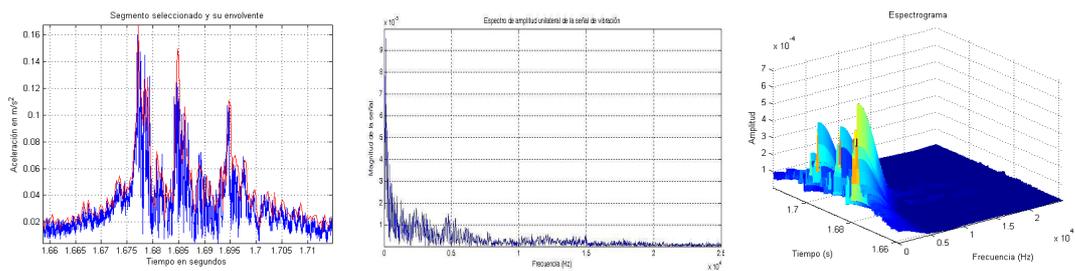


ocurrencia del impulso, las componentes de frecuencias dentro del impulso (parte central) y su correspondiente espectograma (parte derecha de la figura).

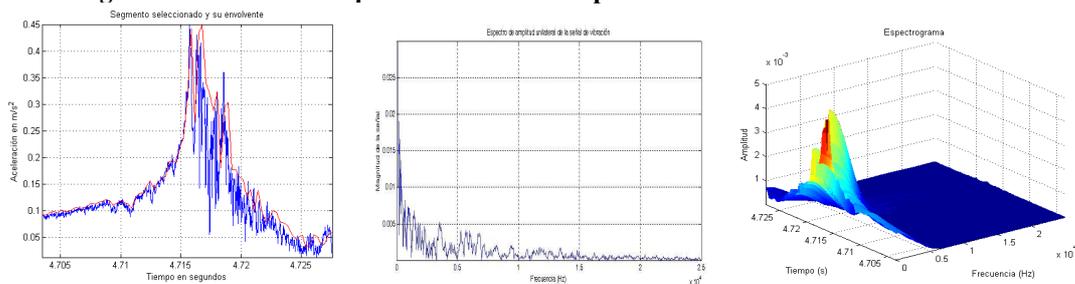
- En las Figuras 7.14 a 7.19 se muestra la información de los impulsos de vibraciones para el caso de un cambiador de tomas en buen estado.
- En las Figuras 7.20 a 7.24 se muestra la información de los impulsos para el caso de un cambiador de tomas con holgura en el anclaje de las barras del selector a la estructura.
- En las Figuras 7.25 a 7.29 se muestra la información de los impulsos para el caso de un cambiador de tomas con contactos fijos del selector flojos.
- En las Figuras 7.30 a 7.33 se muestra la información de los impulsos para el caso de un cambiador de tomas con muelles del selector sin la tensión adecuada.
- En las Figuras 7.34 a 7.37 se muestra la información de los impulsos para el caso de un cambiador de tomas con barra de anclaje de llegada inexistente.
- En las Figuras 7.38 a 7.41 se muestra la información de los impulsos para el caso de un cambiador de tomas con barra de anclaje de partida inexistente.
- En las Figuras 7.42 a 7.47 se muestra la información de los impulsos para el caso de un cambiador de tomas con contactos fijos del selector desgastados.
- En las figura 7.48 a 7.52 se muestra la información de los impulsos para el caso de un cambiador de tomas con los contactos fijos del selector erosionado.
- En las Figuras 7.53 a 7.56 se muestra la información de los impulsos para el caso de un cambiador de tomas con amortiguamiento en el recorrido del carro superior del cambiador.
- En las figura 7.57 a 7.60 se muestra la información de los impulsos para el caso de un cambiador de tomas con amortiguamiento en la leva de arrastre carro superior del conmutador.



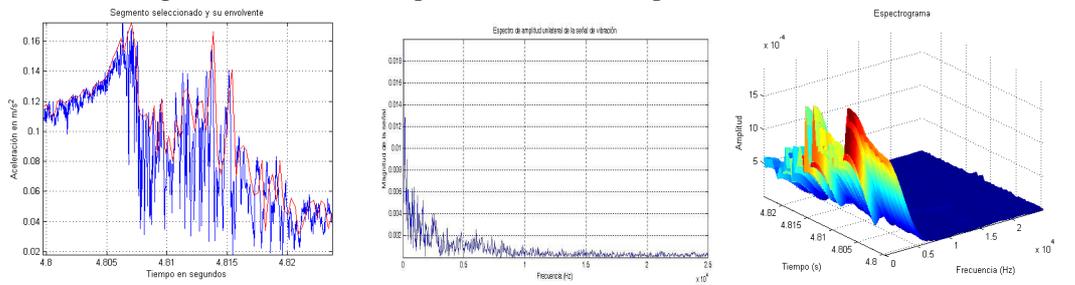
**Figura 7.14. Escala-tiempo- frecuencia del impulso 1: arranque del accionamiento a motor:**



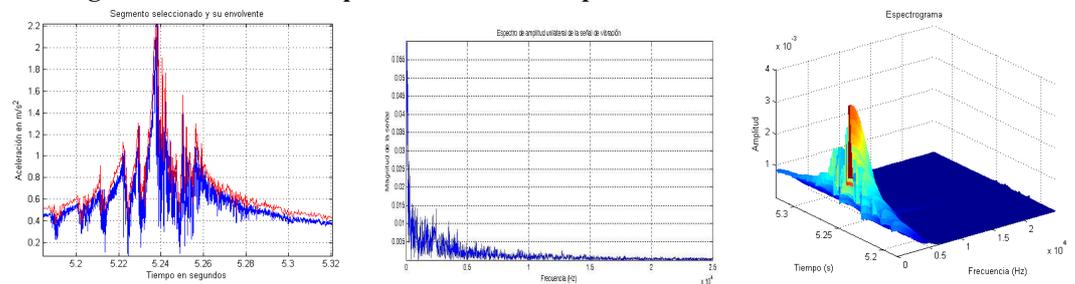
**Figura 7.15. Escala-tiempo frecuencia del impulso 2: inicio actuación cruces de malta**



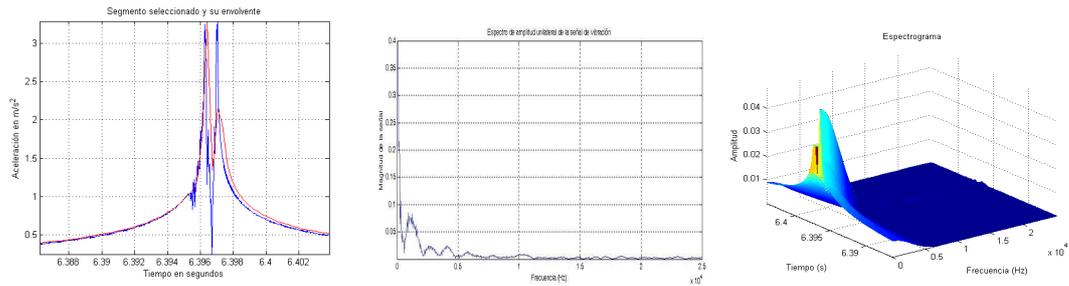
**Figura 7.16. Escala-tiempo frecuencia del impulso 3: actuación del selector**



**Figura 7.17. Escala-tiempo frecuencia del impulso 4: finaliza actuación cruces de malta**

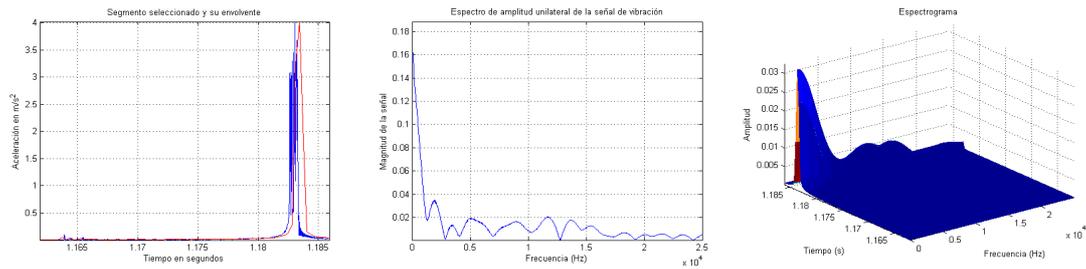


**Figura 7.18. Escala-tiempo frecuencia del impulso 5: proceso de conmutación**

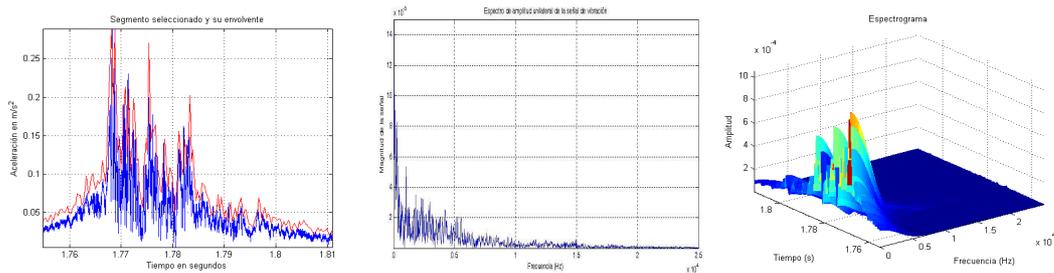


**Figura 7.19. Escala-tiempo frecuencia del impulso 6: parada accionamiento a motor**

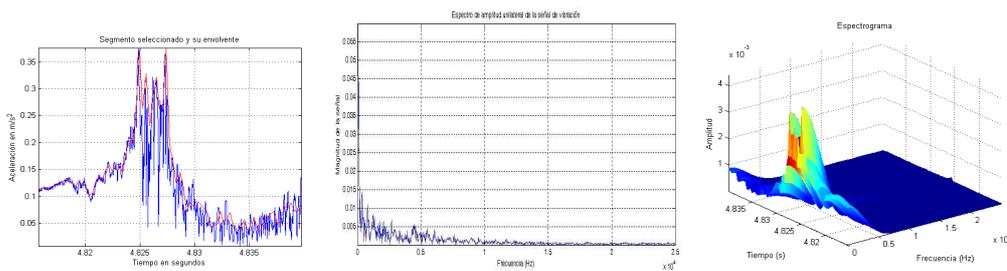
**Holgura en el anclaje de las barras del selector a la estructura**



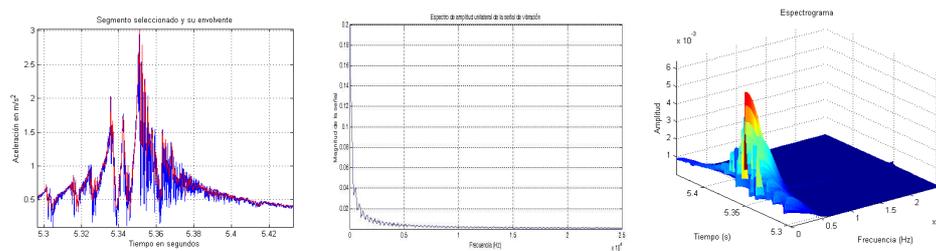
**Figura 7.20. Escala-tiempo frecuencia del impulso 1: arranque accionamiento a motor**



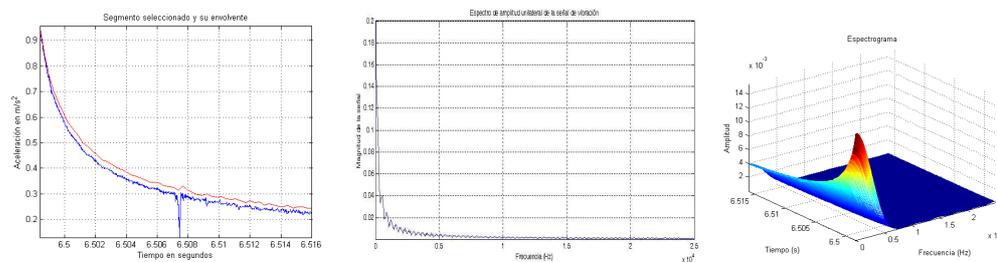
**Figura 7.21. Escala-tiempo frecuencia del impulso 2: inicio actuación cruces de malta**



**Figura 7.22. Escala-tiempo frecuencia del impulso 3: actuación del selector**

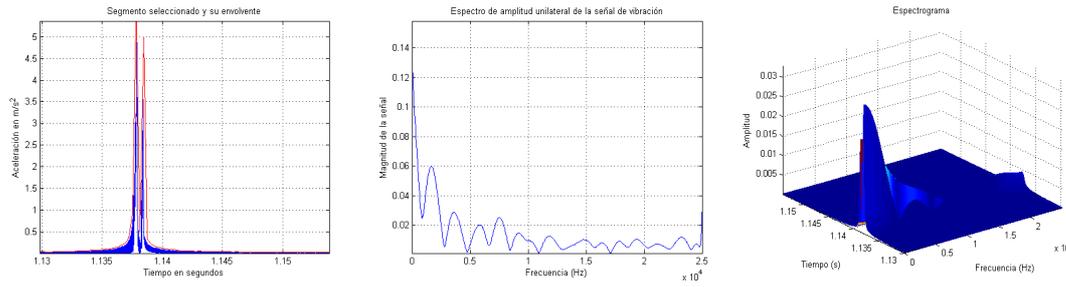


**Figura 7.23. Escala-tiempo frecuencia del impulso 5: proceso de conmutación**

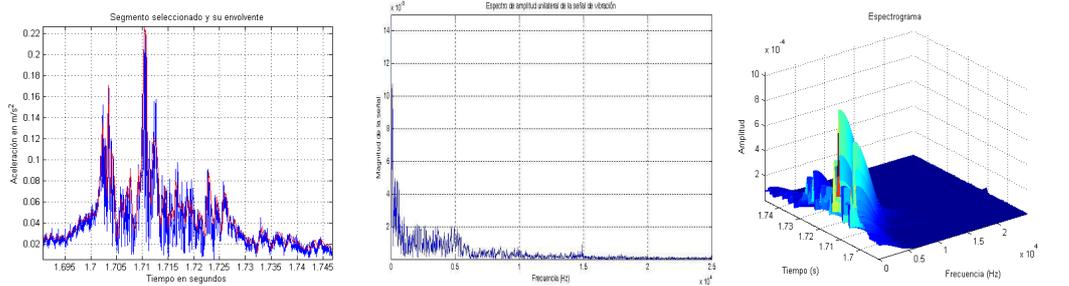


**Figura 7.24. Escala-tiempo frecuencia del impulso 6: parada accionamiento a motor**

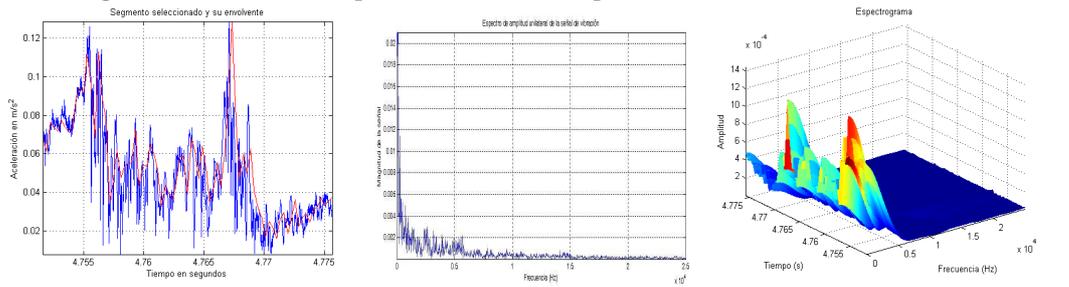
**Contactos fijos del selector flojos**



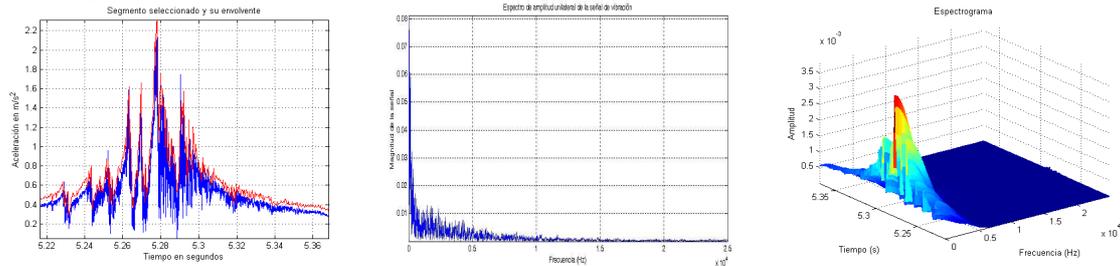
**Figura 7.25. Escala-tiempo frecuencia del impulso 1: arranque accionamiento a motor**



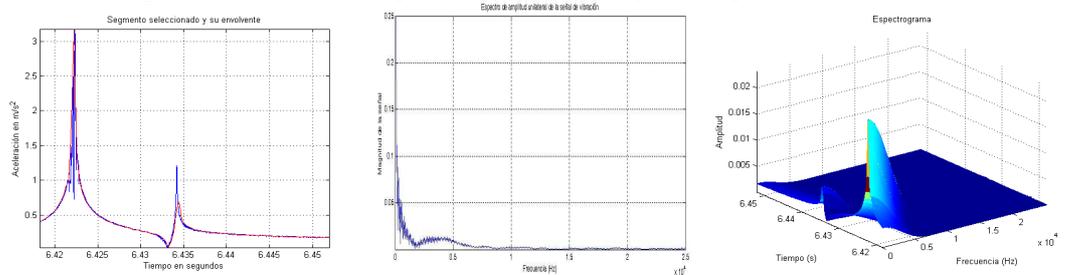
**Figura 7.26. Escala-tiempo frecuencia del impulso 2: inicio actuación cruces de malta**



**Figura 7.27. Escala-tiempo frecuencia del impulso 4: finaliza actuación cruces de malta**

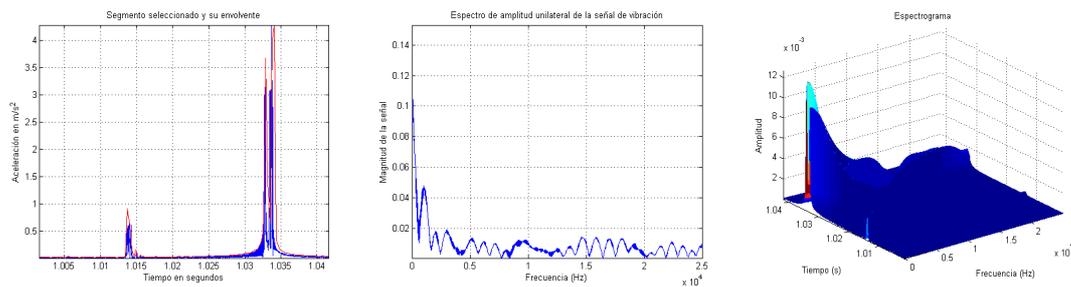


**Figura 7.28. Escala-tiempo frecuencia del impulso 5: proceso de conmutación**

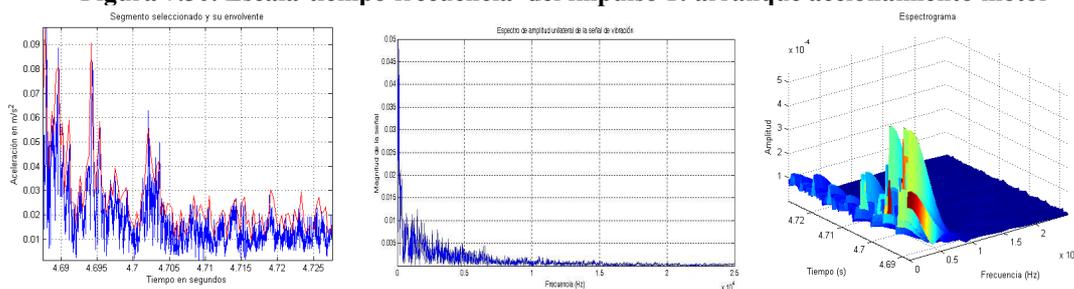


**Figura 7.29. Escala tiempo –frecuencia del impulso 6: parada accionamiento motor**

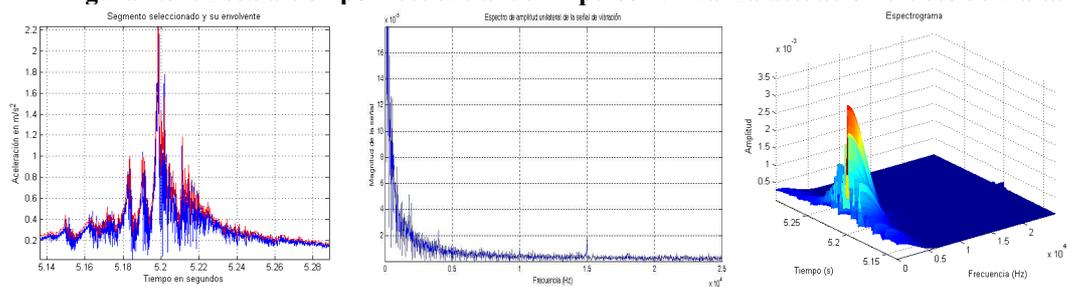
**Muelles del selector sin la tensión adecuada**



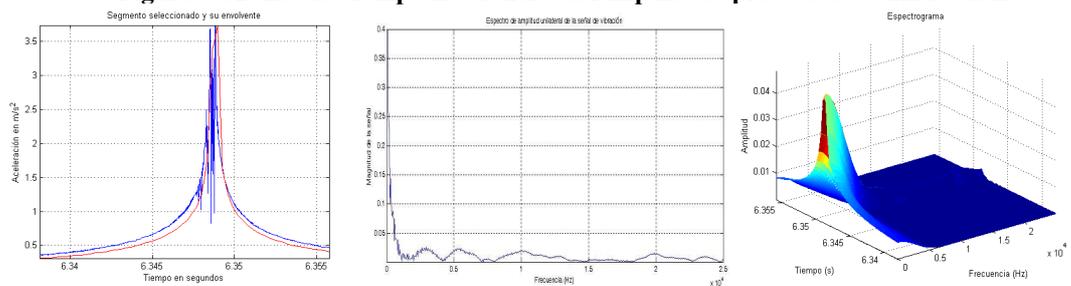
**Figura 7.30. Escala-tiempo frecuencia del impulso 1: arranque accionamiento motor**



**Figura 7.31. Escala-tiempo frecuencia del impulso 4: finaliza actuación cruces de malta**

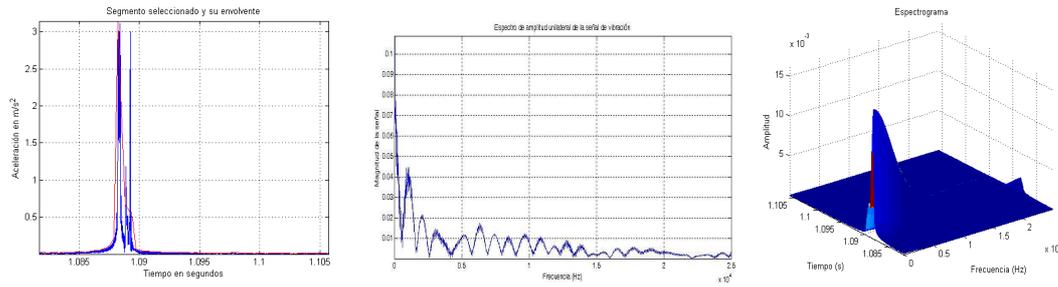


**Figura 7.32. Escala-tiempo frecuencia del impulso 5: proceso de conmutación**

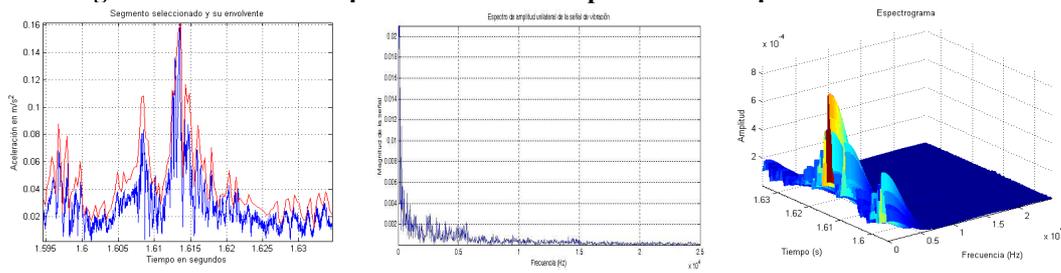


**Figura 7.33. Figura Escala-tiempo frecuencia del impulso 6: parada accionamiento a motor**

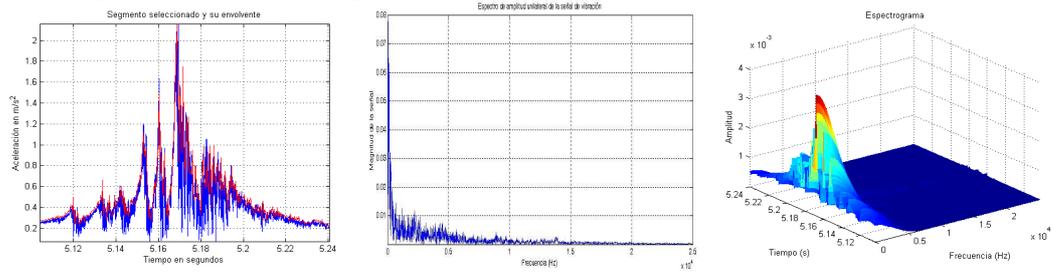
**Barra de anclaje de llegada inexistente**



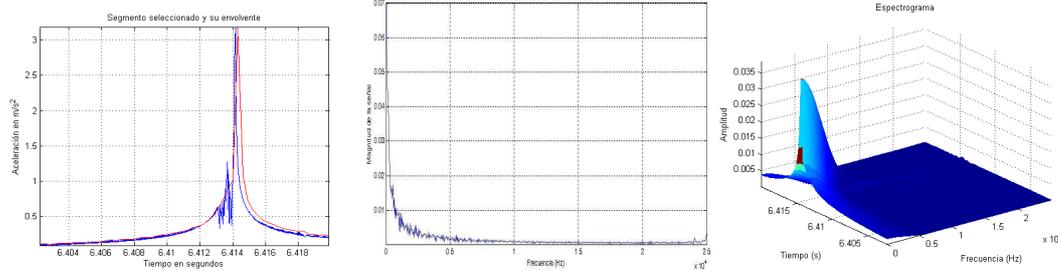
**Figura 7.34. Escala-tiempo frecuencia del impulso 1: arranque accionamiento a motor**



**Figura 7.35. Escala-tiempo frecuencia del impulso 2: inicio actuación cruces de malta**

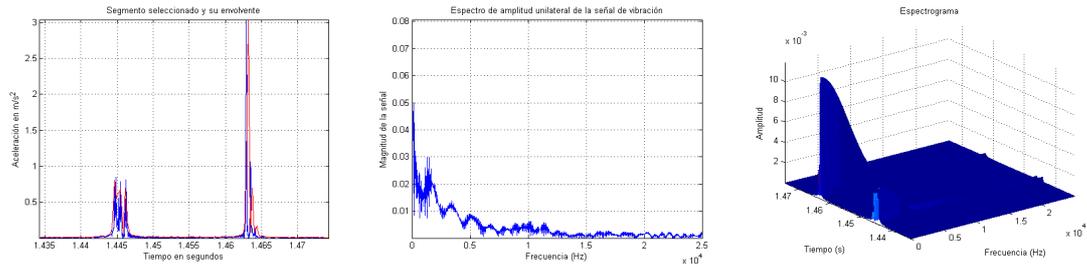


**Figura 7.36. Escala-tiempo frecuencia del impulso 5: proceso de conmutación**

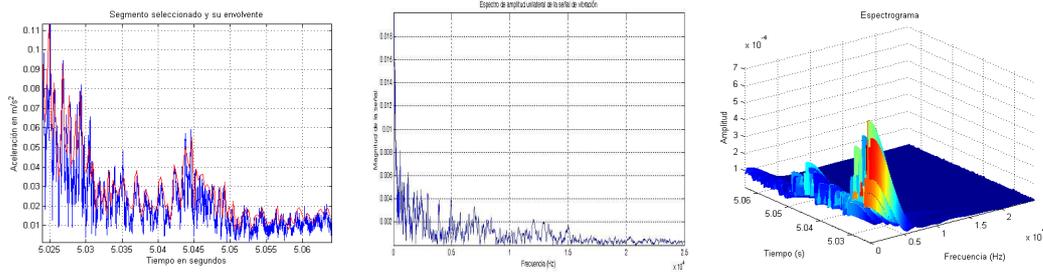


**Figura 7.37. Escala-tiempo frecuencia del impulso 6: parada accionamiento a motor**

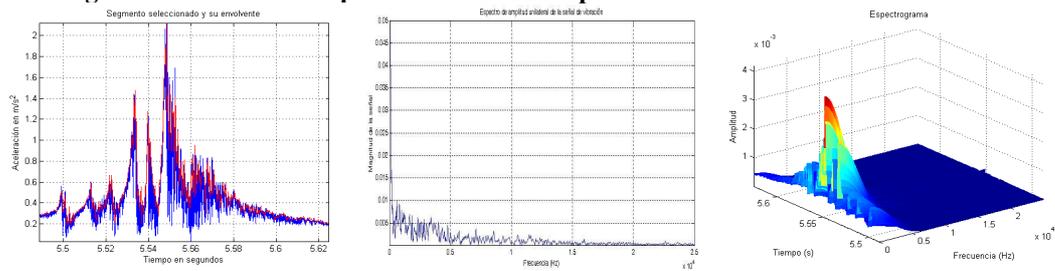
**Barra de anclaje de partida inexistente**



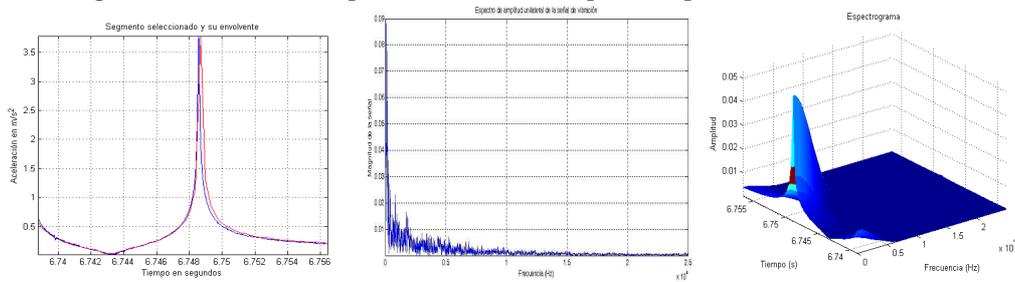
**Figura 7.38. Escala-tiempo frecuencia del impulso 1: arranque accionamiento a motor**



**Figura 7.39. Escala-tiempo frecuencia del impulso 4: finaliza actuación cruces de malta**



**Figura 7.40. Escala-tiempo frecuencia del impulso 5: proceso de conmutación**



**Figura 7.41. Escala-tiempo frecuencia del impulso 6: parada accionamiento a motor**

Contactos fijos del selector desgastados

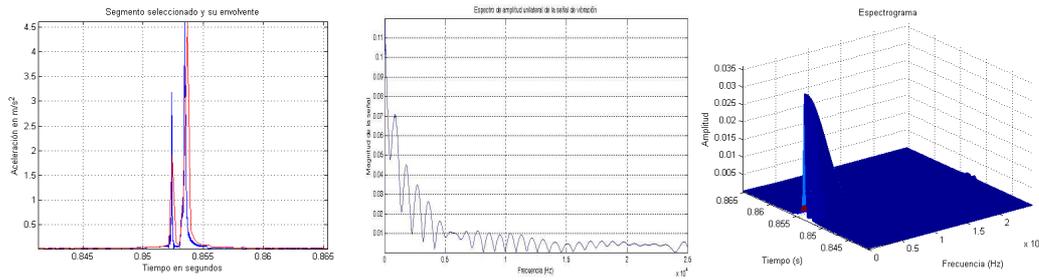


Figura 7.42. Escala-tiempo frecuencia del impulso 1: arranque accionamiento motor

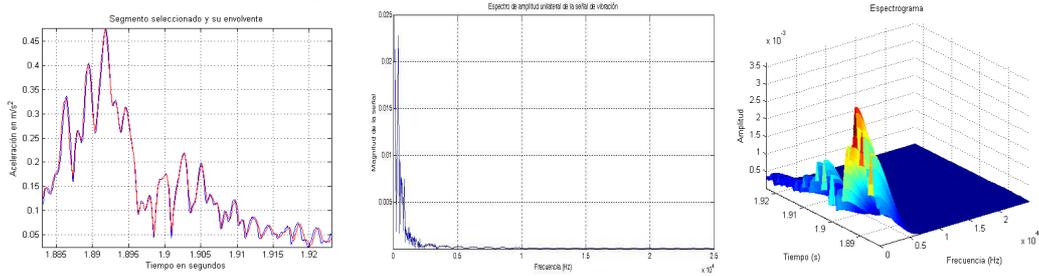


Figura 7.43. Escala-tiempo frecuencia del impulso 2: inicio actuación cruces de malta

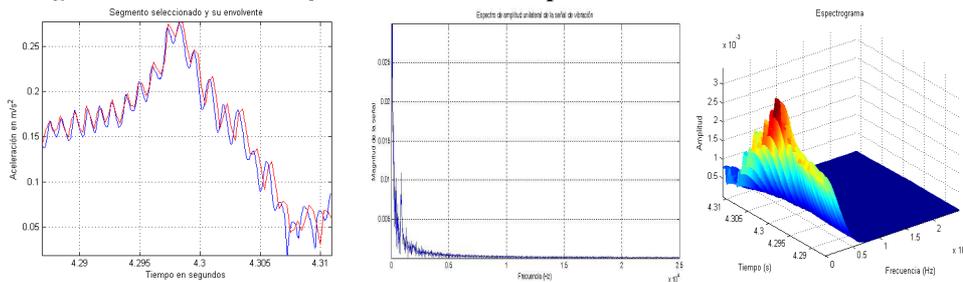


Figura 7.44. Escala-tiempo frecuencia del impulso 3: actuación del selector

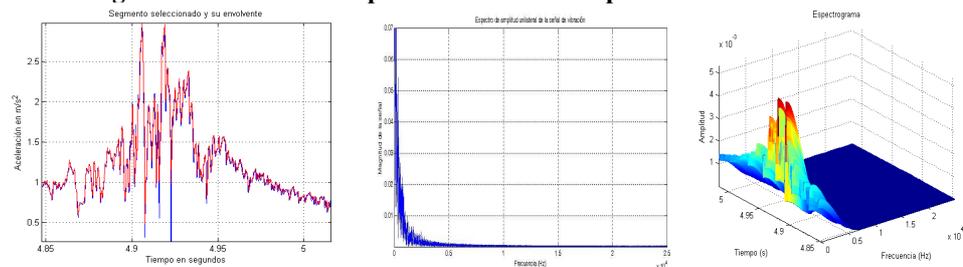


Figura 7.45. Escala-tiempo frecuencia del impulso 4: finaliza actuación de cruces de malta

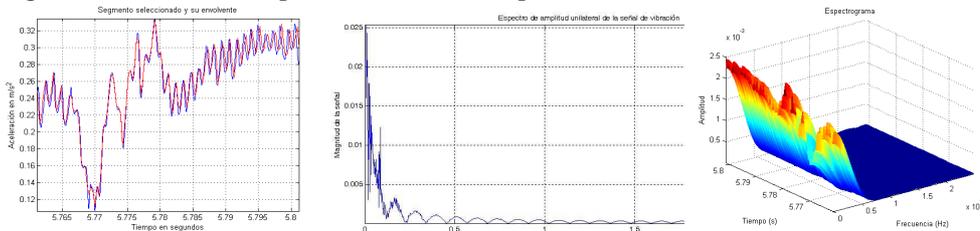


Figura 7.46. Escala-tiempo frecuencia del impulso 5: proceso de conmutación

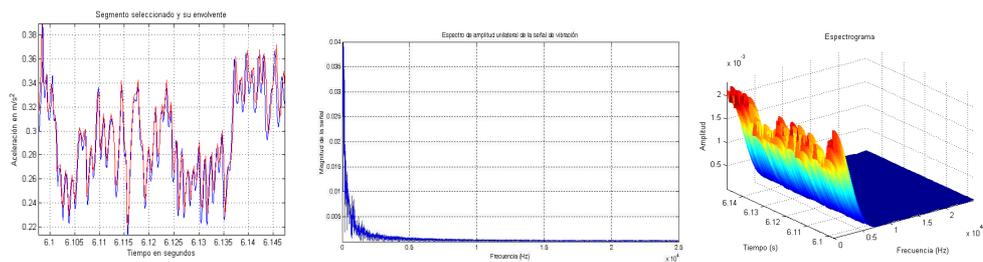
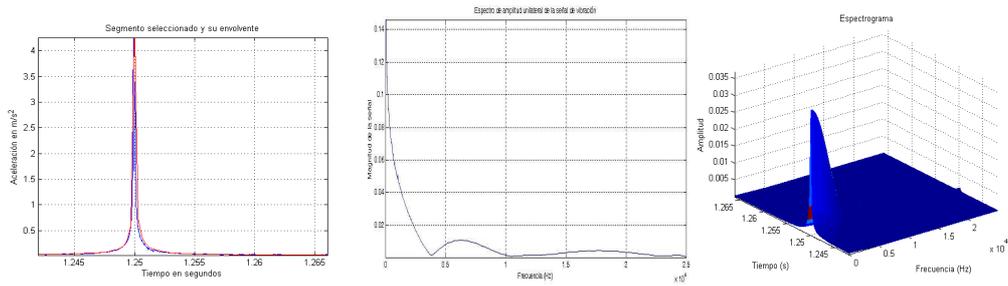
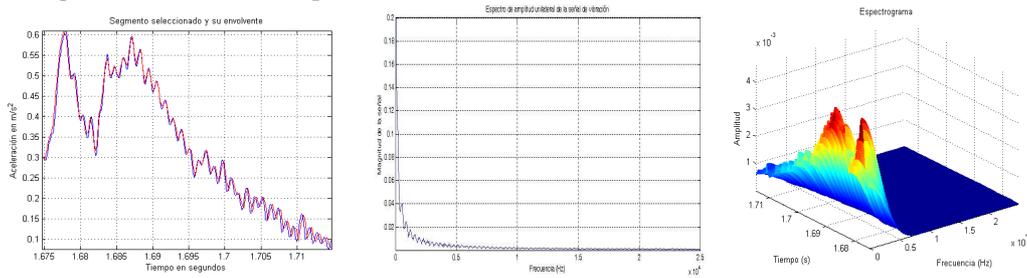


Figura 7.47. Escala-tiempo frecuencia del impulso 6: parada accionamiento motor

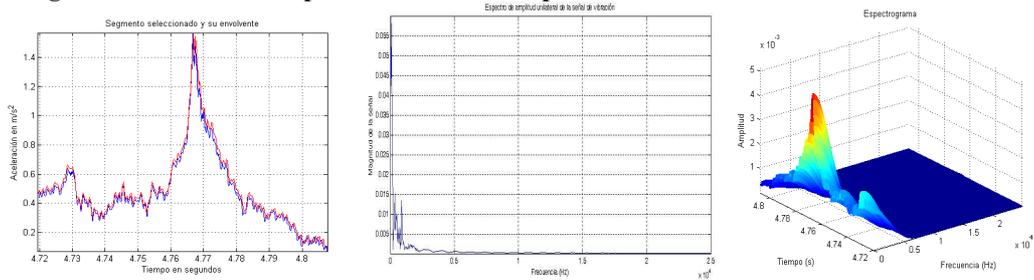
**Contactos fijos del selector erosionados**



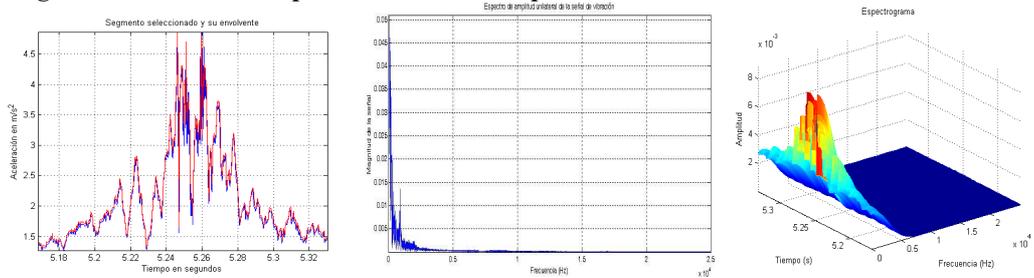
**Figura 7.48. Escala-tiempo frecuencia del impulso 1: arranque accionamiento motor**



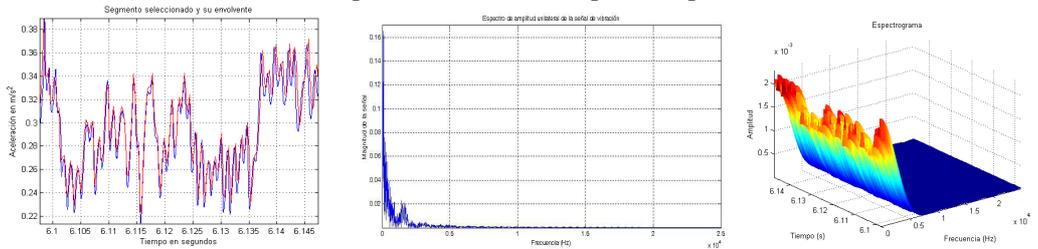
**Figura 7.49. Escala-tiempo frecuencia del impulso 2: inicio actuación cruces de malta**



**Figura 7.50. Escala-tiempo frecuencia del impulso 4: finaliza actuación cruces de malta**

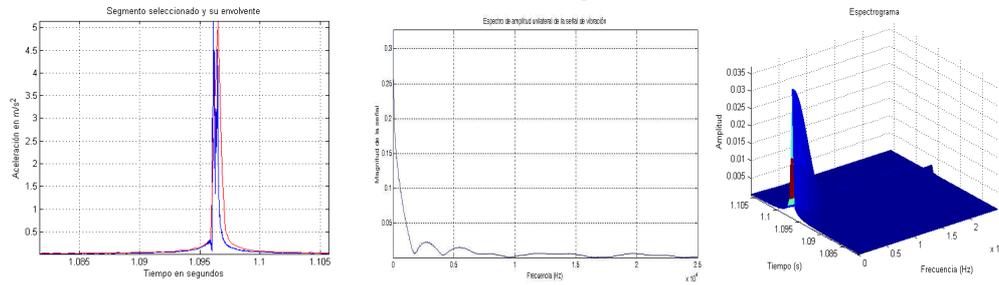


**Figura 7.51. Escala-tiempo frecuencia del impulso 5: proceso de conmutación**

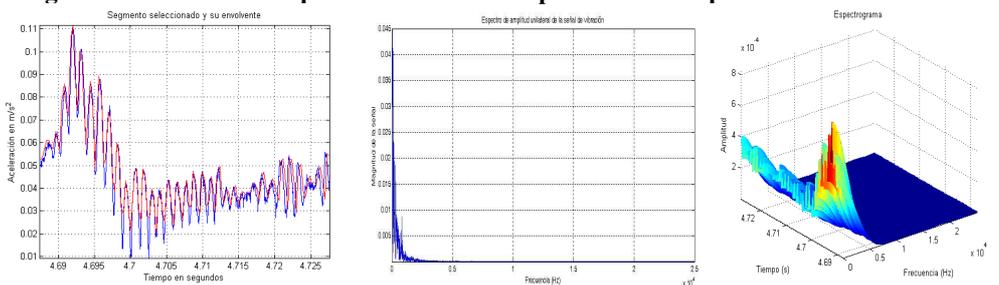


**Figura 7.52. Escala-tiempo frecuencia del impulso 6: parada accionamiento a motor**

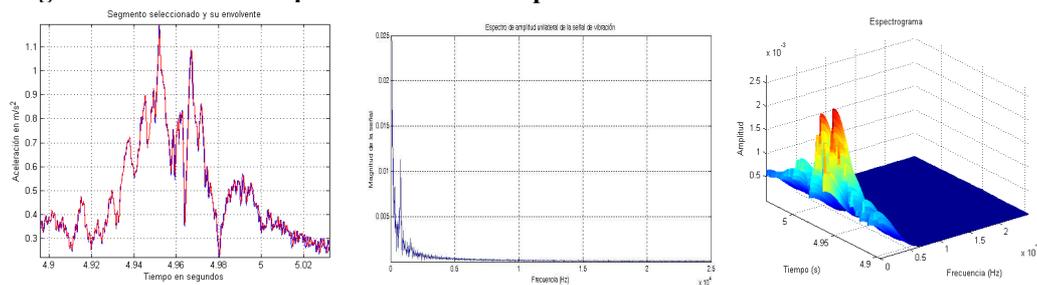
**Amortiguamiento recorrido carro superior del conmutador**



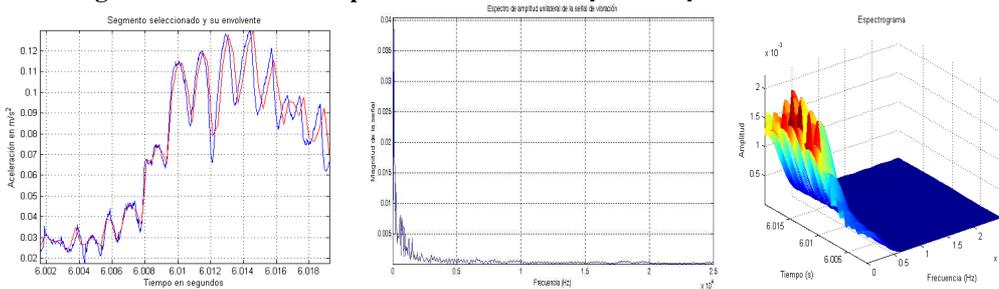
**Figura 7.53. Escala-tiempo frecuencia del impulso 1: arranque accionamiento a motor**



**Figura 7.54. Escala-tiempo frecuencia del impulso 4: finaliza actuaci cruces de malta**

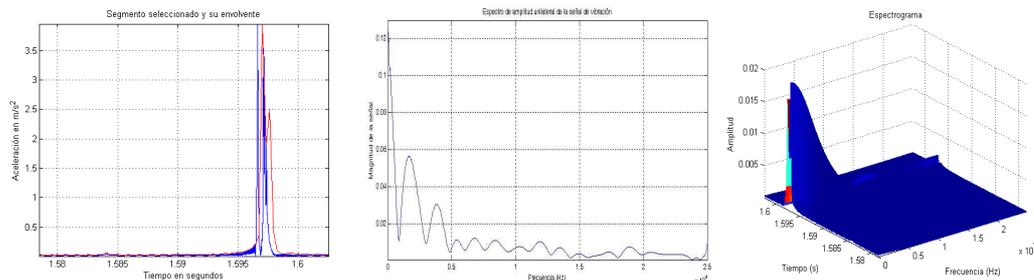


**Figura 7.55. Escala-tiempo frecuencia del impulso 5: proceso de conmutaci3n**

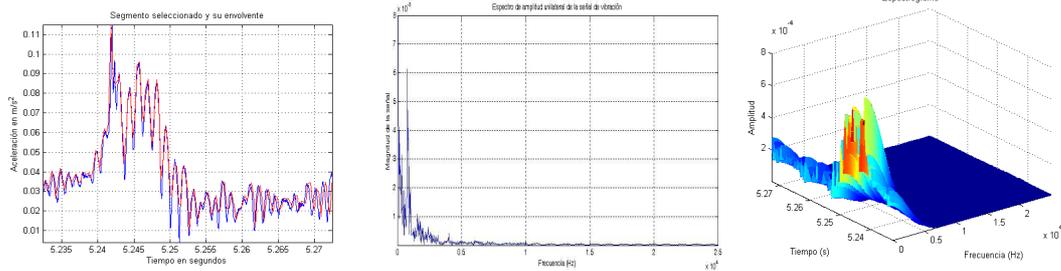


**Figura 7.56. Escala-tiempo frecuencia del impulso 6: parada accionamiento a motor**

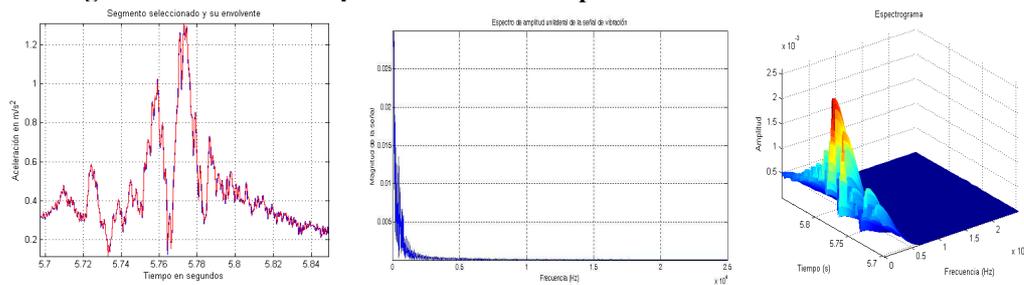
**Amortiguamiento leva de arrastre carro superior del conmutador**



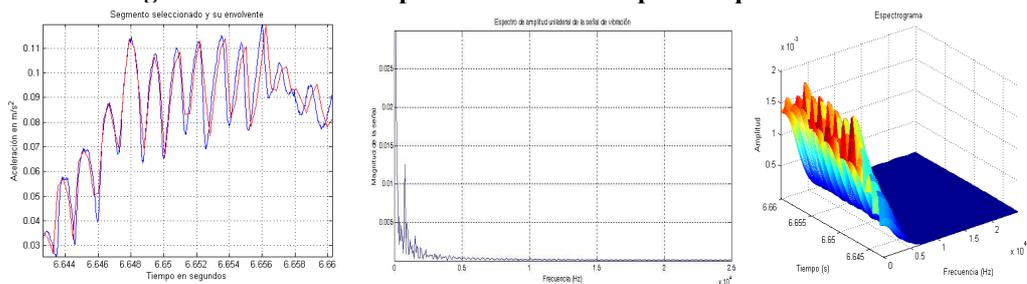
**Figura 7.57. Escala-tiempo frecuencia del impulso 1: arranque accionamiento a motor**



**Figura 7.58. Escala-tiempo frecuencia del impulso 4: finaliza actuación cruces de malta**



**Figura 7.59. Escala-tiempo frecuencia del impulso 5: proceso de conmutación**



**Figura 7.60. Escala-tiempo frecuencia del impulso 6: parada accionamiento a motor**



A partir de los resultados encontrados en el análisis tiempo-frecuencia utilizando la transformada corta de Fourier aplicada a la señal de vibración se puede inferir que cuando existe una avería en el selector existe una variación en el espectro de frecuencias asociado a dichos impulsos.

En el caso de contactos del selector desgastados, contactos erosionados y amortiguamiento en el recorrido del carro superior o en la leva de arrastre del carro superior del cambiador de tomas en carga, el espectro del impulso 2 es significativamente distinto, pues contiene menos componentes de alta frecuencia que en los demás casos.

Estos resultados son coherentes con los obtenidos del análisis en frecuencia.

Además, si la avería es importante se presenta una modificación en el número de impulsos presentes en la señal de vibración, de lo contrario no se presenta cambio en el número de impulsos. En la Tabla 7.2 se muestra un resumen de los principales impulsos presentes en la señal de vibración en buen estado y ante cada una de las averías anteriormente mencionadas.

Para las vibraciones correspondientes a los defectos en el selector, los impulsos en los que hay que centrar la atención son los impulsos 2, 3 y 4, porque son los que corresponden a eventos relacionados con la actuación del selector. No obstante, en un sistema mecánico, las vibraciones son muy dependientes de pequeñas variaciones en las condiciones de contorno, por lo que cuando el selector está en mal estado, en ocasiones se notan cambios en los impulsos 5 y 6, que corresponden a la actuación del conmutador y a la parada del accionamiento a motor.

Como se muestra en la Tabla 7.2, atendiendo a los impulsos presentes en la señal de vibración, el estado del cambiador de tomas en carga puede ser clasificado en cinco grupos distintos.

A la vista ello, se desprende que el estudio tiempo-frecuencia mediante transformada corta de Fourier proporciona resultados más aptos para el diagnóstico automático de averías en cambiadores de tomas en carga que un análisis puramente en frecuencia mediante la transformada de Fourier (apartado 7.1), pues además de identificar el contenido en frecuencias de la señal permite detectar de forma automática la desaparición de impulsos de vibración asociada a ciertas averías.



Tabla 7.2. Detección de averías en cambiadores de tomas en carga basada en el análisis de los impulsos presentes en la señal de vibración en buen estado y con averías. La presencia o no de impulsos fue determinada mediante la transformada de Fourier de tiempo corto

Grupo	Avería	Figuras	Impulsos que desaparecen	Impulsos que se modifican
1	Cambiador de tomas en buen estado	8.14-8.19	Ninguno	
	Contactos fijos del selector desgastados	8.42-8.47	Ninguno	Importante variación el espectro de frecuencias de los impulso 2, 3 y 4
2	Holgura en el anclaje de las barras del selector a la estructura	8.20 - 8.24	Impulso 4	Se presentan ligeros cambios en los espectros del impulso 2
3	Contactos fijos del selector flojos	8.25 - 8.29	Impulso 3	Se presentan ligeros cambios en los espectros de los impulsos 2 y 4
	Contactos fijos del selector erosionados	8.48-8.52		Varía el espectro de frecuencias de los impulsos 2 y 4
4	Muelles del selector sin la tensión adecuada	8.30- 8.33	Impulsos 2y 3	Varía el espectro de frecuencias del impulso 4
	Barra de anclaje de partida inexistente	8.38-8.41	Impulsos 2 y 3	Varía el espectro de frecuencias del impulso 4
	Amortiguamiento recorrido carro superior del conmutador	8.53-8.56	Impulsos 2, 3	Varía el espectro de frecuencias del impulso 4
	Amortiguamiento leva de arrastre carro superior del conmutador	8.57 a 8.60	Impulso 2 y 3	Varía el espectro de frecuencias del impulso 4
5	Barra de anclaje de llegada inexistente	8.34-8.37	Impulsos 3 y 4	Varía el espectro de frecuencias del impulso 2

### 7.3. Análisis tiempo-frecuencia utilizando la transformada Wavelet

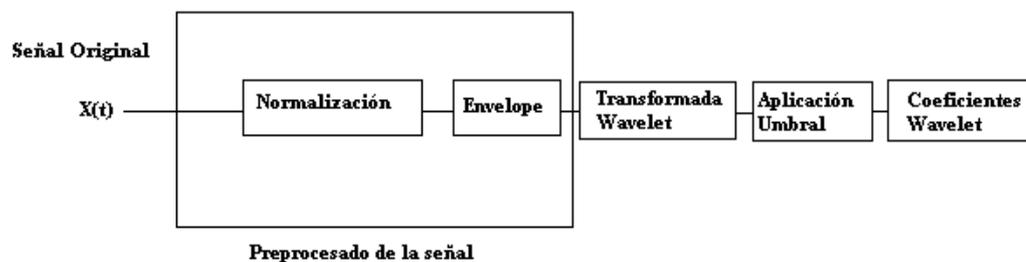


Figura 7.61. Procesamiento de la señal

El procesamiento de la señal de vibración se ilustra en la Figura 7.61 y se resumen en las siguientes fases:

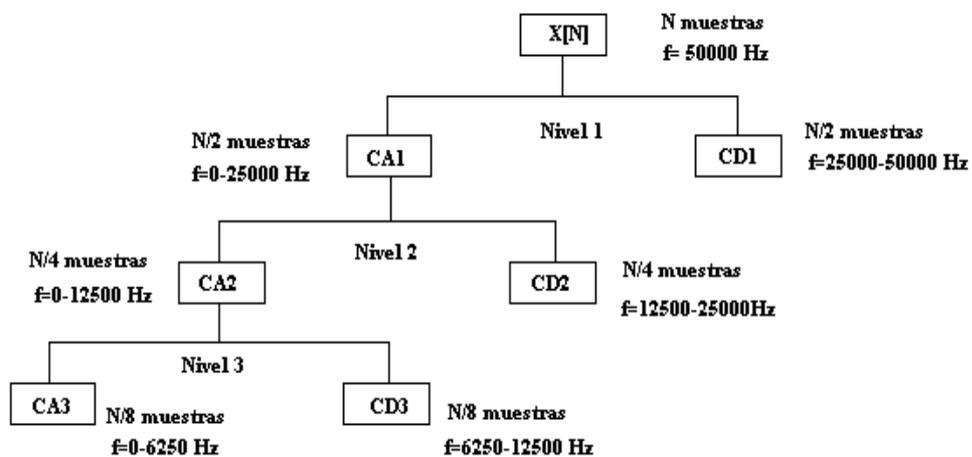
- Se realiza un pre-procesado de la señal de vibración consistente en normalización y aplicación de la transformada de Hilbert para obtener la envolvente de la señal (Figura 7.13).
- Se aplica transformada wavelet discreta (Biortogonal 3.3) hasta el nivel de descomposición 3, tomando los coeficientes wavelet de aproximación de nivel 3 (figura 7.62).
- Se grafican los coeficientes wavelet en un plano tiempo-escala, a través del esquema conocido como escalograma.
- Sobre los coeficientes wavelet, se aplica un umbral de energía con el fin de desechar impulsos falsos o poco relevantes y así extraer los rasgos característicos o patrones que diferencian la señal.

#### 7.3.1. Aplicación de Wavelets

Aunque la duración del proceso de cambio de una toma a otra es de aproximadamente unos 5,5 segundos (275000 muestras) a la tasa de muestreo de 50 kHz, la señal de vibración completa presenta 10 segundos correspondiente a 500000 muestras (Figura 7.13). Al aplicar un análisis multiresolución de nivel 3 es decir una descomposición de nivel 3 (Figura 7.62), a la señal de la Figura 7.13 se obtiene un número diferente de coeficientes por nivel (Tabla 7.3).

**Tabla 7.3. Número de coeficientes para descomposición wavelet nivel 3 de una señal de 500.000 datos**

Nivel	Coefficientes	Número de muestras	Bandas de frecuencias (Hz)
1	CA1: Aproximación nivel 1	250.000	0-25.000
	CD1: Detalle nivel 1	250.000	25.000-50.000
2	CA2: Aproximación nivel 2	125.000	0-12.500
	CD2: Detalle nivel 2	125.000	12.500-25.000
3	CA3: Aproximación nivel 2	62.500	0-6.250
	CD3: Detalle nivel 2	62.500	6.250-12.500



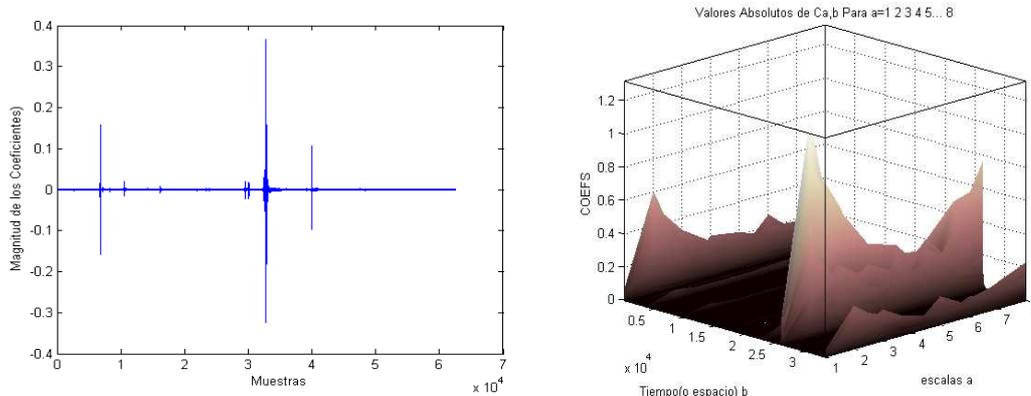
**Figura 7.62. Descomposición wavelet discreta de nivel 3 con wavelet madre Biortogonal 3.3**

La banda de frecuencia que aporta la mayor información relevante, y donde se aprecian comportamientos diferenciados de las señales en buen estado y con diferente tipo de avería, es el nivel de descomposición 3. Esta banda de frecuencia coincide con la frecuencia nominal de los acelerómetros utilizados.

Se toma el coeficiente de aproximación de nivel 3 (Figura 7.63 izquierda) dado que interesa centrar la atención en los impulsos de la señal y en no las variaciones abruptas o discontinuidades contenidas en el coeficiente de detalle de nivel 3.

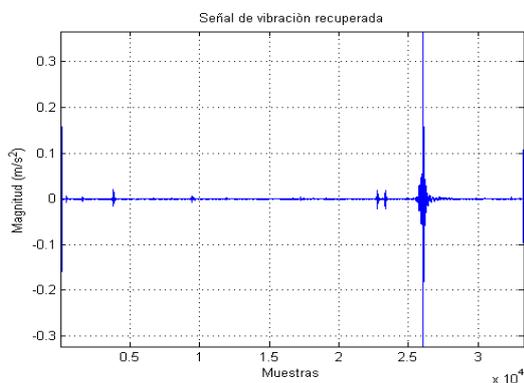
Al tomar el coeficiente de nivel 3 sin las componentes de alta frecuencia, al cual se denomina coeficiente de aproximación de nivel 3, se tiene una notable reducción en términos de muestras (62500). El propósito es eliminar el mayor número de muestras sin perder fidelidad de la señal

En la Figura 7.63 (derecha) se muestra el escalograma resultante de la descomposición wavelet discreta del coeficiente de aproximación de nivel 3. El escalograma representado es el modulo al cuadrado de los coeficientes de aproximación.



**Figura 7.63. Coeficientes de aproximación de nivel 3(izquierda); Escalograma(derecha)**

Seguidamente se procede a eliminar las muestras dentro de la matriz cuyo valor es cero, con el objetivo de disminuir el número de muestras, al reconstruir la señal se obtienen 33.284 muestras o coeficientes (Figura 7.64).



**Figura 7.64. Señal reconstruida con 33.284 muestras**

### 7.3.2. Aplicación de Umbrales

Para la detección de los impulsos presentes en la señal de vibración en el plano escala-tiempo<sup>12</sup> se aplico la metodología de establecimiento de umbral (apartado 6.4.2.2).

<sup>12</sup> Téngase en cuenta que el valor de los coeficientes es una función de dos variables (escala-tiempo), de forma que en función de la escala elegida el instante de tiempo en el que se dan los máximos coeficientes es distinto, como se observa en la figura 7.63 derecha

En primer lugar se aplico sobre la señal de vibración (figura 7.64) un criterio de umbral duro ("hard threshold", ecuación 6.34 del apartado 6.4.2) basado en capturar un porcentaje de energía elevado ( $E_p=99\%$ ) de la señal de vibración, preservando así los impulsos 2, 3 y 4 de muy bajo contenido energético. Con este procedimiento se eliminaron 30.530 muestras quedando una señal compuesta por 2.754 coeficientes efectivos. En la Figura 7.66 se muestra el valor absoluto de los coeficientes para 8 escalas. Sobre estos coeficientes se hallaron los impulsos fundamentales de la señal de vibración aplicando un algoritmo de detección de impulsos, implementado en Matlab siguiendo el esquema de la Figura 7.65.

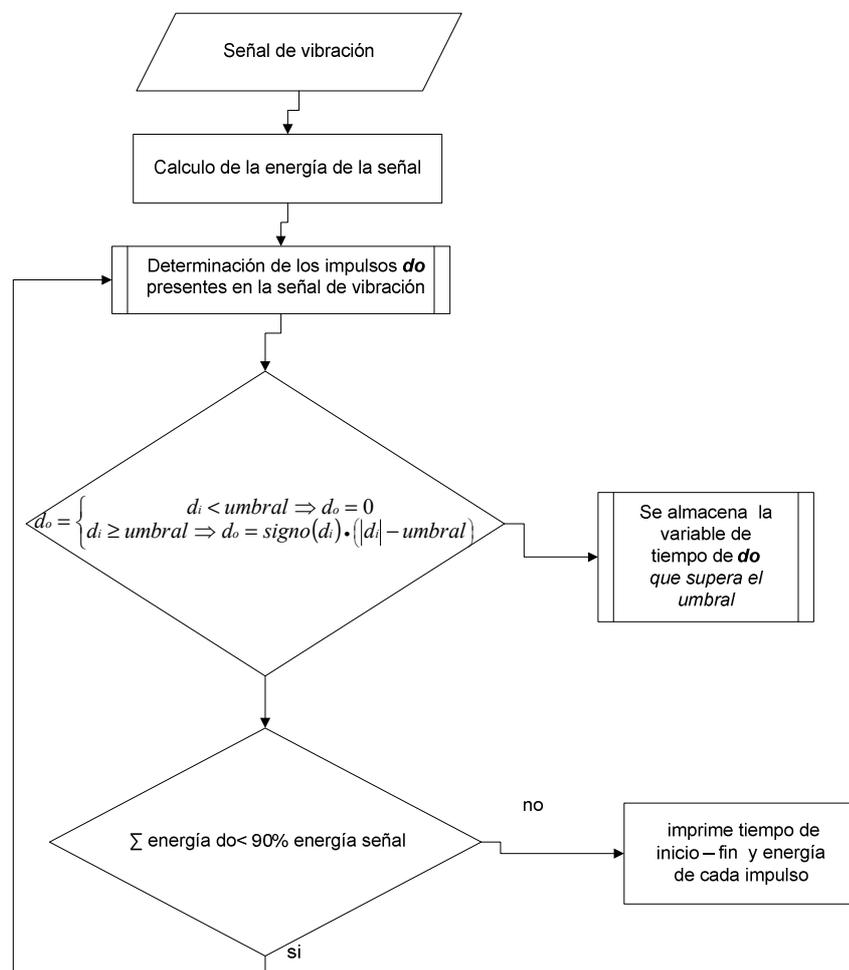
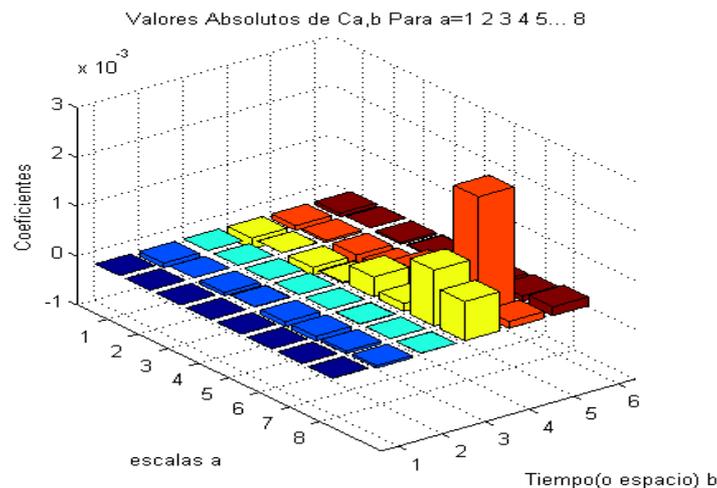


Figura 7.65. Algoritmo de detección de impulsos



**Figura 7.66. Coeficientes absolutos para 8 escalas**

Para propósitos de alimentar una red neuronal (apartado 8.4) que permita clasificar un total de 180 señales de vibración, se tomara como vector de entrada los coeficientes absolutos<sup>13</sup> de la escala 7.

En las Figura 7.67 a Figura 7.76 se muestran los espectrogramas de la señal de vibración en buen estado y con cada una de las averías anteriormente mencionadas. Con base en las características (Tabla 7.4) y tomando la escala 7 como referencia se establecen los siguientes grupos de diagnóstico:

- Grupo 1: Operación normal del cambiador de tomas en carga (Sin averías).
- Grupo 2: Holguras en el anclaje, contactos fijos del selector flojos, muelles sin la tensión adecuada, barra de llegada inexistente, barra partida inexistente,
- Grupo 3: Contactos erosionados y contactos desgastados.
- Grupo 4: Elementos amortiguados del conmutador.

<sup>13</sup> Módulo al cuadrado del coeficiente

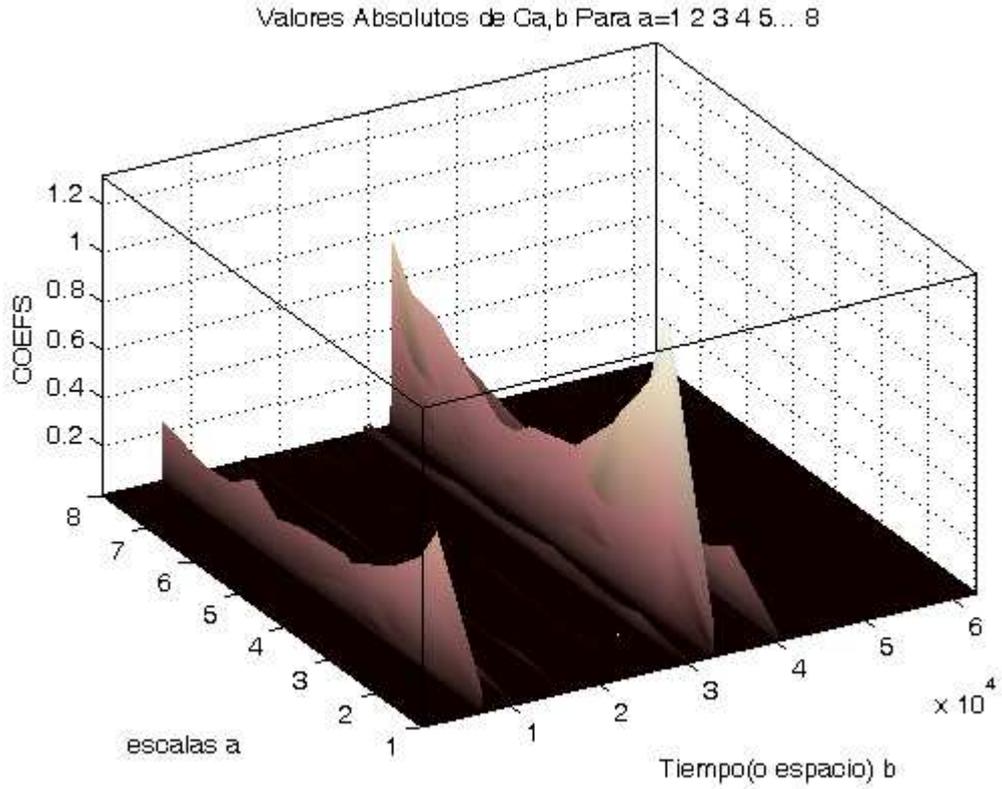


Figura 7.67. Grupo 1, Operación normal del cambiador de tomas en carga (Sin averías).

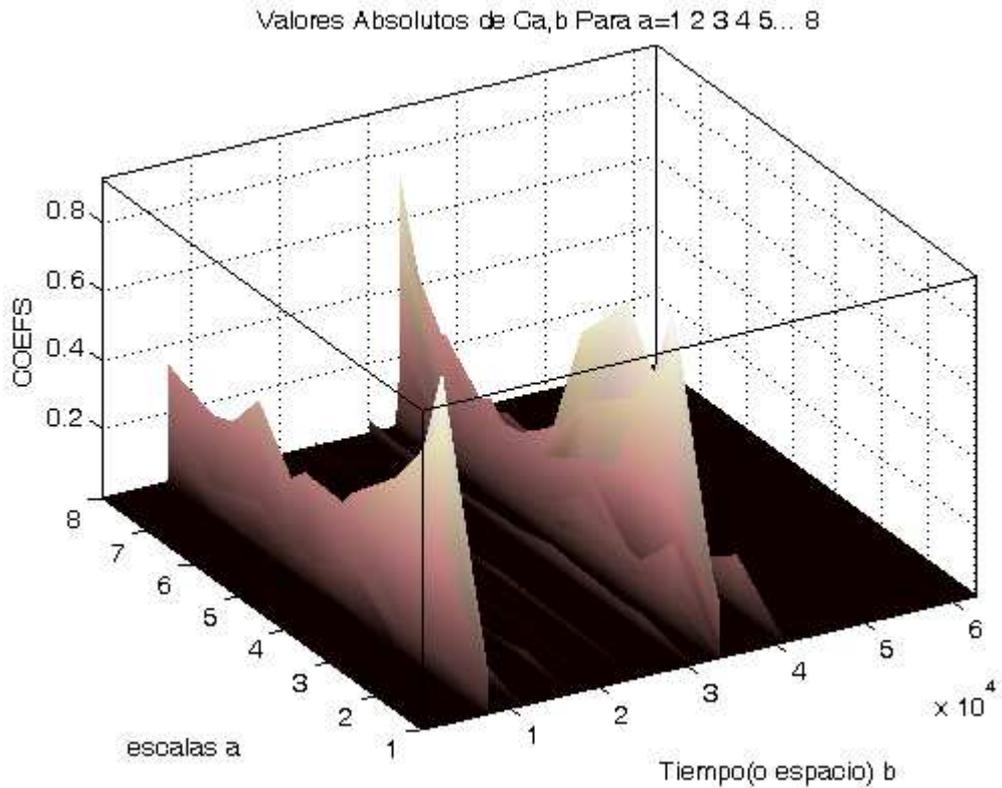


Figura 7.68. Grupo 2, Holguras en el anclaje

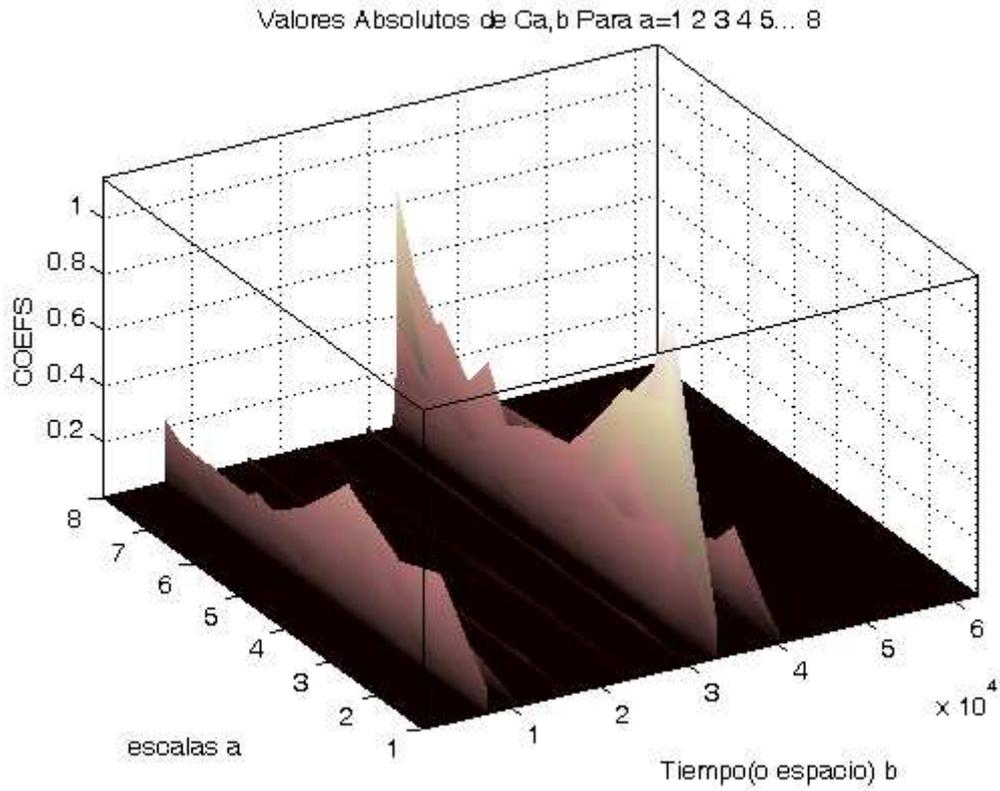


Figura 7.69. Grupo 2, Contactos fijos del selector flojos

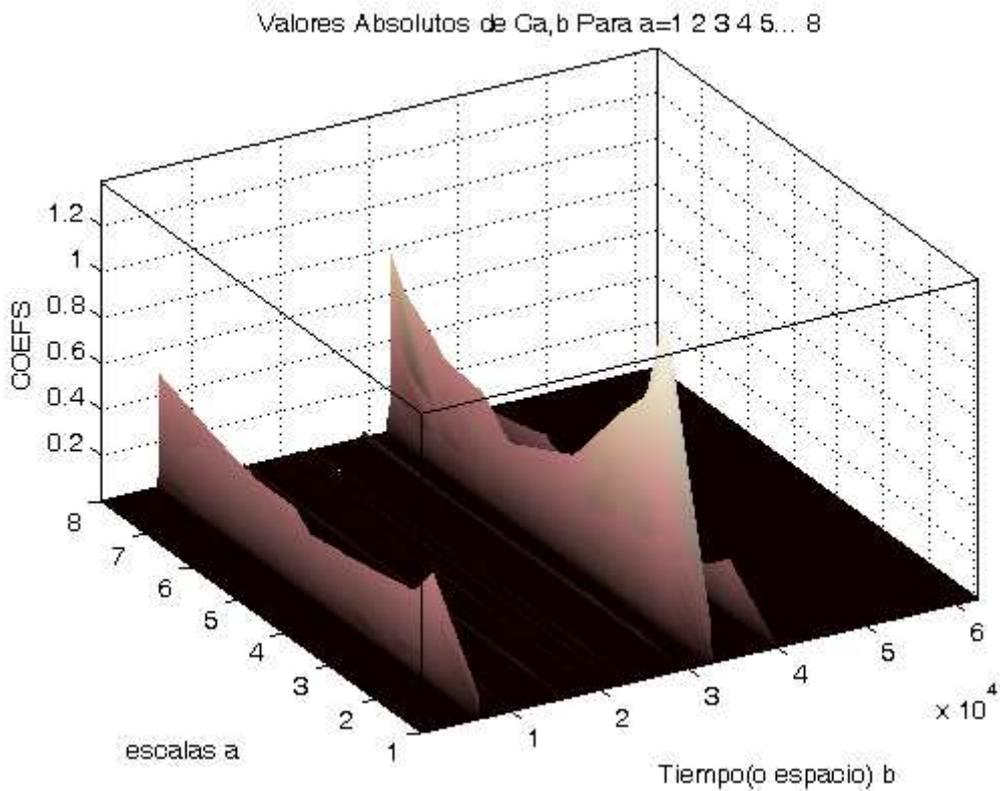


Figura 7.70. Grupo 2, Muelles sin la tensión adecuada

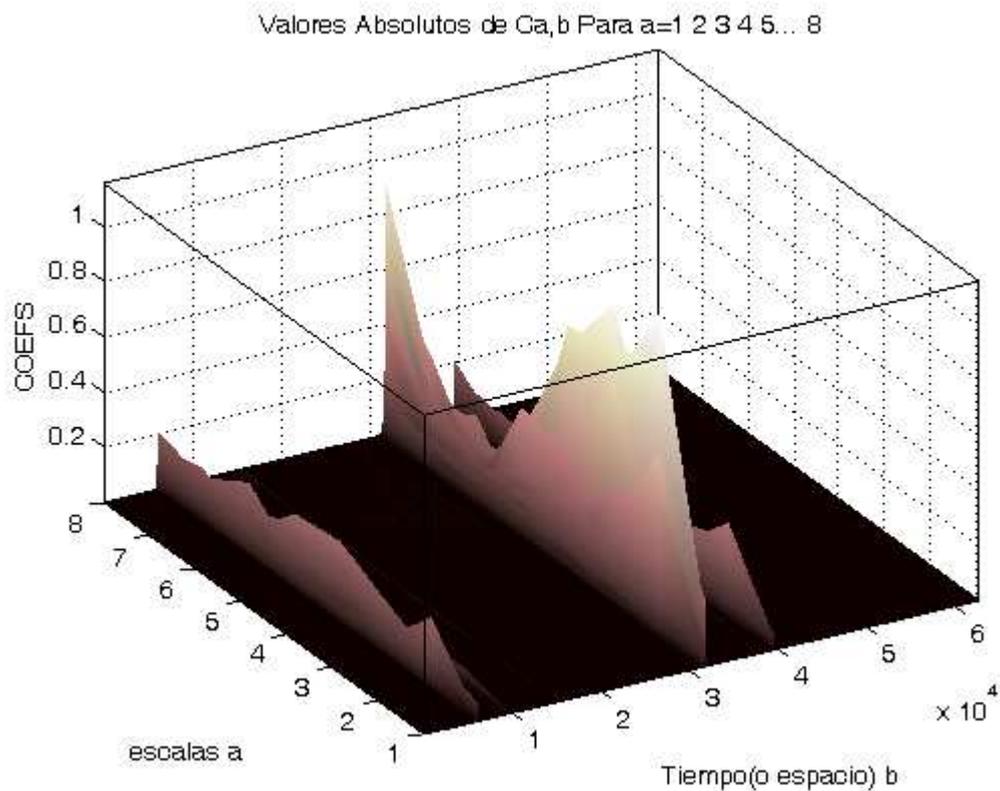


Figura 7.71. Grupo 2, barra de llegada inexistente

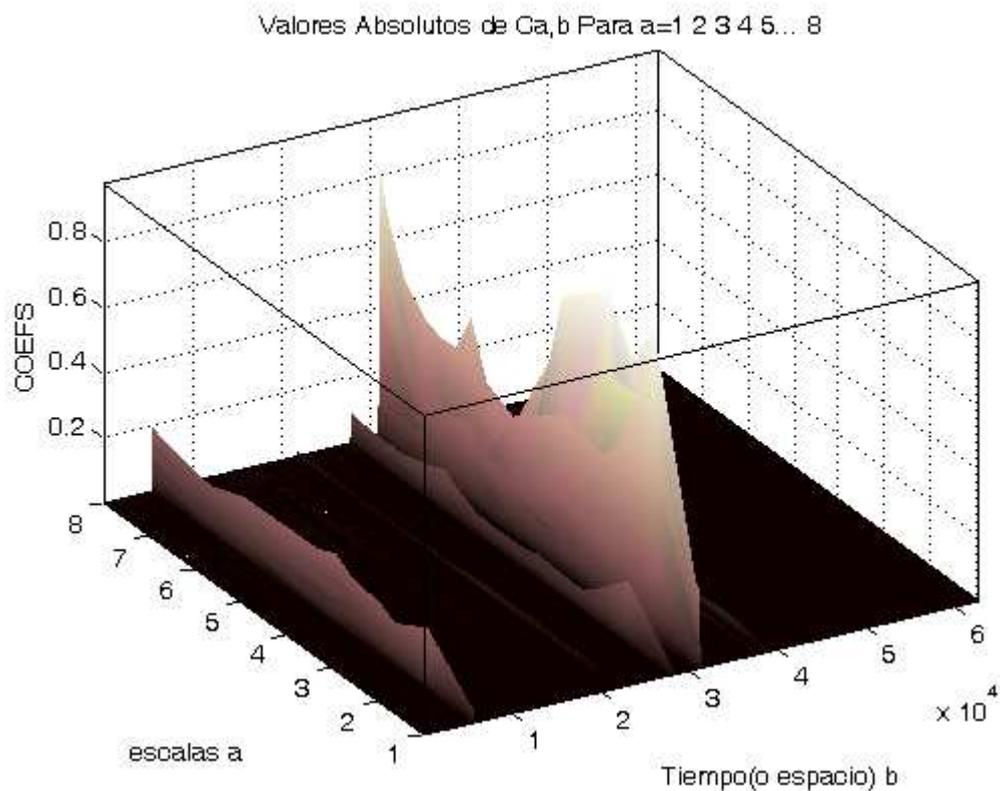


Figura 7.72. Grupo 2, barra de partida inexistente

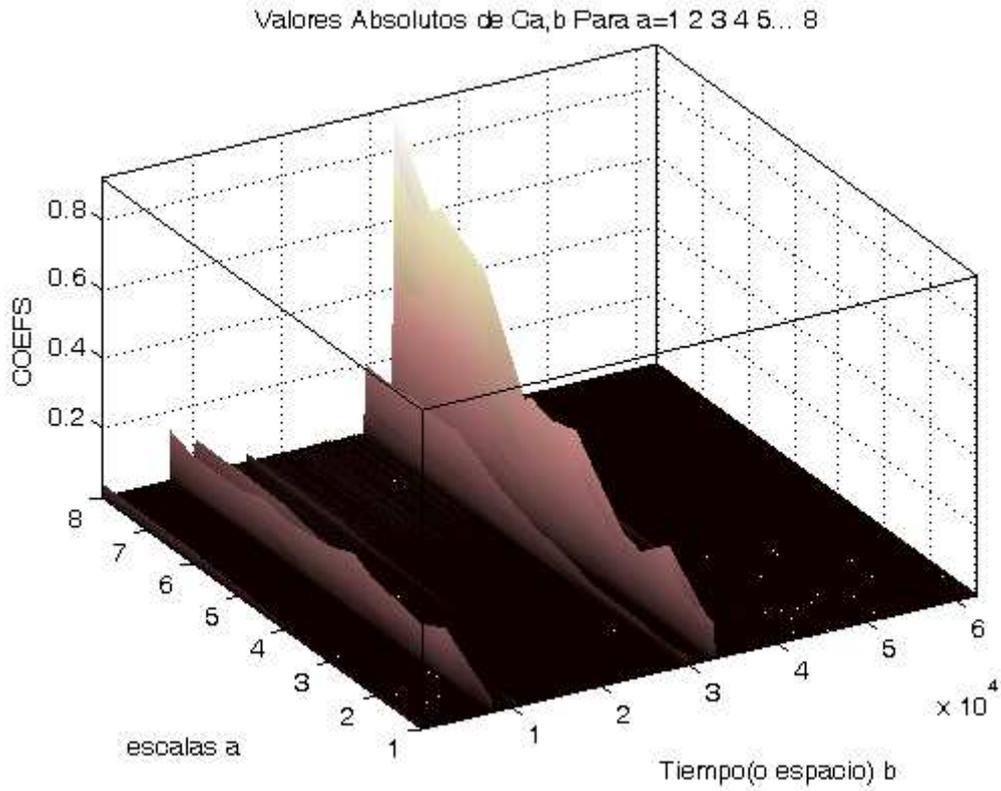


Figura 7.73. Grupo 3, contactos erosionados

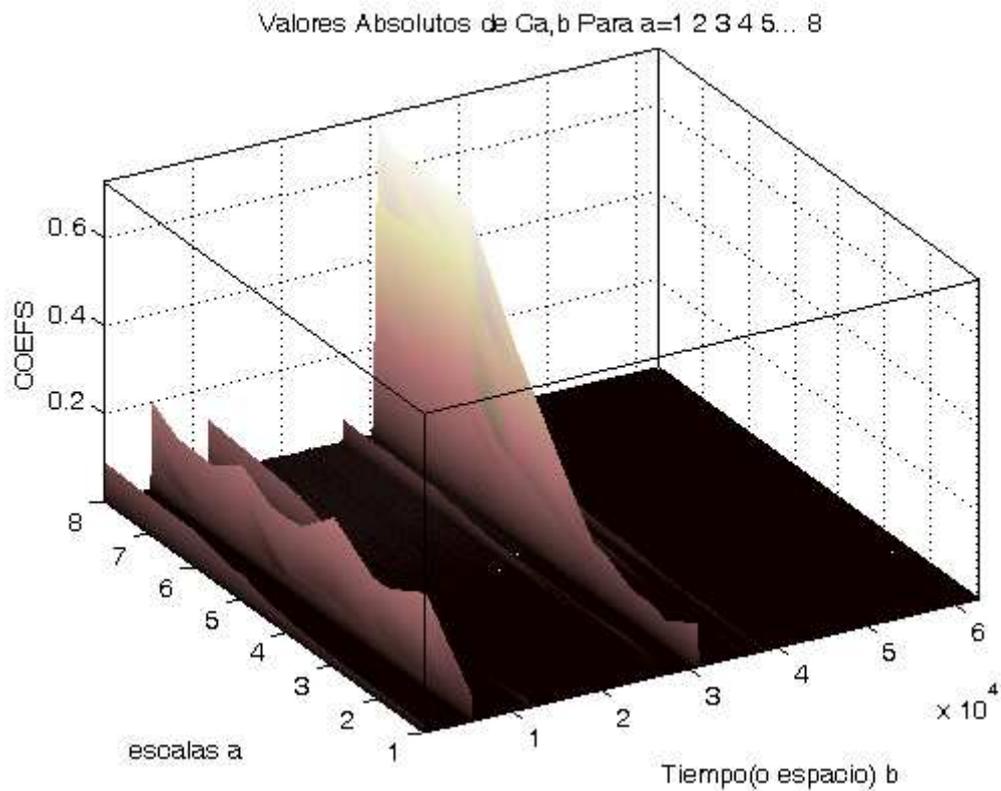


Figura 7.74. Grupo 3, contactos desgastados

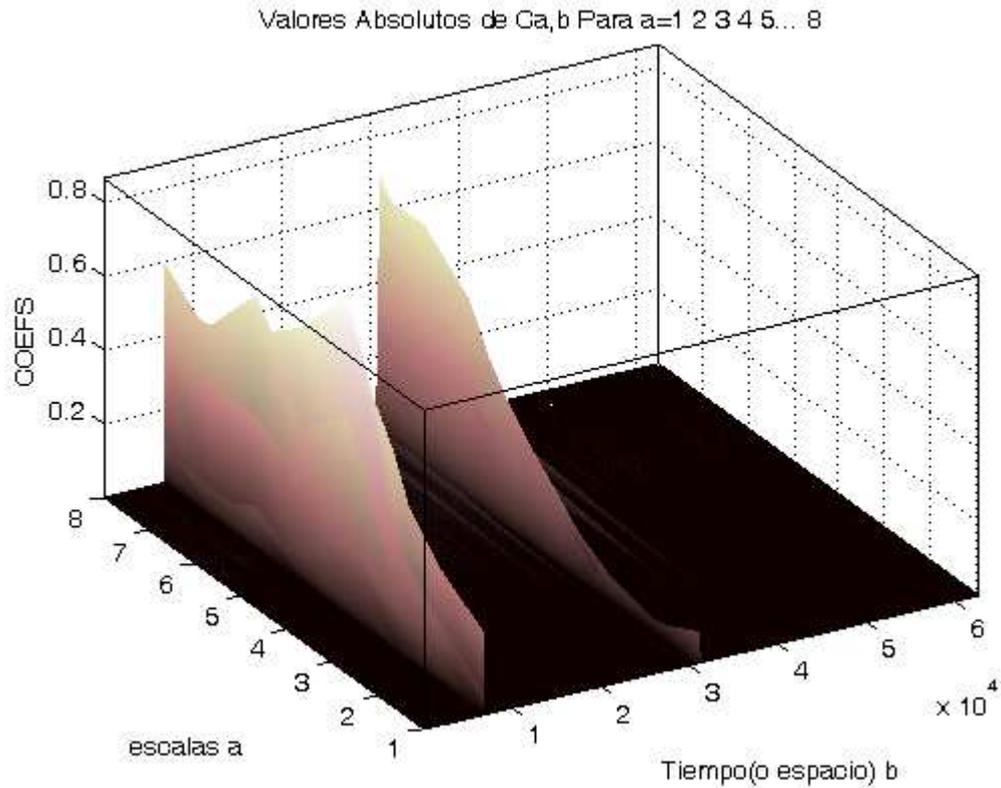


Figura 7.75. Grupo 4, amortiguamiento recorrido carro superior del conmutador

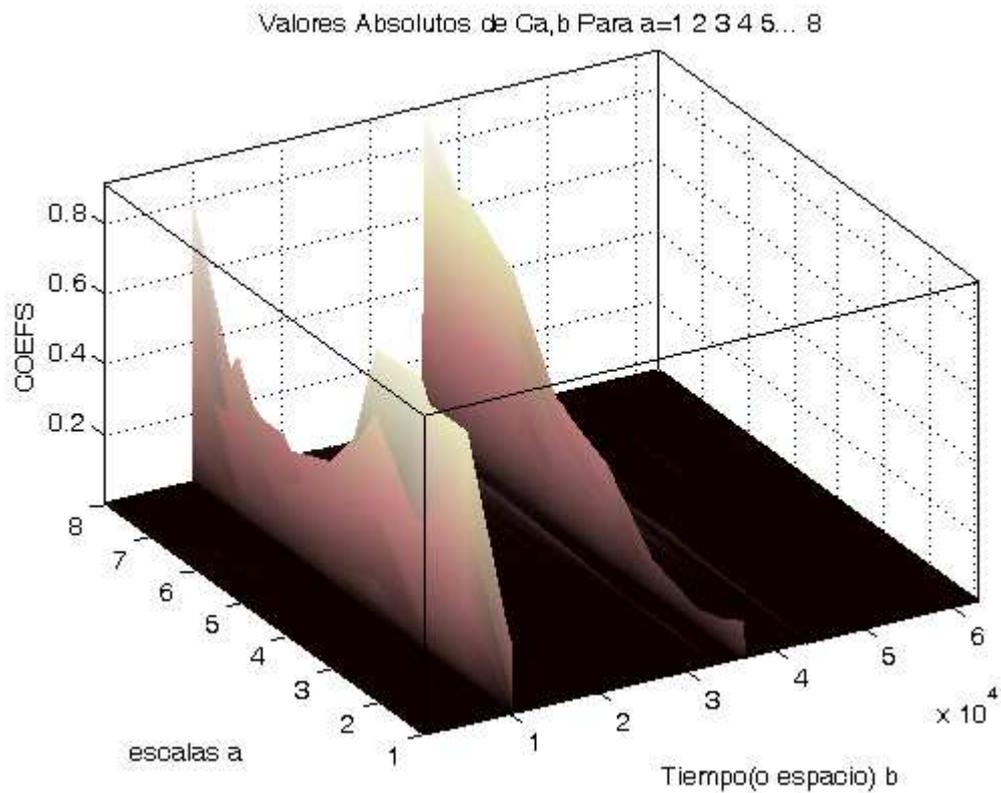


Figura 7.76. Grupo 4, amortiguamiento leva carro superior del conmutador

Para establecer los grupos se han considerado el valor de los coeficientes y la variación de éstos con la escala. Así, las características de los diferentes grupos son las indicadas en la tabla 7.4.

**Tabla 7.4. Detección de averías en cambiadores de tomas en carga basada en el análisis de la descomposición wavelet de la señal de vibración en buen estado y con averías.**

Grupo	Avería	Características
1	Cambiador de tomas en buen estado	En $b \approx 3 \times 10^4$ coeficientes elevados En $b \approx 4 \times 10^4$ coeficientes reducidos
2	Holgura en el anclaje de las barras del selector a la estructura	En $b \approx 1 \times 10^4$ coeficientes de amplitud $\geq 0.2$ En $b \approx 3 \times 10^4$ coeficientes de valor muy superior. En $b \approx 4 \times 10^4$ coeficientes de valor elevado
	Contactos fijos del selector flojos	
	Muelles del selector sin la tensión adecuada	
	Barra de anclaje de llegada inexistente	
	Barra de anclaje de partida inexistente	
3	Contactos desgastados	En $b \approx 1 \times 10^4$ coeficientes de amplitud baja $\leq 0.2$
	Contactos fijos del selector erosionados	En $b \approx 3 \times 10^4$ la amplitud de los coeficientes aumenta al crecer la escala
4	Amortiguamiento recorrido carro superior del conmutador	En $b \approx 1 \times 10^4$ coeficientes de amplitud alta
	Amortiguamiento leva de arrastre carro superior del conmutador	En $b \approx 3 \times 10^4$ la amplitud de los coeficientes aumenta al crecer la escala

Los grupos obtenidos con esta metodología están formados por averías distintas de las de la metodología anterior (tabla 7.2).



La forma de agrupar los distintos espectogramas obtenidos al aplicar la transformación wavelet es adecuada para que la realice un experto humano pero es difícil de implementar en un programa de diagnóstico que permita realizar un diagnóstico automático, debido a ello, esta metodología de diagnóstico se presta para ser implementada con una red neuronal artificial. De hecho, los grupos 1 y 2 son difíciles de distinguir a ojo, y se ha hecho una distinción entre ellos debido a que la red neuronal desarrollado (véase capítulo 8) sí que es capaz de distinguirlos.

#### **7.4. Detección escala-tiempo de los impulsos presentes en la señal de vibración con actuación del selector.**

Como se demostrara en este apartado, el tiempo entre dos impulsos de vibración es representativo de la existencia de defectos internos en un cambiador de tomas en carga. El instante de ocurrencia de un impulso de vibración se puede detectar utilizando la transformada corta de Fourier, o la transformada Wavelet; los resultados obtenidos (en cuanto a tiempo de ocurrencia de los impulsos) son muy semejantes. En este apartado se analizará el tiempo entre impulsos utilizando para la detección de los mismos (del instante de tiempo en el que ocurren) la transformada Wavelet.

En la Tabla 7.5 se presenta los instantes de tiempo de inicio ( $T_{inicial}$ ) y de finalización ( $T_{final}$ ), así como el tiempo de duración de los impulsos y el intervalo de tiempo entre un impulso y el siguiente de la señal de vibración, para el cambiador de tomas en carga en buen estado.

Duración:  $T_{final}(i)-T_{inicial}(i)$  ;  $i$ =número de impulso (de 1a 6)

$\Delta T_{impulsos}$ :  $T_{final}(i+1)-T_{final}(i)$ ;  $i$ =número de impulso (de 1a 6)

En el apéndice III se muestran estos mismos parámetros para las diferentes averías simuladas.

En las tablas se presenta la energía de cada uno de los impulsos, que es la variable utilizada para la detección de los mismos. Se puede apreciar que la energía de los impulsos que corresponden a la actuación del selector (impulsos 2, 3 y 4) es mucho menor que la que corresponde a los impulsos de arranque del motor, de parada de accionamiento a motor o de actuación del conmutador.

En el apéndice III se han resaltado en amarillo aquellos impulsos que han desaparecido de la señal de vibración.

**Tabla 7.5. Señal de vibración en buen estado**

SEÑAL VIBRACION BUEN ESTADO 1					
IMPULSO	Energía	T inicial	T final	Duración	$\Delta T$ impulsos
1	1,36e-003	1,0817	1,1058	0,0240	
2	27,9e-006	1,6587	1,7147	0,0561	0,5529
3	84,9e-006	4,7035	4,7276	0,0240	2,9888
4	26,5e-006	4,79976	4,8237	0,0240	0,0721
5	5,28e-003	5,1843	5,3205	0,1362	0,3606
6	456e-006	6,3862	6,4038	0,0176	1,0657

Como es sabido, al repetir un cambio de toma idéntico dos veces consecutivas no se obtiene exactamente la misma señal de vibraciones. Por eso, si se desea utilizar el tiempo entre dos impulsos de vibración como un indicador de diagnóstico del estado de un cambiador de tomas en carga se debe realizar un estudio estadístico que permita obtener unos tiempos estadísticamente significativos para el intervalo de tiempo entre dos impulsos consecutivos para cada tipo de averías.

Para realizar el estudio estadístico se han utilizado 15 señales para el cambiador de tomas en carga en buen estado y 15 señales para cada uno de los defectos contemplados. En la Tabla 7.6 se muestran los resultados del estudio estadístico realizado. Se puede observar que los tiempos entre impulsos se ven significativamente modificados en algunos tipos de averías.



Tabla 7.6. Estudio estadístico de la diferencia temporal

CAMBIO DE TOMA		T2-T1	T3-T2	T4-T3	T5-T4	T6-T5
<b>BUEN ESTADO</b>	Media (s)	0,607	3,082	0,118	0,592	1,179
	Desviación Std (s)	0,077	0,009	0,011	0,078	0,220
	Desviación Std/Media (%)	12,657	0,302	9,330	13,165	18,683
<b>HOLGURA</b>	Media (s)	0,624	3,085			1,221
	Desviación Std (s)	0,016	0,009			0,013
	Desviación Std/Media (%)	2,541	0,287			1,089
<b>CONTACTOS FIJOS DEL SELECTOR FLOJOS</b>	Media (s)	0,696			0,622	1,270
	Desviación Std (s)	0,009			0,003	0,006
	Desviación Std/Media (%)	1,305			0,483	0,479
<b>MUELLES DEL SELECTOR SIN LA TENSION ADECUADA</b>	Media (s)				0,522	1,283
	Desviación Std (s)				0,042	0,088
	Desviación Std/Media (%)				0,080	0,068
<b>BARRA DE ANCLAJE DE LLEGADA INEXISTENTE</b>	Media (s)	0,567				1,284
	Desviación Std (s)	0,024				0,013
	Desviación Std/Media (%)	4,291				1,021
<b>BARRA DE ANCLAJE DE PARTIDA INEXISTENTE</b>	Media (s)				0,553	1,316
	Desviación Std (s)				0,040	0,060
	Desviación Std/Media (%)				7,230	4,560
<b>CONTACTOS FIJO DEL SELECTOR DESGASTADOS</b>	Media (s)	1,081	2,604	0,140	0,671	1,303
	Desviación Std (s)	0,149	0,342	0,008	0,038	0,010
	Desviación Std/Media (%)	13,755	13,131	5,706	5,701	0,775
<b>CONTACTOS DEL SELECTOR EROSIONADOS</b>	Media (s)	0,430			0,389	1,190
	Desviación Std (s)	0,012			0,050	0,010
	Desviación Std/Media (%)	2,791			12,853	0,840
<b>AMORTIGUAMIENTO RECORRIDO CARRO SUPERIOR</b>	Media (s)				0,606	1,240
	Desviación Std (s)				0,046	0,150
	Desviación Std/Media (%)				7,628	12,082

Tabla 7.7. Propuesta de metodología de detección de averías basada en la desaparición de impulsos y en el tiempo entre impulsos.

Grupo	Avería	Impulsos que desaparecen	Tiempos entre impulsos Impulsos que se modifican
1	Cambiador de tomas en buen estado	Ninguno	Caso base
	Contactos fijos del selector desgastados		Incremento significativo del T12 respecto del caso base. Reducción correspondiente en el tiempo T23
2	Holgura en el anclaje de las barras del selector a la estructura	4	
3	Contactos fijos del selector flojos	3	Ligero aumento del tiempo T12 respecto del caso base
	Contactos fijos del selector erosionados		Reducción del tiempo T12 Disminución significativa del tiempo T45 respecto del caso base
4	Muelles del selector sin la tensión adecuada	2 y 3	Ligero aumento del tiempo T12
	Barra de anclaje de partida inexistente		Cambios ligeros (no significativos) en los tiempos entre impulsos
	Amortiguamiento recorrido carro superior del conmutador		Cambios ligeros (no significativos) en los tiempos entre impulsos
	Amortiguamiento leva de arrastre carro superior del conmutador		Reducción significativa del tiempo T45 respecto del caso base
5	Barra de anclaje de llegada inexistente	3 y 4	Cambios ligeros (no significativos) en los tiempos entre impulsos

En la Tabla 7.7 se muestra una propuesta de metodología de detección de averías basada en la desaparición de impulsos de vibración y en los tiempos entre impulsos.

En la propuesta presentada en la Tabla 7.7 el estado del cambiador se clasifica en 5 grupos (columna 3 de la tabla) en función de los impulsos que desaparecen.

Dentro del grupo 1 (que engloba a cambiador de tomas en buen estado y contactos desgastados), el desgaste de contactos se caracteriza por un incremento significativo del tiempo entre los impulsos 1 y 2.

El grupo 2 contiene un solo defecto (holgura en el anclaje).

El grupo 3 contiene dos estados defectuosos (contactos del selector flojos y contactos del selector erosionados), y la distinción entre ambos estados se puede hacer con base al tiempo T5-4.

El grupo 4 contiene cuatro estados defectuosos (muelles del selector sin la tensión adecuada, barra de anclaje de partida inexistente, amortiguamiento del carro y amortiguamiento en la leva). El amortiguamiento de la leva es el más fácil de identificar, por la significativa reducción de T5-4 que conlleva, pero los otros tres casos son difíciles de distinguir entre sí.

El grupo 5 contiene un solo defecto (barra de anclaje de llegada inexistente)

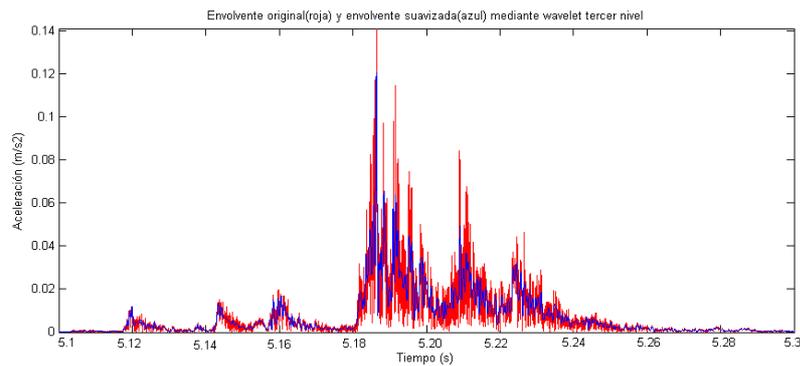
Se observa que la clasificación a la que se ha llegado con esta metodología es idéntica a la que se llega detectando la presencia o ausencia de impulsos de vibración. No obstante, a nuestro juicio, la metodología utilizada en este apartado es superior, ya que la ausencia de impulsos de vibración se produce sólo para fallos importantes, mientras que en fallos menos severos se tendrá una reducción de la energía del impulso correspondiente.

### **7.5. Análisis tiempo frecuencia para la etapa de conmutación.**

Hasta aquí se ha tratado preferentemente de fallos en el selector de tomas.

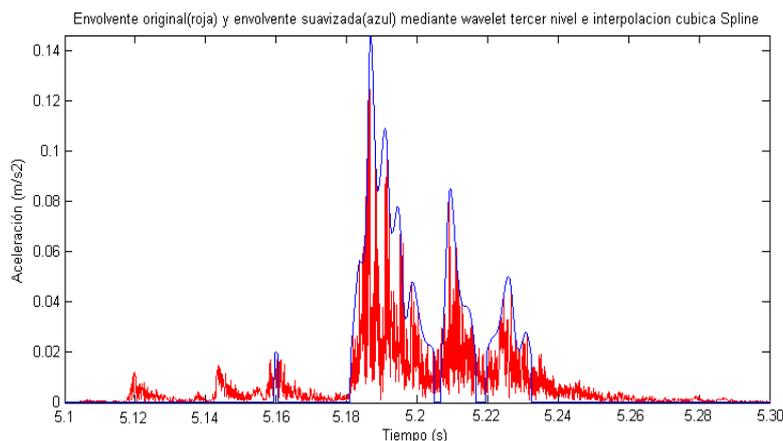
Para detectar averías en el conmutador del cambiador de tomas en carga se ha realizado el mismo procesado de la señal que en el caso de la señal entera pero aplicado al período de tiempo de la conmutación. En la figura 8.61 se muestra la transformada de Hilbert (onda roja) de la señal de vibraciones de un cambiador de tomas en carga, así como la envolvente suavizada, obtenida al aplicar la transformada wavelet, y reconstruir la señal a partir de los coeficientes de aproximación de nivel 2 y de los coeficientes de detalle afectados de un coeficiente de reducción (apartado 6.2.5.1, expresión (6.36)).

La dificultad que se presenta en la detección de los sub-impulsos presentes en esta etapa es la cantidad de ruido presente en la señal a pesar de haberse suavizado al aplicar wavelet (Biorotogonal 3.3), de nivel 2 (Figura 7.77).



**Figura 7.77. Envoltorio original (roja) y envoltorio suavizado (azul) mediante wavelet de tercer nivel**

Para solucionar este inconveniente, antes de aplicar el umbral, se aplica la técnica de interpolación cubica Spline con el fin de eliminar dicho ruido y obtener mejor resolución en la detección de los sub-impulsos propios de esta etapa (Figura 7.78)



**Figura 7.78. Envoltorio original (roja) y envoltorio suavizado (azul) mediante wavelet de tercer nivel e interpolación cubica spline**

Lamentablemente no ha sido posible simular averías en el conmutador del cambiador de tomas en carga debido a que este es un aparato mecánico muy complejo de montar y desmontar y que requiere un utillaje apropiado. Se contactó con una empresa especializada para desmontar el conmutador, simular averías en el mismo y volverlo a montar, pero la elevada carga de trabajo de la mencionada empresa, y la prioridad que ésta concedió a sus clientes habituales, hizo que no fuera posible la colaboración de la empresa para esta labor. En estas circunstancias solamente se realizó una detección de los impulsos del conmutador en buen estado. Los resultados del estudio realizado se recogen en [26].

### 7.6. Comparativa entre las metodologías empleadas en el análisis.

La aplicación de una técnica puramente frecuencial como es la transformada de Fourier aplicada al conjunto de la señal de vibraciones de un cambiador de tomas en carga (apartado 7.1) no proporciona resultados muy satisfactorios para detectar y distinguir averías en un cambiador de tomas en carga, ya que los diferentes espectros obtenidos son muy semejantes entre sí. Teniendo en cuenta que una señal de vibraciones no es totalmente repetitiva al repetir un experimento dos veces, las pequeñas diferencias entre los espectros de la señal de vibraciones no ofrecen una fiabilidad suficiente a la hora de distinguir determinados defectos entre sí, e incluso un cambiador en buen estado de uno con determinados defectos. Es posible, eso sí, distinguir dos grupos de estados en el cambiador de tomas; el primer grupo recoge el cambiador en buen estado y cinco estados caracterizados por defectos que no provocan una variación significativa en el patrón de vibraciones (fundamentalmente fallos en el selector). El segundo grupo recoge cuatro estados defectuosos que modifican sustancialmente el patrón de vibraciones (fundamentalmente eliminando las vibraciones de más alta frecuencia); son defectos en el selector que introducen rozamientos importantes o averías en el elemento almacenador de energía.

La transformada corta de Fourier (apartado 7.2) permite realizar un análisis tiempo-frecuencia de la señal de vibración de un cambiador de tomas en carga (señal no estacionaria). Esta metodología segmenta la señal utilizando para ello una ventana (ventana de Hamming para el caso en estudio), aplica la transformada de Fourier para cada segmento y obtiene la energía de cada impulso. Mediante este procedimiento es posible detectar si ha desaparecido uno o más impulsos y cuál es el impulso desaparecido, es posible determinar el instante de tiempo en el que ocurre cada impulso, la duración del impulso y el contenido en frecuencias de cada impulso. De esta manera se dispone de varios indicadores para identificar el estado del cambiador de tomas.

Si de entre esos identificadores se elige la existencia o no de impulso y el contenido en frecuencias de cada impulso, es posible clasificar el cambiador en cinco grupos, alguno de los cuales recoge un solo estado defectuoso mientras que otros recogen dos defectos (buen estado y un estado defectuoso) o cuatro estados



defectuosos. En algunos casos, a partir del contenido en frecuencias es posible diferenciar dos estados de un mismo grupo, pero en el caso del grupo 4 (que incluye cuatro estados defectuosos) es prácticamente imposible diferenciar entre los distintos estados defectuosos.

El problema de la transformada de Fourier de tiempo corto es que calcula con la misma resolución tanto frecuencias bajas como frecuencias altas ya que utiliza para ello un ancho de ventana fijo para todo el análisis. La transformada de Wavelet soluciona este inconveniente incorporando variables de escalamiento y traslación que permiten utilizar ventanas de diferente ancho durante el análisis de la señal, en otras palabras realiza un análisis tiempo frecuencia con resolución variable, siendo la resolución inversamente proporcional a la escala, es decir bajas escalas –altas frecuencias, corresponden a wavelets comprimidas, donde se aprecian los detalles de los cambios a altas frecuencias, mientras que altas escalas-bajas frecuencias corresponden a wavelets dilatadas donde se aprecian las aproximaciones (que representan la parte más lenta de la señal). Al disminuir la resolución se elimina o en su defecto se tiene menos información de altas frecuencias, lo que proporciona una tendencia general de la señal.

El objetivo de aplicar transformada de wavelet discreta es reducir mediante un análisis multi-resolución las señales de alta frecuencia, umbralizar los coeficientes y así obtener los coeficientes de máxima correlación que permitan identificar cada uno de los impulsos presentes en la señal de vibración.

La metodología de diagnosticar el estado del cambiador de tomas con base en el análisis de los espectogramas obtenidos en el apartado 7.3.1, permite clasificar el estado del cambiador en cuatro grupos, por lo que no ofrece una información suficientemente detallada como para diferenciar los diferentes tipos de avería con claridad.

La medida de los tiempos entre impulsos permite discriminar, de forma más fácil, las diferentes averías incluidas en un grupo que si se utiliza el espectro de frecuencias. Así, de los 4 estados defectuosos incluidos en el grupo 4 solo dos de ellos (barra de anclaje de partida inexistente y amortiguamiento del carro superior del conmutador) no pueden ser distinguidos entre sí. La medida de tiempos entre impulsos puede realizarse mediante la transformada corta de Fourier o mediante la transformada Wavelet y los resultados son muy semejantes.



## CAPÍTULO 7.RESULTADOS ESTUDIO EXPERIMENTAL

---

Cada una de las metodologías (transformada de Fourier clásica, transformada de Fourier en tiempo corto y transformada Wavelet) utilizadas en el análisis de la señal de vibración presenta puntos fuertes y débiles, por ende es necesario precisar que son técnicas complementarias y de ningún modo la una desplaza a la otra.



## Capítulo 8

# REDES NEURONALES ARTIFICIALES-MAPAS AUTO-ORGANIZADOS

El modelado de sistemas mediante redes neuronales artificiales tiene dos propósitos principales. Primero lograr una adecuada descripción de los fenómenos biofísicos que se presentan en las neuronas artificiales. En segundo lugar permitir la implementación de nuevos dispositivos basados en una concepción heurística, e inspirados en elementos simples como unidades lógicas sencillas, que generaran una respuesta determinada en función de un conjunto de entradas y de una función de activación (Redes Neuronales Artificiales, RNA), emulando el comportamiento de las neuronas biológicas.

Para el modelado, análisis y solución de escenarios complejos en el mundo real, se han propuesto e implementado diversas alternativas de solución mediante el uso de técnicas de inteligencia artificial (razonamientos probabilísticos, lógica difusa, algoritmos genéticos y redes neuronales artificiales).

Aunque no existe un criterio claro para la selección de cualquiera de estas herramientas como alternativa de solución para un problema específico, Kohonen [64], sugiere tomar en consideración el uso de redes neuronales artificiales para los siguientes escenarios:

**Considerable número de datos altamente ruidosos y poco definidos:** En este grupo se incluyen fenómenos cuyos datos no pueden ser descritos mediante parámetros estadísticos de bajo orden (primero y segundo orden); o sus distribuciones no son gaussianas y su estadística no es estacionaria.

**Dinámica de las señales:** Las condiciones dinámicas de las señales se pueden representar de manera más eficiente a través de modelos de redes neuronales



artificiales avanzadas, que son fácilmente manejables a nivel de símbolos y atributos abstractos.

**Efectos Colectivos:** Las redes neuronales artificiales a menudo son útiles para estimación no lineal y procesos de control en los cuales los métodos probabilísticos clásicos fallan. Este tipo de métodos no tienen en cuenta las señales individuales o patrones de variables, sino que se concentran en las propiedades colectivas de un conjunto de variables.

**Computación Masivamente Paralela:** Cuando las señales y los elementos de datos son variables dinámicas que cambian asincrónicamente, su análisis se realiza de una forma más adecuada mediante computación analógica masivamente paralela, la cual se realiza naturalmente en arquitecturas computacionales de redes neuronales artificiales.

**Adaptación:** Con el fin de lograr un manejo correcto de un conjunto no estacionario de datos, las propiedades de transformación y transferencia de señales deben ser adaptativas. En este tipo de sistemas, la precisión y selectividad del sistema completo debe ser optimizado con respecto a algún tipo de índice de funcionamiento. Entre otros efectos adaptativos deseables se encuentran la asignación óptima de recursos computacionales, y la función de memoria asociativa que corrige y complementa patrones de datos ruidosos e incompletos.

**Surgimiento de Funciones Inteligentes para el Procesamiento de Información:** Las redes neuronales artificiales son capaces de crear nuevas funciones de procesamiento de información tales como detectores específicos de algún tipo de característica, y representaciones internas organizadas para señales estructuradas, como respuesta a patrones de señales recurrentes. Asimismo, las redes neuronales artificiales pueden crear abstracciones superiores (simbolismos) de datos no procesados, de una manera totalmente automática.

### 8.1. Elementos constitutivos de una Red Neuronal Artificial

Una neurona básica toma una entrada  $P$ , la cual es multiplicada por un factor de ponderación  $w$ , también conocido como *peso*. Existe la alternativa de

introducir un factor constante para ajuste denominado *bias*. Con los valores proporcionados por estas entradas, la neurona genera una salida según la función de activación definida. Esta función puede ser de tipo sigmoïdal, lineal o binario, entre otros.

Básicamente, una red neuronal artificial está conformada por la interconexión de un conjunto de elementos simples denominados *neuronas*, trabajando de forma paralela para resolver una tarea determinada en función de un vector de entrada específico mediante el ajuste de los valores de los pesos y de los factores de ajuste *bias*.

En una red neuronal artificial si se conoce el vector objetivo que se desea alcanzar, éste puede ser incluido como un vector de entrada adicional, lo que permitirá un ajuste de los pesos de las neuronas(función de ponderación) en pro de alcanzar dicho objetivo (Figura 8.1).

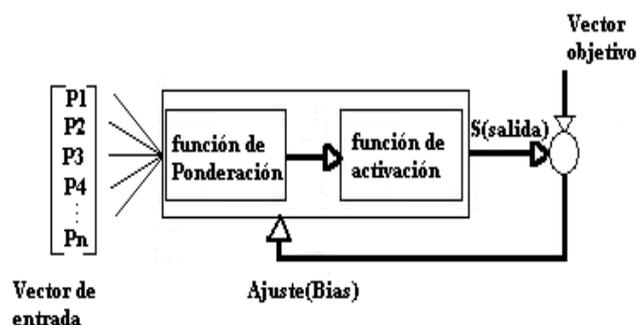


Figura 8.1. Diagrama de bloques de una red neuronal artificial

Las redes neuronales artificiales son entrenadas de forma que ante una entrada particular, generen una salida específica. La respuesta de la red neuronal ante una señal de entrada dada dependerá de las interconexiones presentes entre cada uno de estos elementos así como también de que la red esté adecuadamente entrenada para responder a dicha entrada.

En función del tipo de aprendizaje que se realiza, las redes neuronales artificiales pueden ser clasificadas de acuerdo a [66](Figura 8.2) como:

- Aprendizaje supervisado.
- Aprendizaje no supervisado y
- Aprendizaje híbrido.

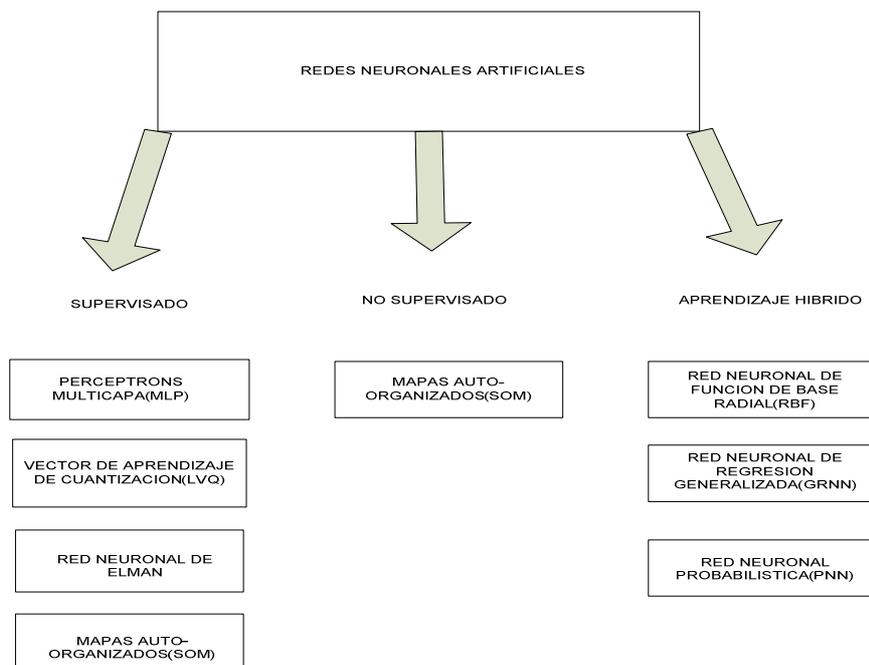


Figura 8.2. Clasificación de las redes neuronales artificiales

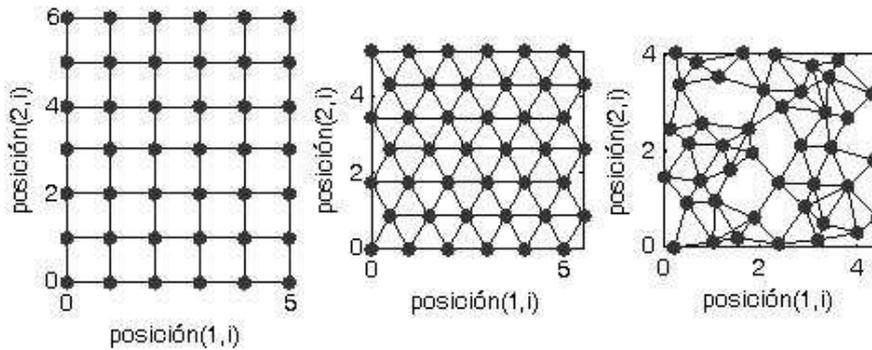
## 8.2. Mapa auto-organizado (SOM)

En este trabajo de tesis se va a utilizar un mapa auto-organizado (SOM, *por sus iniciales en inglés "Self Organizing Map"*), el cual es un modelo que permite una abstracción de las similitudes existentes dentro de un conjunto determinado de datos de entrada. Dado que el mapa auto-organizado reduce la dimensionalidad de los datos de entrada al tiempo que preserva sus interrelaciones topológicas, permite el establecimiento de un grupo de abstracciones asociadas a dichos datos. Los mapas auto-organizados son representaciones que aprenden a clasificar vectores de entrada según como se relacionen entre sí. Se diferencian de los mapas competitivos [64], en que son capaces de reconocer no solo entradas similares, sino grupos de entradas que sean similares entre sí.

El conjunto de variables de entrada a un mapa auto-organizado forma un vector real  $P$ :

$$P = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n]^T \in R^n \quad (8.1)$$

El mapa auto-organizado está compuesto por una red de neuronas ordenadas de acuerdo a una función topológica (por ejemplo rectangular, hexagonal e irregular, Figura 8.3). La función de vecindad  $N_i$  de un nodo  $i$  incluye todos los nodos ubicados dentro de un cierto radio alrededor de un nodo determinado.



a) Rectangular                      b) Hexagonal                      c) Irregular  
**Figura 8.3. Topologías presentes en un mapa auto-organizado de siete filas por seis columnas, donde se muestra la ubicación de las neuronas**

Cada neurona tiene asociado un peso  $w_i$  (también llamado modelo) de la misma dimensión que el vector de entrada.

$$w_i = [\mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{in}]^T \in R^n \quad (8.2)$$

El mapa auto-organizado realiza un mapeo del un conjunto de datos de entrada  $n$ -dimensionales hacia los elementos de una ordenación unidimensional o bidimensional. Para ello, la imagen de un vector de entrada,  $P$ , dentro del mapa auto-organizado estará dada como el elemento del vector  $w_i$  más próximo a  $P$ . Asumiendo una medida de distancia (dado por el índice  $c$ ) entre  $P$  y  $w_i$  denotada  $d(P, w_i)$ , se tiene(8.3).

$$c = \arg \min\{d(P, w_i)\} \quad (8.3)$$

Para determinar cuál de los elementos del vector modelo (o vector de pesos)  $w_i$  se encuentra más cerca de los elementos de entrada, los pesos deben tener algún valor por lo que deben ser previamente inicializados. Dicha inicialización puede ser aleatoria, ya que la convergencia del mapa no depende de ella. Sin embargo, una inicialización con cierto tipo de regularidad, puede llegar a permitir que el mapa converja mucho más rápido. A continuación se realiza una comparación entre cada elemento del vector de entrada  $P$  y cada peso del vector  $w_i$ , donde la neurona cuyo peso resulte ser más similar a  $P$  según la medida de distancia previamente definida, será denominada neurona ganadora *BMU (Best Matching Unit)*. Esta neurona ganadora es la que se activa según la función de activación previamente definida.

La vecindad  $N_{ci}[n]$  contiene todas las neuronas  $i$  que se encuentran en un radio  $d$  de la neurona ganadora  $c$  en el instante  $n$ , así:



$$N_{ci}[n] = \{i, d_{ci} \leq d\} \quad (8.4)$$

Para cada uno de los elementos de entrada se modifica tanto el peso de la neurona ganadora como los de aquellas contenidas dentro de la vecindad, siendo este ajuste proporcional a un factor  $\alpha$  llamado factor de aprendizaje (*learning factor*) con el fin de minimizar el error presente entre los pesos y el dato de entrada. El factor de aprendizaje y el radio de la vecindad determinan qué neuronas son modificadas y en qué grado.

Un mapa auto-organizado agrupa localmente parámetros similares de entrada gracias a la búsqueda de una distancia mínima. Para garantizar que dicha localización se mantenga y exista convergencia a lo largo del proceso, la vecindad disminuye su tamaño a medida que transcurre el proceso, de modo que  $N_{ci}[n] \rightarrow 0$  conforme  $n \rightarrow \infty$ . Asimismo, el factor de aprendizaje  $\alpha[n]$  va variando a lo largo del proceso (8.5)

$$0 < \alpha[n] < 1; \quad \alpha[n] \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 \quad (8.5)$$

La actualización de los pesos de las neuronas se define mediante la *regla de Kohonen* [65], de manera que para las neuronas  $i$  que pertenezcan a la vecindad  $N_i(d)$  se tiene que el nuevo valor para el peso  $w_i$  está dado por (8.6)

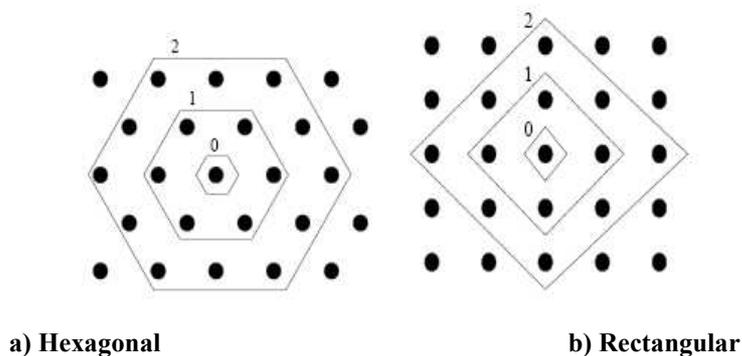
$$\begin{aligned} w_i[n] &= w_i[n-1] + \alpha[n] N_{ci}[n] (P - w_i[n-1]) \\ w_i[n] &= (1 - \alpha[n] N_{ci}[n]) w_i[n-1] + \alpha[n] N_{ci}[n] P \end{aligned} \quad (8.6)$$

Donde  $P$  representa los datos de entrada,  $\alpha[n]$  el factor de aprendizaje con valor entre 0 y 1, el cual decrece con el número de iteraciones ( $n$ ) del proceso de entrenamiento, de tal forma que cuando se ha presentado un gran número de veces el vector de datos de entrada, su valor es prácticamente nulo, con lo que las modificaciones de los pesos es insignificante.

La ecuación (8.6) indica que cuando un vector de datos es presentado en el instante  $n$ , el peso de la neurona para dicho instante equivale al del instante anterior ( $n-1$ ) más un cierto ajuste equivalente al factor de aprendizaje multiplicado por la diferencia entre el peso previo de la neurona y el dato de entrada. Esto implica que a medida que se entrena el mapa auto-organizado los pesos de la neurona ganadora y de sus vecinos cercanos se ajustarán cada vez más

al dato de entrada  $P$ , permitiéndoles ser capaces de reconocer vectores de datos similares.

El tamaño inicial de la vecindad es un parámetro importante, ya que si no es lo suficientemente grande, el mapa auto-organizado no podrá ser organizado de manera global. En general, el radio inicial de la vecindad suele ser algo más de la mitad del diámetro de todo el mapa auto-organizado. La forma de la vecindad es independiente de la topología del mapa, aunque habitualmente se guarda una homogeneidad en este sentido (Figura 8.4).



**Figura 8.4. Ejemplo de vecindades topológicas**

La selección del número de ciclos de entrenamiento (sigla en inglés Epoch) es fundamental para mapas auto-organizados de grandes dimensiones, ya que para una implementación práctica, es muy importante minimizar la duración del entrenamiento, sin que esto afecte a la calidad de éste. Es una regla común [65], aunque no estricta, definir para ciclos de entrenamiento como mínimo 500 veces el número de neuronas del mapa auto-organizado.

Los mapas auto-organizados se clasifican en dos grupos principales según el tipo de entrenamiento implementado: Mapas No Supervisados y Mapas Supervisados.

- **Mapas No Supervisados:** Este tipo de mapas se caracterizan por clasificar los datos de entrada según los patrones de correlación que detecte entre ellos, ya que recibe únicamente como entradas los datos que desean ser clasificados. En el caso de las señales de vibración, este tipo de mapa realizará una clasificación según el grado de similitud presente entre las diferentes señales.



- **Mapa Supervisado:** Este mapa recibe durante su etapa de entrenamiento de manera simultánea y concatenada con las señales a clasificar, un índice de clase común asociado a ellas y definido por el usuario, el cual asocia cada una de las señales a un grupo conocido caracterizado por la pertenencia de dicha señal a cada una de las clases del conjunto de salida. Por tanto, este mapa clasifica los datos de entrada en mayor medida según el índice de clase y en menor medida por la similitud presente entre ellos. El índice de clase no necesariamente debe ser de magnitud unitaria (con un valor entre 0 y 1), sin embargo, cuanto más reducido sea, menor importancia se le dará al grupo durante el proceso de clasificación, llegando a realizarse una clasificación del tipo no supervisado cuando el índice de clase es de magnitud nula.

El entrenamiento de un mapa auto-organizado se divide en dos etapas principales:

- **Etapa de aprendizaje o de ordenamiento:** En esta etapa tanto el radio de la vecindad como el factor de aprendizaje se inician con sus valores máximos y decrecen hasta unos valores específicos determinados para la etapa de ajuste. Durante esta etapa, las neuronas se organizan de manera global dentro del espacio de datos de entrada con la misma topología con que están ordenadas y relacionadas entre sí. Al finalizar esta etapa, se comienza la etapa de ajuste.
- **Etapa de ajuste:** Se caracteriza porque el radio de la vecindad solo permite incluir a neuronas muy cercanas a la neurona ganadora (activa). Mientras tanto, el factor de aprendizaje se inicia también en un valor pequeño y decrece muy lentamente. De manera conjunta, estos parámetros permiten un ajuste fino de la ubicación de las neuronas, al tiempo que mantiene estable el ordenamiento alcanzado durante la etapa de aprendizaje. El número de ciclos de entrenamiento durante esta etapa puede llegar a ser cientos de veces mayor que los utilizados durante la etapa de ordenamiento.



### 8.3. Parámetros del mapa auto-organizado

**8.3.1. Tipos de inicialización de modelos:** Existen dos tipos de inicialización, aleatoria y lineal.

- **Inicialización Aleatoria:** Se asignan al vector de pesos unos valores aleatorios, normalmente ubicados dentro del rango de los datos de entrada. Un conjunto de vectores inicialmente desordenado puede eventualmente llegar a ser organizado, en algunos cientos de pasos para la mayoría de aplicaciones. Sin embargo, esto no implica que la inicialización aleatoria sea por defecto la más rápida o la mejor.
- **Inicialización Lineal:** Se obtiene la matriz de autocorrelación de los datos de entrada. A partir de ella, se procede a determinar los dos mayores valores propios (*autovalores*) de dicha matriz. Una vez obtenidos estos valores, ellos serán los valores extremos de la inicialización, y el resto de valores de inicialización se definen proporcionalmente a estos.

#### 8.3.2. Duración del entrenamiento

Este parámetro determina el número de ciclos de entrenamiento utilizados para entrenar el mapa. Un entrenamiento demasiado corto puede evitar que el mapa realice una clara clasificación entre diversos grupos de señales, ya que no se le ha permitido minimizar lo suficiente las distancias entre las neuronas y los datos de entrada. Por otro lado, un excesivo entrenamiento, no solo precisa de grandes recursos computacionales, sino que fuerza a un sobre-entrenamiento del mapa cuya consecuencia principal será una clasificación demasiado específica, con lo que cualquier nueva señal que le sea presentada al mapa será considerada errónea si no pertenece estrictamente al grupo de señales de entrenamiento.

#### 8.3.3. Algoritmos de entrenamiento:

Existen dos tipos básicos, secuencial o por lotes.

- **Secuencial:** Este algoritmo se caracteriza porque el ajuste de los pesos de las neuronas se realiza a medida que se le va presentando al mapa cada una de las señales a clasificar. Es útil cuando las señales de



entrenamiento corresponden a una serie temporal, para el cual el mapa se entrena con el propósito de evaluar la evolución de un proceso.

- **Por Lotes:** Para este caso, el ajuste de los pesos se realiza solo después de haber presentado todas las señales. Este tipo de algoritmo se implementa para entrenar un mapa auto-organizado con señales de diferente tipo, con el propósito de establecer las regiones correspondientes de clasificación.

### 8.3.4. Error mínimo de cuantización (*Minimum Quantisation Error, MQE*)

Es la mínima distancia presente entre el vector de datos de entrada  $P$  presentado al mapa auto-organizado y el vector de pesos ( $w_i$ ) de las neuronas pertenecientes al mapa, donde

$$MQE = \min\{d(w_i, P)\} = \min\|w_i - P\| \quad (8.7)$$

Dentro de los mapas auto-organizados, existen diferentes tipos de medidas de distancia que son implementadas, siendo las más usadas la distancia Euclidiana, la distancia de cajas (*box distance*), la distancia de enlace (*link distance*) y la distancia Manhattan, entre otras [67]. Para el presente desarrollo se seleccionó como medida de distancia la de tipo Euclidiana, ya que esta permite una medida de distancia más específica entre las neuronas debido a que está asociada a la separación real entre neuronas y no solo al grado de vecindad entre ellas. La distancia Euclidiana  $d_{Euc}$  entre dos conjuntos A y B, siendo

$$\begin{aligned} A &= [a_1 \ a_1 \ a_1 \ \dots \ a_j] \\ B &= [b_1 \ b_2 \ b_3 \ \dots \ b_j] \end{aligned} \quad (8.8)$$

se define en el espacio  $R^n$  como

$$d_{Euc}(A, B) = \sqrt[n]{(a_1 - b_1)^n + (a_2 - b_2)^n + \dots + (a_j - b_j)^n} \quad (8.9)$$

En el mapa auto-organizado, esta distancia se evalúa de manera independiente para cada uno de los elementos de datos de entrada y de los vectores de pesos, para determinar así cual es la mínima distancia existente. Dado que el mapa auto-

organizado puede ser básicamente de carácter unidimensional o bidimensional (aunque puede extenderse a un número mayor de dimensiones), la distancia Euclidiana será evaluada en el espacio  $R$  ó  $R^2$  según sea el caso donde:

$$d_{Euc}(w_i, x_i) = \begin{cases} (w_i - x_i) & ; \text{ para } R \\ \sqrt{(w_i - x_i)^2} & ; \text{ para } R^2 \end{cases} \quad (8.10)$$

El MQE es una medida de la aproximación con la cual son mapeados los datos de entrada  $n$ -dimensionales sobre una representación unidimensional o bidimensional como es el mapa auto-organizado. De esta manera, un menor valor del MQE estará asociado a una representación más exacta en el mapa auto-organizado de las similitudes presentes en los datos de entrada. La ocurrencia de valores extremos del error mínimo de cuantización puede deberse a dos causas principales:

- Existen valores atípicos (*outliers*) entre los valores de las señales a clasificar: Este inconveniente se minimiza con la previa normalización de los datos.
- La señal de entrada pertenece a una clase desconocida para el mapa: El mapa auto-organizado siempre trata de clasificar cualquier señal de entrada dentro de alguna de las clases existentes, por lo que existe la posibilidad de que para una señal, de clase desconocida, la clasificación sea incorrecta.

### 8.3.5. Matriz unificada de distancias

Para visualizar las distancias existentes entre las neuronas pertenecientes a un mapa auto-organizado, normalmente se recurre al diagrama desarrollado por Ultsch et Al [68], y ampliamente usado por Kohonen [64], denominado matriz unificada de distancias (*U-matrix*). Este diagrama representa las distancias entre las neuronas del mapa organizado mediante un conjunto de matices ya sea en escala de grises o en una escala de pseudo-colores. Si la distancia entre las neuronas es pequeña, se representa mediante un matiz claro, mientras que distancias grandes se representan mediante matices oscuros. Gracias a esta convención, las áreas de clasificación o *clusters* del mapa organizado son visualmente definibles, así también como los límites de dichas zonas.

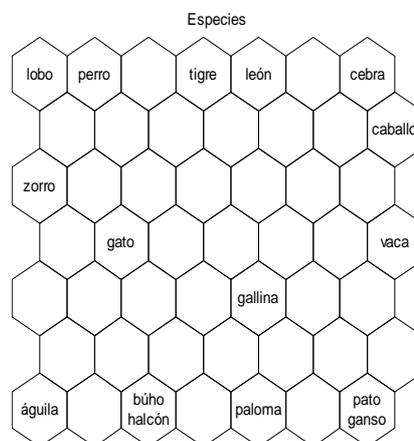
En la Figura 8.5 se muestra un ejemplo de clasificación de patrones mediante un mapa auto-organizado basado en el planteado por Kohonen [64]. En este ejemplo ilustrativo, se ha realizado la clasificación de dieciséis especies diferentes de animales por medio de un mapa auto-organizado, teniendo como parámetros catorce variables diferentes, asociados al tamaño, características fisionómicas y hábitos de conducta. Cada una de estas variables se pondera con un valor de ‘1’ si está presente para determinada especie, y con un valor de ‘0’ si está ausente (Tabla 8.1).

**Tabla 8.1. Parámetros de clasificación para un grupo de diferentes especies animales**

PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN PARA DIFERENTES ESPECIES														
Especie	TAMAÑO			POSEE						GUSTA DE				
	Pequeño	Mediano	Grande	2 patas	4 patas	Pelo	Pezuñas	Crin	Plumas	Rayas	Cazar	Correr	Volar	Nadar
paloma	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
gallina	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
pato	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1
ganso	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1
búho	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0
halcón	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0
águila	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
zorro	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
perro	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0
lobo	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0
gato	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
tigre	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0
león	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0
caballo	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0
cebra	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0
vaca	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0

Una vez definida la Tabla 8.1, es presentada a un mapa auto-organizado para realizar la clasificación.

Para este ejemplo, se utilizó un mapa auto-organizado de topología hexagonal de dimensiones [7, 7], es decir, formado por un arreglo de siete filas por siete columnas. Después del entrenamiento, la clasificación resultante fue la siguiente (Figura 8.5):



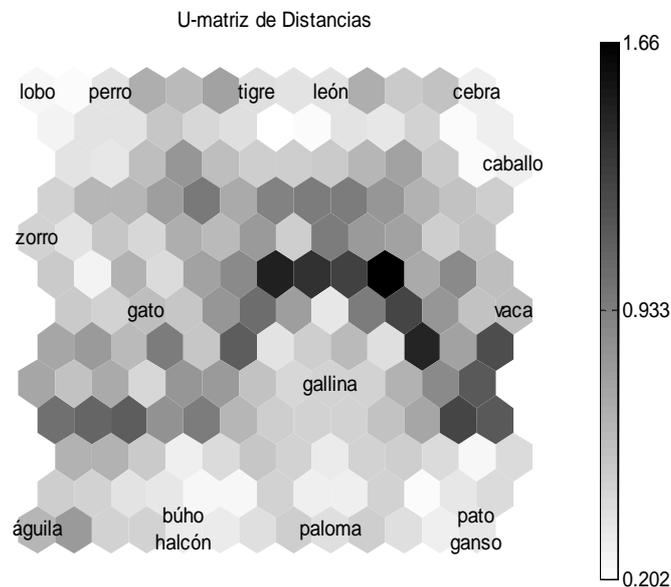
**Figura 8.5. Ejemplo de clasificación de especies mediante un SOM.**



Como se puede apreciar, el *SOM* considera al caballo y a la cebra como más afines entre sí dentro de ciertos animales, al tiempo que reconoce la similitud existente entre el pato y el ganso. Finalmente, clasificó dentro de los mamíferos a la vaca, aunque debido a su lenta movilidad y su hábito alimenticio, se considera algo distante de sus similares.

La U-matriz de distancias (Figura 8.6) representa tanto la ubicación de las neuronas como el grado de separación entre ellas, por lo que sus dimensiones deben ser  $[2m-1, 2n-1]$ , donde  $[m, n]$  corresponde a la dimensión del mapa auto-organizado, siendo  $m$  y  $n$  respectivamente el número de filas y columnas que conforman el mapa auto-organizado. Para el ejemplo, debido a que la dimensión del mapa auto-organizado es  $[7, 7]$ , la U-matriz correspondiente es de dimensión  $[13, 13]$ .

Como se puede observar, existe una cierta división a lo largo de la parte central del mapa auto-organizado (Figura 8.6) donde un conjunto de casillas de color oscuro señala la separación entre mamíferos y aves dentro de las especies presentadas al mapa. La barra de escala de grises ubicada a la derecha de la U-matriz permite cuantificar las distancias existentes en función de la tonalidad.



**Figura 8.6. U-matriz de distancias de la clasificación de las especies listadas en la Tabla 8.1. Los límites de las regiones de clasificación se encuentran demarcados mediante matices oscuros.**

#### 8.4. RED NEURONAL DESARROLLADA

En el presente trabajo de tesis se ha desarrollado una red neuronal con base en la *SOM* Toolbox ejecutándose sobre MATLAB versión 7.0 (R14) para el diagnóstico de averías en cambiadores de tomas en carga.

La variable de entrada a la red son los coeficientes de aproximación de tercer nivel obtenidos en la descomposición wavelet de la señal de vibración en buen estado y con avería (apartado 7.3) utilizando wavelet madre: Biortogonal 3.3 (apartado 6.4.2.2)

Después de realizar varios entrenamientos (apartado 8.6) se ha llegado a un *SOM* de dimensiones [16 15], con un total de 240 neuronas.

La red se ha entrenado con 180 señales correspondientes a 5 grupos de diagnóstico; 36 señales por grupo (apartado 8.7) y ha sido probada con 50 nuevas señales pertenecientes a los cinco grupos de diagnóstico (10 señales por grupo).

Las señales de vibración utilizadas durante el entrenamiento se etiquetaron de manera alfabética y ordenada con el fin de determinar la precisión de la clasificación producida por el *SOM*. Estas etiquetas están compuestas por un índice alfabético seguido del indicador del grupo al que pertenece. El índice alfabético va desde la *a* hasta la *z* y desde *Aa* hasta *Aj* (un total de 36 códigos diferentes). A diferencia del período de clasificación, durante el entrenamiento se conoce a qué grupo de diagnóstico pertenecen dichas señales de vibración; es por eso que en la etiqueta se incluye el nombre del grupo, desde *GR1* hasta *GR5*. Por ejemplo, la primera señal correspondiente al Grupo 1 de diagnóstico es etiquetada como *aGR1*; la vigésima señal correspondiente al Grupo 3 de diagnóstico es etiquetada como *tGR3* y la trigésima señal correspondiente al Grupo 4 de diagnóstico es etiquetada como *AdGR4*.

De manera similar, las señales utilizadas en la etapa de clasificación (señales a clasificar) fueron etiquetas con diez índices numéricos desde *1* hasta *10*, y cinco índices alfabéticos, desde *testGR1* a *testGR5*.

El entrenamiento de la red será de tipo supervisado, con inicialización lineal y algoritmo de entrenamiento secuencial.

El algoritmo de aprendizaje es el siguiente:

1. Se inicializan los pesos (inicialización lineal) y se fija la zona de vecindad entre las neuronas de salida. La función de vecindad gaussiana  $N_{ci}[n]$  contiene todas las neuronas  $i$  que se encuentran dentro de un radio  $d$  de la neurona ganadora  $c$  y está definida según (8.11).

$$N_{ci}[n] = \exp\left[-d_{ci}^2 / 2d^2[n]\right] \quad (8.11).$$

Donde  $d_{ci}^2$  : Distancia Euclidea

$d[n]$  : Radio de la vecindad en el instante  $n$

$n$  : Instante de entrenamiento

El radio de esta vecindad decrece linealmente a lo largo de los ciclos de entrenamiento.

Durante la etapa de ordenamiento, el radio de esta vecindad decrece linealmente pasando de un radio inicial de 2 a un radio final de 1 a lo largo de los 1000 ciclos de entrenamiento determinados previamente. El factor de aprendizaje  $\alpha[n]$  se varía a lo largo del proceso de ordenamiento según:

$$\alpha[n] = \alpha_0 / (1 + 100n / C_{ord}) \quad (8.12)$$

Donde:

$\alpha_0$  : Factor de aprendizaje inicial

$C_{ord}$  : Ciclos totales de entrenamiento de la etapa de aprendizaje o de ordenamiento (*Epochs*)

$n$  : Instante de entrenamiento

Durante la etapa de ajuste, el factor de aprendizaje se mantiene constante (0,5), tomando el valor con el cual finaliza durante la etapa de ordenamiento. Sin embargo, la vecindad sigue reduciéndose linealmente entre un radio inicial de 1 y una radio final de 0,001, pero ahora sobre un número mayor de ciclos de entrenamiento propios de esta etapa (4000).

2. Se presenta a la red la información de entrada (coeficientes wavelet) en forma de vector  $P = [P_1, P_2, \dots, P_{130}]$  cuyos componentes son continuos y normalizados.

3. Se determina cuál es la neurona ganadora o BMU (best matching unit) de la capa de salida. Para ello se calcula la distancia(similitud) entre el vector de entrada  $P$  y el vector de peso  $w_i$  utilizando para ello la distancia euclídea, dada por la ecuación (8.3)

$$c = \arg \min \{d(P, w_i)\}.$$

4. Una vez determinada la neurona ganadora, para cada uno de los elementos del vector de entrada se actualiza el peso de la neurona ganadora, así como el de aquellas neuronas presentes dentro de la vecindad, siendo este ajuste proporcional al factor de aprendizaje y el radio de la vecindad. La actualización de los pesos de las neuronas esta dado por ecuación (8.6)

$$w_i[n] = (1 - \alpha[n] \cdot N_{ci}[n]) \cdot w_i[n-1] + \alpha[n] \cdot N_{ci}[n] \cdot P$$

5. El proceso debe repetirse (pasos 2 a 5) volviendo a presentar todo el vector de entrada, hasta que el entrenamiento termina. El número de ciclos de entrenamiento debe fijarse a priori, con el fin de calcular la tasa de convergencia en función de la vecindad y del factor de aprendizaje. Terminado el entrenamiento, el mapa ha de ordenarse en sentido topológico, es decir  $n$  vectores topológicamente próximos se aplican a  $n$  neuronas adyacentes.

#### 8.4.1. Grupos de diagnóstico

Del apartado 7.3.se obtuvieron 4 grupos de diagnóstico para el proceso de clasificación, del defecto o avería del cambiador de tomas en carga, sin embargo, las características de algunas de las averías simuladas son semejantes, por lo que se hace necesario crear un quinto grupo de diagnóstico., correspondiente a aquellas averías que no puedan ser clasificadas en ningún grupo. Por lo tanto los grupos de diagnóstico quedan conformados así:

- Grupo 1: Operación normal del *OLTC* (Sin averías).
- Grupo 2: Problemas de contactos del selector (holguras, contactos flojos, problemas en los muelles del selector, barra partida)
- Grupo 3: Problemas de contactos del selector (contactos erosionados, contactos desgastados)

- Grupo 4: Elementos amortiguados del conmutador.
- Grupo 5: Tipo Desconocido

Para el entrenamiento de tipo supervisado se define un índice de clase de magnitud unitaria, mediante un vector de longitud igual al número de grupos de clasificación así:

$$Cl[i] = \begin{cases} 1, & i = \text{Número del grupo} \\ 0, & i \neq \text{Número del grupo} \end{cases} \quad (8.13)$$

Por tanto, los índices de clase para los grupos de diagnóstico serán respectivamente:

$$Cl = \begin{cases} [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] & , \text{ Grupo } 1 \\ [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0] & , \text{ Grupo } 2 \\ [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0] & , \text{ Grupo } 3 \\ [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0] & , \text{ Grupo } 4 \\ [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1] & , \text{ Grupo } 5 \end{cases} \quad (8.14)$$

Debido a la presencia de los índices de clase, la longitud de las señales presentadas al mapa será ligeramente mayor.

Durante la fase de clasificación, las señales de prueba no poseen el índice de clase presente durante el entrenamiento, por lo tanto el *SOM* realiza una clasificación de tipo no supervisado, teniendo en cuenta la previa organización obtenida durante el entrenamiento supervisado. Esto significa que durante la fase de clasificación, el *SOM* evalúa la similitud entre las señales de prueba y las señales utilizadas durante la fase de entrenamiento, procurando conservar la sectorización presente dentro del mapa

### **8.5. Medidas de eficiencia del SOM**

La clasificación de las señales introducidas no solo depende del número de neuronas y de los ciclos de entrenamiento, sino también de la topología existente y de la dinámica del factor de aprendizaje.

Las medidas más usadas para medir la eficiencia del SOM son: el error final de cuantización (MQE), el porcentaje de activación y el porcentaje de clasificación correcta del SOM.



- **El error final de cuantización (MQE):** Mide la distancia mínima existente entre las neuronas entrenadas y las señales de prueba. Interesa que tenga el valor más pequeño posible.
- **Porcentaje de activación del SOM:** Es el porcentaje de neuronas diferentes que responden ante un vector de entrada con respecto al total de neuronas pertenecientes al mapa. La activación de un SOM nunca puede ser del 100% debido a que existen ciertas neuronas que se encargan de delimitar los *clusters* o regiones dentro del SOM y por tanto, son muy poco susceptibles de ser activadas. Se puede lograr un mayor porcentaje de activación del SOM con un entrenamiento no supervisado, pero en detrimento de la correcta clasificación de las señales. Interesa que el porcentaje de activación sea lo más elevado posible.
- **Porcentaje de clasificación correcta del SOM:** Este indicador mide el porcentaje de las señales de prueba, clasificadas correctamente.

### 8.6. Determinación del tamaño del SOM

Para determinar el tamaño óptimo del SOM, se realizan varios entrenamientos sobre mapas auto-organizados de diferentes dimensiones, bajo iguales parámetros de entrenamiento. Para determinar el tamaño óptimo se ha utilizado como parámetros de decisión el porcentaje de clasificación correcta del mapa auto-organizado, el valor del MQE y del porcentaje de activación. Es necesario tener en cuenta que la clasificación no solo depende del número de neuronas presentes en el mapa auto-organizado, también del número de columnas y filas que lo conforman. Esto significa que la clasificación realizada por un SOM de dimensiones [12 15] no es igual a una realizada por un SOM de dimensiones [10 18] aunque ambos poseen el mismo número de neuronas (180).

En la Tabla 8.2 se muestran los resultados obtenidos durante la clasificación de las señales con el fin de determinar el tamaño óptimo del mapa. La mejor clasificación se obtiene con un SOM de dimensiones [16 15], con un total de 240 neuronas y una clasificación correcta del 90 %, manteniendo un valor de MQE bajo y un buen porcentaje de activación.



Tabla 8.2. Porcentajes de clasificación correcta para SOMs de diversas dimensiones

PORCENTAJE DE CLASIFICACIÓN CORRECTA DEL SOM			
Dimensiones SOM / Neuronas	Porcentaje Clasificación	Porcentaje Activación	MQE Final
[15 12] (180)	78	53,333333	0,080460
[15 13] (195)	74	52,307692	0,071095
[15 14] (210)	82	51,428571	0,057311
[15 15] (225)	84	48,000000	0,056234
[16 12] (192)	84	49,479167	0,078548
[16 13] (208)	88	47,115385	0,080453
[16 14] (236)	80	47,321429	0,066006
[16 15] (240)	<b>90</b>	<b>46,666667</b>	<b>0,060688</b>
[16 16] (256)	84	46,484375	0,045754
[17 12] (204)	80	50,000000	0,069234
[17 13] (221)	82	48,868778	0,063724
[17 14] (250)	74	48,739496	0,048322
[17 15] (255)	84	46,666667	0,050225
[17 16] (272)	74	44,117647	0,045800
[17 17] (289)	80	43,944637	0,040305
[18 12] (216)	80	48,148148	0,069165
[18 13] (234)	74	48,290598	0,058445
[18 14] (252)	86	44,841270	0,062197
[18 15] (270)	78	45,925926	0,039833
<b>Longitud = 60 muestras, Epochs Fase de Ordenamiento = 100; Epochs Fase de Ajuste = 1000</b>			
<b>Tasa de Aprendizaje Hiperbólica; Vecindad Gaussiana; Reducción lineal de Vecindad</b>			

### 8.7. Resultados de entrenamiento SOM [16 15]

La Tabla 8.3 muestra los resultados de tres procesos de entrenamiento diferentes para un SOM de [16 15]; el primer proceso de entrenamiento con 100 ciclos de ordenamiento y 500 ciclos de ajuste, el segundo con 100 ciclos de ordenamiento y 5.000 ciclos de ajuste y el tercero con 1.000 ciclos de ordenamiento y 5.000 de ajuste.



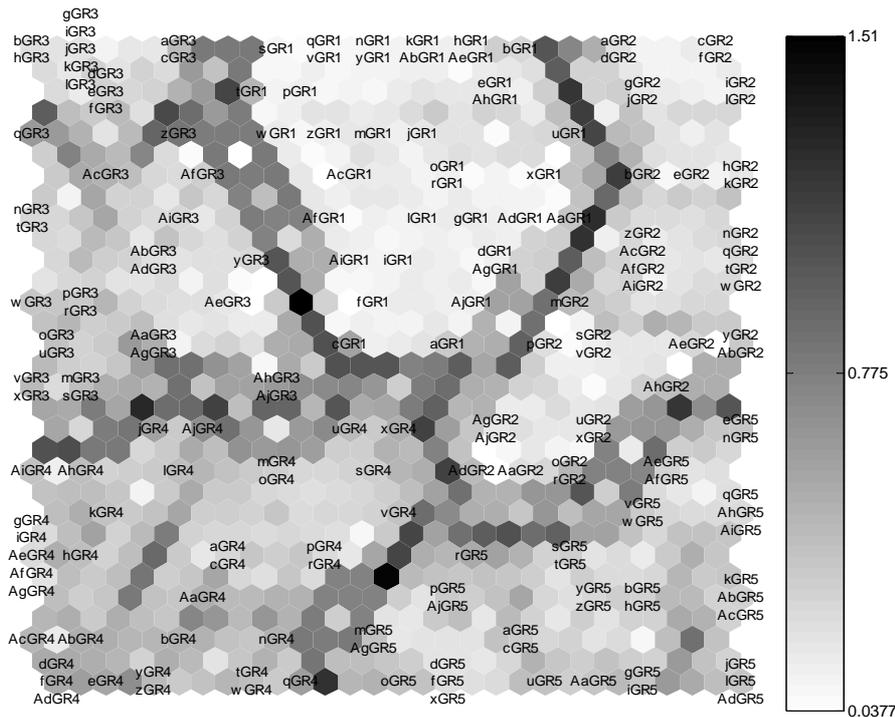
**Tabla 8.3. Resultados entrenamientos SOM [16 15]**

<b>Etapa de Ordenamiento: Radio inicial = 2; Radio final =1; Factor de aprendizaje=0,5</b>					
<b>Etapa de Ajuste: Radio inicial = 1; Radio final =0.001; Factor de aprendizaje=0,5</b>					
<b>Epochs Ordenamiento= 100; Epochs ajuste=500</b>					
Radio final etapa de ajuste	0,001	0,01	0,05	0,1	0,2
MQE Final	0,0609	0,0609	0,0606	0,0609	0,0606
Porcentaje de Activación	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7
Porcentaje de Clasificación	90	90	90	90	88
<b>Epochs Ordenamiento= 100; Epochs ajuste=5000</b>					
Radio final etapa de ajuste	0,001	0,01	0,05	0,1	0,2
MQE Final	0,0619	0,0619	0,0619	0,0619	0,0619
Porcentaje de Activación	46,3	46,3	46,3	46,3	46,3
Porcentaje de Clasificación	90	90	90	90	88
<b>Epochs Ordenamiento= 1000; Epochs ajuste=5000</b>					
Radio final etapa de ajuste	0,001	0,01	0,05	0,1	0,2
MQE Final	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Porcentaje de Activación	48,3	48,3	48,3	48,3	48,3
Porcentaje de Clasificación	88	88	88	86	84

En la Tabla 8.3 se observa que el incrementar en 10 veces el ciclo de ajuste en la etapa de entrenamiento (de 500 a 5.000) no implica necesariamente una reducción en el error de cuantización, ya que la variación del factor de aprendizaje y del radio de la vecindad es proporcional a la duración del entrenamiento. Por el contrario el *MQE* se incrementó en un 1,39% y el porcentaje de clasificación correcta permanece constante. Además la correcta clasificación por parte del *SOM* está asociada a la etapa de ordenamiento con lo cual un incremento en los ciclos de ordenamiento puede mejorar la robustez del *SOM* en detrimento de la clasificación producida por un sobre-entrenamiento.

### 8.8. Visualización del SOM

Para el SOM [16 15], con 100 ciclos en la fase ordenamiento y 500 ciclos en la fase de ajuste (Tabla 8.3), en la Figura 8.7 (matriz unificada de distancias) se muestra la ubicación de las neuronas y el grado de separación entre ellas. En la Figura 8.8 se muestra la clasificación resultante para 50 señales de prueba y en Figura 8.9 la trayectoria de clasificación obtenida,



**Figura 8.7. U-matriz de distancias resultante para el SOM [16 15] supervisado; Epochs Fase Ordenamiento: 100; Epochs Fase Ajuste: 500**

En la matriz de distancias (Figura 8.7) las distancias pequeñas entre neuronas se representan mediante un matiz claro, mientras que distancias grandes, se representan mediante matices oscuros.

De la visualización del SOM se puede concluir lo siguiente:

- En la matriz de distancias (Figura 8.7) se pueden apreciar cinco áreas de clasificación o *clusters* visualmente bien definidas y los límites de dichas zonas, correspondientes a los cinco grupos de diagnóstico
- En la clasificación resultante de las 50 señales de prueba (Figura 8.8), el SOM considera que 4 de las señales del grupo 2 de diagnóstico correspondientes, a holguras, contactos flojos, problemas en los

muelles y barra partida del selector, como más afines a la operación normal del cambiador de tomas en carga. Mientras el grupo 4 de diagnóstico, de elementos amortiguados en el conmutador, se encuentran claramente diferenciados del resto de grupos de diagnóstico, así como las 6 señales de grupos desconocidos clasificadas en la parte de abajo del lado derecho del SOM.

- Existe cierta división a lo largo de la parte arriba a la derecha del SOM, donde un conjunto de color oscuro señala cierta separación entre las señales de clasificación del grupo 3 de diagnóstico de, contactos erosionados y desgastados.

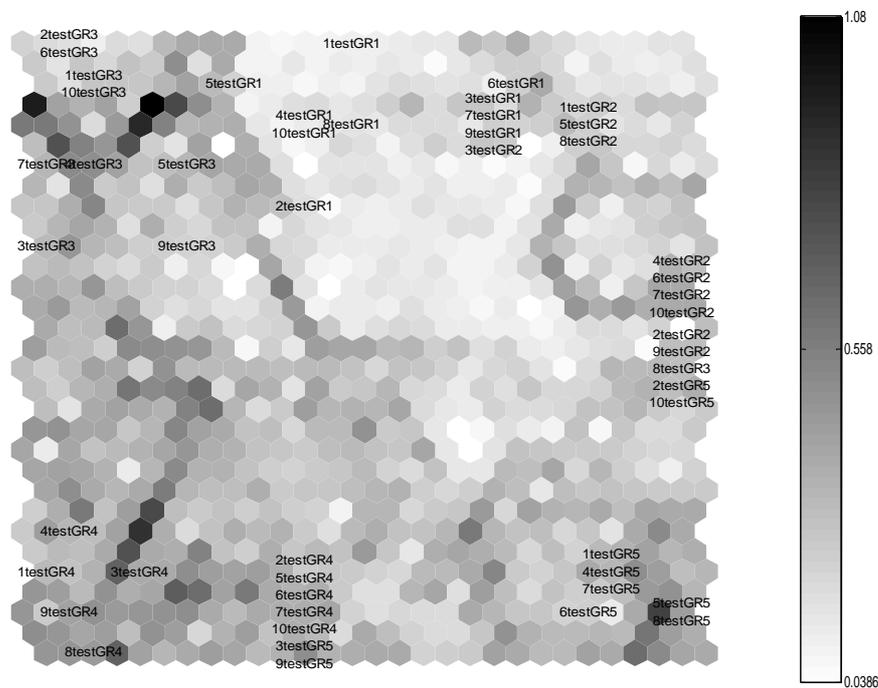
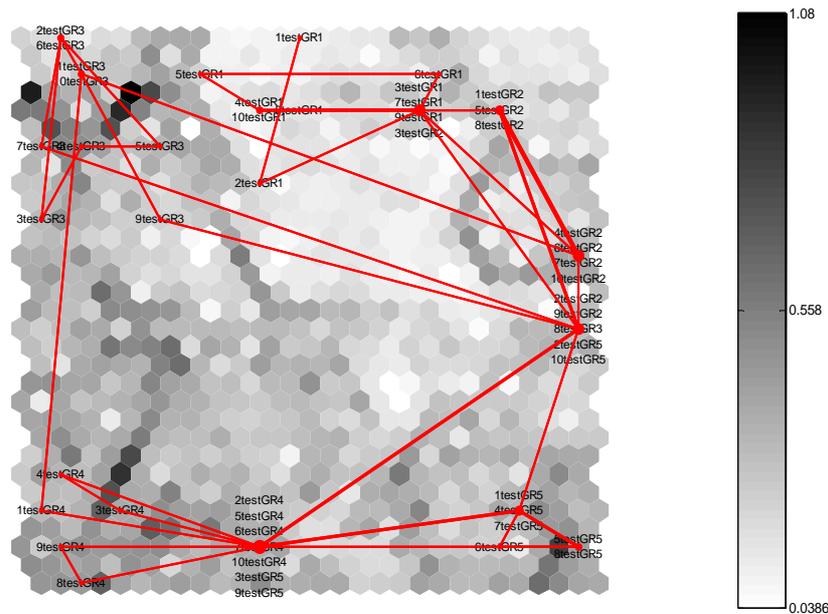


Figura 8.8. Clasificación resultante de señales para el SOM [16 15] supervisado. Epochs Fase Ordenamiento: 100; Epochs Fase Ajuste: 500



**Figura 8.9.** Trayectoria de clasificación para el SOM [16 15] supervisado. Epochs Fase Ordenamiento: 100; Epochs Fase Ajuste: 500

Con el fin de establecer las ventajas que brinda realizar un aprendizaje supervisado frente a un aprendizaje no supervisado, en la Figura 8.10 se muestra la matriz de distancia y en la Figura 8.11 la trayectoria de clasificación realizada para el SOM [16 15] no supervisado.

De la Tabla 8.4 se desprende que aunque el porcentaje de activación (47,9%) y el porcentaje de clasificación (88 %), son buenas, la clasificación de las señales fue mucho menos diferenciada a la lograda mediante el entrenamiento supervisado. A manera de ejemplo puede apreciarse que en el cuadrante superior izquierdo (Figura 8.11) una misma neurona ubicada entre los grupos 2 y 5 presenta activación de ambos, produciendo cierta ambigüedad en la clasificación. Asimismo existen neuronas que se activan para determinadas señales específicas y que se encuentran demasiado alejadas de sus similares, lo que se traduce en falta de generalización por parte del mapa, y por ende, en una reducción de la diferenciación.

**Tabla 8.4.** Comparación entre resultados entrenamiento supervisado y no supervisado del SOM

ENTRENAMIENTO SOM [16 15]		
Radio inicial Ord. = 2; Radio final Ord. = 1; Radio final Ajuste: 0,1		
Epochs Ordenamiento = 100 ; Epochs Ajuste = 500		
INDICADORES	SUPERVISADO	NO SUPERVISADO
MQE Final	0,060986	0,055457
Porcentaje de Activación	46,666667	47,916667
Porcentaje de Clasificación	90	88

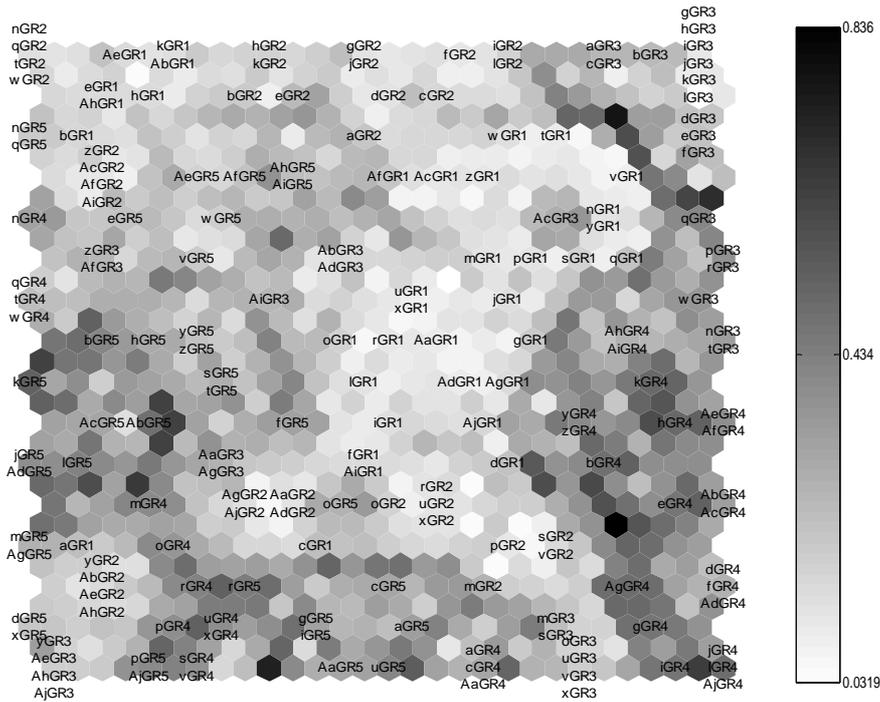


Figura 8.10. U-matriz de distancias resultante para el SOM [16 15] no supervisado. Epochs Fase Ordenamiento: 100; Epochs Fase Ajuste: 500)

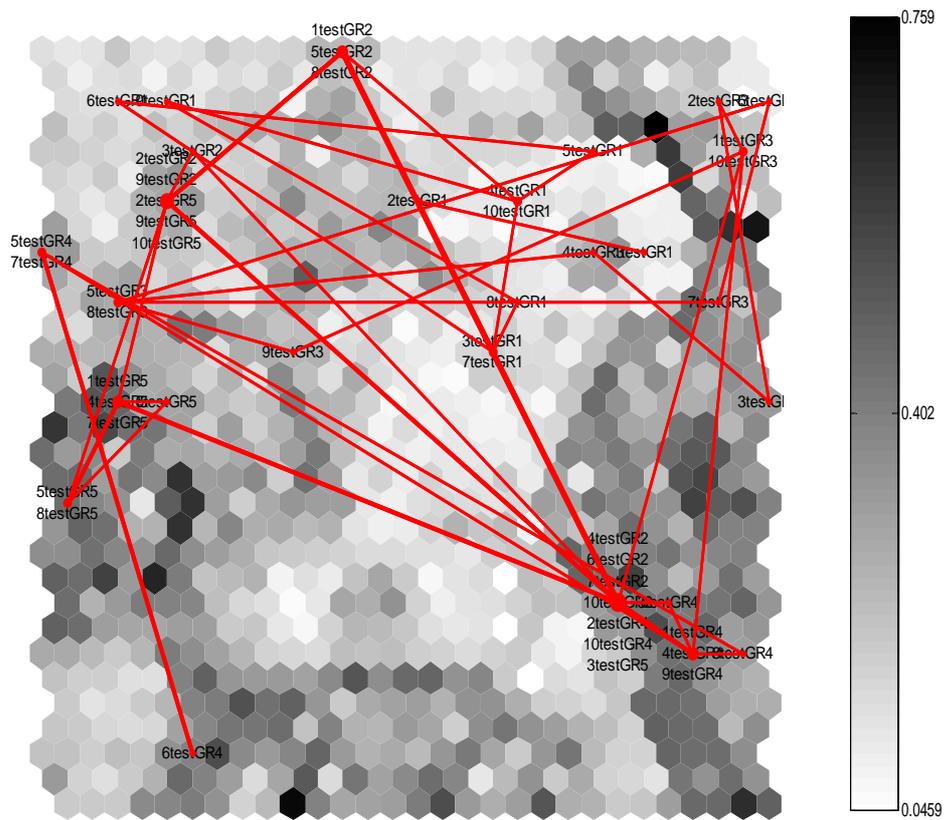


Figura 8.11. Trayectoria de clasificación para el SOM [16 15] no supervisado. Epochs Fase Ordenamiento: 100; Epochs Fase Ajuste: 500; Radio Final Ajuste = 0.1



## *Capítulo 9*

# CONCLUSIONES Y APORTACIONES ORIGINALES

## 9.1. CONCLUSIONES

En la presente tesis se ha establecido una metodología de detección automática de averías en el cambiador de tomas en carga de un transformador basado en el análisis de las vibraciones registradas durante el proceso de conmutación

La primera tarea que hubo que hacer para automatizar el diagnóstico del estado del cambiador de tomas en carga fue conocer con alto grado de detalle el modo de funcionamiento del cambiador de tomas con el fin de determinar los principales impulsos presentes en el patrón de vibración e identificar sus causas, así como estudiar cómo se altera el patrón de vibraciones del cambiador con cada una de las averías. Por los motivos anteriormente expuestos se llevó a cabo un plan de ensayos para tomar medidas de vibración en un cambiador de tomas en carga en buen estado y con diferentes tipos de averías (averías que hubo que simular). El estudio se centró especialmente en las averías del selector, ya que el conmutador es un elemento cuyo montaje y desmontaje requiere de personal cualificado.

Implementar averías en el laboratorio consume gran cantidad de tiempo, es una tarea costosa y no siempre representa la operación real del cambiador de tomas en carga, por lo que es deseable disponer de un procedimiento que permita simular por ordenador la operación de un cambiador de tomas. Sin embargo, el realizar un modelo matemático que describa los niveles de vibraciones del cambiador de tomas en carga no es una tarea sencilla. Por lo tanto en esta tesis propone un modelo simple en 3D de simulación del selector del cambiador de tomas en carga para la simulación del patrón de vibración del cambiador de tomas en buen estado y con algún tipo de avería basado en el método de elementos



finitos (MEF) aplicado a simulación de eventos mecánicos (MES). Dicho modelo fue validado con registros de señales de vibración. Por lo que se refiere al conmutador, éste es un elemento complejo que requiere de unos medios muy potentes de hardware y especialmente de software, y su simulación por elementos finitos con los elementos de hardware y software disponibles en el momento no arrojó resultados satisfactorios.

Una vez que se dispone del patrón de vibraciones del cambiador de tomas se debe automatizar el proceso de extracción de los parámetros con base a los cuales se puede hacer el diagnóstico de averías, pero esto no es una tarea fácil, ya que la vibración de un sistema mecánico complejo depende de muchos factores, lo que hace que los patrones de averías no sean totalmente repetibles. Además, la señal de vibración en un cambiador de tomas contiene un importante nivel de ruido que no permite distinguir de forma fácil la tendencia principal de la señal.

Así, uno de los principales parámetros de diagnóstico de la condición mecánica del cambiador de tomas en carga es el número de impulsos de la señal de vibración, que en muchas ocasiones puede ser claramente visible para el ojo humano. Sin embargo, en un porcentaje elevado de patrones de vibración es difícil cuantificar el número de impulsos presentes en el patrón de vibración, aun para personal cualificado. Diagnosticar *a ojo*, es una tarea laboriosa, subjetiva complicada y con resultados poco satisfactorio, ya que no se cuenta con una metodología clara y efectiva para analizar los diferentes patrones de un cambiador de tomas en carga. Es deseable disponer de un método de diagnóstico objetivo y efectivo dado que los métodos simples de automatización basados en la obtención de los máximos locales de la señal de vibración para de la obtención del número de impulsos no son efectivos por si solos, por tanto es necesario aplicar otras técnicas que permitan obtener la información relevante y desechar el resto, como se comprobó en el curso de los trabajos de tesis.

Se ha comprobado que el análisis de la envolvente de la señal proporciona una señal más fácil de interpretar que el análisis de la señal en bruto, en el proceso de detección de averías. Por ello se ha aplicado a la señal un pre-procesamiento consistente en una normalización y aplicación de la transformada de Hilbert.

Para automatizar el proceso de detección de averías se han utilizado técnicas en el dominio de la frecuencia y técnicas en el dominio tempo-frecuencia. De las

técnicas de procesamiento de datos aplicadas (Transformada rápida de Fourier (FFT), Transformada corta de Fourier (STFT) y Transformada Wavelet discreta (DWT)) que permiten obtener los principales indicadores de diagnóstico se puede concluir lo siguiente:

#### Transformada de Fourier

La transformada de Fourier aplicada al conjunto de la señal de vibraciones de un cambiador de tomas en carga no proporciona resultados satisfactorios para detectar y distinguir averías, ya que los diferentes espectros de frecuencia obtenidos son muy semejantes entre sí y no generan la suficiente variabilidad para distinguir determinados defectos. Con la aplicación de la transformada de Fourier es posible distinguir dos grupos de estados en el cambiador de tomas; el primer grupo recoge el cambiador en buen estado y cinco estados caracterizados por defectos que no provocan una variación significativa en el patrón de vibración (fundamentalmente fallos en el selector). El segundo grupo recoge cuatro estados defectuosos que modifican sustancialmente el patrón de vibración (fundamentalmente eliminando las vibraciones de más alta frecuencia); son defectos en el selector que introducen rozamientos importantes o averías en el elemento almacenador de energía. La Tabla 7.1 del apartado 7.1 refrenda las conclusiones anteriores.

#### Transformada corta de Fourier

La transformada corta de Fourier permite realizar un análisis tiempo-frecuencia de la señal de vibración de un cambiador de tomas en carga (que es una señal no estacionaria). Esta metodología segmenta la señal, utilizando para ello una ventana (ventana de Hamming para el caso en estudio), aplica la transformada de Fourier a cada segmento y obtiene la energía de cada impulso. Mediante este procedimiento es posible detectar si ha desaparecido uno o más impulsos y cuál es el impulso desaparecido. Asimismo, es posible determinar el instante de tiempo en el que ocurre cada impulso, la duración del impulso y el contenido en frecuencias de cada impulso. De esta manera se dispone de varios indicadores de diagnóstico para identificar el estado del cambiador de tomas.

Dependiendo del indicador o conjunto de indicadores de diagnóstico elegidos es posible clasificar y agrupar las averías en grupos de diagnóstico, siendo más

fácil o difícil distinguir los diferentes estados incluidos en dicho grupo. Si se elige como indicadores la existencia o no de impulso y el contenido en frecuencias de cada impulso, es posible clasificar el cambiador en cinco grupos, alguno de los cuales recoge un solo estado defectuoso mientras que otros recogen dos defectos (o un estado en buen estado y un estado defectuoso) o cuatro estados defectuosos. En algunos casos, a partir del contenido en frecuencias es posible diferenciar dos estados de un mismo grupo de diagnóstico, pero en el caso del grupo 4 (que incluye cuatro estados defectuosos) es prácticamente imposible diferenciar entre los distintos estados defectuosos.

Si se elige como indicadores de diagnóstico la existencia o no de impulso y el tiempo entre impulsos, es un poco más fácil distinguir los diferentes estados incluidos en dicho grupo. En la Tabla 7.2 del apartado 7.2 se presenta un resumen de las conclusiones anteriormente expuestas.

#### Transformada Wavelet

El problema de la transformada de Fourier de tiempo corto es que calcula con la misma resolución tanto frecuencias bajas como frecuencias altas ya que utiliza para ello un ancho de ventana fijo para todo el análisis. La transformada Wavelet soluciona este inconveniente incorporando variables de escalamiento y traslación que permiten utilizar ventanas de diferente ancho durante el análisis de la señal, en otras palabras realiza un análisis tiempo frecuencia con resolución variable, siendo la resolución inversamente proporcional a la escala, es decir bajas escalas–altas frecuencias, corresponden a wavelets comprimidas, donde se aprecian los detalles de los cambios a altas frecuencias, mientras que altas escalas–bajas frecuencias corresponden a wavelets dilatadas donde se aprecian las aproximaciones (que representan la parte más lenta de la señal). Al disminuir la resolución se elimina, o en su defecto se tiene menos información de, las altas frecuencias, lo que proporciona una tendencia general de la señal.

La aplicación de la transformada Wavelet con la wavelet madre adecuada, al conjunto de señales de vibración permite una mayor preservación de la energía con respecto a la señal original, a la vez que se mejora la correlación presente en la señal suavizada (filtrada) respecto a la señal original, siendo este un criterio para la selección de este tipo de filtrado. Asimismo, esta transformada permite la



extracción más detalla de los principales indicadores de diagnóstico (número de impulsos fundamentales, energía asociada a cada impulso, espaciamiento temporal entre impulsos y las principales bandas de frecuencias asociados a dichos impulsos.) y de parámetros genéricos y fidedignos representativos de la señal de vibración, para ser utilizado con propósitos de comparación y clasificación.

Tomando como indicadores de diagnóstico los impulsos que desaparecen y el espaciamiento temporal entre impulsos de la señal de vibración se ha presentado en la Tabla 7.7 el estado del cambiador de tomas en carga. Este ha sido clasificado en 5 grupos (columna 1 de la Tabla 7.7) en función de los impulsos que desaparecen. Dentro del grupo 1 se encuentran el cambiador de tomas en buen estado y con contactos desgastados. El desgaste de contactos se caracteriza por un incremento significativo del tiempo entre los impulsos 1 y 2. El grupo 2 contiene un solo defecto (holgura en el anclaje). El grupo 3 contiene dos estados defectuosos (contactos del selector flojos y contactos del selector erosionados), y la distinción entre ambos estados se puede hacer con base al tiempo T5-4. El grupo 4 contiene cuatro estados defectuosos (muelles del selector sin la tensión adecuada, barra de anclaje de partida inexistente, amortiguamiento del carro y amortiguamiento en la leva). El amortiguamiento de la leva es el más fácil de identificar, por la significativa reducción de T5-4 que conlleva, pero los otros tres casos son difíciles de distinguir entre sí y el grupo 5 contiene un solo defecto (barra de anclaje de llegada inexistente).

Dentro de las ventajas significativas del uso de transformada wavelet es que es más fácil programar que la transformada corta de Fourier, la cual requiere un gran esfuerzo de programación.

Cada una de las metodologías (transformada de Fourier clásica, transformada de Fourier en tiempo corto y transformada de wavelet) utilizadas en el análisis de la señal de vibración presenta puntos fuertes y débiles, por ende es necesario precisar que son técnicas alternativas (e incluso, en función de la información que se desee obtener, complementarias) y de ningún modo la una desplaza a la otra.

A nuestro juicio, los mejores indicadores de diagnóstico son la existencia o no de impulso, junto con el tiempo entre impulsos de vibración. Este tiempo entre

impulsos de vibración puede ser determinado mediante transformada corta de Fourier o mediante Wavelet.

El estudio estadístico realizado (Tabla 7.6) permitió establecer qué variaciones es posible esperar del tiempo entre impulsos en un cambiador de tomas en carga que se considera en buen estado y cuando presenta algún tipo de averías al realizar transiciones idénticas.

Se ha utilizado un Mapa Auto-Organizado (*SOM*) como elemento de reconocimiento y clasificación automática de patrones característicos asociados a diversos estados de funcionamiento del cambiador de tomas en carga. Como entrada a este Mapa Auto-Organizado se han usado los coeficientes de aproximación de la descomposición wavelet de orden tres. Con la aplicación de esta herramienta de automatización del diagnóstico de la condición del cambiador de tomas en carga, se demostró que si existe conocimiento experto de las condiciones de funcionamiento asociadas a los patrones de entrenamiento (indicadores de diagnóstico) del mapa auto-organizado *se* puede incrementar notablemente el porcentaje de clasificación correcta de señales mediante la implementación de un mapa auto-organizado de tipo supervisado, permitiendo una elevada tasa de clasificación.

## **9.2. Aportaciones originales**

La mayoría de los trabajos sobre cambiadores de tomas en carga, se centran en averías en el conmutador. Esta tesis, marca la diferencia, ya que gran parte de este trabajo se centra, en averías en el selector, donde se investigado muy poco, de acuerdo a la bibliografía consultada.

Se ha propuesto una metodología para automatizar el proceso de obtención de los indicadores de diagnóstico (número de impulsos de vibración, contenido en frecuencia de los mismos, energía contenida en el los impulsos y el tiempo entre los impulsos de vibración) para la evaluación del estado (buen estado, averiado y tipo de avería) de un cambiador de tomas en carga.

En la metodología propuesta se han utilizado indicadores de diagnóstico complementarios a los indicadores tradicionales: tiempo de duración del impulso, contenido de energía de impulso y banda de frecuencia asociada al impulso.

Se ha mostrado que la aplicación de la transformada corta de Fourier permite obtener resultados semejantes a los obtenidos mediante la transformada Wavelet si se elige adecuadamente la ventana.

Se ha establecido un criterio claro de selección de la *Wavelet* más apropiada para propósitos de filtrado basado en el grado de correlación presente entre la *wavelet* y la señal de vibración del cambiador de tomas en carga

Se ha propuesto una metodología de umbral, para generar la señal de vibración suavizada con base a los coeficientes *wavelet* de aproximación inalterados y con un escalamiento de los coeficientes *wavelet* de detalle mediante un factor de reducción  $r$ , el cual depende del nivel de descomposición wavelet. Este factor  $r$  se encuentra determinado por la expresión (6.36).

Este método de umbral permite una mayor preservación de la energía con respecto a la señal original, a la vez que se mejora la correlación presente en la señal suavizada respecto a la señal original,

Se propone un nuevo modelo a nivel del selector en 3D para la simulación de el patrón de vibración del cambiador de tomas en carga en buen estado y con una avería tipo, con el fin de complementar los registros de datos obtenidos en pruebas de campo y mejorar la eficiencia de la base de datos que alimenta el sistema de diagnóstico. Con esto se, puede ajustar de una manera más confiable los valores críticos de los umbrales de detección de averías y la probabilidad de falsas alarmas

La metodología de diagnóstico implementada en la presente tesis doctoral puede hacerse extensiva a otro tipo de maquinas rotativas.

### **9.3. Propuesta de Trabajos futuros:**

Los trabajos que se han llevado a cabo se han centrado principalmente (aunque no exclusivamente) en las averías en el selector de un cambiador de tomas en carga, ya que no se logró que una empresa especializada en el montaje, reparación y puesta a punto de cambiadores de tomas accediera a venir a realizar el desmontaje y montaje preciso para simular las diferentes averías del conmutador

que estaba previsto analizar. Como trabajo futuro en este campo sería la realización de un programa de ensayos centrado en las averías del conmutador.

El cambiador de tomas en carga del que se dispuso en la Universidad no es un cambiador de tomas que se encuentre trabajando en un transformador. El patrón de vibraciones de un cambiador de tomas puede depender de factores tales como la corriente de carga del transformador y la temperatura de funcionamiento. Para utilizar este método de diagnóstico como método que permita diagnosticar averías en un transformador en servicio sin necesidad de un descargo (on line), sería preciso cuantificar esa dependencia.

En ocasiones, las averías simuladas en el cambiador de tomas en carga son averías muy severas que hacen que determinados pulsos de vibración desaparezcan. Sin embargo, en ocasiones una avería se va gestando de forma gradual. Es de esperar que entre la condición de equipo en buen estado (presencia de todos los impulsos de vibraciones) y el estado terminal (avería franca) se pase por estados intermedios que se manifiesten en una disminución de la energía contenida en determinados impulsos de vibración hasta que finalmente el impulso desaparece. Por tanto hay que seguir ahondando en la detección de averías en estados intermedios.

No todas las averías de un cambiador de tomas en carga se manifiestan en una alteración del patrón de vibraciones del cambiador de tomas. Así, una avería en las resistencias de conmutación (o una presencia de descargas parciales excesiva) no tiene una influencia apreciable en el patrón de vibraciones. Existen otros métodos de detección de averías en cambiadores de tomas en carga que pueden ser utilizados como un complemento al método presentado.

Se podría utilizar, para cada avería específica del cambiador de tomas en carga, una wavelet madre diferente que identifique dicha avería, de forma que al obtener la correlación de ésta frente a la señal de vibración se obtenga una mayor sensibilidad para la detección del detalle característico de la avería en cuestión.

Mejorar el modelado en 3D propuesto del modo de funcionamiento del cambiador de tomas en carga, incorporando un mayor número de nodos y grados de libertad, con el fin de reproducir el patrón de vibración que este genera con diferentes tipos de averías.



El Error Mínimo de Cuantización (*MQE*) es un indicador para la detección de valores atípicos en las señales de vibración. Con base en este indicador se pueden definir umbrales para la detección del deterioro gradual de los contactos del cambiador de tomas en carga.

Por último, en el presente trabajo de tesis se ha utilizado una red neuronal artificial que utiliza como entradas los coeficientes wavelet de aproximación de nivel 3, sin embargo, se podría pensar en alimentar la red con la energía de cada uno de los impulsos y el tiempo entre éstos, que es una variable que se ha demostrado eficaz en el diagnóstico de averías. De hecho, esta filosofía de funcionamiento se llegó aplicar en el curso de la tesis, pero requiere una estimación de tiempos muy precisa para realizar la clasificación correcta, cosa que no se consiguió hasta la etapa final de la tesis.

#### 9.4. Publicaciones derivadas de la tesis

Los trabajos realizados en esta tesis han dado lugar a las siguientes publicaciones:

- E. Rivas, J. C. Burgos and J. C. Garcia-Prada. (2009, Condition assessment of power OLTC by vibration analysis using wavelet transform. *IEEE Transactions on Power Delivery Vol 24 No 2*, pp. 687-694. Abril 2009.
- E.Rivas, JC Burgos, JC García” Vibration Analysis as method diagnosis for power on load tap changers.”*Revista de Ingenieria*, ISSN 0121-750X, Vol 1, 2008.
- E.Rivas, JC Burgos, JC García” Métodos de diagnóstico de averías para transformadores con cambiadores de tomas en carga” *Revista de Ingenieria*, ISSN 0121-750X, Vol 12, No 2, 2007, págs. 68-72.
- E.Rivas, JC Burgos, JC García “Off-line and On-line diagnosis methods for power transformer on load tap changers” *Advanced Research Workshop on Transformers ARWtr 2007*. Oct 2007. Baiona-España.,pags271-278
- E.Rivas, D.Urquiza, JC. Burgos “Diagnóstico de Averías en Cambiadores de Tomas en Carga”; *ALTAE 2005- IEEE- VII congreso*



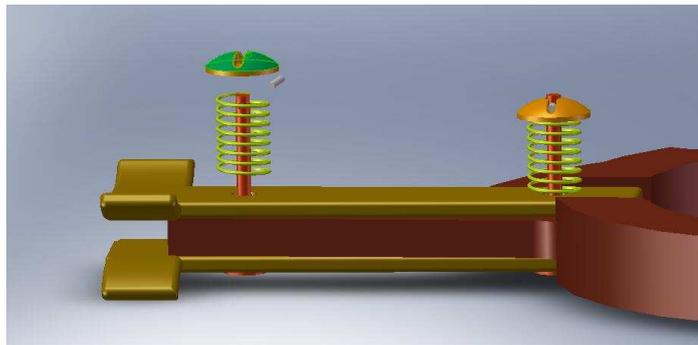
## CAPÍTULO 9 CONCLUSIONES Y APORTACIONES ORIGINALES

---

latinoamericano y IV congreso Iberoamericano en alta tensión y aislamiento eléctrico.

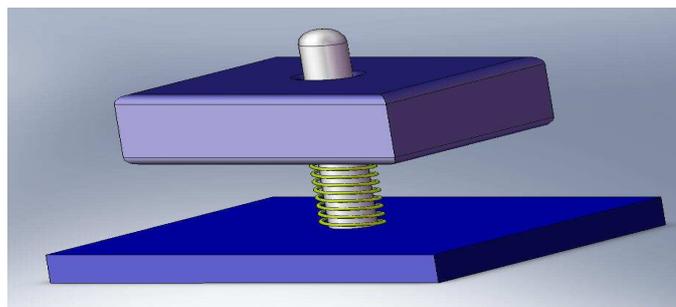
*Apendice I.****FUERZAS DE LOS MECANISMOS DE PRESIÓN*****A.I.1. Cálculo de la fuerza  $F$  de los mecanismos de presión**

El cálculo de la fuerza  $F$  que ejerce el muelle del mecanismo de presión de los contactos móviles del selector del cambiador de tomas en carga se realizó de forma experimental. Para ello se desmontó el mecanismo de presión de un contacto móvil del selector (Figura A.I.1) y se extrajo el muelle.



**Figura A.I.1. Mecanismo de presión de un contacto móvil del selector**

Para calcular la constante de rigidez  $k$  de forma experimental, se insertó una guía redonda al muelle para evitar pandeo (Figura A.I.2). Aplicando la Ley de Hooke ( $F = -k\Delta x$ ); siendo  $F$  la carga aplicada y  $\Delta x$  la longitud del muelle que se comprime, se obtuvo  $k$  (Tabla A.I.1).



**Figura A.I.2. Guía redonda para obtener  $K$  experimentalmente**

Tabla A.I.1. Cálculo de la constante de elasticidad  $k$

Nº de Pesa	Fuerza (N)	Fuerza Acumulada (N)	$\Delta x$ (m)	$k$ (N/m)
1	2,35	2,35	0,00035	6729,37
2	2,35	4,70	0,0007	6726,29
3	3,35	8,06	0,0015	5200,50
4	3,35	11,41	0,0021	5435,58
5	4,96	16,37	0,0024	6824,98
6	4,90	21,28	0,0033	6450,81
7	1,83	23,12	0,0049	4670,84
8	13,58	36,70	0,0054	6797,69
9	13,64	50,35	0,0089	5657,66
<b><math>k</math> media</b>				<b>6054,86</b>

### A.I.1.2. Simplificación de los muelles por una fuerza equivalente:

Con el hardware disponible actualmente es complejo simular en ALGORTM el comportamiento de los dos muelles de constante de elasticidad  $k = 6054,86 \text{ N/m}$ , por lo cual se acude a reemplazar la fuerza que ejercen los dos muelles por una fuerza equivalente  $F = 119,58 \text{ N}$  (Ley de Hooke)

$$F = -k \cdot \left( \frac{x_0 + x_1}{2} \right) \quad (10.1)$$

Siendo

$$k = k \text{ media} = 6054,86 \text{ N/m}$$

$$x_0 = 0,0245 \text{ metros}$$

$$x_1 = 0,015 \text{ metros.}$$

El valor medido de  $x_0$  es la longitud del muelle cuando el contacto móvil no está conectado a un contacto fijo del selector (Figura A.I.3).

El valor medido de  $x_1$  es la longitud del muelle comprimido, cuando el contacto móvil está unido al contacto fijo del selector (0).

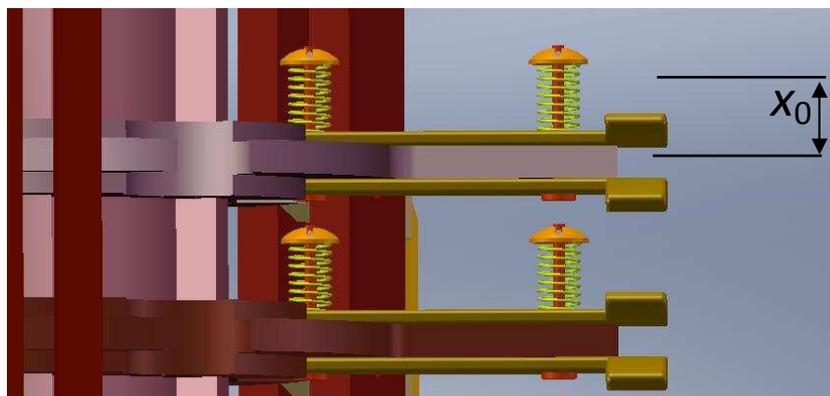


Figura A.I.3. Cálculo de  $x_0$  con el contacto móvil del selector sin conectar.

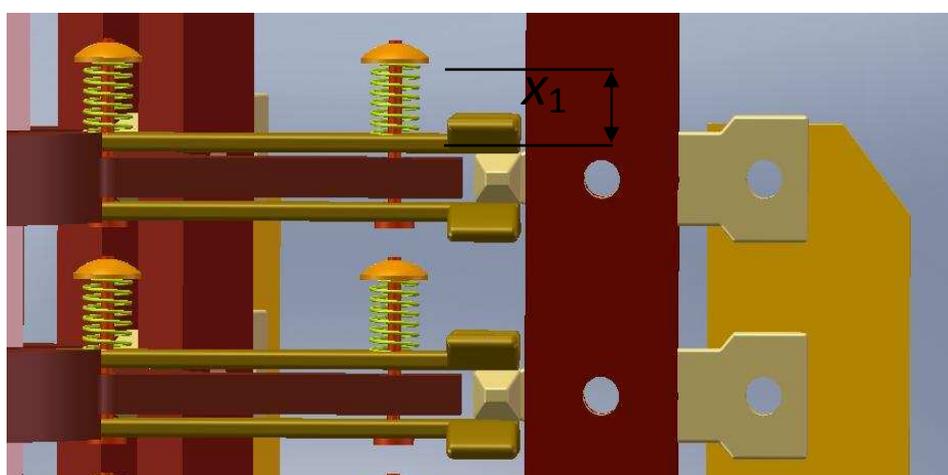


Figura A.I.4. Cálculo de  $x_1$  con el contacto móvil conectado al contacto fijo del selector

## Apéndice II.

### A.II.1. Cálculo de la velocidad constante de rotación

En el selector está compuesto por 12 tomas (6 pares y 6 impares) distribuidas uniformemente formando una circunferencia, por lo que entre una toma y otra existen  $30^\circ$  ( $60^\circ$  entre tomas del mismo tipo).

Durante un cambio de toma con actuación del selector, éste recorre  $60^\circ$  (ángulo de la toma precedente a la toma final) en aproximadamente 3 segundos.

En ALGOR™ la rotación se introduce en revoluciones (Figura A.II.1)

El contacto móvil gira:  $60^\circ \cdot \frac{1 \text{ revolución}}{360^\circ} = 0,167 \text{ revoluciones}$

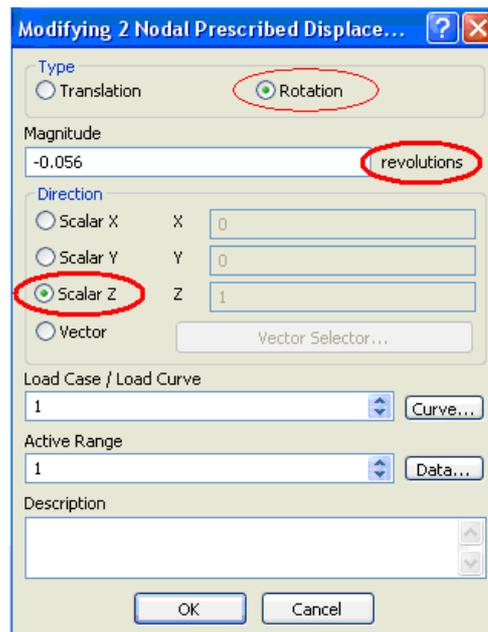


Figura A.II.1. Ventana del desplazamiento prescrito

En la ventana de selección de los parámetros del análisis () se introduce la duración del evento (3 segundos) por lo cual cada segundo el contacto móvil gira **0,056 revoluciones (3segundos x 0,167 revoluciones)**

*Apendice III.*

**Tabla A.III.1. Holgura en el anclaje de la barra del selector a la estructura**

HOLGURA EN EL ANCLAJE DE LA BARRA DEL SELECTOR A LA ESTRUCTURA					
IMPULSO	Energía	T inicial	T final	Duración	$\Delta T$ impulsos
1	2,20e-003	1,1619	1,1859	0,0240	
2	66,9e-006	1,7548	1,8109	0,0561	0,5689
3	73,4e-006	4,8157	4,8397	0,0240	3,0048
4					
5	10,5e-003	5,2965	5,4327	0,1362	
6	1,55e-006	6,4984	6,5160	0,0176	1,0657

**Tabla A.III.2. Contacto flojo del selector**

CONTACTOS FIJOS DEL SELECTOR FLOJOS					
IMPULSO	Energía	T inicial	T final	Duración	$\Delta T$ impulsos
1	1,70e-003	1,1298	1,1538	0,0240	
2	4,18e-006	1,6907	1,1768	0,0561	0,5369
3					
4	1,27e-006	4,7516	4,7756	0,0240	3,0048
5	6,49e-003	5,2163	5,3686	0,1522	
6	359e-006	6,4183	6,4519	0,0337	1,0497

**Tabla A.III.3. Muelles del selector sin la tensión adecuada**

MUELLES DEL SELECTOR SIN LA TENSION ADECUADA					
IMPULSO	Energía	T inicial	T final	Duración	$\Delta T$ impulsos
1	2,19e-003	1,0016	1,0417	0,0401	
2					
3					
4	8,05e-006	4,6875	4,7276	0,0401	
5	4,28e-003	5,1362	5,3205	0,1843	0,04087
6	739e-006	6,3381	6,3558	0,0176	1,0176

**Tabla A.III.4. Barra de anclaje de llegada inexistente**

BARRA DE ANCLAJE DE LLEGADA INEXISTENTE					
IMPULSO	Energía	T inicial	T final	Duración	$\Delta T$ impulsos
1	948e-006	1,081	1,105	0,024	
2	16,3e-006	1,594	1,634	0,04	0,553
3					
4					
5	5,93e-003	5,104	5,240	0,136	
6	262e-006	6,402	6,419	0,017	1,315

**Tabla A.III.5. Barra de anclaje de partida inexistente**

BARRA DE ANCLAJE DE PARTIDA INEXISTENTE					
IMPULSO	Energía	T inicial	T final	Duración	$\Delta T$ impulsos
1	629e-006	1,434	1,474	0,040	
2					
3					
4	11,5e-006	5,024	5,064	0,040	
5	5,54e-003	5,488	5,625	0,137	0,601
6	360e-006	6,738	6,756	0,018	1,268

**Tabla A.III.6. Contactos fijos del selector desgastados**

CONTACTOS FIJOS DEL SELECTOR DESGASTADOS					
IMPULSO	Energía	T inicial	T final	Duración	$\Delta T$ impulsos
1	1,31e-003	0,8317	0,8517	0,020	
2	439e-006	1,8737	1,9238	0,0501	1,022
3	99,9e-006	4,2986	4,3287	0,0301	2,3748
4	175e-006	4,8397	5,0301	0,1904	0,5110
5	40,9e-003	5,7615	5,7916	0,0301	0,7314
6	269e-006	6,1022	6,1443	0,0421	0,3106

**Tabla A.III.7. Contactos del selector erosionados**

CONTACTOS DEL SELECTOR EROSIONADOS					
IMPULSO	Energía	T inicial	T final	Duración	$\Delta T$ impulsos
1	1,45e-003	1,2325	1,2525	0,020	
2	1,94e-004	1,6733	1,7234	0,0501	0,4208
3					
4	4,07e-002	4,7194	4,8096	0,0902	
5	3,99e-002	5,1804	5,3226	0,1422	0,3708
6	2,85e-004	6,4932	6,5256	0,0324	1,1706

**Tabla A.III.8. Elementos amortiguados en el conmutador**

AMORTIGUAMIENTO RECORRIDO DEL CARRO SUPERIOR					
IMPULSO	Energía	T inicial	T final	Duración	$\Delta T$ impulsos
1	3,00e-003	1,081	1,105	0,024	
2					
3					
4	28,4e-006	4,687	4,727	0,04	
5	7,41e-003	4,895	5,032	0,137	0,345
6	24,2e-006	6,000	6,019	0,019	1,124

Tabla A.III.9. Elementos amortiguados en el conmutador

IMPULSO	AMORTIGUAMIENTO LEVA DE ARRASTRE DEL CARRO SUPERIOR				
	Energía	T inicial	T final	Duración	$\Delta T$ impulsos
1	1,455e-003	1,578	1,602	0,024	
2					
3					
4	31,8e-006	5,232	5,272	0,04	
5	7,130e-003	5,697	5,849	0,152	0,617
6	25,19e-006	6,642	6,663	0,021	0,966



## ***BIBLIOGRAFIA***

- [1] R. Feinberg. ed., Modern Power Transformer Practice, Macmillan Press Ltd, New York, 1980.
- [2] MR” On- Load Tap changer Type D” Inspections instructions.
- [3] Cambiadores de tomas en carga ABB, Guía de mantenimiento.
- [4] D. A. Peck. (1995, On-load tap-changers current experience and future developments. principles and resulting benefits of separate tank (external) tap-changers. Developments on-Load Tap changers: Current Experience and Future, IEE European Seminar on pp. 3/1-3/9.
- [5] P. Kang, “On-line condition assessment of power transformer on-load tap-changers: transient vibration analysis using wavelet transform and self-organizing map”, Ph.D. Dissertation, Queensland University of Technology, 2000.
- [6] Schellhase, H.-U.; Pollock, R.G.; Rao, A.S.; Korolenko, E.C.; Ward, B “Load tap changers investigations of contacts, contact wear and contact coking”. Electrical Contacts, 2002. Proceedings of the Forty-Eighth IEEE Holm Conference on 21-23 Oct. 2002 Page(s):259 – 272.
- [7] Spence, G.; Hall, A.C. “On-load tap-changers current experience and future development: Users experience and perspective” Developments On-Load Tap changers: Current Experience and Future, IEE European Seminar on. 9 Nov 1995 Page(s):1/1 - 1/7..
- [8] Guide for life management techniques for power transformers.
- [9] Cigre WGA2.18. January 2003.CIGRE SC 12 WG 12.05, An International Survey on Failures in Large Power Transformers in Service, ELECTRA No 88(1983), pp 2147.
- [10] M. A. Redferm and W R C Handley. “Duty based maintenance for on load transformer tap changers”, 2001 IEEE.
- [11] Handley, B. et al “On load tap-changer conditioned based maintenance” IEE Proc Generation Transmission Distribution Vol 148 No 4. Jul 2001
- [12] M. Duval “The Duval Triangle for Load Tap Changers, Non-Mineral Oils and Low Temperature Faults in Transformers” IEEE Electrical Insulation Magazine.



## BIBLIOGRAFIA

---

- Vol 24 No 6. Diciembre 2008.
- [13] Wang, M.; Vandermaar, A.J.; Srivastava, K.D. “Review of condition assessment of power transformers in service” *Electrical insulation Magazine IEEE* Volume 18, Issue 6, Nov.-Dec. 2002 Page(s):12 – 25.
- [14] Doble Engineering Company” Condition assessment of load tap changer using static and dynamic contact resistance” 2004,pp 1-13.
- [15] E. Rivas, D.Urquiza, J.C. Burgos “Diagnóstico de Averías en Cambiadores de Tomas en Carga”; *ALTAE 2005- IEEE- VII congreso latinoamericano y IV congreso Iberoamericano en alta tensión y aislamiento eléctrico*.
- [16] Pengju Kang and D. Birtwhistle. (2003, Condition assessment of power transformer on-load tap changers using wavelet analysis and self-organizing map: Field evaluation. *Power Delivery, IEEE Transactions on* 18(1), pp. 78-84.
- [17] Haupert, T.; Hanson, D.; McDonald, W.” The use of diagnostic testing of insulating oil for fault detection in electrical equipment”. *Electrical Insulation Conference, 1997, and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference. Proceedings* 22-25 Sept. 1997 Page(s):537 – 541.
- [18] Jakob, F.; Jakob, K.; Jones, S.; Youngblood, R.”Use of gas concentration ratios to interpret LTC & OCB dissolved gas data”. *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference, 2003. Proceedings* 23-25 Sept. 2003 Page(s):301 – 304.
- [19] IEEE Std C57.104-1991. Guide for the interpretation of Gases Generated in Oil. Immersed Transformers. 1991
- [20] Youngblood, Rick; Baker, C.; Jakob, Fredi; Perjanik, N. “Application of Dissolved Gas Analysis to Load Tap Changers”,
- [21] P. Kang, D. Birtwhistle and K. Khouzam. (1998, Transient signal analysis and classification for condition monitoring of power switching equipment using wavelet transform and artificial neural networks. *Knowledge-Based Intelligent Electronic Systems, 1998. Proceedings KES '98. 1998 Second International Conference on* 2pp. 73-79 vol.2.
- [22] Werle, P.; Radigk, C. et al. “Comparison of Different DGA Methods for the Condition Assessment of Power Transformers”[http://downloads.german-pavilion.com/downloads/pdf/exhibitor\\_16524.pdf](http://downloads.german-pavilion.com/downloads/pdf/exhibitor_16524.pdf)
- [23] UNE-EN 60599 Equipos eléctricos impregnados en aceite en servicio. Guía para



- la interpretación de los análisis de gases disueltos y libres. Febrero 2000
- [24] M. Duval “A Review of Faults Detectable by Gas-in-oil Analysis in Transformers” IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol 18, No 3. 2002.
- [25] Smit, J.J: Gulski, E. “Condition Assessment of Transmission Network Infrastructures (April 2007)” PowerTech 2007 Laussane. July 2007
- [26] E. Rivas, J. C. Burgos and J. C. Garcia-Prada. (2009, Condition assessment of power OLTC by vibration analysis using wavelet transform. Power Delivery, IEEE Transactions on 24(2), pp. 687-694.
- [27] Reason J. “Oil Temperatures Pinpoint Load-Tap-changer Wear” Electrical World Sept 1993
- [28] Boss, P. et al.”Economical Aspects and Practical Experiences of Power Transformer on-line Monitoring” paper 12-202. CIGRE 2000
- [29] Perez Moreno, E. “Predictive Maintenance Tools for Power Transformers” Proc ARWtr 2004. Oct 2004. Vigo, España.
- [30] J. Erbrink, E. Gulski, P. P. Seitz and R. Leich. (2008, Advanced on-site diagnosis of transformer on-load tap changer. Electrical Insulation, 2008. ISEI 2008. Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on pp. 252-256.
- [31] J. Erbrink, E. Gulski, J. J. Smit, P. P. Seitz and R. Leich. (2008, Experimental model of aging mechanisms of on-load tap changer contacts. Condition Monitoring and Diagnosis, 2008. CMD 2008. International Conference on pp. 247-250.
- [32] T. Bengtsson; Kols, H.; Foata, M. “Monitoring Tap Changer Operations” CIGRE. Paris 1998. Paper 12-209.
- [33] M. Foata, R. Beauchemin, and C. Rajotte, “On-line testing of on-load tap changers with a portable acoustic system,” IEEE 9th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance Proceedings, pp. 293 – 298, Oct. 2001.
- [34] P. Kang and D. Birtwhistle. (2001, Condition assessment of power transformer on-load tap-changers using wavelet analysis. Power Delivery, IEEE Transactions on 16(3), pp. 394-400.
- [35] P. Kang and D. Birtwhistle. (2001, Condition monitoring of power transformer on-load tap-changers. I. automatic condition diagnostics. *Generation,*



## BIBLIOGRAFIA

---

- Transmission and Distribution, IEE Proceedings- 148(4)*, pp. 301-306.
- [36] P. Kang and D. Birtwhistle. (2002, 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.
- [37] T. Bengtsson, M. Foata, C. Rajotte, et Al, "Acoustic Diagnosis of tap changers," Cigre, Sweden 1996.
- [38] M. Foata, C. Landry, and C. Rajotte, "On-line Acoustic System for the Diagnostic Strategy of tap changers," Cigre, Merida Colloquium, June 2003.
- [39] J. T. Chang, R.D. Fricker, "Detecting when a monotonically increasing mean crossed a threshold", *Journal of quality technology*. 31, (2), pp.217-234, April 1999.
- [40] L. de Almeida, M. Fontana, F. A. Wegelin and L. Ferreira. (2005, 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 1pp.* 653-656.
- [41] E. F. Simas, L. A. L. de Almeida and A. C. de Lima. (2005, Vibration monitoring of on-load tap changers using a genetic algorithm. *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2005. IMTC 2005. Proceedings of the IEEE 3pp.* 2288-2293.
- [42] E. F. S. Filho and L. A. L. de Almeida. (2008, Self-organized classification of on-load tap changers acoustic signatures. *Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2008. IMTC 2008. IEEE pp.* 1051-1056.
- [43] F. A. Wegelin, R. S. Magalhaes, L. A. L. de Almeida and M. Fontana. (2005, Condition monitoring of power transformers using acoustic signal prony's analysis. *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2005. IMTC 2005. Proceedings of the IEEE 2pp.* 1384-1387.
- [44] Kerry Williams, "Condition Monitoring of OLTC's using vibration analysis"; *TechCon Asia-Pacif 2006 Page(s)* 61-76.
- [45] ALGOR™ license number DE23692 I+D+I professional multiphysics MES, update 2008. Version 19.
- [46] A. I. Zayed., Hilbert transform associated with the fractional fourier transform. *Signal Processing Letters, IEEE 5(8)*, pp. 206-208. 1998
- [47] O. Rioul, M. Vetterli, "Wavelets and Signal Processing", *IEEE SP Magazine*,



- Vol.8, No. 5, 1991, pp.
- [48] A.P. Calderón, “Intermediate spaces and interpolation, the complex method” Stud. Math, 24:113-190, 1964.
- [49] I. Daubechies. ”Ten Lectures on Wavelets”. The Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992, pp. 259-285.
- [50] A. Mertins, “Signal Analysis: Wavelets, Filter Banks, Time-Frequency Transforms and Applications”, John Wiley & Sons Ltd, 1999, p.8.
- [51] C.Valens, “A Really Friendly Guide to Wavelets”, 2004
- [52] Zwe-Lee Gaing. (2004, Wavelet-based neural network for power disturbance recognition and classification. Power Delivery, IEEE Transactions on 19(4), pp. 1560-1568.
- [53] E. Tkacz, P. Kostka, D. Komorowski, T. Domider and A. Wrzesniowski. (2002, Improvement of wavelet neural network hybrid systems performance by optimisation of two types of learning algorithms. Neural Information Processing, 2002. ICONIP '02. Proceedings of the 9th International Conference on 2pp. 556-561 vol.2.
- [54] Zhi-Dong Zhao. (2005, Wavelet shrinkage denoising by generalized threshold function. Machine Learning and Cybernetics, 2005. Proceedings of 2005 International Conference on 9pp. 5501-5506 Vol. 9.
- [55] Hailong Zhu and J. T. Kwok. (2002, improving de-noising by coefficient de-noising and dyadic wavelet transform. Pattern Recognition,
- [56] D. L. Donoho. (1995, De-noising by soft-thresholding. Information Theory, IEEE Transactions on 41(3), pp. 613-627.
- [57] A. Bultheel, “Wavelets with applications in signal and image processing”, Septiembre de 2003, pp. 157-162.
- [58] D. Donoho, “De-Noising by Soft–Thresholding”, Departamento de Estadística, Universidad de Stanford, 1992.
- [59] T. Sapatinas, K. Powell, T. Bailey, W. Krzanowski, “Application of Wavelets to the pre - processing of Underwater Sounds”, Departamento de Estadística Matemática e Investigación Operacional, Universidad de Exeter, Estadística y Computación (5), 1995, pp. 265 - 273.
- [60] A.A. Orozco, C. Guarnido, J.D. Echeverri, “Análisis de reducción de ruido en señales provenientes de microelectrodos de registro”, Scientia et Técnica,



## BIBLIOGRAFIA

---

- Universidad Tecnológica de Pereira, Año XII, No. 32, Colombia, 2006, pp. 55-59.
- [61] I. J. Schoenberg, “Quarterly of Applied Mathematics 4”, 1946, pp. 45-99, 112-141.
- [62] S. Diwakar, M. A. Essawy and S. Z. Sabatto. (1998, an intelligent system for integrated predictive diagnosis. System Theory, 1998. Proceedings of the Thirtieth Southeastern Symposium on pp. 179-183.
- [63] E. F. S. Filho and L. A. L. de Almeida. (2008, Self-organized classification of on-load tap changers acoustic signatures. Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2008. IMTC 2008. IEEE pp. 1051-1056.
- [64] T.Kohonen, “Self-Organizing Maps”, Springer Series in Information Sciences, Vol. 30, Springer, 2001. Third Extended Edition.
- [65] T.Kohonen, “Self-Organized formation of topologically correct feature maps”, Biological Cybernetics, Vol. 43, pp.56-69, 1982.
- [66] S. V. Verdu, M. O. Garcia, C. Senabre, A. G. Marin and F. J. G. Franco. (2006, Classification, filtering, and identification of electrical customer load patterns through the use of self-organizing maps. *Power Systems, IEEE Transactions on* 21(4), pp. 1672-1682.
- [67] H. Demuth, M. Beale, M. Hagan, “Neural Network Toolbox”, Version 4, the MathWorks, 2005.
- [68] A. Ultsch, H. Siemon, “Technical Report 329”, Universidad de Dortmund, Dortmund, Alemania 1989.
- [69] S.G. Mallat, “A Wavelet Tour on Signal Processing”, Academic Press, Second Edition, 1999, pp. 30-32, 70, 220-314.